

POSZERZAMY HORYZONTY

TOM XLVII CZ. II

Redakcja naukowa

Dr inż. Renata Matysik-Pejas, prof. URK

Dr inż. Małgorzata Bogusz

Dr Piotr Rachwał

MONOGRAFIA

SŁUPSK, GRUDZIEŃ 2025

RECENZENCI:

Dr hab. Artur Jacek Kożuch prof. nadzw. UHP - Uniwersytet Przyrodniczo -Humanistyczny w Siedlcach, Wydział Nauk Ekonomicznych i Prawnych

Dr hab. Barbara Zwolińska, prof. nadzw. UG - Uniwersytet Gdański, Wydział Filologiczny

Dr hab. Wiesław Dyk, prof. nadzw. US - Uniwersytet Szczeciński, Wydział Teologiczny

Dr inż. Małgorzata Bogusz - Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Rolniczo-Ekonomiczny

Dr inż. Anna Sieczko - Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Nauk Ekonomicznych

Dr inż. Piotr Prus - Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Rolnictwa i Biotechnologii

Dr Jan Zawadka - Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Nauk Ekonomicznych

Dr Piotr Rachwał - Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Rolniczo-Ekonomiczny

Dr Maciej Jewczak - Uniwersytet Łódzki, Wydział Ekonomiczno-Socjologiczny

Dr Anna Janicka - Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie, Wydział Rolniczo-Ekonomiczny

Dr Monika Wojcieszak - Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Ekonomiczno - Społeczny

Dr Lidia Jabłońska-Porzuczek - Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Ekonomiczno -Społeczny

Dr Katarzyna Wójcik – Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie, Katedra Systemów Obliczeniowych

Dr Witold Trela - Prywatna działalność gospodarcza

WYDAWNICTWO:

Mateusz Weiland Network Solutions

Druk publikacji wykonano na podstawie dostarczonych oryginalnych tekstów, na odpowiedzialność autorów poszczególnych prezentacji.

ISBN: 978-83-68082-19-7

SPIS TREŚCI

I NAUKI TECHNICZNE, ŚCISŁE ORAZ PRZYRODNICZE

1. ALGORYTMY WIELOZADANIOWE W PLANOWANIU PRODUKCJI BUDOWLANEJ – PRZEGLĄD LITERATURY
Paulina Kostrzewa-Demczuk.....8
2. OCENA LUMINACJI NAWIERZCHNI Z WYKORZYSTANIEM MODELU REGRESJI LOGISTYCZNEJ
Paulina Bąk- Patyna, Grzegorz Mazurek, Przemysław Buczyński, Hubert Patyna, Piotr Sokółowski.....20
3. ROLA SPOIWA W KSZTAŁTOWANIU WŁAŚCIWOŚCI BETONU MODYFIKOWANEGO NANOCELULOZĄ
Emilia Łukawska, Natalia Machul, Aleksandra Zagozda, Bartłomiej Zieliński.....30
4. AUTOKLAWIZOWANE MATERIAŁY WAPIENNO – KRZEMIONKOWE Z UDZIAŁEM SZKŁA ODPADOWEGO
Katarzyna Borek.....48
5. RECYKLING WIELOKROTNY BETONU JAKO ELEMENT GOSPODARKI CYRKULARNEJ – STAN BADAŃ I PERSPEKTYWY ROZWOJU
Kszysztof Liszka.....58
6. MAGNETYT W BETONIE – JAK WIELKOŚĆ ZIARNA WPŁYWA NA PRZEWODNICTWO CIEPLNE I ZDOLNOŚCI OSŁONOWE
Krzysztof Liszka.....64
7. SZKŁO W MATERIAŁACH BUDOWLANYCH
Katarzyna Borek.....68
8. OD PROLIFERACJI DO WŁÓKNIENIA: ROLA KRWIOTWÓRCZYCH KOMÓREK MACIERZYSTYCH W PATOGENEZIE MIELOFIBROZY
Aleksandra Rosiek.....77

9. MOLEKULARNE DETERMINANTY WIRULENCJI I MECHANIZMY PATOGENEZY <i>CRONOBACTER SAKAZAKII</i> – AKTUALNY STAN WIEDZY Adrian Macion	85
10. OPRYSK NA MEDAL – BADANIA NAD JAKOŚCIĄ ZABIEGU Wojciech Spychała, Bartłomiej Galgański, Dawid Laudacki, Michał Zięba	111
11. PROCES UCZENIA SIĘ KONI, W ŚWIELE WSPÓŁCZESNEJ NAUKI O ZACHOWANIACH ZWIERZĄT Zofia Rudnicka, Agata Danielewicz	119
12. PODSTAWY MECHANIZMU AGRESJI U PSÓW Zofia Rudnicka, Adrianna Zecer	126
13. HEALTH-PROMOTING QUALITIES OF MARE'S MILK Daniel Wysokiński, Agata Danielewicz	134
14. TERAPIA Z UDZIAŁEM KONI (HIPOTERAPIA). PRZYGOTOWANIE KONIA Adrianna Zecer, Zofia Rudnicka, Agata Danielewicz	144
15. WELFARE OF THERAPEUTICALLY USED RABBITS Dagmara Brzyska, Agata Danielewicz	153
16. INNOVATIVE METHODS OF SUPPORTING HORSE REPRODUCTION – TECHNIQUES, OPPORTUNITIES AND DEVELOPMENT PROSPECTS Nawojka Bala, Agata Danielewicz	161
17. CZAS JAKO ZJAWISKO EMERGENTNE. SYMETRIA I ASYMETRIA UKŁADÓW Sara Leiss	169
18. UKŁADY IDEALNIE SYMETRYCZNE. WAHADŁOWY MODEL WSZECHŚWIATA Sara Leiss	177

19. SYSTEM INTELIGENTNEJ ORGANIZACJI PLIKÓW Z DYNAMICZNYMI KATEGORIAMI - STUDIUM ALGORYTMÓW KATEGORYZACJI WIELOPOZIOMOWEJ I ARCHITEKTURY MODULARNEJ
Krzysztof Żukowski.....183

II NAUKI MEDYCZNE

1. NANOTECHNOLOGIA JAKO NOWOCZESNA METODA DIAGNOSTYKI I INNOWACYJNA TERAPIA W PRZYPADKU CHORÓB SERCOWO-NACZYNIOWYCH
Alicja Pluta, Kacper Artykiewicz, Maja Pluta, Nikola Szyller, Wiktoria Skwierczyńska.....191
2. WPŁYW MUZYKI NA UKŁAD NERWOWY DZIECKA – DONIESIENIA Z BADAŃ PILOTAŻOWYCH
Marta Giża-Mydlarz.....202
3. WODOGŁOWIE NIEKOMUNIKUJĄCE JAKO POWIKŁANIE GUZÓW MÓZGU
Jan Jędrzyak, Karolina Grzywacz, Zachary Greinert-Czekalski, Karolina Tworek.....206
4. CASE REPORT: RZADKA ODMIANA OSTEOSARCOMA CONVENTIONAL G3 U 16-LETNIEJ PACJENTKI, WYZWANIA TERAPETYCZNE I ROZWIĄZANIE CHIRURGICZNE
Filip Mądry, Weronika Woźniak.....213
5. GENETYCZNIE UWARUNKOWANE ZESPOŁY PADACZKOWE
Damian Kucner.....215
6. ZASTOSOWANIE POLIDEOKSYRYBONUKLEOTYDÓW (PDRN) W MEDYCYNIE REGENERACYJNEJ
Nikola Szyller, Maja Pluta, Alicja Pluta, Kacper Artykiewicz.....230
7. ZJAWISKO CUTOUT W ZŁAMANIACH PRZEZKRĘTARZOWYCH - OPIS 3 PRZYPADKÓW I ANALIZA PROBLEMU
Weronika Woźniak, Filip Mądry.....239

8. FIZJOTERAPIA GERIATRYCZNA WOBEC WYZWAŃ STARZEJĄCEGO SIĘ SPOŁECZEŃSTWA – MIĘDZY REHABILITACJĄ A PROFILAKTYKĄ	
Kamila Maculewicz	249
9. PANDEMIA PO PANDEMII - STAN ZDROWIA PSYCHICZNEGO PACJENTÓW PO PANDEMII SARS-COV-2 NA PRZYKŁADZIE DEPRESJI	
Kacper Artykiewicz, Alicja Pluta, Maja Pluta, Wiktoria Skwierczyńska, Nikola Szyller	256
10. FIZJOTERAPIA JAKO INTEGRALNY ELEMENT KOMPLEKSOWEJ OPIEKI PALIATYWNEJ U PACJENTÓW Z CHOROBAŁ NOWOTWOROWĄ	
Maciej Andruczyk	263
11. SZTUCZNA INTELIGENCJA W DIAGNOSTYCE ZMIAN SKÓRNYCH	
Maja Pluta, Nikola Szyller, Alicja Pluta, Kacper Artykiewicz	268

I NAUKI TECHNICZNE, ŚCISŁE ORAZ PRZYRODNICZE

1. ALGORYTMY WIELOZADANIOWE W PLANOWANIU PRODUKCJI BUDOWLANEJ – PRZEGLĄD LITERATURY

Paulina Kostrzewa-Demczuk

Politechnika Świętokrzyska

Wydział Budownictwa i Architektury

ul. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7; 25-314 Kielce

E-mail: P.K-D.: pkostrzewa@tu.kielce.pl

1. Wstęp

Planowanie i harmonogramowanie robót budowlanych należy do najbardziej złożonych obszarów zarządzania projektami inżynierskimi, ze względu na wysoką niepewność, silne zależności technologiczne oraz wielowymiarowy charakter ograniczeń zasobowych, czasowych i kosztowych. W literaturze dotyczącej planowania i sterowania projektami budowlanymi coraz częściej podkreśla się konieczność równoległego rozwiązywania wielu różnego typu problemów decyzyjnych, wynikających z dużej złożoności procesów budowlanych oraz silnych współzależności między zadaniami, zasobami i ograniczeniami wykonawczymi. W tym kontekście rośnie znaczenie algorytmów wielozadaniowych (multi-task algorithms), rozumianych jako podejścia algorytmiczne, które potrafią jednocześnie realizować kilka odmiennych, lecz powiązanych zadań obliczeniowych, wspierających szeroko rozumiane harmonogramowanie projektu. Odróżnia je to od standardowych metod optymalizacji, które koncentrują się zwykle na jednym ściśle zdefiniowanym problemie, takim jak klasyczny RCPSP (Resource-Constrained Project Scheduling Problem).

Branża budowlana stoi przed koniecznością planowania wielozadaniowych i wieloobiektowych przedsięwzięć w warunkach niepewności, ograniczeń zasobowych i kolizji przestrzennych. Klasyczne techniki deterministyczne (CPM/PERT, Line-of-Balance) pozostają fundamentem, lecz przy rosnącej skali i złożoności coraz częściej uzupełnia się je metaheurystykami wielokryterialnymi, które pozwalają eksplorować kompromisy między czasem, kosztem, wykorzystaniem zasobów i stabilnością harmonogramu. Algorytmy wielozadaniowe (multi-task) dodają kolejny wymiar: uczą się równocześnie na pokrewnych zadaniach (np. wariantach pogodowych, alternatywnych dostępnościach zasobów, wielu podobnych obiektach), co umożliwia transfer wiedzy i redukuje koszty obliczeń.

Celem pracy jest: (1) usystematyzowanie problemów planowania produkcji budowlanej; (2) przegląd i porównanie algorytmów wielokryterialnych oraz wielozadaniowych; (3) wyciągnięcie wniosków praktycznych dla inżynierów planistów i wskazanie luk badawczych. Artykuł ma charakter przeglądowy.

2. Klasy problemów planistycznych w budownictwie

2.1. RCPSP / MRCPSP — harmonogramowanie z ograniczeniami zasobów

Resource-Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP) to klasyczny model, w którym elementarną jednostką są aktywności powiązane relacjami precedencji (zwykle finish–start). Każda aktywność wymaga zasobów odnawialnych (np. brygady, sprzęt) oraz/lub nieodnawialnych (np. materiały, budżet), a zasoby mają ograniczoną pojemność w czasie. Wariant multi-mode (MRCPSP) pozwala, żeby dana aktywność miała kilka trybów wykonania — różniących się czasem trwania, nakładami zasobów i kosztem — co odzwierciedla wybory technologiczne w budownictwie (np. różne metody deskowania, liczba brygad, zmiany technologii). Model RCPSP/MRCPSP jest NP-trudny i bywa formułowany jako kombinatoryczny problem optymalizacyjny z wieloma kryteriami (makespan, koszt, poziomowanie zasobów) [Herroelen et al.,1998].

Typowe cele i kryteria [Herroelen et al.,1998]:

- minimalizacja czasu realizacji projektu (makespan),
- minimalizacja kosztów bezpośrednich/całkowitych (w MRCPSP koszty trybów),
- minimalizacja fluktuacji obciążenia zasobów (resource leveling) — co ma znaczenie praktyczne dla stabilności siły roboczej, kosztów pośrednich i logistyki,
- minimalizacja opóźnień względem kamieni milowych (weighted tardiness względem milestone'ów).

Rozwiązania tego problemu obejmują dokładne algorytmy (branch-and-bound, programowanie mieszano-całkowite dla małych instancji) oraz heurystyki i metaheurystyki (GA, tabu search, ACO, iterated local search) i hybrydy z algorytmami konstrukcyjnymi/priority-rule [Hartmann & Briskorn, 2008]. W praktyce dla średnich i dużych przypadków (szczególnie MRCPSP i wieloprojektów) dominują algorytmy metaheurystyczne oraz metody rozkładu problemu i heurystyki wsparcia. Przeglądy literatury kompleksowo opisują rozwój i warianty RCPSP.

2.2. Kompromis czas–koszt–zasoby (TCTO / TCR)

Time–Cost Trade-Off (TCTO) to klasa problemów koncentrująca się na wyborze wariantów czasowych wykonywania aktywności (crashing, przyspieszania) w celu skrócenia harmonogramu kosztem wzrostu kosztów bezpośrednich (np. nadgodziny, większa liczba brygad, droższe technologie). W wersjach rozszerzonych (TCR) dodaje się aktywne modelowanie zasobów i wymogi ich wygładzania - zatem decyzje o przyspieszaniu mają także wpływ na profile wykorzystania zasobów i koszty pośrednie. Początki badań sięgają rozwoju CPM i analiz „crash” w literaturze zarządzania projektami [Kelley & Walker, CPM, 1959].

Specyfika i cele [Csordas, 2017]:

- poszukiwanie minimalnego kosztu przy zadanym limicie czasu lub minimalnego czasu przy danym budżecie,
- generowanie frontu Pareto (wariantów kompromisowych) między kosztem a czasem, z ewentualnym dodatkowym kryterium jakości lub ryzyka,
- uwzględnienie kosztów bezpośrednich (przyspieszenie) oraz kosztów pośrednich (np. kary za opóźnienia, przestoje), a także ograniczeń budżetowych i polityki zatrudnienia.

Tradycyjne podejścia związane z metodą i jej wyzwaniem opierają się na programowaniu liniowym (dla liniowych zależności koszt–czas) i algorytmach

heurystycznych. Rosnące zainteresowanie budzi integracja symulacji (uwzględnienie niepewności czasu i dostępności zasobów) z optymalizacją (symulacja + metaheurystyka) w celu uzyskania rozwiązań odpornych na zmienność warunków. W literaturze wskazywane są też aspekty jakościowe (quality trade-offs) i ryzyka związane z „crashingiem” [Senses and Kumral, 2023].

2.3. Projekty powtarzalne - Line-of-Balance (LOB) i harmonogramy przepływu brygad

Projekty powtarzalne (repetitive projects) charakteryzują się długą sekwencją podobnych jednostek roboczych (kondygnacje, segmenty tunelu, odcinki drogi). Model LOB i powiązane metody (flow-line scheduling) skupiają się na synchronizacji przepływu brygad przez kolejne jednostki, tak aby utrzymać stały „rytm” produkcji prac i minimalizować przestoje oraz kolizje na placu budowy [Arditi et al., 2002]. Metody LOB przedstawiają harmonogram jako „linie” (przesunięcia czasowe) pomiędzy brygadami i zakresami robót.

Główne cele i ograniczenia:

- minimalizacja przestojów brygad i kosztów z tym związanych,
- zapewnienie płynnego przepływu (ciągłość pracy) i redukcja kolizji w przestrzeni roboczej,
- uwzględnienie ograniczeń logistycznych (dostawy, składowanie), technologicznych (sekwencja prac) i bezpieczeństwa.

Podejścia do rozwiązania tej problematyki obejmują specjalizowane algorytmy LOB, modele oparte na constraint programming, heurystyki oparte na regułach rytmiki, a także podejścia optymalizacyjne integrujące alokację zasobów i tras logistycznych. W literaturze [Tomeczak and Jaśkowski, 2022] coraz częściej łączy się LOB z modelowaniem przepływów (flowline, takt time scheduling) i metodami cyfrowymi (BIM + optymalizacja).

2.4. Planowanie wieloprojektowe i portfelowe

W praktyce wykonawcy zarządzają portfelem projektów, które współdzielą zasoby (ekipa, sprzęt, prefabrykacja) [Beşikci et al. 2015]. Multi-Project Scheduling (MPS) obejmuje planowanie równoległych projektów z ograniczeniami globalnych zasobów, priorytetami, czasami dostaw i ograniczeniami logistycznymi (np. miejsca składowania, przesyłki). To środowisko znacząco zwiększa złożoność decyzyjną: konflikty alokacyjne pojawiają się nie tylko wewnątrz projektu, lecz między projektami.

Cele i trudności [Beşikci et al. 2015]:

- optymalizacja wykorzystania zasobów na poziomie portfela (portfolio-level leveling),
- minimalizacja unerwienia terminów ważonych priorytetami, kosztów relokacji i wynajmu sprzętu,
- koordynacja logistyczna: dostawy, magazynowanie, kolejność realizacji etapów między projektami.

Metody umożliwiające rozwiązanie tego typu problemów obejmują: harmonogramowanie hierarchiczne (dekompozycja portfela), alokacyjne heurystyki priorytetowe, algorytmy metaheurystyczne (np. adaptacje MRCPS na środowiska wieloprojektowe), a także podejścia z uwzględnieniem niepewności (stochastic/robust scheduling). W praktyce rośnie znaczenie narzędzi wspierających decyzję (co-scheduling, digital twins, symulacja przepływu materiałów).

Tabela 1. Porównanie klas problemów planistycznych w budownictwie

Klasa problemu	Główne cechy	Typowe cele optymalizacyjne	Najczęściej stosowane metody rozwiązania	Kluczowe wyzwania badawcze i praktyczne
RCPSP / MRCPSP (Resource-Constrained Project Scheduling Problem; Multi-Mode RCPSP)	- Zadania powiązane relacjami precedencji. - Ograniczenia zasobów odnawialnych i nieodnawialnych. - Wariant MRCPSP: wiele trybów realizacji różniących się czasem, kosztem i zużyciem zasobów. - Problem silnie NP-trudny, rozbudowana literatura modelowa.	- Minimalizacja czasu realizacji projektu (makespan). - Minimalizacja kosztów realizacji. - Wygładzanie profilu wykorzystania zasobów (resource leveling). - Minimalizacja opóźnień względem kamieni milowych.	- Programowanie całkowitoliczbowe (dla małych instancji). - Heurystyki priorytetowe i algorytmy konstrukcyjne. - Metaheurystyki: GA, tabu search, ACO, SA, ILS, PSO. - Modele hybrydowe: optymalizacja + symulacja, CP + heurystyki.	- Skalowalność przy dużej liczbie zadań i ograniczeń zasobowych. - Obsługa wielu typów zasobów (różne kalendarze, zmienność dostępności). - Integracja z niepewnością (czasy, awarie sprzętu, opóźnienia dostaw). - Modelowanie przestrzennych kolizji robót.
TCR / TCTO (Time-Cost-Resource trade-off / Time-Cost Trade-Off)	- Zależności koszt-czas (crashing, fast-tracking). - Przyspieszenie prac wymaga dodatkowych zasobów lub technologii. - Często wielokryterialny charakter (koszt-czas-zasoby-ryzyko). - Możliwość generowania frontu Pareto.	- Minimalizacja czasu przy ograniczonym budżecie. - Minimalizacja kosztu przy narzuconym terminie. - Jednoczesna minimalizacja kosztu bezpośredniego i pośredniego. - Wygładzanie obciążenia zasobów podczas przyspieszania.	- Programowanie liniowe i nieliniowe. - Metaheurystyki wielokryterialne (NSGA-II, SPEA2). - Hybrydy: symulacja Monte Carlo + optymalizacja. - Analiza Pareto, metody dekompozycyjne.	- Nieliniowe zależności koszt-czas w rzeczywistości budowlanej. - Duża niepewność skutków przyspieszania (ryzyko jakości, awarie, przestoje). - Trudności w estymacji kosztów pośrednich i kosztów zwłoki. - Włączanie ograniczeń logistycznych i dostępności

Klasa problemu	Główne cechy	Typowe cele optymalizacyjne	Najczęściej stosowane metody i rozwiązania	Kluczowe wyzwania badawcze i praktyczne
				kluczowych zasobów.
Projekty powtarzalne / LOB (Line-of-Balance, Repetitive Scheduling)	- Jednostki robocze powtarzalne (kondygnacje, segmenty, odcinki). - Kluczowa rola rytmiki przepływu brygad (workflow continuity). - Harmonogram wyrażony jako linie przepływu (flow lines). - Problemy kolizji, przeciążenia przestrzeni i przestojów brygad.	- Minimalizacja przestojów brygad. - Maksymalizacja ciągłości pracy i stabilności rytmu produkcji. - Redukcja kolizji przestrzennych i czasowych. - Minimalizacja całkowitego czasu realizacji projektu powtarzalnego.	- Algorytmy Line-of-Balance i flowline scheduling. - Modele optymalizacyjne: MILP, constraint programming. - Techniki heurystyczne: przestrzenno-czasowe reguły kolejności. - Integracja z BIM (detekcja kolizji + harmonogram).	- Modelowanie przestrzenne kolizji i ograniczeń frontu robót.- Koordynacja logistyki (dostawy, dostęp do dźwigów, składowanie). - Zmienność jednostek roboczych mimo pozornej powtarzalności. - Synchronizacja wielu brygad o różnych prędkościach i technologiach.
Planowanie wieloprojektowe (Multi-Project Scheduling / Portfolio Scheduling)	- Równoległe projekty współdzielące zasoby. - Konflikty alokacyjne na poziomie przedsiębiorstwa. - Ograniczenia logistyczne, przestrzenne i magazynowe. - Priorytety projektów i hierarchiczne cele decyzyjne.	- Minimalizacja ważonych opóźnień w portfolio projektów. - Wygładzanie obciążenia zasobów globalnych. - Minimalizacja kosztów relokacji sprzętu i pracowników. - Maksymalizacja przepustowości portfela (throughput).	- Hierarchiczne heurystyki alokacji (reguły priorytetów). - Metaheurystyki wieloprojektowe (GA, SA, PSO, TS). - Dekompozycja portfela na podproblemy (LD, CP + heurystyki). - Symulacja + optymalizacja (systemy wieloagentowe).	- Koordynacja projektów o różnych parametrach i kalendarzach. - Dynamiczne zmiany dostępności zasobów (sprzęt, pracownicy). - Zarządzanie ryzykiem portfela i zależnościami między projektami. - Integracja planowania logistycznego i produkcji prefabrykatów.

3. Rola algorytmów wielozadaniowych

W projektach budowlanych, oprócz ustalenia terminów działań przy ograniczeniach zasobów należy równolegle przeprowadzić m.in. bilansowanie zasobów w skali projektu, analizę kosztów alternatywnych metod wykonania robót, prognozowanie ryzyka opóźnień czy ocenę wpływu zmian projektowych na harmonogram i budżet. Jak wskazuje literatura [Hartmann i Briskorn, 2010], efektywne harmonogramowanie wymaga integracji aspektów czasowych, zasobowych i kosztowych oraz dynamicznej rekonfiguracji planów wraz z pojawianiem się nowych informacji. Algorytmy wielozadaniowe odpowiadają na tę potrzebę poprzez możliwość wykonywania wielu operacji analitycznych w jednym spójnym procesie obliczeniowym.

W podejściu wielozadaniowym harmonogramowanie traktowane jest jako zestaw powiązanych problemów, które można rozwiązywać równolegle w ramach jednego algorytmu. Przykładowo, jeden moduł algorytmu może generować harmonogram zgodnie z ograniczeniami zasobowymi RCPSP, drugi wykonywać estymację kosztów i analizę wariantów technologicznych, trzeci – realizować dynamiczną ocenę ryzyka na podstawie danych probabilistycznych lub symulacyjnych, a czwarty – wyznaczać alternatywne plany realizacji przy zmienionych parametrach wejściowych. Tego typu podejścia opisują m.in. Kolisch i Padman [Kolisch i Padman, 2001], zwracając uwagę na konieczność integrowania wielu perspektyw decyzyjnych w ramach jednego systemu wspomagania decyzji projektowych.

Algorytmy wielozadaniowe często wykorzystują architekturę modułarną lub hybrydową, łącząc różne techniki obliczeniowe, takie jak heurystyki priorytetowe, algorytmy ewolucyjne, metody symulacyjne czy modele probabilistyczne. Wynika to z faktu, że poszczególne zadania składowe – harmonogramowanie, szacowanie kosztów, analiza ryzyka – mogą charakteryzować się różną strukturą matematyczną i innymi wymaganiami obliczeniowymi. Integracja metod deterministycznych i stochastycznych jest kluczowa w systemach decyzyjnych dla projektów budowlanych [Herroelen i Leus, 2005], które są szczególnie podatne na niepewność i zmienność warunków terenowych.

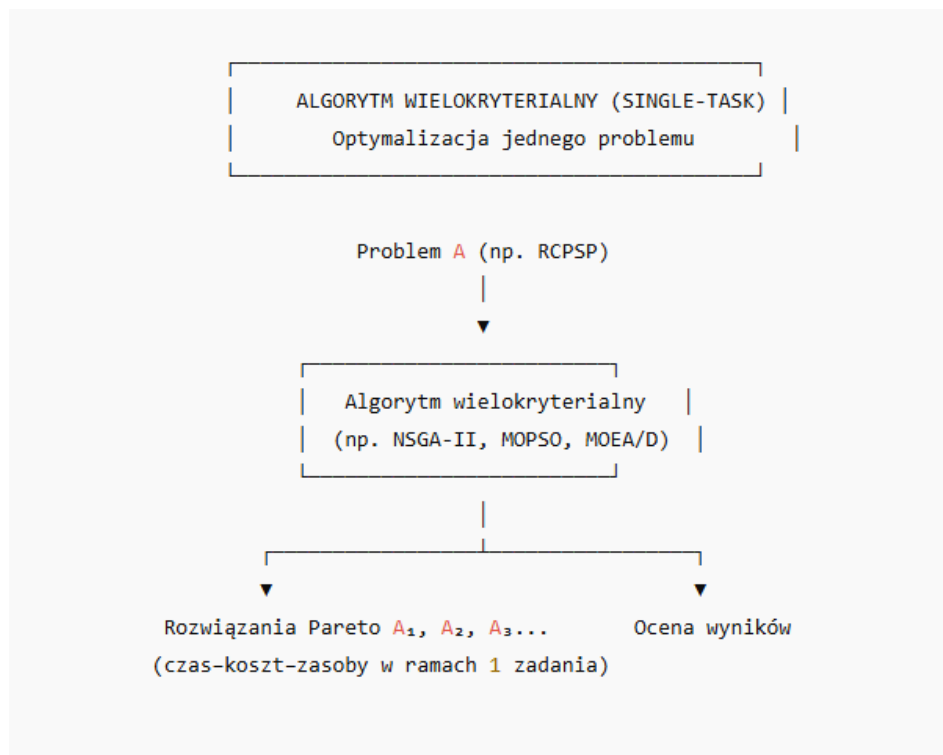
Jedną z ważnych zalet algorytmów wielozadaniowych jest zdolność do współdzielenia informacji między zadaniami, co pozwala poprawić jakość decyzji końcowych. Przykładowo, jeśli moduł analizy ryzyka wykryje zwiększone prawdopodobieństwo opóźnień w dostawach określonego zasobu, informacja ta może zostać natychmiast uwzględniona przez moduł harmonogramowania, prowadząc do regeneracji harmonogramu w czasie bliskim rzeczywistości.

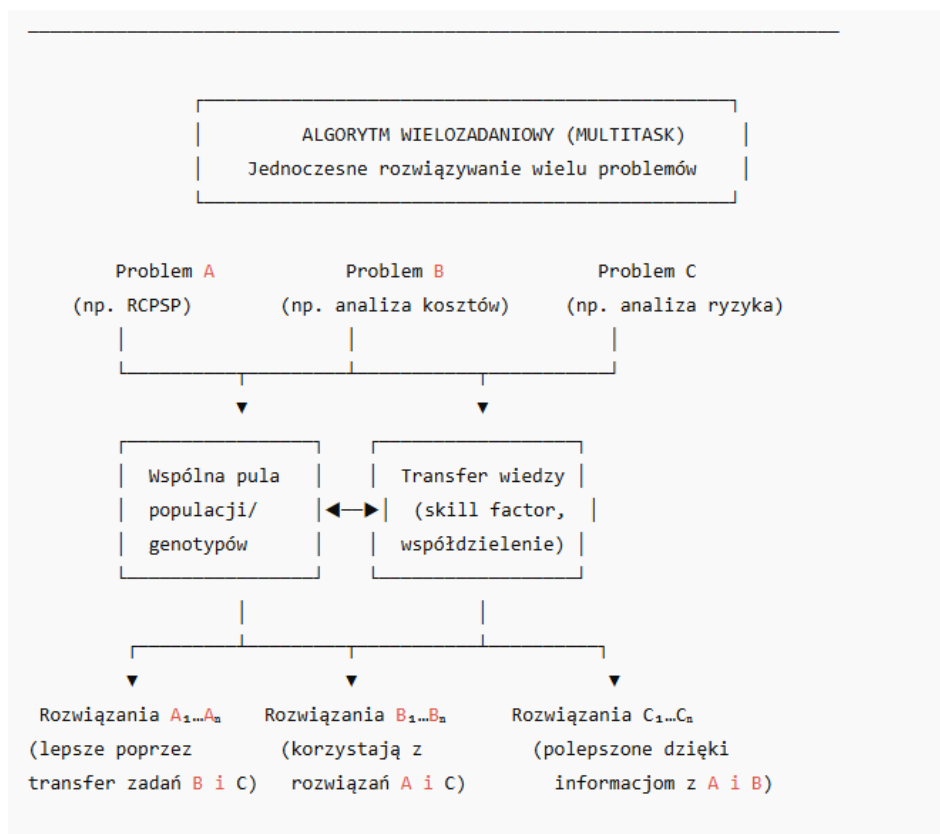
Algorytmy wielozadaniowe różnią się od klasycznych metod optymalizacji tym, że zamiast skupiać się na jednym problemie, równolegle eksplorują przestrzeń rozwiązań kilku zadań. W kontekście budownictwa oznacza to możliwość jednoczesnego rozwiązywania problemów harmonogramowania, przydziału zasobów oraz logistyki dostaw, zamiast rozpatrywania ich oddzielnie. Badania ostatnich lat wykazały, że takie podejście pozwala osiągać lepsze wyniki niż optymalizacja sekwencyjna. Przykładowo, w pracy [Bali et al., 2021] wykazano, że MFEA zastosowany do problemów harmonogramowania projektów budowlanych prowadził do skrócenia czasu obliczeń w porównaniu z klasycznymi algorytmami genetycznymi.

Podsumowując, algorytmy wielozadaniowe stanowią nowoczesne i kompleksowe podejście do harmonogramowania projektów budowlanych, umożliwiające równoczesne rozwiązywanie kilku powiązanych zadań decyzyjnych. Ich rozwój wpisuje się w tendencję integracji metod obliczeniowych oraz rosnące zapotrzebowanie na narzędzia zdolne do dynamicznego reagowania na zmienność i złożoność procesów budowlanych. Dzięki temu mogą one znacząco poprawić jakość planowania oraz adaptacyjność harmonogramów w praktyce inżynierskiej.

4. Przegląd algorytmów i ich wariantów w harmonogramowaniu projektów budowlanych

W literaturze dotyczącej optymalizacji problemów zarządzania projektami budowlanymi wyróżnia się dwie istotne klasy metod obliczeniowych: algorytmy wielokryterialne typu single-task oraz algorytmy wielozadaniowe (multi-task). Choć obie grupy wykorzystują zaawansowane techniki obliczeniowe, ich założenia, zakres działania oraz struktura informacyjna znacząco się różnią.





Rysunek 1. Schematyczne porównanie algorytmów single-task i multi-task

Rysunek przedstawia koncepcyjne różnice pomiędzy algorytmami wielokryterialnymi single-task, które optymalizują jeden problem przy wielu kryteriach, oraz algorytmami wielozadaniowymi multitask, które równolegle rozwiązują wiele powiązanych problemów, umożliwiając transfer wiedzy pomiędzy nimi (np. w ramach Multifactorial Evolutionary Algorithm – MFEA).

4.1. Algorytmy wielokryterialne typu single-task

Algorytmy wielokryterialne typu single-task są ukierunkowane na rozwiązanie jednego, z góry określonego problemu optymalizacyjnego, w którym występuje jednak więcej niż jedno kryterium decyzyjne. Typowymi przykładami problemów optymalizacyjnych rozwiązywanych przez algorytmy wielokryterialne są problemy harmonogramowania z ograniczeniami zasobowymi (RCPSP) lub kompromisu czas–koszt–zasoby (TCT/TCR), gdzie celem jest jednoczesna minimalizacja czasu realizacji, kosztu, nierównomierności zasobów lub ryzyka. Algorytmy takie jak NSGA-II, SPEA2, MOEA/D czy MOPSO generują zbiór rozwiązań Pareto-optymalnych, umożliwiając decyzję kompromisową w ramach pojedynczego zadania [Deb, 2001; Coello Coello, 2006]. Kluczową cechą tego podejścia jest brak wymiany informacji poza rozwiązywanym problemem – cała populacja, operatory i proces selekcji odnoszą się wyłącznie do jednej funkcji celu (lub zestawu celów) powiązanych z pojedynczym modelem.

Prace Deb (2001), Coello Coello (2007) oraz Zhang i Li (2007) potwierdzają skuteczność tych metod w zadaniach, w których analiza kompromisów jest równie ważna jak jakość globalnego optimum. W zastosowaniach budowlanych algorytmy single-task stosuje się

najczęściej w klasycznych problemach RCPSP, TCTP (Time–Cost Trade-off Problem) oraz analizach ryzyka. Kluczową cechą tego podejścia jest rozwiązywanie jednego problemu na raz, bez wymiany informacji pomiędzy różnymi zadaniami lub modelami.

4.2. Algorytmy wielozadaniowe (multi-task)

Odmienne podejście reprezentują algorytmy wielozadaniowe – opisane szerzej w rozdziale 3, określane również jako multi-task (Multifactorial Evolutionary Algorithms, MFEA). Metody te zakładają równoległe rozwiązywanie wielu powiązanych problemów optymalizacyjnych, które współdzielą część struktury decyzyjnej, przestrzeni rozwiązań lub parametrów wejściowych. Mogą to być np. harmonogramowanie RCPSP, analiza kosztów, bilansowanie zasobów oraz ocena ryzyka, prowadzone w jednym procesie obliczeniowym [Gupta, Ong & Feng, 2016]. Najważniejszym elementem algorytmów multi-task jest mechanizm transferu wiedzy (knowledge transfer) pomiędzy zadaniami, który umożliwia przekazywanie korzystnych cech rozwiązań (np. struktur harmonogramów, strategii alokacji zasobów czy wzorców kosztowych) między poszczególnymi modelami. Dzięki temu rozwiązania jednego problemu mogą przyspieszać konwergencję i poprawiać jakość rozwiązań w pozostałych zadaniach, nawet jeśli ich cele są odmienne. Ta cecha odróżnia multi-task od podejść single-task, które działają w izolacji.

Z perspektywy zastosowań w budownictwie różnice te mają istotne implikacje praktyczne. Algorytmy single-task są szczególnie efektywne, gdy projekt wymaga optymalizacji jednego wyraźnie zdefiniowanego aspektu, np. minimalizacji czasu przy danych zasobach. Natomiast algorytmy wielozadaniowe lepiej sprawdzają się w zadaniach zintegrowanych, takich jak łączenie harmonogramowania, kosztorysowania i analizy ryzyka, gdzie decyzje są współzależne, a równoległe przetwarzanie różnych modeli może przynieść lepsze rezultaty.

5. Porównanie skuteczności i metryki ewaluacyjne

5.1. Metryki oceny jakości rozwiązań dla wielu zadań

W algorytmach wielozadaniowych każde zadanie generuje własny zbiór rozwiązań, co wymaga zastosowania zróżnicowanych miar, analogicznych do stosowanych w algorytmach wielokryterialnych. Wśród podstawowych metryk oceny jakości rozwiązań wyróżnia się:

- Best-Found Fitness (BFF) — wartość najlepszego rozwiązania uzyskanego dla danego zadania. Miara ta pozwala określić, czy multitask przynosi korzyść w stosunku do niezależnego uruchamiania algorytmów single-task.
- Mean Fitness — średni poziom dostosowania populacji w danym zadaniu, wskazujący na stabilność działania algorytmu oraz jego zdolność do eksploracji przestrzeni rozwiązań.
- Spread i różnorodność rozwiązań — miary oceniające poziom zróżnicowania populacji, istotne zwłaszcza przy zadaniach wielokryterialnych lub w sytuacji, gdy rozwiązania jednego zadania wpływają na drugie.

Miary te stosowane są osobno dla każdego zadania, a następnie agregowane, co ułatwia porównywanie algorytmów o różnych strategiach współdzielenia informacji.

5.2. Metryki oceny transferu wiedzy i interakcji między zadaniami

Unikatową cechą algorytmów wielozadaniowych jest możliwość przenoszenia korzystnych cech genotypu pomiędzy zadaniami. Dlatego niezbędne są miary oceny efektywności transferu:

- Transfer Efficiency Index (TEI) — ocena wpływu rozwiązań zadań pomocniczych na poprawę wyników zadania głównego. Miara dodatnia sugeruje korzystną interakcję, podczas gdy wartości ujemne wskazują na interferencję.
 - Skill Factor Consistency (SFC) — stabilność przyporządkowania rozwiązań do zadań w procesie ewolucji. Wysokie wartości oznaczają, że algorytm trafnie wykorzystuje strukturalne podobieństwa między zadaniami.
 - Positive vs. Negative Transfer Ratio (PTR/NTR) — stosunek liczby przypadków, w których transfer przyniósł poprawę, do liczby przypadków, w których pogorszył wyniki.
- Metryki te umożliwiają analizę, w jakim stopniu algorytm wykorzystuje powiązania zadań oraz czy zachodzi zjawisko niekorzystnej interferencji obliczeń.

5.3. Metryki złożone i globalne oceny skuteczności algorytmu

W celu kompleksowego porównania skuteczności algorytmów multi-task wprowadzane są metryki złożone, obejmujące agregację wyników ze wszystkich zadań:

- Overall Task Performance (OTP) — wskaźnik sumaryczny, który łączy najlepsze wyniki wszystkich zadań z uwzględnieniem ich ważności lub wagi decyzyjnej.
- Multitask Optimization Score (MOS) — ocenia zarówno jakość rozwiązań, jak i szybkość konwergencji dla wszystkich zadań równocześnie.
- Computational Cost Ratio (CCR) — porównanie kosztów obliczeń multi-task względem uruchamiania pojedynczych zadań osobno.

W rezultacie algorytm, który osiąga wysokie wartości OTP i MOS przy niskich kosztach obliczeń, uznawany jest za najbardziej efektywny.

Algorytmy multi-task mogą znacząco przewyższać algorytmy single-task, jeśli zadania są ze sobą strukturalnie powiązane, a transfer wiedzy jest pozytywny. W przypadku zadań odmiennych lub nieskorelowanych, tradycyjne podejścia single-task mogą okazać się bardziej stabilne. Dlatego właściwy dobór metryk ewaluacyjnych, obejmujący zarówno jakość rozwiązań, funkcję transferu, jak i koszty obliczeń, jest kluczowy dla poprawnej oceny skuteczności algorytmów wielozadaniowych.

6. Podsumowanie

Przeprowadzony przegląd literatury pokazuje, że algorytmy wielozadaniowe, zwłaszcza oparte na paradygmacie ewolucyjnym, stanowią obiecującą klasę narzędzi wspierających rozwiązywanie złożonych problemów planowania produkcji budowlanej. Ich zdolność do równoczesnej optymalizacji wielu zadań – takich jak harmonogramowanie robót, bilansowanie zasobów, analizowanie wariantów technologicznych czy minimalizacja kosztów wykonawstwa – otwiera możliwości zwiększenia efektywności decyzyjnej w warunkach wysokiej złożoności i niepewności. W literaturze podkreśla się, że MTO mogą skracać czas obliczeń, poprawiać

jakość rozwiązań i pozwalać na wykrywanie ukrytych zależności pomiędzy zadaniami, które w tradycyjnych podejściach single-task pozostają niewykorzystane.

Jednocześnie analiza dostępnych badań wskazuje na istotne ograniczenia obecnego stanu wiedzy. Po pierwsze, większość prac opiera się na syntetycznych lub uproszczonych zestawach danych, które nie oddają złożoności realnych projektów budowlanych. W praktyce harmonogramy budów charakteryzują się dynamicznie zmieniającymi się warunkami, niejednoznacznością danych wejściowych oraz wieloetapową zależnością między zasobami. Po drugie, wiele algorytmów multi-task testowanych jest na zadaniach silnie skorelowanych, co ułatwia transfer wiedzy; rzadziej analizuje się przypadki, w których korelacja ta jest słaba lub negatywna, a transfer może powodować interferencję i pogorszenie wyników. Po trzecie, wciąż niewystarczająco opracowane są metryki oceny efektywności transferu wiedzy oraz kryteria stopnia podobieństwa zadań, co utrudnia jednoznaczną ocenę przewag algorytmów wielozadaniowych nad klasycznymi metodami optymalizacji. Dodatkowym ograniczeniem jest brak badań uwzględniających czynniki charakterystyczne dla branży budowlanej, takie jak ryzyko pogodowe, zakłócenia logistyczne czy strukturalne zależności pomiędzy wieloma wykonawcami.

W świetle powyższych ustaleń można wskazać kluczowe kierunki dalszych badań. Konieczne jest rozwijanie metod określania podobieństwa zadań oraz automatycznego sterowania intensywnością transferu wiedzy, tak aby ograniczyć ryzyko niekorzystnej interferencji. Szczególnie perspektywiczne wydaje się łączenie algorytmów multi-task z technikami uczenia maszynowego – zwłaszcza deep learning i meta-learning – które mogłyby dynamicznie dostosowywać zachowanie algorytmu do bieżących warunków projektu. W przyszłych pracach warto również koncentrować się na walidacji empirycznej z użyciem rzeczywistych danych z placów budowy, co pozwoli ocenić praktyczną użyteczność MTO. Ważnym obszarem badań jest także rozszerzenie multi-task optimization o czynniki niepewności, np. poprzez integrację z symulacjami Monte Carlo czy metodami probabilistycznymi, co umożliwiłoby bardziej realistyczne odwzorowanie warunków produkcji budowlanej.

Podsumowując, algorytmy wielozadaniowe stanowią zaawansowaną i szybko rozwijającą się grupę metod optymalizacyjnych, które mają duży potencjał w zakresie planowania produkcji budowlanej. Wymagają jednak dalszych prac teoretycznych i aplikacyjnych, aby w pełni wykorzystać ich możliwości oraz zapewnić ich skuteczność w złożonych realiach współczesnych procesów budowlanych.

Bibliografia:

1. Herroelen W., De Reyck B., Demeulemeester E. (1998). Resource-constrained project scheduling: A survey of recent developments, *Computers & Operations Research*, Volume 25, Issue 4, Pages 279-302, [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(97\)00055-5](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(97)00055-5).
2. Hartmann S., Briskorn D. (2008). A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem, *European Journal of Operational Research*, Working Paper, No. 02/2008.
3. Kelley Jr, J. E., & Walker, M. R. (1959). Critical-path planning and scheduling. In Papers presented at the December 1-3, 1959, eastern joint IRE-AIEE-ACM computer conference (pp. 160–173).

4. Csordas, H. (2017). An overview of the time-cost trade-off problems of project planning. *ProcediaEngineering*, 196, 323-326.
5. Senses, S. and Kumral, M. (2023). Managing Trade-off Between Cost and Time in Project Scheduling Problems Using Discrete Event Simulation. DOI: 10.5220/0012004900003546, In *Proceedings of the 13th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (SIMULTECH 2023)*, pages 178-185.
6. Arditi D., Onur A., Tokdemir B., and Suh K. (2002). Challenges in Line-of-Balance Scheduling, *Journal of Construction Engineering and Management*, Volume 128, Issue 6, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2002\)128:6\(545\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2002)128:6(545))
7. Tomczak, M., & Jaśkowski, P. (2022). Scheduling repetitive construction projects: structured literature review. *Journal of Civil Engineering and Management*, 28(6), 422–442. <https://doi.org/10.3846/jcem.2022.16943>.
8. Beşikci U., Bilge U., Ulusoy G. (2015). Multi-mode resource constrained multi-project scheduling and resource portfolio problem, *European Journal of Operational Research*, Volume 240, Issue 1, 2015, Pages 22-31, ISSN 0377-2217, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.06.025>.
9. Bali K. K., Gupta A., Ong Y. S. (2021). Tan PS. Cognizant Multitasking in Multiobjective Multifactorial Evolution: MO-MFEA-II. *IEEE Trans Cybern.* 2021 Apr;51(4):1784-1796. doi: 10.1109/TCYB.2020.2981733. Epub 2021 Mar 17. PMID: 32324586.x
10. Hartmann S., Briskorn D. (2010). A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem, *European Journal of Operational Research*, Volume 207, Issue 1, 2010, Pages 1-14, ISSN 0377-2217, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.11.005>.
11. Kolisch R., Padman R. (2001). An integrated survey of deterministic project scheduling, *Omega*, Volume 29, Issue 3, Pages 249-272, ISSN 0305-0483, [https://doi.org/10.1016/S0305-0483\(00\)00046-3](https://doi.org/10.1016/S0305-0483(00)00046-3).
12. Herroelen W., Leus R. (2005). Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials, *European Journal of Operational Research*, Volume 165, Issue 2, Pages 289-306, ISSN 0377-2217, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.002>.
13. Deb K. (2001). *Multiobjective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. Wiley, New York.
14. Coello Coello C. A. (2006). "Evolutionary multi-objective optimization: a historical view of the field," in *IEEE Computational Intelligence Magazine*, vol. 1, no. 1, pp. 28-36, doi: 10.1109/MCI.2006.1597059.
15. Gupta A., Ong Y.S. and Feng L. (2016). "Multifactorial Evolution: Toward Evolutionary Multitasking," in *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 20, no. 3, pp. 343-357, doi: 10.1109/TEVC.2015.2458037.

2. OCENA LUMINACJI NAWIERZCHNI Z WYKORZYSTANIEM MODELU REGRESJI LOGISTYCZNEJ

Paulina Bąk- Patyna, Grzegorz Mazurek, Przemysław Buczyński, Hubert Patyna, Piotr Sokołowski

Politechnika Świętokrzyska Kielce

Wydział Budownictwa i Architektury

Al. 1000- Lecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

E-mail: pbak@tu.kielce.pl

Hubert Patyna

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki

Al. 1000- Lecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

1. Wprowadzenie

W artykule zasadniczym celem jest określenie skutecznego prognozowania współczynnika luminancji mieszanki mineralno-asfaltowej. Luminancja mieszanki mineralnej determinuje wartość ostatecznej luminacji nawierzchni. Możliwość szybkiej prognozy zdecydowanie zwiększy efektywność projektowania mieszanek mineralno-asfaltach pod kątem doboru własnego kruszywa spełniającego wymagania funkcjonalne oraz zwiększające jasność nawierzchni. Proces badawczy składał się z dwóch etapów. Pierwszy etap obejmuje modelowanie współczynnika luminancji Qd kruszywa z uwzględnieniem jego analizy petrograficznej. Drugi zasadniczy etap, opiera się o badania pierwszego etapu, dotyczyły modelowania współczynnika luminancji mieszanki mineralnej uwzględniając: udział procentowy danego składnika, jego uziarnienie oraz jego właściwości fotometryczne. Do modelowania wykorzystano efektywną technikę drzew wzmocnianych. W wyniku jej zastosowania uzyskano dopasowanie modelu do danych eksperymentalnych.

2. Model regresyjny współczynnika luminancji dla mieszanki mineralnej

Modelowanie wartości współczynnika luminancji Qd mieszanki mineralnej opiera się na wnioskach i wynikach modelowania współczynnika luminancji dla kruszywa. Model opracowany dla współczynnika luminancji kruszywa uwzględniającego petrografię wybrano do dalszej analizy, gdyż pozwalał na obniżenie błędu prognozy przypisanego do kruszywa. Należy jednak pamiętać, że uwzględnienie modelu zawierającego wyniki analizy petrograficznej podniesie jakość predykcji współczynnika luminancji, zdecydowanie zmniejszy jego użyteczność z punktu widzenia zastosowań praktycznych. Wynika to z faktu, że analizy petrograficzne są rzadko wykonywane w drogownictwie dla danego kruszywa.

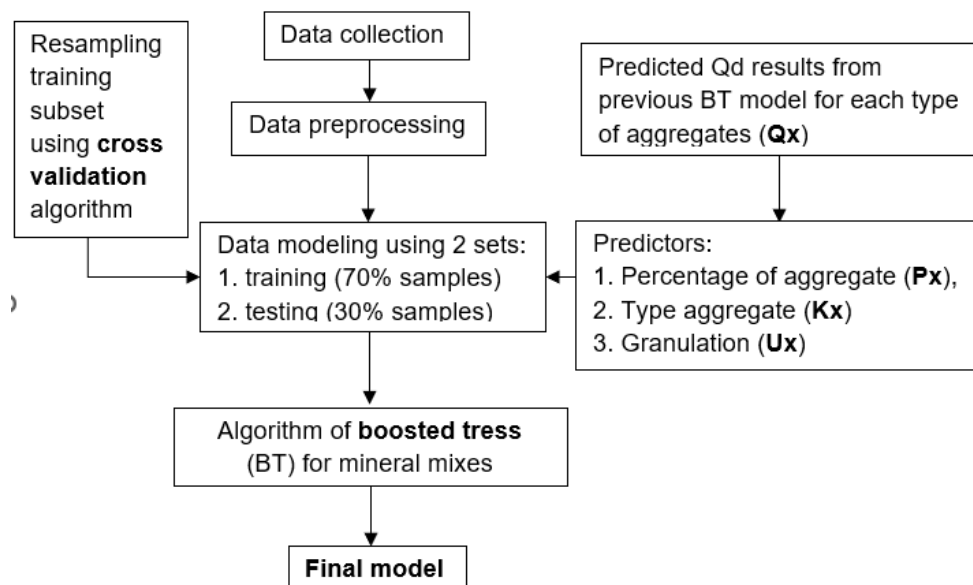
Struktura zbioru wejściowego dotyczącego mieszanki mineralnej opiera się na wykorzystaniu zaprojektowanych składów 34 mieszanek mineralnych przeznaczonych do wykonania rzeczywistych nawierzchni dróg obciążonych ruchem średnim kategorii KR3-4 ($0.5 \cdot 10^6 \div 2.5 \cdot 10^6$ ESAL). Wszystkie mieszanki mineralne musiały odpowiadać wymaganiom

uziarnienia obowiązującym w Polsce, zgodnie z WT-2/2014 [37]. Wprowadzenie takich uwarunkowań wykluczało możliwość zastosowania kruszywa jednego rodzaju, gdyż jego stos okruchowy uniemożliwiałby zagęszczenie mieszanki mineralno-asfaltowej (mma) wykonanej z jego udziałem w warunkach rzeczywistych. Kolejne ograniczenie wynikało z kwasowości skał, czyli zawartości krzemionki (SiO_2). Zastosowanie skał kwaśnych, np.: kwarcytu oraz granitu spowodowałoby utratę wymaganej wodoodporności mma z faktu niskiej adhezji tych skał do asfaltu. Z kolei zastosowanie kruszywa o wysokiej adhezji z kruszywem (wapień) nie zapewniłoby wymaganej wartości odporności na rozdrabianie (współczynnik Los Angeles) $\text{LA} < 40$. Uwzględniając wszystkie warunki mieszanka mineralna składała się z od 3 do 4 kruszyw różnych rodzajów granulacji (K_x). Zaletą takiego postępowania była możliwość odwzorowania rzeczywistych mieszanek mineralno-asfaltowych, które zostały zastosowane do produkcji mma i tym samym reguły, jakie określono w modelu dotyczyły rzeczywistych warunków. Liczba wyników w zbiorze wejściowym wynosiła 450, a jego strukturę przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Struktura zbioru wejściowego oznaczenia Qd mieszanki mineralnej

Zmienna ilościowa zależna	
Współczynnik luminancji w świetle rozproszonym	$\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$
Powierzchniowy współczynnik odbłasku	$\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$
Zmienna ilościowa niezależna (predyktor ilościowy)	
Współczynnik luminancji Qd dla kruszywa (wartość modelowa paragraf 3.2), Q_x	$\text{mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}_1$
Udział procentowy frakcji kruszywa, P_x	%
Zmienna jakościowa niezależna (predyktor jakościowy)	
Uziarnienie kruszyw, U_x	0/2, 2/5, 2/8, 5/8, 8/11
Rodzaj kruszywa, P_x	Wapień, Kwarcyt, Melafit, Granit, Amfibolit, Bazalt, Gabro
Ilość frakcji w mm, K_x	od 3 do 4

Podczas budowy modelu nie uwzględniono najdrobniejszej frakcji kruszywa U1 o uziarnieniu 0/2. Ten rodzaj frakcji zdecydowanie zafałszowałby wynik współczynnika luminancji. Ponadto frakcje kruszywa drobnego są otaczane przez asfalt tworząc mastyks (kruszywo drobne oraz lepszycze asfaltowe) dlatego też pozostawienie tej frakcji w mm byłoby nieuzasadnione. Niemniej jednak uwzględnione je podczas projektowania składu mm, gdyż mają wpływ na jej optymalny stos okruchowy. Algorytm postępowania mającego na celu modelowanie współczynnika luminancji mieszanki mineralnej w postaci schematu blokowego przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1. Algorytm modelowania współczynnika luminancji Q_d za pomocą modelu regresyjnego BT do dla mieszanki mineralnej

Zadanie, jakie sobie postawiono było nowe zatem, aby wybrać odpowiednią technikę DM posłużono się narzędziem, którego dostarcza pakiet Statistica uwzględniony w module *Data Miner Recipes*. Jego działanie i wynik należy traktować przede wszystkim jako studium wykonywalności co do integralności zbioru danych jak i wskazanie na technikę, która będzie prawdopodobnie najskuteczniejsza do prognozy współczynnika luminancji. Do realizacja zadania wstępnie wytypowano 4 techniki regresyjne DM:

1. Las losowy (RT),
2. Sieć neuronowa (ANN),
3. Wzmacniane drzewa losowe (BT),
4. Klasyczne drzewa losowe (C&RT),
5. Multi Adaptive Regression Splines (MARS).

Najlepszy model uczenia maszynowego musiał wykazywać się spośród ich modeli najmniejsza wartością RMSE. W przypadku modelu MARS wymagane było nadanie etykiet jakościowych niektórym zmiennymi i ostatecznie ta technika okazała się nieskuteczną. Również technika C&RT nie pozwoliła na uzyskanie zadowalającego wyniku predykcji. Zestawienie wstępnych rezultatów przedstawiono w tabeli 2.

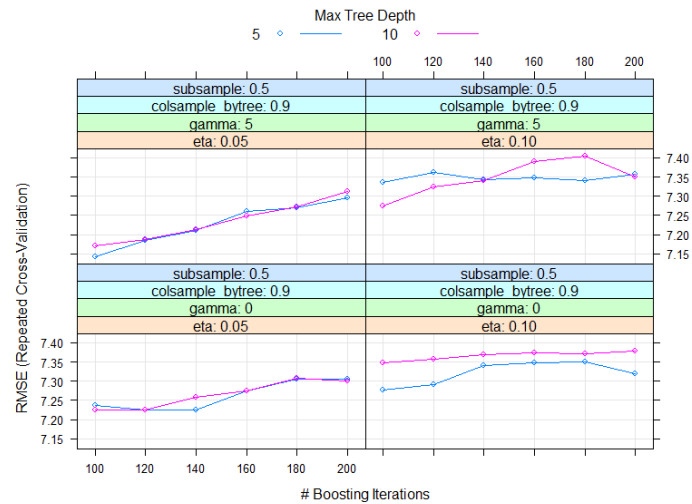
Tabela 2. Wstępny przegląd technik uczenia maszynowego do predykcji cechy Qd mieszanki mineralnej

Nazwa	Średnia suma kwadratów reszt (MSE), uczenie	Korelacja, uczenie	Wybór do oceny
Drzewa wzmacniane	35,69	0,93	TRUE
Sieć neuronowa	37,43	0,92	TRUE
Losowy las	91,5	0,85	TRUE
C&RT	158,61	0,71	FALSE
MARS	-	-	FALSE

Spośród wszystkich technik uczenia wybrano do dalszej ewaluacji algorytm drzew wzmacnianych (BT). Uzyskane rezultaty jakości dopasowania uwzględniały wykorzystanie wszystkich wyników w zbiorze bez podziału na zbiór uczący i testowy. Funkcja modelująca została poddana procesowi dostrojenia. Proces ten wykonano posilując się biblioteką *caret* dostępną w języku programowania R. Dzięki niemu można skutecznie dostroić dowolną funkcję modelującą. W procesie dostrojenia uwzględniono następujące parametry:

- ✓ *nrounds* - It controls the maximum number of iterations,
- ✓ η - controls the learning rate,
- ✓ γ - It controls regularization (or prevents overfitting),
- ✓ *max depth*- It controls the depth of the tree,
- ✓ *min. child weight* - it refers to the minimum number of instances required in a child node,
- ✓ *subsample* - controls the number of samples (observations) supplied to a tree.

Proces strojenia polegał na iteracji określonych kombinacji parametrów modelu BT (metoda *xgbTree*) uwzględnionych w ustalonej siatce parametrów stosując również sprawdzian krzyżowy. Walidację krzyżową wprowadzono w celu uniknięcia nadmiernego przeuczenia modelu zbudowanego na podstawie zbioru treningowego. Następnie po wykonaniu czasochłonnego procesu obliczeniowego wynik został przedstawiany w postaci wektora wartości parametrów, przy których model uzyskał najwyższą skuteczność. Jako kryterium wyboru najlepszego modelu wykorzystano metrykę RMSE. Wykres reprezentujący fragment rezultatów RMSE w procesie strojenia parametrów przedstawiono na rysunku 2.



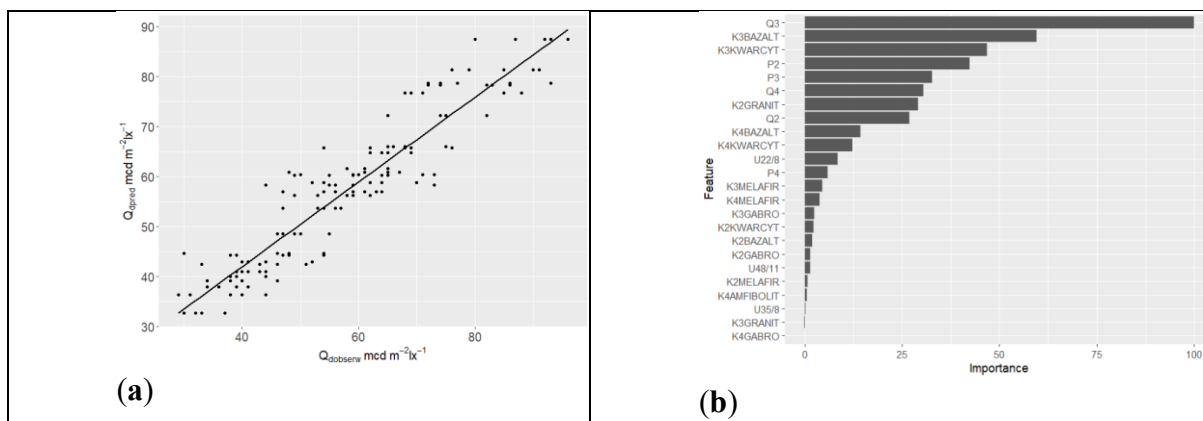
Rysunek 2. Oznaczenia graficzne: a) Luminancji, b) Iluminacji [2]

Ostatecznie najlepszy model, o najniższej wartości RMSE, po realizacji procesu strojenia odznaczał się parametrami które podano w tabeli 3.

Tabela 3. Wybrane rezultaty dostrojenia parametrów modelu

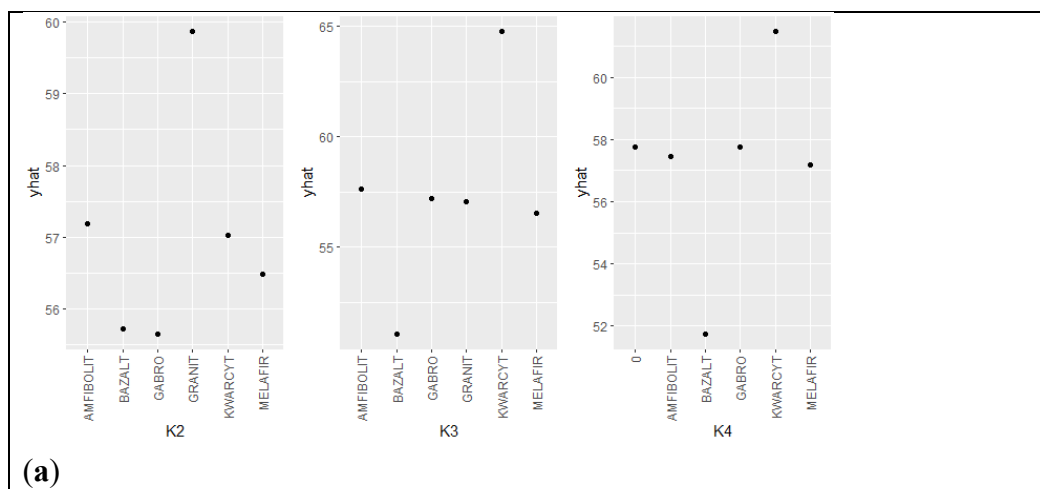
η	max depth	γ	subsample	min. child weight	nrounds	RMSE	R^2	MAE
0.05	5	5	0.5	3	120	7.1	0.82	5.7

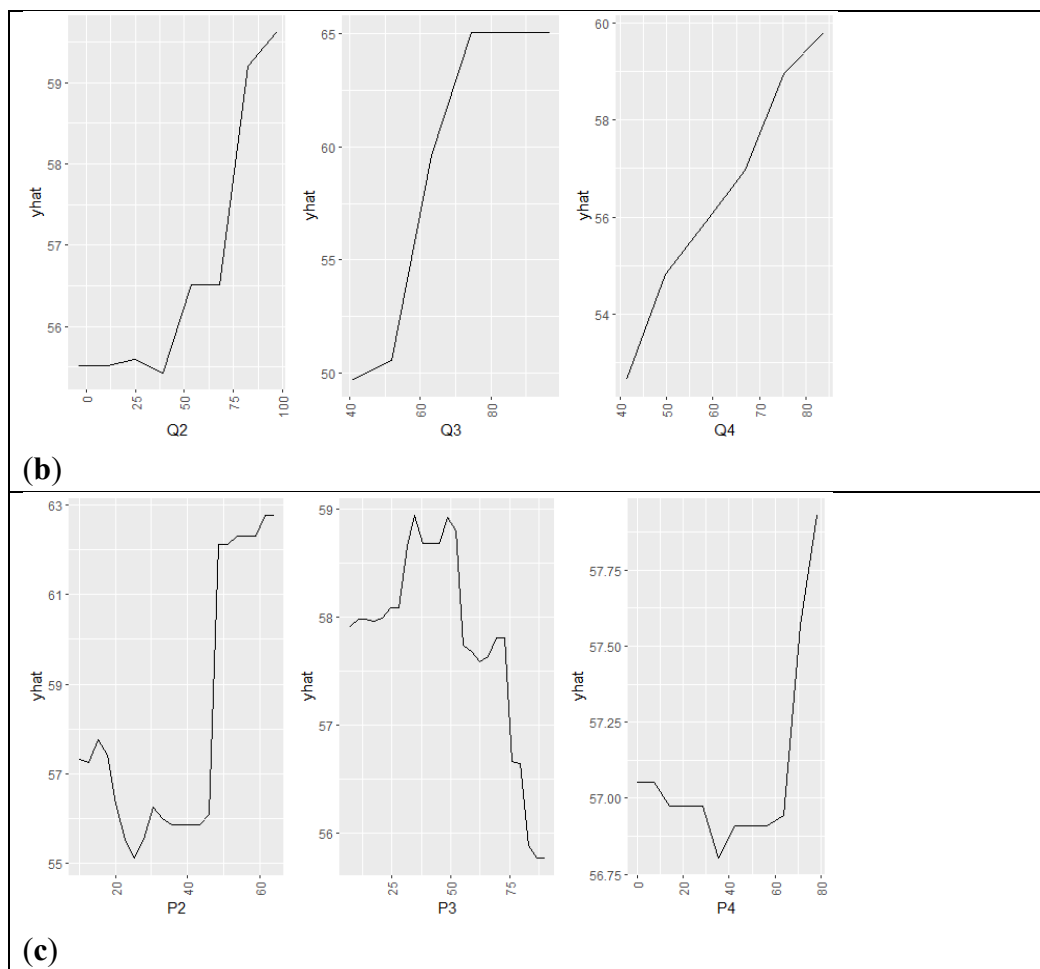
Należy zaznaczyć, że zbiór testowy został wykorzystany do weryfikacji wartości *nrounds*, której wartość została ostatecznie ustalona jako 120. Dalsze zwiększanie parametru *nrounds* prowadziło do przeuczenia modelu BT. Jakość dopasowania modelu zawierająca wyniki całego zbioru (zbiór uczący i testowy) pomiędzy cechą $Q_{d_{\text{obserw}}}$ (wartości obserwowane) i zbiorem wartości przewidywanych $Q_{d_{\text{predic}}}$ wyniosła: $R^2=0.87$, $MAE=4.4 \text{ mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$ oraz $RMSE = 5.7 \text{ mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$. Wyniki uzyskanej jakości uznano za satysfakcjonujące. Istotną kwestią oceny jakości modelu była również analiza jego struktury za pomocą wykresu ważności zmiennych. Na ich podstawie można ocenić, która ze zmiennych ma największy wpływ na podział drzew i relacji pomiędzy nimi oraz pozwala na dokonane sformułowanie wniosków praktycznych. Wykres ważności zmiennych oraz jakość dopasowania modelu $Q_{d_{\text{predic}}}$ vs. $Q_{d_{\text{obserw}}}$ przedstawiono na Rysunek 3.



Rysunek 3. Ocena modelu BT: a) jakoś dopasowania modelu (R^2); b) wykres ważności

Obserwując wyniki na rysunku 3b należy zwrócić uwagę, że największy wpływ na określenie reguł podczas budowy modelu BT miała wartość współczynnika luminancji frakcji kruszywa (komponentu) nr 2 i nr 3 (Q2, Q3). Bardzo istotne były również procentowe udziały frakcji nr 2 (P2) oraz nr 3 (P3). Ciekawa informacja wynika z oceny ważności interakcji cech: K3Basalt oraz K3Quartize. Najprawdopodobniej był to skutek występowania piroksenu w kruszywie, który jednoznacznie rozdziela zbiorowość na kruszywa jasne i ciemne. Zatem występowanie tych skał we frakcji nr 3 będzie rzutować istotnie na ostateczną wartość luminancji mieszanki mineralnej. Granulacja uziarnienia (Ux) miała również ważne znaczenie, choć już nie tak duże jak wspomniane cechy. Aby zrozumieć strukturę zbioru zastosowano wykresy cząstkowe (Partial Dependence Plot) których celem było określenie siły wpływu danej zmiennej przy marginalizacji wpływu pozostałych i wyrażanie jej w postaci uśrednionej wartości cechy Qd (oznaczona jako $\hat{y}$). Jest to użyteczne narzędzie analityczne, szczególnie wtedy, gdy interesuje nas logiczne uzasadnienie obecności zmiennych, oraz gdy poszukujemy ogólnych wniosków o charakterze praktycznym. Informacje zawarte na rysunku 3 zostały rozwinięte i przedstawione w formie graficznej na rysunku 4 z podziałem na rodzaj składnika w mieszance mineralnej (z pominięciem komponentu nr 1).





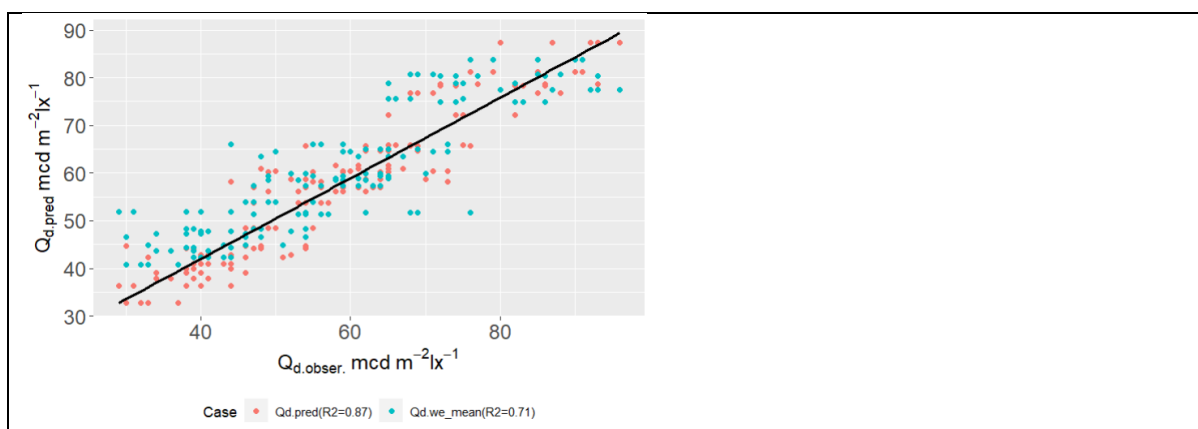
Rysunek 4. Częstkowe wykresy zależności: a) rodzaj kruszywa (Kx); b) współczynnik luminancji kruszywa (Qx); c) udział procentowy kruszywa (Ux)

Z uwagi na niewielki wpływ granulacji kruszywa na wartość Qd (Rysunek 3b) nie wykonano dla tej zmiennej wykresu częstkowego (Ux). Natomiast o wiele bardziej istotny był wpływ cech Kx, Qx, oraz Px. Przed wykonaniem analizy warto wskazać jaką granulacją odznaczał się każdy komponent mieszanki mineralnej. Kruszywo nr 2 (odpowiednio opisane przez cechy K2, Q2, P2) mogło wystąpić jako frakcja: 2/5 lub 2/8, kruszywo nr 3 jako frakcja: 2/8, 5/8 natomiast nr 4 jako frakcja 8/11 lub jej brak. Analizując Rysunek 4a należy zwrócić uwagę, że największy wpływ na wysoką jasność kruszywa granitowego we frakcji nr 2 (K2). Ponadto wprowadzenie kruszywa kwarcytowego jako komponent K2 i K3 miało bardzo korzystny wpływ na współczynnik luminancji mieszanki mineralnej (mm). Przeciwnieństwem tego było kruszywo bazaltowe, którego obecność wywołał odwrotny efekt. O wiele bardziej interesujące było stwierdzenie, przy jakim przeciętnym udziale procentowym kruszywa jasnego można uzyskać efekt podwyższonej wartości współczynnika luminancji mm w zależności od rodzaju komponentu. Analizując rysunek 4 b i c okazało się, że udział kruszywa Q2 o frakcji: 2/5 lub 2/8 powyżej 40% i o współczynniku luminancji Qd $>70 \text{ mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$ spowodował nagły przyrost cechy Qd mm (wzrost yhat). Podobnie w przypadku składnika nr 4 (frakcja 8/11) wzrost jego udziału $>60\%$ (P4) w składzie mm zawierającym jasne kruszywo powodował istotny przyrost jasności mm. Składnik nr 3 (frakcje: 2/8 lub 5/8) największy wpływ na współczynnik luminancji mm wywołał przy udziale procentowym od 25% do 50% i tylko

wtedy, gdy było stosowane kruszywo o $Q_d > 80 \text{ mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$. Taki wynik mogło dostarczyć wyłącznie kruszywo kwarcytowe lub granitowe. Składnik nr 4, czyli kruszywo o frakcji 8/11 miało znaczenie dopiero wtedy, gdy jego udział był $>60\%$. Ten wynik ma uzasadnienie, gdy pod uwagę zostanie wzięta jego powierzchnia właściwa. Kruszywo o takim uziarnieniu zdecydowanie będzie miało niższą powierzchnię właściwą niż frakcje drobniejsze występujące w komponentach 2 i 3. W związku tym, frakcja najgrubsza (nr 4) będzie zdecydowanie w mniejszym stopniu oddziaływała na współczynnik luminancji niż drobna. Należy jednak pamiętać, że frakcje grube są odpowiedzialne za wysoką odporność mieszanki mineralno-asfaltowej (mma) na deformacje trwałe. Dlatego też optymalizacja składu mma ze względu na zachowanie wysokiej odporności na deformacje trwałe prawdopodobnie zmniejszy potencjał kruszywa jasnego do rozjaśnienia nawierzchni. Współczynnik luminancji można również wyznaczyć na podstawie innych ocen. Wartość QD można określić również posiłkując się marą średniej ważonej zgodnie ze wzorem (4):

$$Q_{d, \text{mean, weighted}} = \frac{P_i Q_i + \dots + P_n Q_n}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

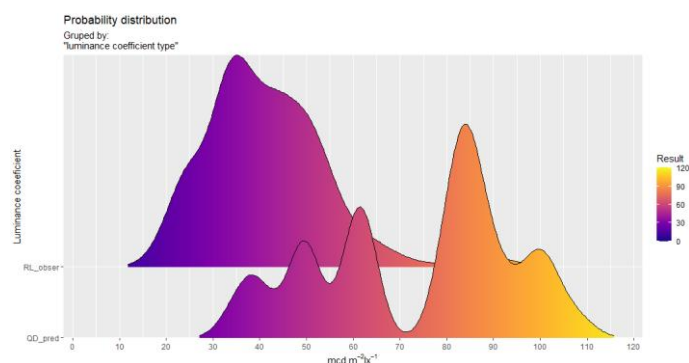
Gdzie: $Q_{d, \text{mean, weighted}}$ – średnia ważona współczynnika luminancji mm, P_i – udział procentowy kruszywa w i-tym komponente mm, współczynnik luminancji kruszywa i-tego komponentu. Rezultaty prognozowanej wartości $Q_{d, \text{mean, weighted}}$ przedstawiono w postaci graficznej w zestawieniu wyników przedstawionych na Rysunek 5



Rysunek 5. Porównanie wartości prognozowanej $Q_{d, \text{predic}}$ na podstawie modelu BT i $Q_{d, \text{mean, weighted}}$

Jakość dopasowania modelu w oparciu o kalkulację $Q_{d, \text{mean, weighted}}$ zmniejszyła się z $R^2=0.87$ (na podstawie modelu BT) do 0.71. Spadek ten można wyjaśnić zmiennością wartości średnie ważonej wynoszącej 12%. Jednak obserwując odchylenia od linii proporcjonalności model wykorzystujący średnią ważoną nie jest w stanie wyjaśnić wielu wartości odstających, które powstały w trakcie analizy. Wynika to z faktu, że rozkład cechy Q_d kruszywa nie miał rozkładu normalnego i charakteryzuje się wielomodalnością (Rysunek 5). Zatem miary centralne stosowane w testach parametrycznych nie pozwolą na właściwą predykcję wyników tak złożonej wielkości jaką jest współczynnik luminancji Q_d mieszanki mineralnej a powstałe reszty nie będą spełniały warunku homoscedastyczności.

Należy w tym miejscu wyraźnie podkreślić, że interpretacja wyników uzyskanych na podstawie modelu BT dotyczy wyłącznie zbioru kruszyw wykorzystanego do analizy i relacje występujące pomiędzy składnikami wynikały również z regulacji narzucanych przez obowiązujące w Polsce wymagania techniczne WT-1/2014 kruszyw i WT/2/2014 dla składu mieszanek mineralnych. Natomiast nic nie stoi na przeszkodzie, aby niniejszy model poddać dalszej ewaluacji z wykorzystaniem innych składów mieszanek mineralnych podlegającym innym regułom ich skomponowania. Uzyskany zbiór rezultatów obejmuje szerokie spektrum współczynnika luminancji Q_d jak i również oznaczonego współczynnika RL . Podsumowując, rozkład prawdopodobieństwa wyników występujących w eksperymencie przedstawiano na Rysunek 6.



Zakres wyników współczynnika luminancji przewidywanych przez model $Q_{d,predic}$ zawiera się w przedziale od $28 \text{ mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$ do $116 \text{ mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$. Natomiast współczynnik RL najczęściej uzyskiwał wartość podczas badań z przedziału $35 \div 40 \text{ mcd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$. Intencją autorów jest dalsza walidacja i kalibracja opracowanego modelu prognozującego współczynnik luminancji Q_d kruszywa jak i mieszanki mineralnej. W kolejnym kroku poszukiwane będą związki pomiędzy: kruszywem, mieszanką mineralną oraz mieszanką mineralno-asfaltową poddaną procesowi zużycia a współczynnikami luminancji. Zasadniczym celem jest zbudowanie modelu DM pozwalającego na prognozowanie współczynnika luminancji na etapie projektowania mieszanki mineralno-asfaltowej.

3. Wnioski

Przedstawiony proces modelowania udowodnił, że za pomocą technik uczenia maszynowego można uzyskać bardzo dobre odwzorowanie współczynnika luminancji kruszywa oraz mieszanki mineralnej sporządzonej z jego udziałem. Dzięki temu możliwość prognozowania luminancji mieszanki mineralnej pozwoli na etapie projektowania mieszanki mineralno-asfaltowej tak dobrać jej skład, aby uzyskać maksymalny poziom jej rozjaśnienia przy zachowaniu wymaganych cech mechanicznych.

Bibliografia:

1. Mazurek, G.; Bąk-Patyna, P. Application of Data Mining Techniques to Predict Luminance of Pavement Aggregate. *Applied Sciences* 2023, 13, 4116, doi:10.3390/app13074116.
2. Filipczyk, M.; Kukielska, D. Bright and Bleached Surfaces. Theory and Practice. *Mining Science; ISSN 2300-9586* 2016, doi:10.5277/MSMA1622302.

3. *Road Lighting Calculations*; 2000; ISBN 978-3-901906-54-1.
4. Strbac-Hadzibegovic, N.; Strbac-Savic, S.; Kostic, M. A New Procedure for Determining the Road Surface Reduced Luminance Coefficient Table by On-Site Measurements. *Lighting Research & Technology* 2019, 51, 65–81, doi:10.1177/1477153517736804.
5. *Road Surfaces and Lighting: Joint Technical Report CIE/PIARC*; Photocopy ed. 2008.; CIE Central Bureau: Vienna, Austria, 2008; ISBN 978-3-901906-72-5.
6. Bodmann, H.W.; Schmidt, H.J. Road Surface Reflection and Road Lighting: Field Investigations. *Lighting Research & Technology* 1989, 21, 159–170, doi:10.1177/096032718902100402.
7. Van Tichelen, P.; Jansen, B.; Geerken, T.; Vanden Bosch, M.; Van Hoof, V.; Vanhooydonck, L.; Vercalsteren, A. *Final Report Lot 9: Public Street Lighting*; 2007;
8. *Mineralogia szczegółowa: rozpoznawanie, występowanie, znaczenie minerałów*; Wydanie pierwsze.; Mineralpress: Kraków, 2019; ISBN 978-83-933330-5-9.
9. R Core Team R: A Language and Environment for Statistical Computing 2021.
10. Friedman, J.H. Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine. *The Annals of Statistics* 2001, 29, 1189–1232.
11. Hill, T.; Lewicki, P. *Statistics: Methods and Applications: A Comprehensive Reference for Science, Industry, and Data Mining*; StatSoft: Tulsa, OK, 2006; ISBN 978-1-884233-59-3.
12. Nwanganga, F.; Chapple, M. *Practical Machine Learning in r:
*; 1st ed.; John Wiley and Sons: Indianapolis, 2020; ISBN 978-1-119-59151-1.
13. Norddeutsche Expertengruppe Für Aufgehellte Asphaltdeckschichten: Praktische Hinweise Für Den Bau von Hellen Asphaltdeckschichten 2004.
14. WT-1 Kruszywa Do Mieszanek Mineralno-Asfaltowych i Powierzchniowych Utrważeń Na Drogach Krajowych 2014.
15. PN-EN 13043:2004/Ap1:2010 Kruszywa Do Mieszanek Bitumicznych i Powierzchniowych Utrważeń Stosowanych Na Drogach, Lotniskach i Innych Powierzchniach Przeznaczonych Do Ruchu.

3. ROLA SPOIWA W KSZTAŁTOWANIU WŁAŚCIWOŚCI BETONU MODYFIKOWANEGO NANOCELULOZĄ

Emilia Łukawska, Natalia Machul, Aleksandra Zagozda, Bartłomiej Zieliński

Politechnika Świętokrzyska

Wydział Budownictwa i Architektury

Studenckie Koło Naukowe Betonic

ul.: al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

E-mail: nati_machul@interia.pl

1. Wstęp

Współczesne budownictwo stawia przed technologią materiałową coraz bardziej złożone wyzwania, które muszą uwzględniać więcej cech niż tylko wytrzymałość betonu w konstrukcji. Kluczowego znaczenia nabierają obecnie trwałość obiektów, efektywność ekonomiczna wykonawstwa, a także —zasady zrównoważonego rozwoju. Beton, jako najpowszechniej stosowany materiał konstrukcyjny na świecie, podlega w związku z tym ciągłej ewolucji technologicznej. Jednym z przełomowych osiągnięć w tej dziedzinie było opracowanie w Japonii w latach 80. XX wieku betonu samozagęszczalnego (SCC – Self-Compacting Concrete) [Bartos, 1978, s. 28–30; Okamura, Ouchi, 2003, s. 5–15]. Technologia ta, eliminująca konieczność mechanicznego zagęszczania mieszanki betonowej, zrewolucjonizowała proces realizacji konstrukcji, umożliwiając dokładne wypełnienie szalunków o skomplikowanej geometrii oraz elementów o gęstym zbrojeniu. Pomimo bardzo korzystnych właściwości reologicznych, betony SCC — podobnie jak betony tradycyjne — charakteryzują się kruchością oraz niską wytrzymałością na rozciąganie. Powszechnie stosowanym rozwiązaniem tego problemu jest wykorzystanie zbrojenia rozproszonego w postaci włókien stalowych, polimerowych lub szklanych [Zych, 2010]. Włókna te pełnią funkcję mikrozbroyenia, ograniczając rozwój rys poprzez ich mostkowanie w matrycy cementowej, co prowadzi do zwiększenia odporności na pękanie oraz poprawy właściwości mechanicznych kompozytu betonowego. Należy jednak podkreślić, że produkcja włókien syntetycznych i stalowych wiąże się z wysokim zużyciem energii oraz znaczną emisją CO₂, co pozostaje w sprzeczności z ideą zrównoważonego budownictwa. W odpowiedzi na powyższe wyzwania, niniejsza publikacja koncentruje się na analizie możliwości zastosowania włókien nanocelulozowych jako ekologicznej alternatywy dla konwencjonalnego mikrozbroyenia. Nanoceluloza, będąca materiałem pochodzenia naturalnego, charakteryzuje się unikalnym zestawem właściwości, takich jak wysoka wytrzymałość na rozciąganie, bardzo duża powierzchnia właściwa oraz biodegradowalność [Fahma i in., 2021]. Włókna nanocelulozowe są powszechnie dostępne w środowisku naturalnym i mogą być pozyskiwane z wielu odnawialnych źródeł, co czyni je materiałem przyjaznym dla środowiska i wpisującym się w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym. Celem badań przedstawionych w niniejszej pracy było określenie wpływu dodatku włókien nanocelulozowych oraz rodzaju zastosowanego spoiwa cementowego na właściwości fizyczne i trwałość fibrobetonów samozagęszczalnych.

Program badawczy obejmował analizę porównawczą mieszanek wykonanych na bazie dwóch rodzajów cementów: cementu portlandzkiego CEM I 42,5R oraz cementu portlandzkiego wieloskładnikowego z dodatkiem popiołu lotnego CEM II/B-V 42,5R HSR. Zastosowanie cementu z dodatkiem popiołów lotnych stanowi istotny element ograniczania śladu węglowego, umożliwiając zagospodarowanie odpadów przemysłowych jako pełnowartościowego składnika spoiwa [Heidelberg Materials Polska]. W ramach badań przeprowadzono szczegółową analizę wpływu zmiennej zawartości włókien nanocelulozowych (w zakresie od 0% do 1% masy spoiwa) na kluczowe parametry mieszanki betonowej, takie jak gęstość, konsystencja oraz stopień napowietrzenia. Ocenie poddano również właściwości betonu stwardniałego, w tym wytrzymałość na ściskanie i zginanie, odporność na ścieranie, podciąganie kapilarne, gęstość objętościową, charakterystykę porów powietrznych, nasiąkliwość oraz mrozoodporność.

2. Materiały i Metody

2.1. Składniki mieszanki betonowej

Jako spoiwo wykorzystano dwa rodzaje cementu, różniące się składem i właściwościami:

- CEM I 42,5R: Cement portlandzki o wysokiej wytrzymałości wczesnej, charakteryzujący się szybkim przyrostem ciepła hydratacji.
- CEM II/B-V 42,5R HSR: Cement portlandzki, zawierający w swoim składzie dodatek popiołu lotnego krzemionkowego. Obecność popiołu lotnego wpływa na poprawę urabialności mieszanki, obniżenie ciepła hydratacji oraz zwiększenie odporności na agresję chemiczną.

Jako kruszywo zastosowano mieszankę kruszywa łamanego bazaltowego oraz piasku rzeczno. Uziarnienie kruszywa zostało dobrane tak, aby zapewnić maksymalną szczelność stosu okruszowego. W celu modyfikacji struktury porowatości oraz poprawy parametrów wytrzymałościowych, do mieszanki wprowadzono dodatki mineralne w postaci pyłu krzemionkowego oraz popiołu lotnego (jako dodatek typu II). Pył krzemionkowy, będący bardzo drobnym pyłem o właściwościach pucolanowych, miał za zadanie wypełnienie przestrzeni między ziarnami cementu, uszczelniając matrycę i wzmacniając strefę przejściową między kruszywem a zaczynem. Rolę zbrojenia rozproszonego pełniły włókna nanocelulozy. Wykorzystano włókna pochodzenia naturalnego, które wprowadzano do mieszanki w postaci zawiesiny wodnej, aby zapewnić ich równomierne rozprowadzenie w całej objętości betonu. Badano zawartość włókien na poziomach: 0% (próba kontrolna), 0,3%, 0,6% oraz 1,0% w stosunku do masy spoiwa. W celu uzyskania pożądanych właściwości reologicznych, niezbędnych dla betonu samozagęszczalnego, zastosowano superplastyfikator nowej generacji oraz domieszkę napowietrzającą.

2.2. Procedura przygotowania próbek

Składniki dozowano wagowo z dokładnością do 0,1 g. Mieszanie przeprowadzono w mieszadle mechanicznym o wymuszonym działaniu i stałej prędkości obrotowej, co gwarantowało jednorodność mieszanki. Proces przygotowania mieszanki betonowej rozpoczął się od wymieszania składników suchych, czyli kruszywa, piasku, spoiw i dodatków, przy czym cement wcześniej przesiano przez sito 0,25 mm, aby pozbyć się ewentualnych grudek. Następnie do mieszalnika dodano wodę zarobową wraz z rozprowadzonymi w niej włóknami celulozy, co pozwoliło uniknąć ich zbrylania się wewnątrz mieszanki. Na samym końcu

wprowadzono domieszki chemiczne: w pierwszej kolejności superplastyfikator dla upłynnienia betonu, a po nim domieszkę napowietrzającą, aby uzyskać odpowiednią strukturę mikroporów. Po zakończeniu cyklu mieszania, mieszanka betonowa została poddana badaniom kontrolnym, obejmującym oznaczenie konsystencji metodą rozplywu stożka, badanie wykonano zgodnie z normą PN-EN 12350-8. Badanie zawartości powietrza przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 12350-7, badanie gęstości objętościowej przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12350-6. Następnie mieszankę układano w formach sześciennych o boku 15 cm. Ze względu na samozagęszczalny charakter betonu, nie stosowano wibracji mechanicznej – mieszanka wypełniała formy pod wpływem własnego ciężaru. Formy zostały uprzednio zabezpieczone środkiem antyadhezyjnym, aby ułatwić rozformowanie i zapobiec uszkodzeniu powierzchni próbek. Dojrzewanie próbek odbywało się zgodnie z normą PN-EN 12390-2. Przez pierwsze 24 godzin próbki pozostawały w formach, przykryte folią w celu zapobiegania odparowywaniu wody. Po rozformowaniu, próbki przechowywano w wodzie, w temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$, przez okres 28 dni, aż do momentu przeprowadzenia badań właściwości stwardniałego betonu.

2.3. Metody badawcze

Zakres badań stwardniałego betonu obejmował:

- Badanie gęstości

Oznaczano jako stosunek masy próbki do jej objętości. Badanie przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 12390-7.

- Wytrzymałość na ściskanie i zginanie

Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej zgodnie z normą PN-EN 13791 oraz PN-EN 12390-5. Wynik stanowił średnią z serii pomiarowej.

- Nasiąkliwość

Oznaczano jako stosunek masy wody wchłoniętej przez próbkę do masy próbki suchej, zgodnie z procedurą normową. Badanie wykonano zgodnie z normą PN-88/B-06250

- Mrozoodporność

Badanie polegało na poddaniu próbek cyklicznemu zamrażaniu i rozmrażaniu (metoda bezpośrednia) i ocenie spadku wytrzymałości w porównaniu do próbek niepoddanych cyklom. Badanie mrozoodporności wykonano na podstawie normy PN-EN 206+ krajowe uzupełnienie PN-B-06265 Załącznik N.

- Podciąganie kapilarne

Badano dynamikę transportu wilgoci w betonie poprzez pomiar przyrostu masy próbki zanurzonej częściowo w wodzie w funkcji czasu. Przeprowadzono na podstawie normy PN-EN 13057.

- Charakterystyka porów powietrznych

Analizowano strukturę porowatości, w tym wskaźnik rozmieszczenia porów, który jest krytyczny dla mrozoodporności betonu. Przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 480-11.

- Odporność na ścieranie

Procedura polega na kontrolowanym poddaniu próbki działaniu materiału ściernego (na tarczy Böhmego), a następnie pomiarze ubytku masy w celu określenia wytrzymałości materiału. Badanie przeprowadzono zgodnie z wymaganiami norm (tarcza Boehmego) PN-EN 14157 – metoda B oraz PN-EN 13892-3.

3. Wyniki

Analiza uzyskanych wyników badań laboratoryjnych pozwala na sformułowanie szeregu interesujących obserwacji dotyczących interakcji między rodzajem spoiwa a dodatkiem nanocelulozy.

3.1. Właściwości mieszanki betonowej

Wprowadzenie włókien do matrycy cementowej wpłynęło znacząco na właściwości reologiczne świeżej mieszanki. W przypadku serii opartych na cemencie CEM I, zaobserwowano, że niewielki dodatek nanocelulozy (0,3%) początkowo nie pogarszał drastycznie rozplywu, jednak dalsze zwiększanie zawartości włókien prowadziło do wyraźnego spadku płynności i klasy konsystencji. Jest to zjawisko typowe dla fibrobetonów, gdzie włókna tworzą wewnętrzną sieć przestrzenną, zwiększającą granicę płynięcia mieszanki i utrudniającą swobodny przepływ [Zych, 2010].

Interesującym zjawiskiem, odmiennym od obserwowanego dla CEM I, był wpływ włókien na mieszanki z cementem CEM II/B-V. W tym przypadku, wzrost ilości nanocelulozy sprzyjał poprawie urabialności i płynności. Można przypuszczać, że ziarna popiołu lotnego zawarte w cemencie CEM II redukowały tarcie wewnętrzne między składnikami mieszanki i niwelując negatywny wpływ włókien na reologię [Heidelberg Materials Polska, b.d.]. To spostrzeżenie jest niezwykle istotne z punktu widzenia technologii betonu, sugerując, że cementy popiołowe są bardziej kompatybilne z hydrofilowymi włóknami nanocelulozowymi w kontekście zachowania samozagęszczalności.

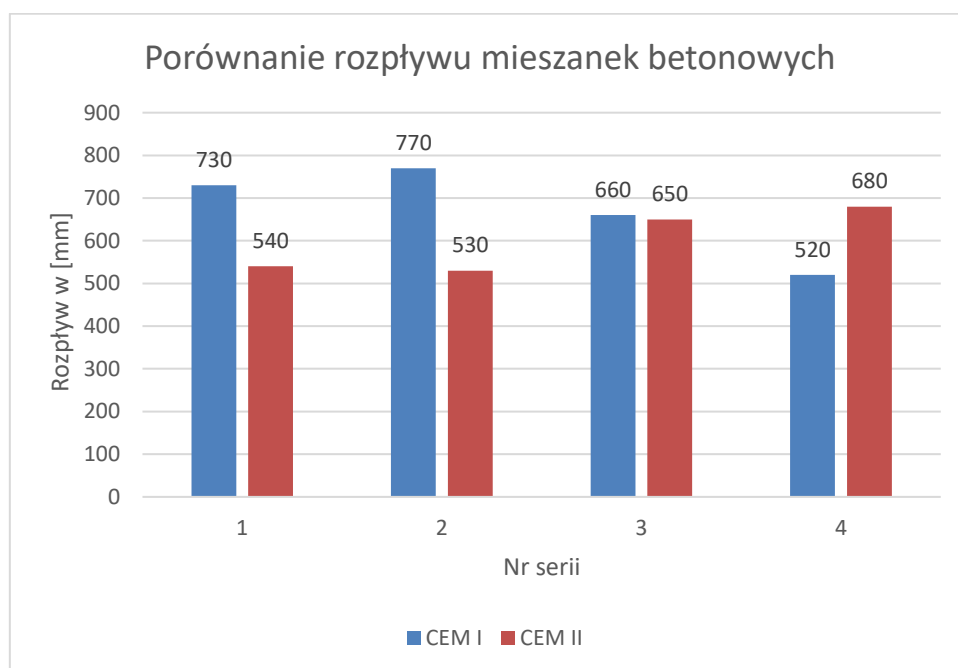
Badania gęstości objętościowej mieszanki wykazały, że wzrost zawartości włókien prowadził do obniżenia gęstości, niezależnie od rodzaju spoiwa. Może to wynikać z faktu, że włókna nanocelulozowe mają znacznie mniejszą gęstość niż zaczyn cementowy, a ponadto mogą wprowadzać do mieszanki dodatkowe powietrze. Niemniej jednak, mieszanki z CEM II charakteryzowały się generalnie wyższą gęstością niż analogiczne mieszanki z CEM I, co prawdopodobnie wiąże się z lepszym upakowaniem stosu okruszowego dzięki obecności drobnych frakcji popiołów. Badania potwierdziły istnienie negatywnej korelacji pomiędzy ilością zastosowanego zbrojenia a trwałością powierzchni. Oznacza to, że każde zwiększenie dawki włókien skutkowało bezpośrednim obniżeniem odporności na procesy ścierania.

Kluczowym parametrem dla trwałości betonu jest jego napowietrzenie. W przypadku cementu portlandzkiego (CEM I), zwiększanie ilości włókien powyżej 0,6% prowadziło do wzrostu zawartości powietrza w mieszance, osiągając poziom optymalny dla betonów mrozoodpornych (4,1–4,3%). Włókna działają jako stabilizatory pęcherzyków powietrza. Odwrotną tendencję zanotowano dla cementu portlandzkiego wieloskładnikowego (CEM II), gdzie dodatek włókien powodował spadek napowietrzenia z 4,5% do poziomu poniżej 3%. Taki spadek może być niebezpieczny z punktu widzenia mrozoodporności, gdyż niewystarczająca ilość mikroporów nie zapewnia odpowiedniej przestrzeni na ekspansję zamarzającej wody.



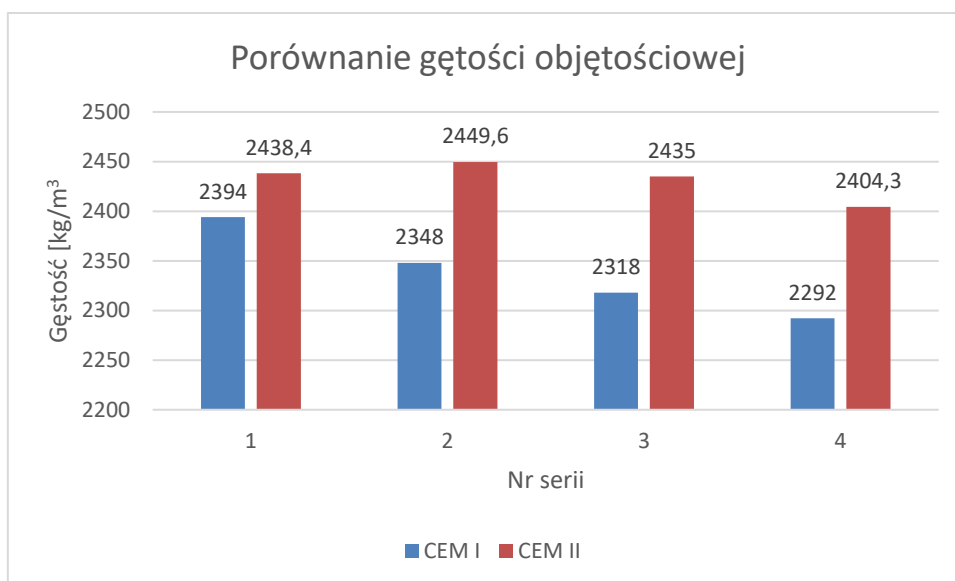
Rysunek 1. Badanie konsystencji mieszanki betonowej

Źródło: własne.



Rysunek 2. Porównanie wyników rozptywu mieszanek betonowych

Źródło: własne.



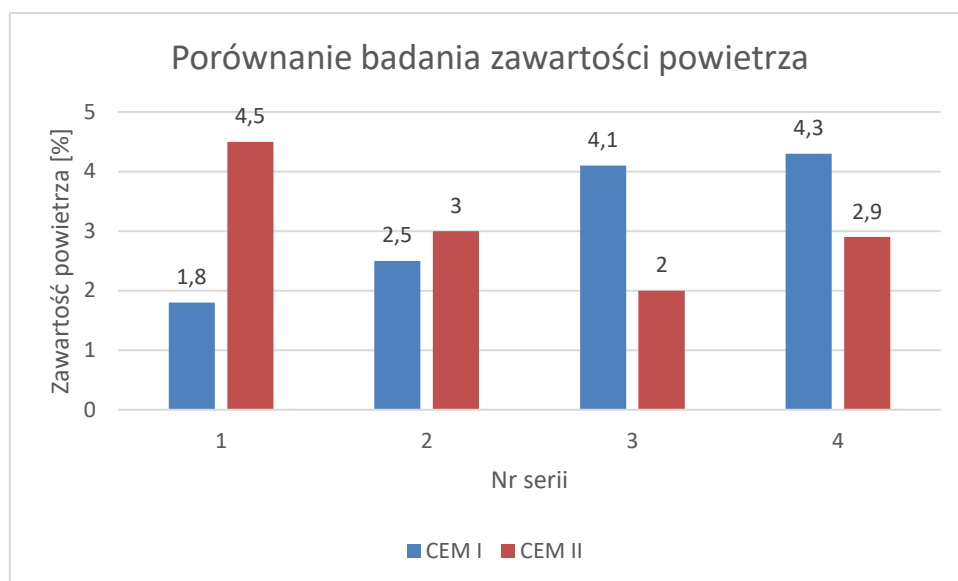
Rysunek 3. Porównanie wyników gęstości objętościowej

Źródło: własne.



Rysunek 4. Badanie zawartości powietrza w mieszance betonowej

Źródło: własne.



Rysunek 5. Porównanie wyników badania zawartości powietrza

Źródło: własne.

3.2. Właściwości stwardniałego betonu

Badania wytrzymałościowe dostarczyły dowodów na skuteczność mikrobrojenia nanocelulozowego. Średnie wartości wytrzymałości na ściskanie oscylowały w granicach 91 MPa, co kwalifikuje badany materiał do grupy betonów wysokowartościowych (BWW). Najbardziej obiecujące wyniki uzyskano dla serii z dodatkiem 0,3% włókien. W tym przypadku odnotowano wzrost wytrzymałości na ściskanie o około 17% oraz wytrzymałości na zginanie o 9,5% w porównaniu do próbek kontrolnych bez włókien. Mechanizm wzmocnienia opiera się na zdolności włókien do mostkowania mikropęknięć powstających w strukturze betonu pod obciążeniem, co opóźnia proces niszczenia i pozwala na przenoszenie naprężeń nawet po zarysowaniu matrycy.

Analiza mrozoodporności ujawniła istotną rolę rodzaju spoiwa. Beton na bazie CEM II (z wyjątkiem jednej serii, która uległa zniszczeniu) wykazał zadowalającą odporność na cykle zamrażania i rozmrażania. Natomiast beton z CEM I bez włókien nie spełnił wymagań mrozoodporności, co wskazuje na konieczność stosowania domieszek napowietrzających lub mikrobrojenia w tego typu mieszankach. Wprowadzenie włókien do betonu z CEM I znacząco poprawiło jego trwałość mrozową. Jest to związane z modyfikacją struktury porów powietrznych – włókna mogą sprzyjać powstawaniu drobnych, równomiernie rozmieszczonych porów, które skutecznie kompensują ciśnienie krystalizacji lodu [Babińska, 2011].

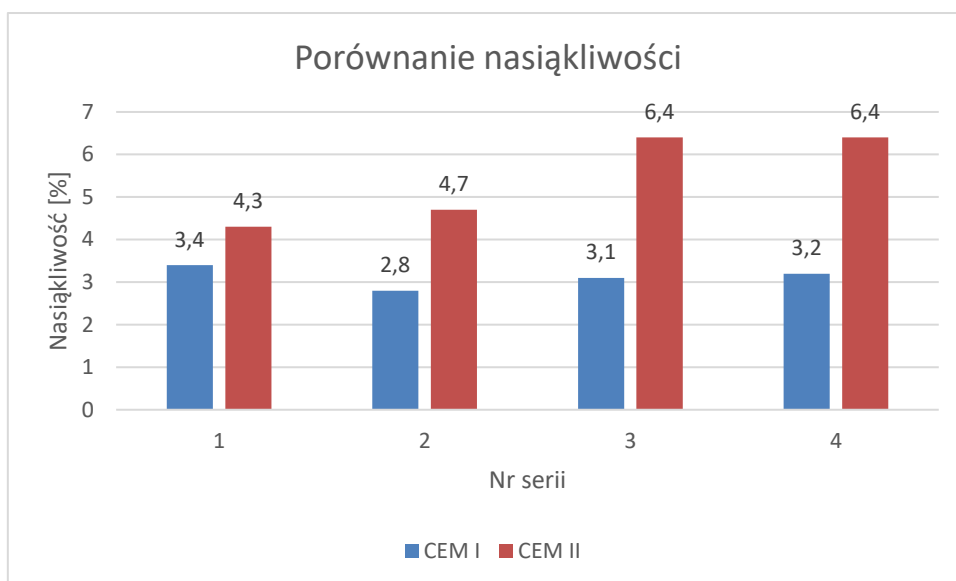
Badania nasiąkliwości i podciągania kapilarnego wykazały złożony wpływ nanocelulozy na transport wilgoci. Włókna nanocelulozowe są z natury hydrofilowe, co mogłoby sugerować zwiększenie chłonności betonu. Rzeczywiście, w betonach z CEM II odnotowano niewielki wzrost nasiąkliwości. Jednakże, w przypadku CEM I nasiąkliwość pozostała na niskim poziomie (<5%). W badaniu podciągania kapilarnego, przy wyższych zawartościach włókien (0,6% i 1,0%), zaobserwowano przyspieszoną absorpcję wody w pierwszej dobie badania. Może to wynikać z tworzenia się ścieżek perkolacji wzdłuż włókien lub zwiększonej porowatości otwartej w strefie kontaktowej.

Analiza struktury porów powietrznych (metodą mikroskopową) wykazała wskaźnik rozmieszczenia porów ($\bar{L}$) w zakresie 0,208–0,287 mm. Wartości te wskazują na potencjalnie nierównomierny rozkład porów, co może być sygnałem ostrzegawczym w kontekście długoterminowej trwałości, mimo pozytywnych wyników badań bezpośrednich mrozoodporności dla większości serii.



Rysunek 6. Badanie nasiąkliwości

Źródło: własne.



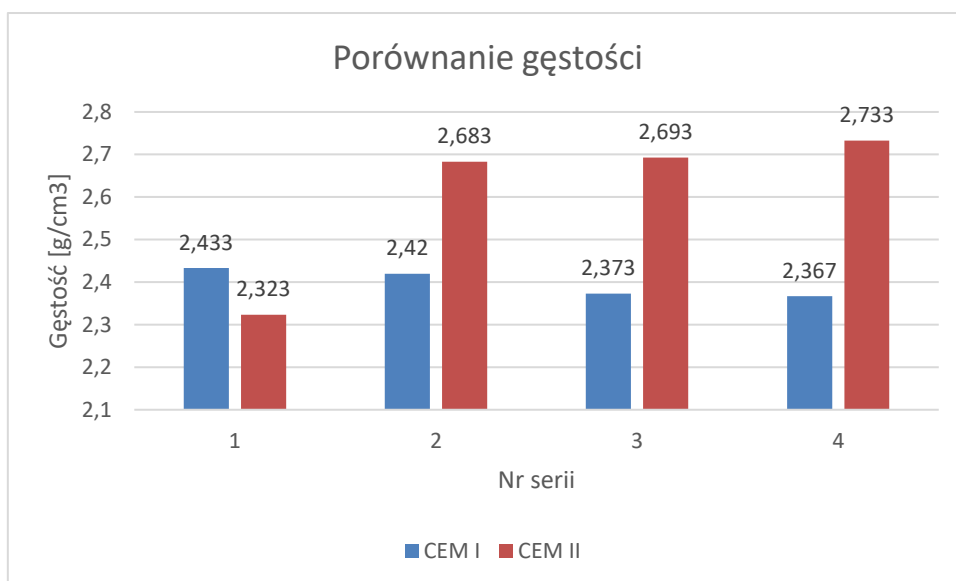
Rysunek 7. Porównanie wyników nasiąkliwości

Źródło: własne.



Rysunek 8. Badanie gęstości

Źródło: własne.



Rysunek 9. Porównanie wyników gęstości

Źródło: własne.



Rysunek 10. Badanie wytrzymałości na ściskanie

Źródło: własne.

		Nr serii			
		1	2	3	4
Nr testu	1	89,2	108,7	94,2	88,6
	2	87,5	110,4	90,5	92,6
	3	90,8	108,4	86,7	88,1
Średnia		89,2	109,2	90,5	89,7
Klasa betonu		C 70/85	C 90/105	C 70/85	C 70/85

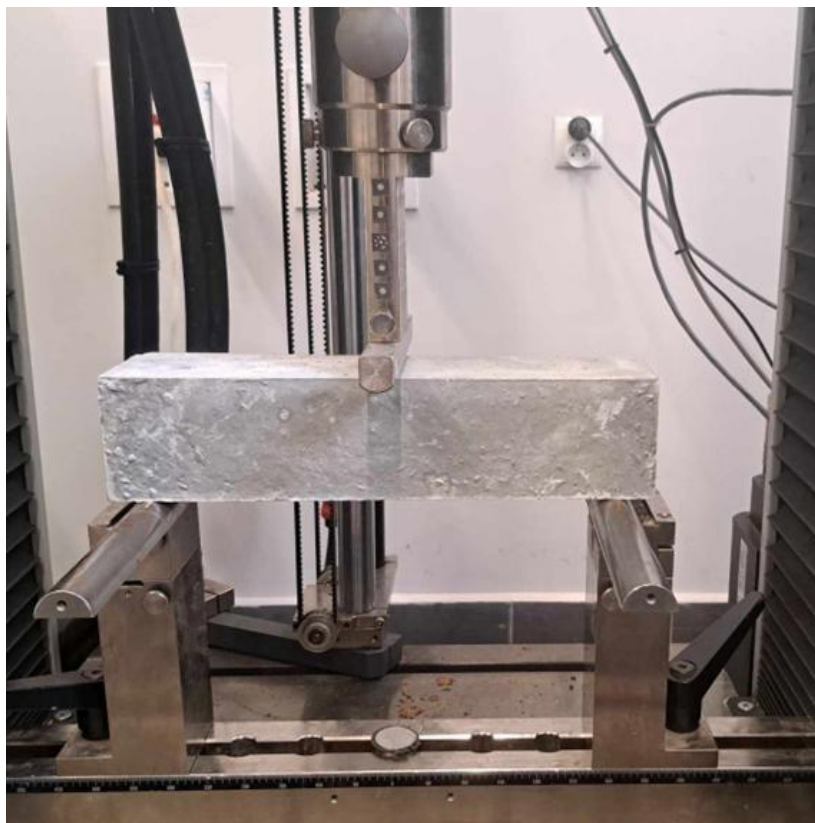
Rysunek 11. Wyniki wytrzymałości na ściskanie stwardniałego betonu dla CEM I 42,5 [MPa]

Źródło: własne.

		Nr serii			
		1	2	3	4
Nr testu	1	100,6	92,6	92,4	82,2
	2	97,9	98,2	93,9	84,9
	3	96,2	88,4	94,7	84,5
Średnia		98,2	95,4	93,7	83,9
Klasa betonu		C 70/85	C 70/85	C 70/85	C 60/75

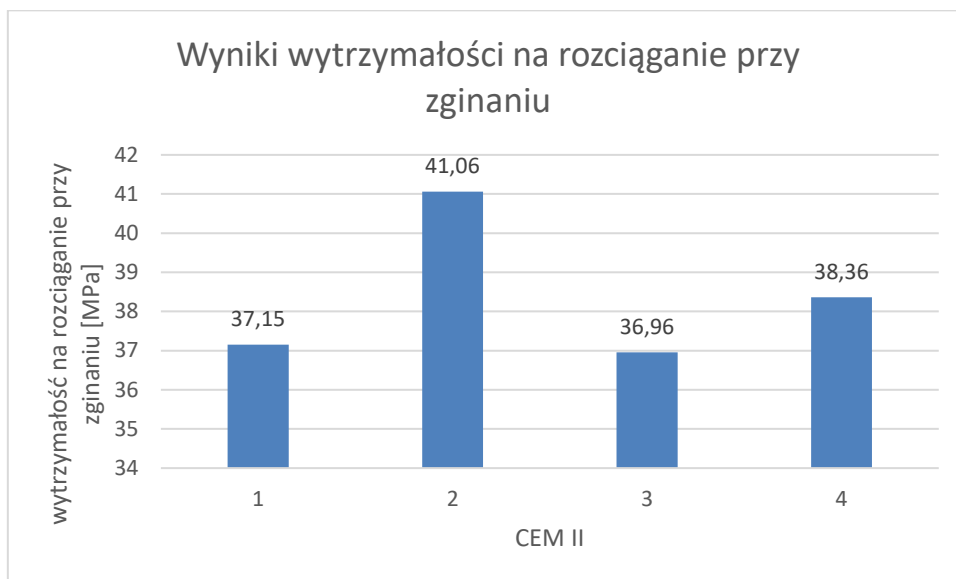
Rysunek 12. Wyniki wytrzymałości na ściskanie stwardniałego betonu dla CEM II 42,5 [MPa]

Źródło: własne.



Rysunek 13. Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu

Źródło: własne.



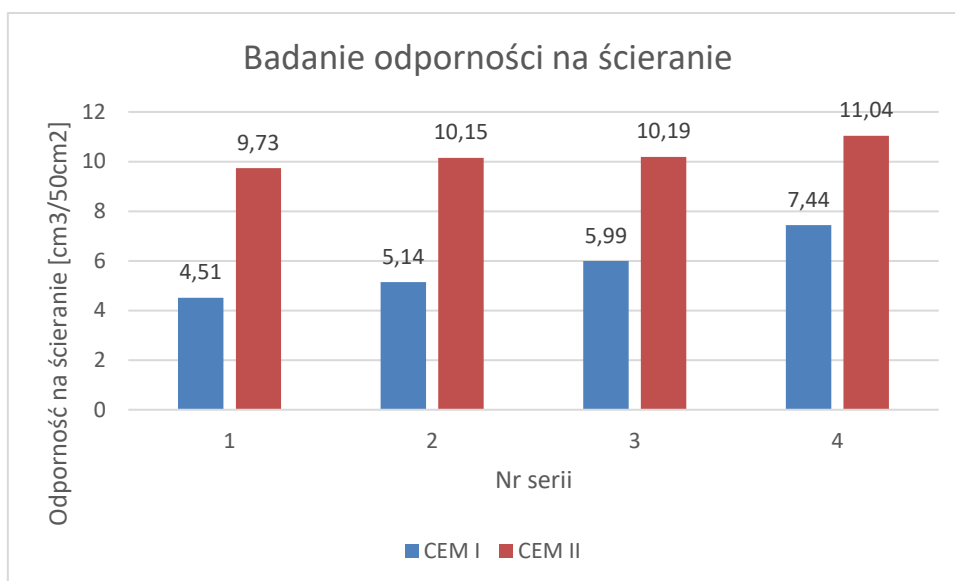
Rysunek 14. Wyniki wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu

Źródło: własne.



Rysunek 15. Badanie odporności na ścieranie

Źródło: własne.



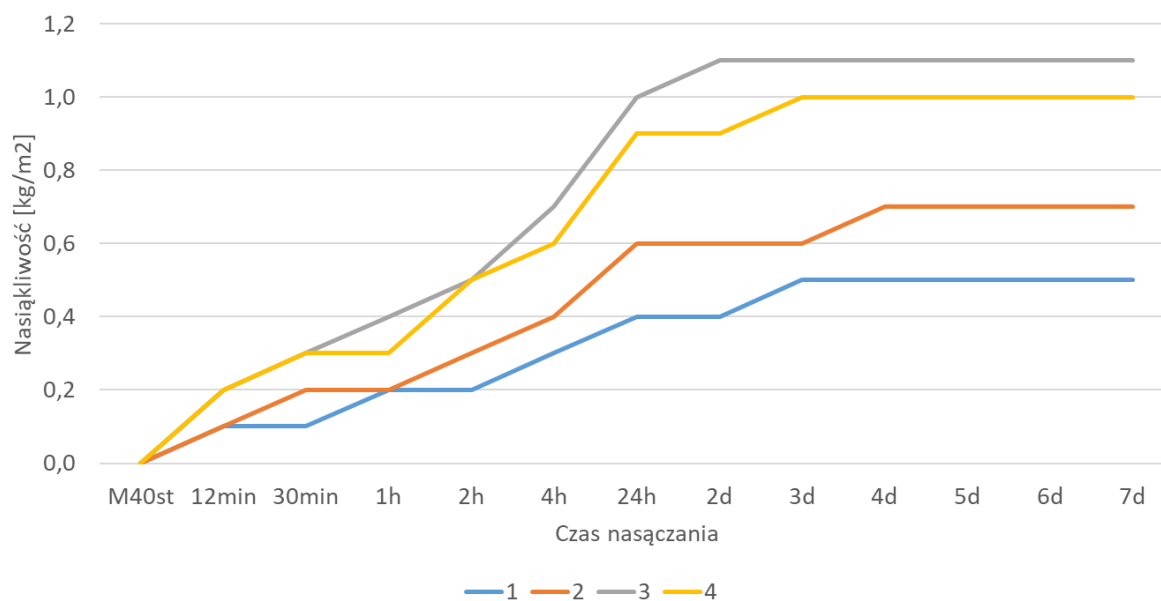
Rysunek 16. Porównanie wyników odporności na ścieranie

Źródło: własne.



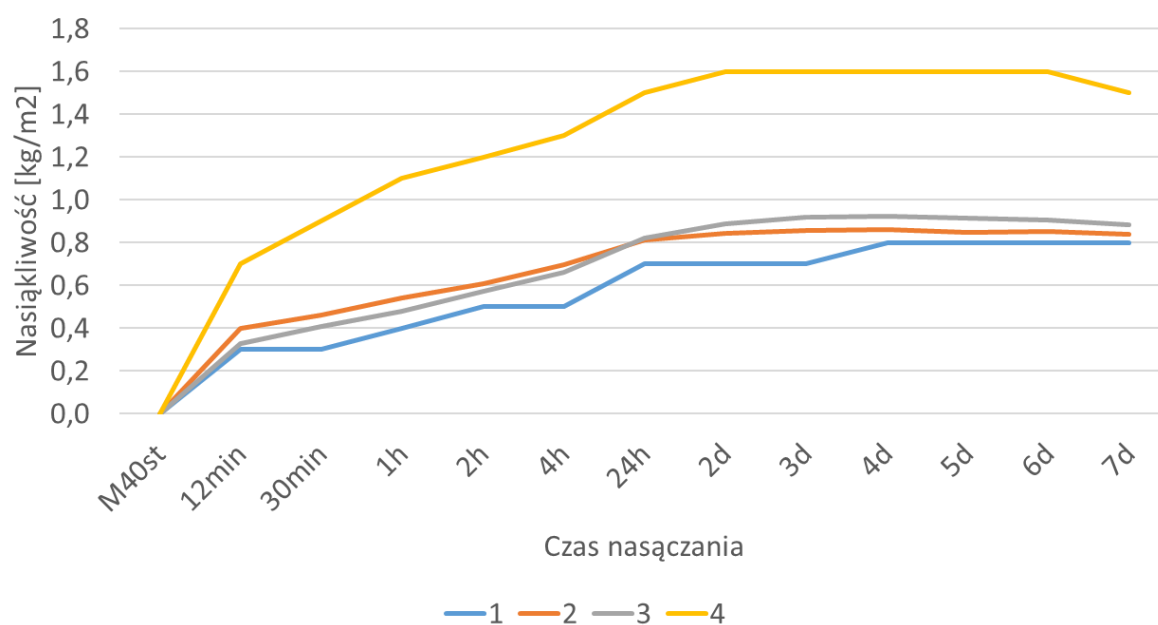
Rysunek 17. Badanie podciągania kapilarnego

Źródło: własne.



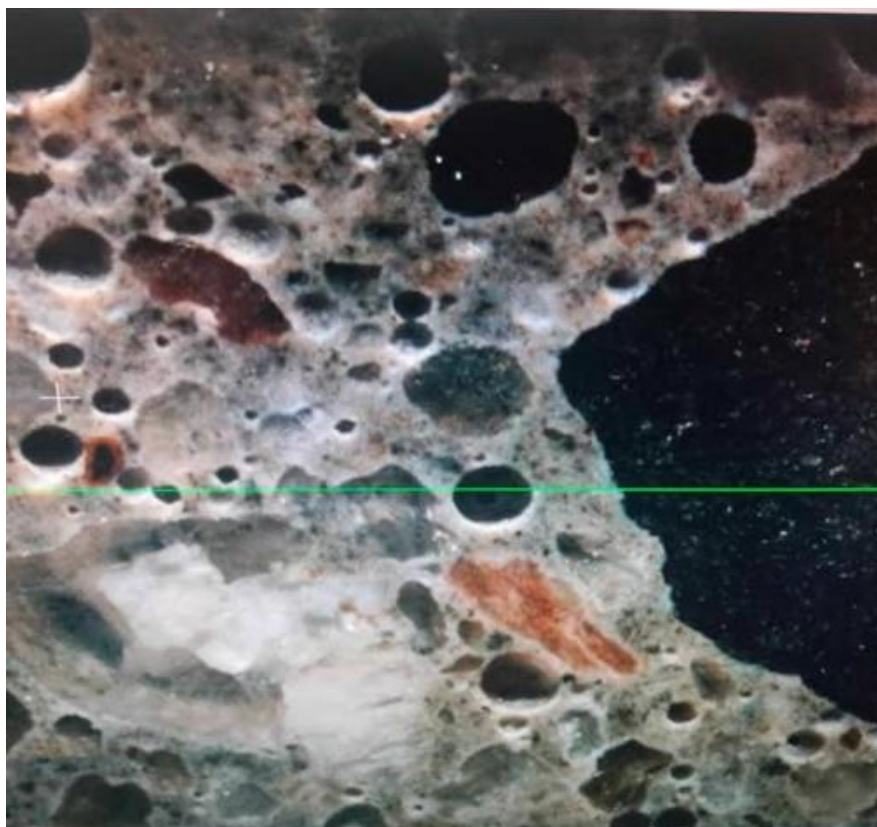
Rysunek 18. Wyniki podciągania kapilarnego dla serii CEM I

Źródło: własne.



Rysunek 19. Wyniki podciągania kapilarnego dla serii CEM II

Źródło: własne.

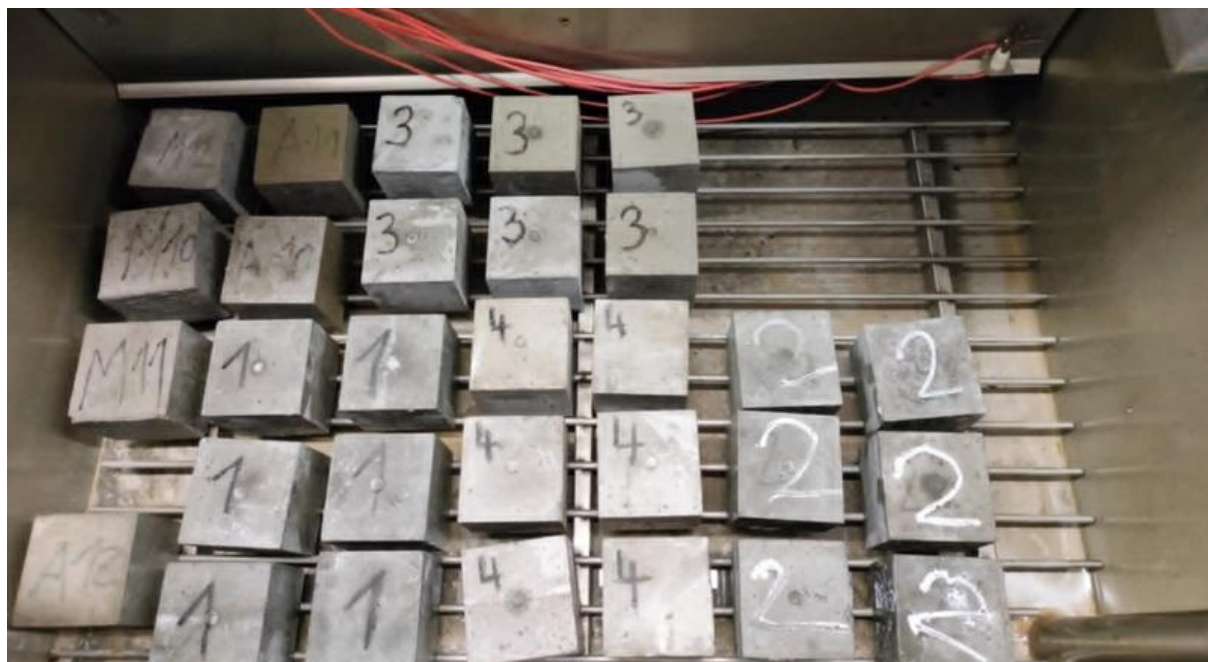
**Rysunek 20. Charakterystyka porów powietrznych**

Źródło: własne.

Seria betonu	1	2	3	4	
Zawartość zaczynu cementowego w betonie P=	29.40	29.60	29.70	29.60	%
Całkowita zawartość powietrza A=	2.62	2.51	2.20	2.02	%
Zawartość mikroporów A_{300} =	0.66	0.92	0.61	1.00	%
Całkowita liczba zmierzonych cięciw N=	469	427	389	394	
Powierzchnia właściwa porów α =	26.77	30.13	25.18	36.01	mm ⁻¹
Stosunek zaczyn/powietrze R=	11.23	11.77	13.48	14.65	
Wskaźnik rozmieszczenia porów L=	0.249	0.226	0.287	0.208	mm

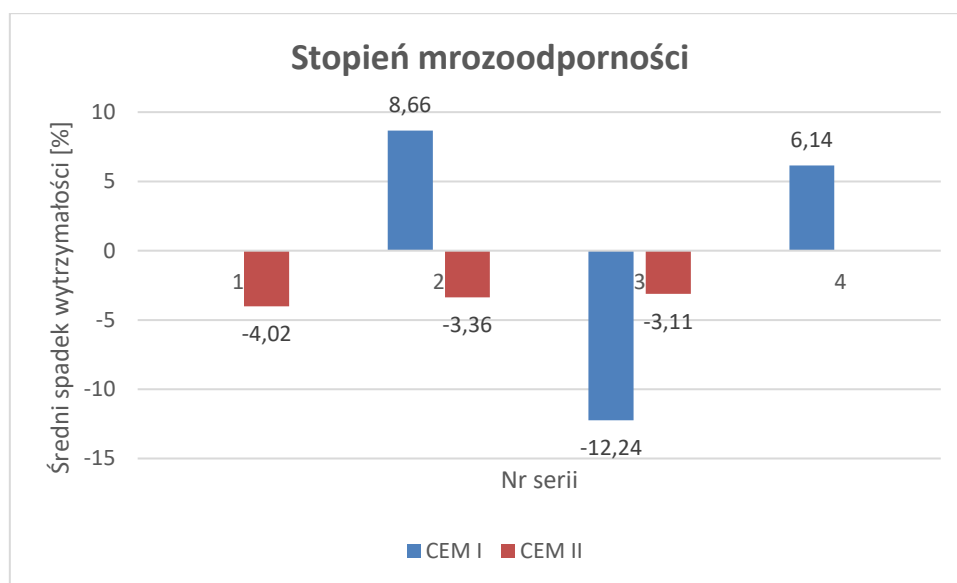
Rysunek 21. Wyniki charakterystyki porów powietrznych

Źródło: własne.



Rysunek 22. Próbkki umieszczone w komorze do badania mrozoodporności

Źródło: własne.



Rysunek 23. Porównanie wyników mrozoodporności

Źródło: własne.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy uzyskanych wyników stwierdzono, że wpływ włókien nanocelulozy na urabialność mieszanki SCC jest ściśle determinowany przez rodzaj zastosowanego cementu. W przypadku cementu portlandzkiego (CEM I) dodatek włókien pogarszał płynność, natomiast przy zastosowaniu cementu popiołowego (CEM II/B-V) zaobserwowano poprawę właściwości reologicznych, co wskazuje na większą kompatybilność tego spoiwa z badanym mikrobrojeniem. Analiza parametrów wytrzymałościowych wykazała, że najkorzystniejsze rezultaty uzyskano przy dodatku nanocelulozy w ilości 0,3% masy spoiwa. Taka zawartość pozwoliła na wzrost wytrzymałości

na ściskanie o 17% oraz na zginanie o 9,5%, przy jednoczesnym zachowaniu akceptowalnej urabialności. Wykazano również, że dalsze zwiększanie ilości włókien nie przynosiło proporcjonalnych korzyści, a mogło prowadzić do problemów z jednorodnością i zagęszczeniem mieszanki.

Istotnym aspektem jest także wpływ dodatku na system napowietrzenia, który zależy od matrycy cementowej. W betonach z CEM I włókna wspomagały napowietrzenie i poprawiały mrozoodporność, podczas gdy w betonach z CEM II powodowały spadek zawartości powietrza, co implikuje konieczność indywidualnego doboru domieszek. Ponadto obserwacje makroskopowe potwierdziły, że dodatek nanocelulozy, szczególnie w ilości 0,3%, skutecznie ograniczał zjawisko „bleedingu”, przekładając się na wyższą jednorodność i lepszą jakość powierzchni betonu. Podsumowując, włókna nanocelulozy stanowią obiecującą, ekologiczną alternatywę dla włókien syntetycznych w technologii betonów samozagęszczalnych, wpisując się w nurt zrównoważonego budownictwa. Dalsze kierunki badań powinny koncentrować się na optymalizacji procesu dyspersji włókien w skali przemysłowej oraz analizie długoterminowej trwałości w środowiskach agresywnych chemicznie.

Bibliografia:

1. Babińska J. (2011). Badania porowatości w ocenie mrozoodporności betonów napowietrzanych. Warszawa: Wydawnictwo Instytutu Techniki Budowlanej.
2. Bartos P.: „Workability of Flowing Concrete: Assessment by a Free Orifice Rheometer”, Concrete, 1978, Tom 12, Nr 10, strony od 28 do 30.
3. Fahma F., Febiyanti I., Lisdayana N., Wayan-Arnata I. (2021). Nanocellulose as a new sustainable material for various applications: a review. Archives of Materials Science and Engineering.
4. Heidelberg Materials Polska. Popiół lotny jako dodatek typu II w składzie betonu. Tom A8. Materiały producenta.
5. Okamura H.; Ouchi M.: „Self-Compacting Concrete”, Journal of Advanced Concrete Technology, 2003, Tom 1, Nr 1, strony od 5 do 15.
6. PN-88/B-06250, „Beton zwykły”, 2003.
7. PN-B-06265:2018-10. Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność. Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A1:2016-12.
8. PN-EN 197-1:2012. Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
9. PN-EN 206-1:2003. Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
10. PN-EN 12350-1. Badania mieszanki betonowej. Część 1: Pobieranie próbek.
11. PN-EN 12350-6. Badania mieszanki betonowej. Część 6: Gęstość.
12. PN-EN 12350-7. Badania mieszanki betonowej. Część 7: Badanie zawartości powietrza. Metody ciśnieniowe.
13. PN-EN 12350-8. Badania mieszanki betonowej. Część 8: Beton samozagęszczalny — Badanie metodą rozplywu stożka.
14. PN-EN 12390-5:2019-08 „Badania betonu -- Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań”, 2019.
15. PN-EN 12390-7:2019-08. Badania betonu. Część 7: Gęstość betonu.

16. PN-EN 13057, “Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych -- Metody badań -- Oznaczanie odporności na absorpcję kapilarną”, 2004.
17. PN-EN 13791. Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych.
18. PN-EN 13892-3, “Metody badania materiałów na podkłady podłogowe -- Część 3: Oznaczanie odporności na ścieranie według Bohmego”, 2015.
19. PN-EN 14157, „Metody badań kamienia naturalnego - Oznaczanie odporności na ścieranie”, 2017.
20. PN-EN 206, „Beton -- Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność”, 2014.
21. PN EN 480-11, “Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu - Metody badań - Część 11: Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie.”, 2008.
22. Zych T. (2010). Współczesny fibrobeton – możliwość kształtowania elementów konstrukcyjnych i form architektonicznych. Architektura. Czasopismo Techniczne, nr 107, s. 372–386.

4. AUTOKLAWIZOWANE MATERIAŁY WAPIENNO – KRZEMIONKOWE Z UDZIAŁEM SZKŁA ODPADOWEGO

Katarzyna Borek

Politechnika Świętokrzyska

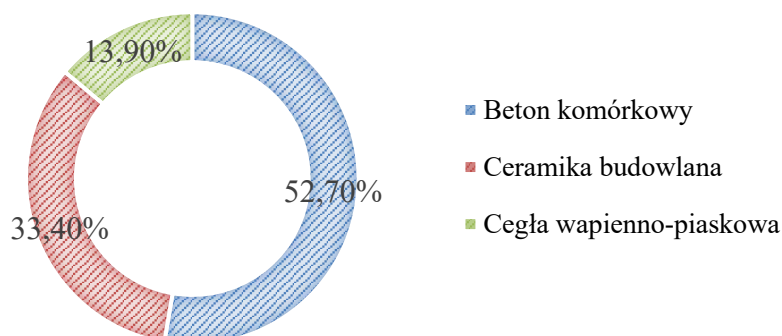
ul. Al. 1000-lecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

Wydział Budownictwa i Architektury

E-mail: kkomisarczyk@tu.kielce.pl

1. Wstęp

Rozwój budownictwa kubaturowego oraz rosnące zapotrzebowanie na budynki mieszkalne wpływa na zwiększenie produkcji m.in. materiałów ściennych murowych. Według danych GUS (Głównego Urzędu Statystycznego) z 2018 roku (rys. 1.) [GUS, 2020] do najbardziej popularnych należą cegły wykonane z betonu komórkowego, ceramiki i silikatów. Dwa spośród wymienionych materiałów łączy charakterystyczny sposób ich wytwarzania. Mowa o grupie materiałów poddawanych obróbce hydrotermalnej i należącym do nich: autoklawizowanym betonie komórkowym oraz wyrobach wapienno-piaskowych.



Rysunek 1. Udział materiałów ściennych w Polsce w 2018 r. wg danych GUS [GUS, 2020]

Wyroby wapienno-piaskowe charakteryzują się dużą wytrzymałością na ściskanie, bardzo dobrą izolacyjnością akustyczną, wysoką odpornością na korozję chemiczną i biologiczną oraz ognioodpornością, są mrozoodporne i posiadają dużą zdolność do akumulacji ciepła. Biorąc pod uwagę wykorzystanie wyłącznie naturalnych surowców, bez dodatków chemicznych oraz dzięki niskiemu zużyciu energii podczas procesu produkcji są w pełni ekologiczne. Silikaty, produkowane są z trzech podstawowych surowców: piasku (92%), wapna (8%) i wody. Piasek kwarcowy, jako nośnik krystalicznej krzemionki pełni rolę kruszywa, natomiast ulegające hydratacji wapno palone jest spoiwem. Na etapie formowania półfabrykatów, wapno wraz z wodą zapewniają odpowiednie właściwości reologiczne masie produkcyjnej. W trakcie procesu autoklawizacji wapno jako nośnik jonów Ca i anionów OH⁻, po uwodnieniu reaguje z jonami krzemianowymi, pochodzącymi z rozpuszczania SiO₂, tworząc produkty należące do grupy uwodnionych krzemianów wapnia [Gawlicki, 2013]. Uwagę należy zwrócić na drobnoziarnisty kwarc pochodzący z piasku, który w temperaturze otoczenia

jest nierozpuszczalny, staje się chemicznie aktywny i reaguje z uwodnionym wapnem CaOH_2 [Kondo, 2008] tworząc uwodnione krzemiany wapnia dopiero podczas obróbki hydrotermalnej, w warunkach podwyższonej temperatury i ciśnienia.

W warunkach hydrotermalnych z układu $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ powstaje szereg związków - faz. Wyniki badań tego układu, oparte nie tylko na identyfikacji powstałych produktów, ale także na określeniu relacji ilościowej są istotne dla zrozumienia tworzenia się cegieł autoklawizowanych. W efekcie syntezy na powierzchni ziaren kwarcu tworzy się na początku bogaty w wapń, uwodniony krzemian wapnia, odporny i nierozpuszczalny w wodzie, słabo wykryształizowany, o prawie bezpostaciowej strukturze [Einar, 1938], [Aitken, 1960]. W miarę postępu procesu syntezy powstaje tobermoryt ($\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) o uporządkowanej strukturze i stabilnym składzie chemicznym. Przy stosunku molowym CaO/SiO_2 bliskim 1, powyżej temperatury 150°C może wytworzyć się ksonotlit ($\text{Ca}_6\text{Si}_6\text{O}_{17}(\text{OH})_2$) [Nocuń- Wczelik, 1999]. W wyrobach wapienno-piaskowych istotne jest powstanie faz o wyższym stopniu krystalizacji, takich jak tobermoryt czy ksonotlit [Drochytka, 2020], [Černý, 2018], dzięki czemu uzyskuje się materiały o większej wytrzymałości na ściskanie i wyższej gęstości.

W literaturze znane są sposoby modyfikacji podstawowego składu mieszaniny surowcowej [Komisarczyk, 2018], [Stepień, 2019], w którym wymianie ulegało zarówno wapno, jak i piasek kwarcowy, a więc cała mieszanina surowcowa. Takie podejście zostało wykorzystane przez Nowek [Nowek, 2014], [Nowek, 2016]. Do produkcji „białej cegły” zastosowano odpady z tworzyw sztucznych (polistyren wysokoudarowy HIPS oraz akrylonitryl-butadieno-styren ABS) w formie: regranulatu, przemiału i proszku. Za poprawę wytrzymałości na ściskanie w stosunku do próbek referencyjnych odpowiada wykorzystanie 15% (wagowo) regranulatu HIPS. Z kolei ABS zablokowało podciągnięcie kapilarne. Wykorzystanie polimerów spowodowało zmniejszenie gęstości nasypowej próbek, a także obniżenie ich nasiąkliwości. Niestety, zastosowanie tworzyw sztucznych do produkcji autoklawizowanych wyrobów wapienno-piaskowych, negatywnie wpływa na ich ekologiczny charakter.

Bezbarwne szkło piankowe w postaci granulatu będącego produktem recyklingu stłuczki szklanej przedstawiono w badaniach Jasińskiej [Jasińska, 2018]. Badania przeprowadzono na granulacie o uziarnieniu 0,25-0,5 mm, którego udział wahał się od 5 do 30% w stosunku do całej masy wapienno-piaskowej. Dodatek granulatu szkła piankowego w głównej mierze wpłynął na zmniejszenie gęstości objętościowej gotowych wyrobów wapienno-krzemionkowych. Jednocześnie wraz ze wzrostem zawartości granulatu w masie próbki odnotowano spadek wytrzymałości na ściskanie gotowych produktów, co wyjaśniono tworzeniem się mniejszej ilości fazy C-S-H w odniesieniu do próbek referencyjnych.

W literaturze [Czapik, 2025], [Borek 2024], [Borek 2022] znane są również badania obejmujące charakterystykę wyrobów wapienno – piaskowych, w których podstawowe źródło aktywnej krzemionki – piasek – zastąpiono opakowaniowym szkłem odpadowym, uzyskanym z rozdrobnienia słoików pochodzących z gospodarstw domowych oraz butelek w kolorze zielonym i brązowym. Celem badań jest sprawdzenie możliwości uzyskania materiałów wapienno- krzemionkowych o zbliżonych lub lepszych właściwościach w stosunku do produktów referencyjnych. Niniejszy artykuł jest uzupełnieniem wyników badań przedstawianych w dotychczasowych publikacjach

2. Materiały i Metody

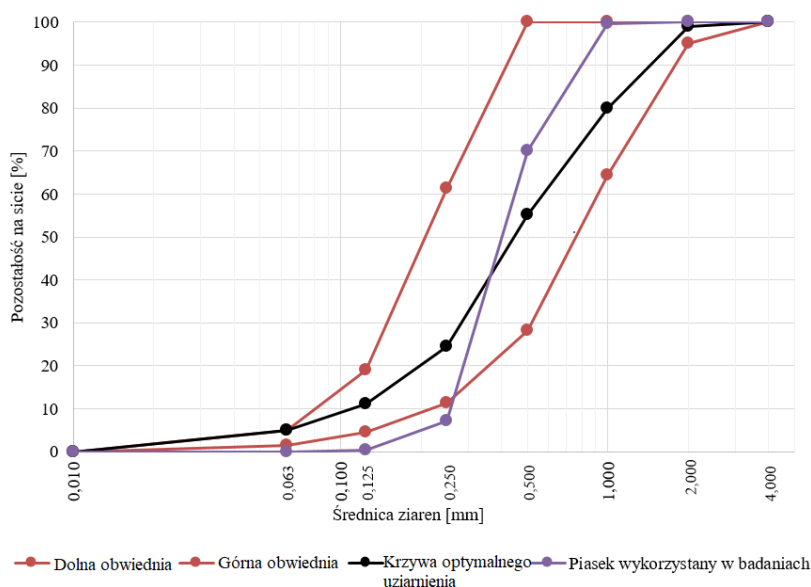
2.1. Materiały

2.1.1. Wapno

W badaniach wykorzystano wapno palone mielone z Zakładu Sitkówka Trzuskawica A CRH Company (Polska). Spełnienie wymagań dla wapna palonego stosowanego do produkcji wyrobów wapienno-krzemionkowych jest istotne przede wszystkim ze względu na skład chemiczny. Im mniejsza zawartość CaO, tym mniejsza prędkość reakcji hydratacji. Udział MgO nieprzekraczający 1,5% wagowo uznaje się za nieszkodliwy, natomiast nadmierna ilość prowadzi do opóźnienia przebiegu hydratacji oraz do pęcznienia i występowania odprysków podczas autoklawizacji wyrobów. W pracy wykorzystano wapno, którego zawartość $\text{CaO} + \text{MgO} \geq 91\%$, $\text{MgO} \leq 2,0\%$, $\text{CO}_2 \leq 3,0\%$, $\text{SO}_3 \leq 0,50\%$. Biorąc pod uwagę właściwości użytkowe wapna, gęstość nasypowa = $0,59 \text{ kg/dm}^3$, a reaktywność wapna $60^\circ \text{C} \leq 2,0$ minuty.

2.1.2. Piasek kwarcowy

Za właściwe w produkcji wyrobów wapienno – piaskowych uznaje się piasek kwarcowy o ciągłej krzywej uziarnienia, bez wyraźnej dominacji którejkolwiek z frakcji ziarnowej. Oznaczenie składu ziarnowego dla piasku kwarcowego wykonano zgodnie z normą PN-EN 933-1:2012 [PKN, 2012] i przedstawiono na rysunku 2. Na wykresie krzywa oznaczona kolorem czarnym określa optymalny rozkład frakcji. Dopuszczalny zakres określają krzywe oznaczone kolorem czerwonym. Krzywą dla piasku zastosowanego w badaniach oznaczono kolorem fioletowym. Dodatkowo piasek kwarcowy spełnia ilościowe wymagania dotyczące składu chemicznego [Borek, 2023]. Gęstość piasku wynosi 2650 kg/m^3 .



Rysunek 2. Zestawienie krzywych uziarnienia piasku kwarcowego

Źródło: opracowanie własne.

2.1.3. Woda

Jako składnik mieszanki wapienno – krzemionkowej zastosowano wodę pitną, co jest zgodne z normą PN-EN 1008:2004 [PKN, 2004].

2.1.4. Odpadowe szkło opakowaniowe

W niniejszej pracy do badań wykorzystano szkła opakowaniowe pochodzące z trzech źródeł. Szkło wąskootworowe z butelek w kolorze zielonym i brązowym oraz szkło szerokootworowe pochodzące z bezbarwnych słoików. Zarówno butelki jak i słoiki stanowiły odpad z opakowań znajdujących się w gospodarstwie domowym. Ze stałych, wyjściowych materiałów za pomocą mechanicznego kruszenia uzyskano stłuczkę szklaną. Uziarnienie dostosowano do rozkładu frakcji piasku kwarcowego, ponieważ wymiany kruszywa dokonywano w ilości 1:1 wagowych. Skład chemiczny przedstawiono w pracy [Borek, 2024].

2.2. Metody

W mieszaninie wapienno – krzemionkowej, kruszywo jakim jest piasek kwarcowy zastąpiono odpadowym szkłem opakowaniowym w trzech kolorach (bezbarwny, zielony i brązowy). Sposób przygotowania mieszanki oraz proces produkcji opisano w pracy [Borek, 2022].

Próbki poddano badaniom pod kątem cech fizycznych i mechanicznych. W każdym przypadku badania przeprowadzono na 6 próbkach tej samej serii. Za wynik oznaczenia przyjęto średnią arytmetyczną z otrzymanych wartości.

Wytrzymałość na ściskanie zbadano zgodnie z normą PN-EN 772-1:2011 [PKN, 2011], po 21 dniach od procesu autoklawizacji, za pomocą prasy hydraulicznej Controls model 50-C9030.

Gęstość objętościową stanowiącą stosunek masy suchego materiału do jego objętości wraz z zawartymi w niej porami, badano zgodnie z metodologią opisaną w pracy [Borek, 2023]. Obliczenia wykonano wykorzystując równanie (1) i (2).

$$\rho = \frac{m_d}{V_0}; [\text{kg/m}^3] \quad (1)$$

gdzie: m_d - masa próbki suchej,

V_0 - objętość próbki wraz z porami.

$$V_0 = \frac{m_1 - m_2}{\rho_w} \quad (2)$$

gdzie: m_1 - masa próbki nasyconej, zważonej w powietrzu, [g]

m_2 - masa próbki nasyconej, zważonej w wodzie, [g]

ρ_w – gęstość wody, [g/cm^3]

Porowatość otwarta określa stosunek objętości porów otwartych w materiale porowatym do jego objętości pozornej, wyrażony w procentach. Porowatość otwarta ma istotne znaczenie dla oceny jakości wyrobów ze względu na jego powiązanie z innymi właściwościami, np. wytrzymałość mechaniczna, przewodnictwo cieplne, przepuszczalność dla gazów, odporność na korozję. Porowatość otwartą obliczono na podstawie wyników gęstości objętościowej, wykorzystując poniższe równanie (3):

$$P_o = \frac{m_1 - m_d}{m_1 - m_2}; [\%] \quad (3)$$

Analizę mikrostruktury badanych materiałów wykonano przy pomocy elektronowego mikroskopu skaningowego Quanta FEG 250 firmy FEI. Pomiary były dokonywane w niskiej próżni. Prężność pary wodnej wynosiła około 30 Pa. Napięcie stosowane podczas badania wynosiło 5kV. Próbek nie napyłano. Materiał do badań wyrobów wapienno – krzemionkowych został pobrany ze zniszczonych próbek po przeprowadzonym teście wytrzymałości na ściskanie. Badania wykonywano zatem na okruchach wyrobów wapienno – krzemionkowych.

3. Wyniki

Skład mieszanek wapienno – krzemionkowym z udziałem szkieł odpadowych przedstawiono w tabeli 1. Oznaczenie R przyporządkowano próbkom o klasycznym składzie (próbki referencyjne). G33 określono próbki z ilością 33% odpadowego szkła opakowaniowego, kolejno próbki z ilością 66% odpadowego szkła opakowaniowego – G66 oraz G100 próbki, w których dokonano całkowitej wymiany piasku kwarcowego. Wymiany kruszywa dokonano w stosunku 1:1 uwzględniając frakcje w klasycznej mieszance. W eksperymencie stosowano szkło w kolorze bezbarwnym (WG), brązowym (BG) i zielonym (GG). Niezależnie od stosowanego koloru szkła, skład masowy mieszanek był jednakowy.

Tabela 1. Skład masowy mieszanek modyfikowanych odpadowym szkłem opakowaniowym

Seria	Udział szkła odpadowego		Udział piasku		Udział wapna	
	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]
R	0,00	0,00	92,00	230,00	8,00	18,40
G33	30,36	75,90	61,64	154,10	8,00	18,40
G66	60,72	151,80	31,28	78,20	8,00	18,40
G100	92,00	230,00	0,00	0,00	8,00	18,40

Źródło: [Borek, 2024].

Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że niezależnie od barwy szkła, próbki wapienno – krzemionkowe wykazują wyższe parametry wytrzymałości na ściskanie, w stosunku do próbek R (3,81 MPa). Próbki zawierające bezbarwne szkło odpadowe wykazują najwyższe wartości wytrzymałości na ściskanie, a receptura WG100 charakteryzuje się najlepszym wynikiem spośród wszystkich analizowanych. Średnia wytrzymałość na ściskanie próbek WG100 wynosi 10,95 MPa i jest o 11,05% i 22,90% wyższa w stosunku do próbek BG100 i GG100 [Borek, 2024].

Wszystkie modyfikowane wyroby wapienno – krzemionkowe wskazują na niższe parametry gęstości objętościowej, w stosunku do próbek R (1957 kg/m³). Próbki z udziałem bezbarwnego szkła odpadowego wykazują najniższe wartości gęstości objętościowej. WG100 charakteryzują się najlepszym wynikiem spośród wszystkich analizowanych. Średnia gęstość objętościowa dla WG100 wynosi 1631 kg/m³ i jest o 4,23% i 10,58% niższa w stosunku do próbek BG100 i GG100. Gęstość objętościowa próbek WG100 jest również o 16,66% niższa w stosunku do próbek o klasycznym składzie. Najwyższy średni wynik spośród modyfikowanych próbek, wykazują te, z udziałem zielonego szkła odpadowego GG33 = 1950 kg/m³ [Borek, 2024].

Porowatość otwarta różni się w zależności od stosowanego koloru szkła. Niezależnie jednak od barwy szkła, próbki wapienno – krzemionkowe. Wskazują na wyższe parametry porowatości otwartej w stosunku do próbek R (9,10%). W grupie próbek modyfikowanych G33 i G66 najniższą absorpcję wykazują próbki z udziałem szkła zielonego. W przypadku całkowitej wymiany piasku kwarcowego na szkło odpadowe najniższą wartość analizowanego parametru wskazują próbki BG100 = 22,33%. Uzyskane wyniki są porównywalne z GG100 = 22,47%.

Analizując uzyskane wartości, można również stwierdzić, że niezależnie od koloru stosowanego szkła wraz ze wzrostem udziału materiału odpadowego w próbce wzrasta porowatość otwarta. Zaobserwowany trend porowatości otwartej jest zgodny z trendem absorpcji wody.

Tabela 2. Wyniki wytrzymałości na ściskanie, gęstości objętościowej oraz porowatości otwartej

Seria	Ilość modyfikatora [%]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Gęstość objętościowa [kg/m ³]	Porowatość otwarta [%]
R	0	3,81	1957	17,86
WG	33	5,21	1900	19,90
	66	6,51	1813	20,99
	100	10,95	1631	26,08
BG	33	4,98	1878	20,76
	66	6,36	1857	21,5
	100	9,86	1703	22,33
GG	33	4,93	1950	19,77
	66	6,10	1885	19,97
	100	8,91	1824	22,47

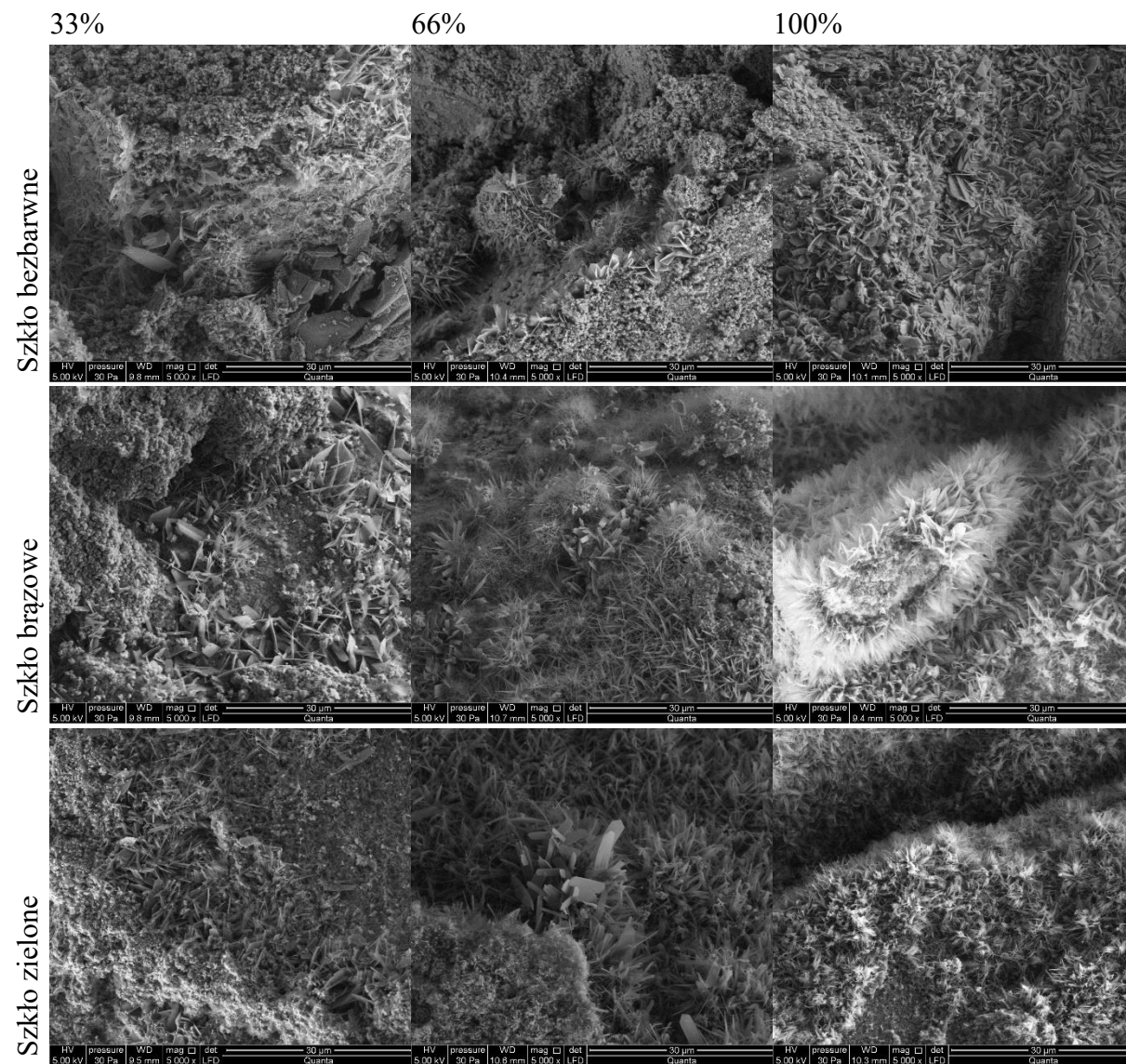
Źródło: opracowanie własne.

Zestawienie wybranych obrazów morfologii uwodnionych krzemianów wapnia z udziałem odpadowych szkieł w kolorze bezbarwnym, brązowym i zielonym w powiększeniu 5 000 x przedstawiono na rysunku 3. W każdym badanym przypadku, niezależnie od koloru oraz ilości zastosowanego szkła odpadowego, stwierdzono występowanie uwodnionych krzemianów wapnia charakterystycznych dla autoklawizowanych wyrobów wapienno-piaskowych. Produkty syntezy wytworzyły się zarówno na powierzchni ziaren piasku/szkła jak i w przestrzeniach pomiędzy ziarnami. W zależności od ilości zastosowanego zamiennika piasku kwarcowego widoczny jest różny stopień krystalizacji uwodnionych krzemianów wapnia oraz inny poziom zagęszczenia faz. Większy udział ilości modyfikatora w badanych próbkach wpływa na gęstsze upakowanie oraz wyższy stopień krystalizacji powstałych produktów syntezy hydrotermalnej.

Obraz mikroskopowy SEM autoklawizowanych wyrobów wapienno-krzemionkowych ze 100%-ym udziałem bezbarwnego szkła opakowaniowego, wskazuje na powstanie uwodnionych krzemianów wapnia o znacznym stopniu krystalizacji. Powszechnie wiadomo,

że tworzenie tobermorytu, o wzorze chemicznym $C_5S_6H_5$ wpływa na wzrost wytrzymałości na ściskanie gotowych wyrobów [Yazici, 2013], co znajduje odzwierciedlenie w otrzymanych wynikach badań [Borek, 2022].

Udział odpadowego szkła opakowaniowego



Rysunek 3. Obrazy mikroskopowe SEM próbek wapienno-krzemionkowych z udziałem szkła bezbarwnego, brązowego i zielonego w ilościach 33, 66 i 100% w powiększeniu 5 000 x.

Źródło: opracowanie własne.

Według Černý'ego i in. [Černý, 2018], wysoka wytrzymałość materiałów autoklawizowanych może wynikać z obecności tobermorytu, którą można zwiększyć poprzez zastosowanie odpowiednich surowców. Efekt ten może być jednak osłabiony, gdy zastosowane surowce zwiększają porowatość materiału w strefie wokół ziaren, jak to może mieć miejsce w przypadku popiołu fluidalnego. W przypadku szkła bezbarwnego (WG) pory widoczne na zdjęciach SEM nie powodowały takiego efektu. Zastosowanie szkła odpadowego przyczyniło się do znacznego wzrostu wytrzymałości na ściskanie [Borek, 2022]. W przeprowadzonych

badaniach wzrost wytrzymałości nie wpłynął na wzrost gęstości materiału, co jest związane z tworzeniem się tobermorytu podczas procesu autoklawizacji [Wongkeo, 2012], [Wongkeo, 2010].

4. Podsumowanie

- 1) niezależnie od zastosowanego koloru szkła następuje wzrost wytrzymałości na ściskanie, przy jednoczesnym zmniejszeniu gęstości objętościowej oraz zwiększenie porowatości otwartej, w stosunku do próbek o klasycznym składzie;
- 2) wraz ze wzrostem zawartości odpadowych szkieł w próbkach autoklawizowanych, wytrzymałość na ściskanie i porowatość otwarta wzrasta, maleje natomiast gęstość objętościowa,
- 3) całkowita wymiana piasku kwarcowego w próbkach wapienno-krzemionkowych na bezbarwne szkło odpadowe (WG100) generuje wzrost wytrzymałości o ~187% w stosunku do próbek o klasycznym składzie (R). Zastosowanie szkła brązowego (BG) i zielonego w ilości 100% masy kruszywa zwiększa wytrzymałość na ściskanie-odpowiednio o ~159% i o ~134% w stosunku do próbek R;
- 4) modyfikacja próbek wapienno-krzemionkowych bezbarwnym szkłem odpadowym, generuje najniższą gęstość objętościową, najwyższą porowatość otwartą w stosunku do próbek z udziałem brązowego i zielonego szkła opakowaniowego. Zastosowanie szkła w kolorze bezbarwnym w ilości 100% masy kruszywa powoduje obniżenie gęstości objętościowej o 4,4% i 11,8% w stosunku do próbek BG100 i GG100;
- 5) wykorzystanie brązowego szkła opakowaniowego jako zamiennika piasku kwarcowego w próbkach wapienno-krzemionkowych, w najmniejszym stopniu wpływa na wzrost porowatości otwartej w stosunku do wyrobów GG i WG. Średnie wyniki porowatości otwartej dla próbek BG100 wskazują na niższą porowatość otwartą (o 0,6% i 16,8%) w stosunku do GG100 i WG100;
- 6) zastosowanie odpadowych szkieł opakowaniowych jako zamiennik piasku kwarcowego, niezależnie od koloru szkła, wpływa na powstanie produktów syntezy, charakterystycznych dla wyrobów wapienno – krzemionkowych, amorficznej fazy C-S-H oraz krystalicznej fazy tobermorytu;
- 7) uzyskane pomiary wytrzymałości na ściskanie, gęstości objętościowej i porowatości otwartej przy wymianie 33% i 66% kruszywa, niezależnie od koloru zastosowanej słuczki szklanej wykazują podobieństwa w wynikach. Całkowite zastąpienie piasku kwarcowego bezbarwnym szkłem odpadowym, spośród trzech zastosowanych rodzajów szkła, w największym stopniu wpływa na zmianę badanych cech fizyczno-mechanicznych i mikrostrukturalnych w stosunku do próbki referencyjnej.

Bibliografia:

1. Aitken A., Taylor H.F.W. (1960) Hydrothermal reactions in lime-quartz pastes. *Journal of Applied Chemistry*. 10(1), 7-15.
2. Borek K. (2024) Lime-silica products based on waste packaging glass. *Construction of Optimized Energy Potential*, 13, 1, 89-96. DOI:10.17512/bozpe.2024.13.10
3. Borek K. , Czapik P. (2022) Utilization of waste glass in autoclaved silica–lime materials. *Materials*, 15(2), 549, DOI:10.3390/ma15020549

4. Borek K., Czapik P., Dachowski R. (2023) Cement bypass dust as an ecological binder substitute in autoclaved silica–lime products. *Materials*, 16(1), 316. DOI:10.3390/ma16010316
5. Černý V., Drochytka R., Kulísek K., Húšť J. (2018) Influence of secondary raw materials on synthesis of tobermorite in lime-silicate composite. *Ce/Papers*. 2(4), 439-444. DOI:10.1002/cepa.842
6. Černý V., Drochytka R., Kulísek K., Húšť J. (2018) Influence of secondary raw materials on synthesis of tobermorite in lime-silicate composite. *Ce/Papers*. 2(4). 439-444. DOI:10.1002/cepa.842
7. Czapik P, Borek K. (2025) Transformation of waste glasses in hydroxide solution. *Materials*, 18(24), 5565. DOI: 10.3390/ma18245565
8. Drochytka R., Černý V. (2020) Influence of fluidized bed combustion fly ash admixture on hydrothermal synthesis of tobermorite in the mixture with quartz sand, high temperature fly ash and lime. *Construction Building Materials*. 230, 117033. DOI:10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117033
9. Einar P., Howard F., Lansing S.W. (1938) Formation of hydrated calcium silicates at elevated temperatures and pressures. Part of *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. 21.
10. Gawlicki M., Pichór W., Brylska E., Brylicki W. [2013] *Materiały budowlane. Podstawy technologii i metody badań*. AGH Uczelniane wydawnictwa naukowo-dydaktyczne. Kraków, 82 -95
11. Główny Urząd Statystyczny [2020] Rynek producentów wyrobów budowlanych w latach 2015 – 2018. 176-178
12. Jasińska I. (2019) Effect of foam glass granules fillers modification of lime-sand products on their microstructure. *Open Engineering*, 9(1), 299-306. DOI: 10.1515/eng-2019-0038
13. Komisarczyk K., Dachowski R. (2018) A study of selected properties of autoclaved bricks. *MATEC Web of Conferences*. 174(02017); 1-8.
14. Kondo R. (1967) Autoclaved calcium silicate building products. 92-93.
15. Nocuń-Wczelik W. (1999) Effect of Na and Al on the phase composition and morphology of autoclaved calcium silicate hydrates. *Cement and Construction Research*. 29(11), 1759-1767. DOI:10.1016/S0008-8846(99)00166-0
16. Nowek M. (2014) The use of selected regranulates in silicate masonry elements. In: 9th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2014. DOI:10.3846/enviro.2014.041
17. Nowek M. (2016) Performance of sand-lime products made with plastic waste. In: E3S Web of Conferences. 10 DOI:10.1051/e3sconf/20161000066
18. Polski Komitet Normalizacyjny (2004) PN-EN 1008:2004 Woda zarobowa do betonu-specyfikacja pobierania próbek, badanie i ocena przydatności wody zarobowej do betonu, w tym wody odzyskanej z procesów produkcji betonu. Polska.
19. Polski Komitet Normalizacyjny. PN-EN 772-21:2011 (2011) metody badań elementów murowych -- część 21: określanie absorpcji wody ceramicznych i silikatowych elementów murowych przez absorpcję zimnej wody. Polska.

20. Polski Komitet Normalizacyjny. PN-EN 933-1:2012 (2012) Badania geometrycznych właściwości kruszyw - część 1: oznaczanie składu ziarnowego - metoda przesiewania. Polska.
21. Stępień A., Kostrzewa P., Dachowski R. (2019) Influence of barium and lithium compounds on silica autoclaved materials properties and on the microstructure. *Journal of Cleaner Production*. 236, 117507. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.06.338
22. Wongkeo W., Chaipanich A. (2010) Compressive strength, microstructure and thermal analysis of autoclaved and air cured structural lightweight concrete made with coal bottom ash and silica fume. *Materials Science and Engineering A*. 527(16-17), 3676-3684. DOI:10.1016/J.MSEA.2010.01.089
23. Wongkeo W., Thongsanitgarn P., Pimraksa K., Chaipanich A. (2012) Compressive strength, flexural strength and thermal conductivity of autoclaved concrete block made using bottom ash as cement replacement materials. *Materials & Design*. 35, 434-439. DOI:10.1016/J.MATDES.2011.08.046
24. Yazici H., Deniz E., Baradan B. (2013) The effect of autoclave pressure, temperature and duration time on mechanical properties of reactive powder concrete. *Construction Building Materials*. 42, 53-63. DOI:10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.01.003

5. RECYKLING WIELOKROTNY BETONU JAKO ELEMENT GOSPODARKI CYRKULARNEJ – STAN BADAŃ I PERSPEKTYWY ROZWOJU

mgr inż. Krzysztof Liszka

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji

Katedra Budownictwa i Inżynierii Materiałowej

E-mail: liszka.k@gmail.com

Streszczenie: Rosnące zapotrzebowanie na surowce mineralne, ograniczone zasoby naturalne oraz konieczność redukcji emisji dwutlenku węgla w sektorze budownictwa skłaniają do poszukiwania nowych rozwiązań w duchu gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ). Jednym z najbardziej obiecujących kierunków jest recykling wielokrotny betonu (multi-recycling), który umożliwia ponowne wykorzystanie kruszywa pochodzącego z rozdrobnienia wcześniejszych betonów recyklingowych. W artykule zaprezentowano aktualny stan badań nad właściwościami fizycznymi, mechanicznymi i mikrostrukturalnymi betonów poddawanych wielokrotnemu recyklingowi, a także analizę możliwości kompensacji utraty ich właściwości. Omówiono także aspekty środowiskowe i energetyczne, w tym ocenę cyklu życia (LCA), oraz perspektywy rozwoju technologii multi-recycling w kontekście transformacji budownictwa w kierunku neutralności klimatycznej.

1. Wprowadzenie

Beton stanowi podstawowy materiał konstrukcyjny współczesnego budownictwa. Według danych Global Cement and Concrete Association, na świecie produkuje się rocznie ponad 14 miliardów metrów sześciennych betonu, co generuje ogromne zapotrzebowanie na surowce mineralne i wiąże się z wysokim śladem węglowym. Produkcja cementu odpowiada za ok. 7–8% globalnych emisji CO₂, dlatego kluczowe znaczenie ma poszukiwanie alternatyw materiałowych i technologicznych zmniejszających wpływ budownictwa na środowisko. Recykling betonu, jako wtórne wykorzystanie odpadów budowlanych, wpisuje się w założenia gospodarki cyrkularnej. Jednak tradycyjny recykling, ograniczający się do jednorazowego użycia gruzu betonowego, nie zamyka w pełni obiegu materiałowego. Koncepcja recyklingu wielokrotnego (multi-recycling) zakłada powtarzalne wykorzystanie kruszywa recyklingowego z kolejnych cykli rozdrabniania, co umożliwia redukcję zapotrzebowania na surowce naturalne nawet o 50% i znaczne ograniczenie emisji gazów cieplarnianych.

2. Istota i znaczenie recyklingu wielokrotnego

Recykling wielokrotny betonu (ang. multi-recycling of concrete) stanowi rozwinięcie klasycznego podejścia do recyklingu materiałów budowlanych, zakładającego jednorazowe ponowne wykorzystanie gruzu betonowego w formie kruszywa wtórnego. W tradycyjnym procesie recyklingu odpady betonowe są kruszone, oczyszczane i ponownie stosowane jako częściowy zamiennik kruszywa naturalnego w produkcji nowego betonu. W przypadku recyklingu wielokrotnego proces ten jest powtarzany – beton wytworzony z kruszywa

recyklingowego po zakończeniu cyklu życia ponownie staje się surowcem do produkcji kolejnych mieszanek betonowych.

Ideą multi-recyklingu jest zamknięcie pętli materiałowej w budownictwie, co wpisuje się w zasady gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ). Dzięki temu możliwe jest ograniczenie zużycia surowców naturalnych, takich jak żwir i piasek, których eksploatacja wiąże się z degradacją środowiska i wysokimi kosztami energetycznymi. W praktyce zastosowanie kruszywa pochodzącego z dwóch lub więcej cykli recyklingu może zmniejszyć zapotrzebowanie na surowce pierwotne nawet o 40–60%, co czyni tę metodę jednym z kluczowych narzędzi transformacji ekologicznej sektora budowlanego.

Z punktu widzenia środowiskowego, recykling wielokrotny ma potencjał znaczącej redukcji emisji dwutlenku węgla. Produkcja cementu portlandzkiego – głównego składnika betonu – generuje średnio 0,9 t CO₂ na każdą tonę wytworzonego cementu. Ograniczenie ilości nowego cementu poprzez wykorzystanie wtórnych kruszyw oraz dodatków mineralnych pozwala obniżyć całkowity ślad węglowy konstrukcji nawet o 25–30% w zależności od liczby cykli recyklingu. Dodatkowo, ponowne wykorzystanie materiału eliminuje konieczność transportu i składowania odpadów budowlanych, co przyczynia się do dalszej redukcji emisji pośrednich.

Z perspektywy technicznej, recykling wielokrotny wiąże się z szeregiem wyzwań. Każdy cykl kruszenia i ponownego wykorzystania powoduje zmiany w strukturze kruszywa – wzrasta jego porowatość, maleje gęstość objętościowa i pogarsza się przyczepność zaczynu cementowego do powierzchni ziaren. Te zmiany są konsekwencją obecności resztek starego zaczynu na powierzchni kruszywa, co prowadzi do powstania niestabilnej strefy przejściowej (ITZ – Interfacial Transition Zone). W praktyce obserwuje się, że wytrzymałość na ściskanie betonu z kruszywem po drugim cyklu recyklingu spada średnio o 10–15% w porównaniu z betonem konwencjonalnym, natomiast po trzecim cyklu – o 20–25%. Jednak właściwa modyfikacja składu betonu i procesów produkcyjnych może znacząco zredukować te straty.

W badaniach prowadzonych przez ośrodki w Niemczech, Japonii i Polsce wykazano, że odpowiednia selekcja frakcji kruszywa, ograniczenie ilości zaprawy reszkowej na powierzchni ziaren oraz zastosowanie dodatków mineralnych o właściwościach pucolanowych (popioły lotne, pyły krzemionkowe, metakaolin) pozwalają utrzymać parametry mechaniczne betonu z recyklingu wielokrotnego na poziomie dopuszczalnym dla zastosowań konstrukcyjnych. Co więcej, nowe technologie czyszczenia i regeneracji kruszywa (np. czyszczenie mechaniczno-hydrodynamiczne, aktywacja powierzchniowa) umożliwiają dalsze zwiększanie jego jakości.

Z punktu widzenia ekonomicznego, multi-recycling przynosi wymierne korzyści. Ograniczenie transportu i kosztów utylizacji odpadów budowlanych, a także zmniejszenie zużycia surowców pierwotnych, prowadzi do redukcji całkowitych kosztów inwestycji o 5–10% w stosunku do konwencjonalnych technologii. Dodatkowo, w kontekście europejskich regulacji dotyczących zielonych zamówień publicznych, stosowanie materiałów pochodzących z recyklingu wielokrotnego może stanowić istotne kryterium oceny projektów infrastrukturalnych.

W wymiarze strategicznym, recykling wielokrotny jest narzędziem realizacji celów Europejskiego Zielonego Ładu, który zakłada neutralność klimatyczną Unii Europejskiej do roku 2050. Włączenie tego podejścia w krajowe polityki surowcowe i budowlane umożliwi nie

tylko ograniczenie emisji, lecz także zwiększenie niezależności surowcowej państw członkowskich.

3. Stan badań i obserwacje mikrostrukturalne

Badania nad recyklingiem betonu, a w szczególności jego wersją wielokrotną (multi-recycling), prowadzone są od początku XXI wieku w wielu ośrodkach naukowych na świecie – w Japonii (Tohoku University, Tokyo Institute of Technology), Niemczech (BAM, TU Berlin), Polsce (ITB, Politechnika Wrocławska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu) oraz Kanadzie i Australii. Ich wspólnym celem jest ocena wpływu liczby cykli recyklingu na właściwości fizyczne, mechaniczne i mikrostrukturalne betonu oraz określenie granic jego wielokrotnego wykorzystania.

W licznych eksperymentach potwierdzono, że kolejne cykle recyklingu prowadzą do systematycznej degradacji struktury betonu. Beton po pierwszym cyklu recyklingu (oznaczany jako R1) wykazuje zwykle nieznaczne pogorszenie parametrów – gęstość zmniejsza się o około 2–5%, a wytrzymałość na ściskanie o 5–10% względem betonu referencyjnego (N). Jednak już w drugim cyklu (R2) różnice te stają się istotne: obserwuje się wzrost porowatości o 10–15%, spadek wytrzymałości na ściskanie o 15–25% oraz zwiększenie nasiąkliwości nawet o 40% w stosunku do próbki pierwotnej. W przypadku trzeciego cyklu (R3) negatywne zmiany przybierają charakter wykładniczy – materiał staje się bardziej kruchy, mniej odporny na zamrażanie i odmrażanie, a także wykazuje większą podatność na karbonatyzację.

Mikrostruktura i strefa przejściowa ITZ:

Najistotniejsze zmiany w strukturze betonu wielokrotnie recyklingowanego zachodzą w tzw. strefie przejściowej ITZ (Interfacial Transition Zone) – obszarze pomiędzy powierzchnią kruszywa a zaczynem cementowym. W przypadku kruszywa naturalnego ITZ charakteryzuje się stosunkowo małą porowatością i dobrą adhezją. W betonach z kruszywem recyklingowym powierzchnia ziaren jest jednak pokryta cienką warstwą starego zaczynu cementowego, co prowadzi do powstania podwójnej strefy ITZ (stara ITZ + nowa ITZ).

Badania mikroskopowe SEM (Scanning Electron Microscopy) wykazały, że stara strefa ITZ zawiera liczne mikropęknięcia, pustki powietrzne i porowate wypełnienia hydratacyjne, co sprzyja rozwojowi mikrodefektów w nowym zaczynie. Z kolei analiza składu fazowego metodą XRD (X-ray Diffraction) potwierdza, że w kolejnych cyklach recyklingu maleje udział krzemianów wapnia (C-S-H), a wzrasta zawartość portlandytu (Ca(OH)_2) i karbonatów wapnia (CaCO_3), co osłabia wiązanie międzyfazowe i zwiększa podatność betonu na korozję chemiczną.

Analizy porowatości i przepuszczalności:

Zastosowanie metody porozymetrii rtęciowej (MIP – Mercury Intrusion Porosimetry) pozwoliło określić wzrost całkowitej objętości porów oraz przesunięcie rozkładu ich średnic w kierunku porów kapilarnych (0,05–0,2 μm). Beton z kruszywem po dwóch cyklach recyklingu (R2) charakteryzuje się zwiększoną liczbą porów otwartych, co prowadzi do większej przepuszczalności gazów i cieczy. Wyniki badań MIP wykazały, że udział porów powyżej 0,1 μm wzrasta z 28% w betonie pierwotnym do 42% w betonie R2 i 55% w R3, co koreluje z obniżeniem gęstości i wzrostem nasiąkliwości.

Z kolei analiza powierzchni kruszyw metodą FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) wykazała obecność aktywnych grup hydroksylowych (-OH) oraz karbonylowych (C=O) na granicy między starym a nowym zaczynem, co potwierdza postępującą karbonatyzację i pogorszenie adhezji na poziomie molekularnym.

Degradacja struktury a właściwości mechaniczne:

Zależność między strukturą mikro a właściwościami mechanicznymi betonu została potwierdzona w licznych badaniach eksperymentalnych. W próbkach po pierwszym cyklu recyklingu (R1) obserwuje się niewielkie pogorszenie spójności struktury i nieznaczny wzrost współczynnika dyfuzji jonów chlorkowych (ok. 10–15%). Po drugim cyklu (R2) dyfuzja chlorków rośnie o 30–40%, co znacząco wpływa na trwałość elementów zbrojonych. Próby przeprowadzone w Politechnice Wrocławskiej wykazały, że moduł sprężystości betonu R2 jest średnio o 20% niższy niż betonu referencyjnego, natomiast po trzecim cyklu (R3) spada nawet o 35%.

Pomimo tych zmian, badania prowadzone przez Liszkę i Jaskulskiego (2024) wskazują, że odpowiednia modyfikacja składu mieszanki – w tym zastosowanie dodatków pucolanowych oraz kruszyw aktywowanych powierzchniowo – pozwala na zachowanie właściwości użytkowych nawet po drugim cyklu recyklingu. Uzyskane wyniki sugerują, że granicą efektywnego zastosowania recyklingu wielokrotnego w betonie konstrukcyjnym jest trzeci cykl (R3), po którym materiał wymaga już głębszej regeneracji lub zastosowania w elementach niekonstrukcyjnych (np. prefabrykatach drogowych).

Nowe kierunki badań:

W ostatnich latach obserwuje się rosnące zainteresowanie zastosowaniem metod cyfrowej analizy mikrostruktury (np. mikrotomografia rentgenowska μ CT) do ilościowego opisu zmian w strukturze betonu wielokrotnie recyklingowanego. Umożliwia to trójwymiarową rekonstrukcję porowatości i mikropęknięć, co pozwala lepiej zrozumieć mechanizmy degradacji i utraty wytrzymałości. Równocześnie prowadzone są badania nad modyfikacją ITZ poprzez nanotechnologię – np. stosowanie nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ oraz grafenu do wzmocnienia struktury zaczynu i poprawy przyczepności do kruszywa recyklingowego.

Zgodnie z aktualnym stanem badań, recykling wielokrotny betonu jest procesem możliwym technicznie, lecz wymagającym zaawansowanego podejścia do projektowania składu i kontroli jakości. Kluczowe znaczenie ma tu zrozumienie zjawisk mikrostrukturalnych, które determinują właściwości makroskopowe i trwałość betonu.

4. Kompensacja utraty właściwości

Aby ograniczyć negatywne skutki wielokrotnego recyklingu, stosuje się liczne strategie kompensacyjne. Najczęściej polegają one na wprowadzeniu do zaczynu dodatków mineralnych (popioły lotne, żużle wielkopiecowe, pyły krzemionkowe), które poprawiają szczelność mikrostruktury i ograniczają porowatość. Dodatkowo stosuje się domieszki chemiczne (superplastyfikatory, aktywatory krzemianowe) oraz procedury czyszczenia i aktywacji powierzchni kruszywa. Optymalizacja procesu separacji frakcji kruszywa pozwala utrzymać stabilną jakość mieszanki betonowej i zachować parametry użytkowe materiału. Badania eksperymentalne wykazały, że zastosowanie kombinacji pyłu krzemionkowego i żużla

wielkopieczowego może zwiększyć wytrzymałość na ściskanie nawet o 18% względem betonu recyklingowego nie modyfikowanego.

5. Aspekt środowiskowy – LCA

Zastosowanie metod oceny cyklu życia (LCA) pozwala kompleksowo analizować wpływ multi-recyklingu na środowisko. Uwzględnia się nie tylko emisje CO₂, ale również zużycie energii pierwotnej, wody i transport. W porównaniu z betonem konwencjonalnym, beton z kruszywem po dwóch cyklach recyklingu wykazuje średnio 20–30% niższy ślad węglowy. Kluczowe znaczenie ma też lokalny kontekst – im krótszy transport odpadów, tym większy efekt środowiskowy. W przyszłości konieczne będzie włączenie danych LCA do cyfrowych modeli BIM, co pozwoli na dynamiczną ocenę wpływu środowiskowego na etapie projektowania.

6. Perspektywy rozwoju i wyzwania

Rozwój technologii multi-recyklingu wymaga współpracy nauki, przemysłu i legislatorów. Największym wyzwaniem pozostaje brak jednolitych norm europejskich regulujących jakość kruszyw recyklingowych po więcej niż jednym cyklu użycia. Konieczne jest opracowanie systemu certyfikacji i standaryzacji właściwości kruszywa wtórnego. Z punktu widzenia innowacji, perspektywiczne kierunki obejmują rozwój spoiw geopolymerowych, modyfikację powierzchni kruszyw nanocząstkami oraz zastosowanie technologii niskoenergetycznych w procesie kruszenia. Z ekonomicznego punktu widzenia, wdrożenie multi-recyklingu wymaga zachęt finansowych i wsparcia w ramach zielonych zamówień publicznych.

7. Podsumowanie i wnioski

Recykling wielokrotny betonu stanowi istotny element strategii dekarbonizacji sektora budowlanego. Umożliwia znaczącą redukcję zużycia surowców, minimalizuje ilość odpadów i przyczynia się do osiągnięcia celów neutralności klimatycznej. Dalsze prace badawcze powinny koncentrować się na ocenie długoterminowej trwałości konstrukcji z betonu wielokrotnie recyklingowanego oraz opracowaniu narzędzi cyfrowych wspierających analizę LCA. Multi-recycling betonu może stać się fundamentem „betonu przyszłości” – materiału regeneracyjnego, przyjaznego środowisku i wpisującego się w ideę gospodarki cyrkularnej.

Bibliografia:

1. Jaskulski R., Liszka K., Józwiak-Niedźwiedzka D., 'Multifaceted Analysis of the Thermal Properties of Shielding Cement-Based Composites with Magnetite Aggregate', *Materials*, 2024, 17(12), 2936. DOI: 10.3390/ma17122936
2. Evangelista L., de Brito J., 'The effect of multi-recycling on the mechanical performance of coarse recycled aggregates concrete', *Resources, Conservation & Recycling*, 2018, 133, 275–285. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.02.025
3. Sang-Woo Lee et al., 'Sustainable Construction Exploration: A Review of Multi-Recycling of Concrete', *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 31, 21045–21063. DOI: 10.1007/s41742-024-00652-z

4. Tavares L.M., Lima M. et al., 'Multi-recycling of different concrete products: Effects on recycled materials', *Construction and Building Materials*, 2025. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.146312
5. Ahmed A., Rahman M.M., Tam V.W.Y., 'Influence of Mix Design on Physical, Mechanical and Durability Properties of Concrete made with Multiple Recycled Coarse Aggregates', *Materials*, 2023, 16, 4903. DOI: 10.3390/ma16144903
6. Roknuzzaman M., Rahman M.M., Tam V.W.Y., 'Impact of Multiple Recycling on the Strength of Coarse Aggregate', *Journal of Cleaner Production*, 2021, 312, 127801.
7. Ying-Chieh Hsu, Hsien-Te Lin et al., 'Effect of Aggregate Size on Recycled Aggregate Concrete under Equivalent Mortar Volume Mix Design', *Applied Sciences*, 2021, 11(23), 11274. DOI: 10.3390/app112311274
8. Zhang J., Wang Y. et al., 'Enhancing Concrete Sustainability: A Critical Review of the Effects of Recycled Concrete Aggregates on Mechanical and Durability Properties', *Buildings*, 2024, 15(8), 1361. DOI: 10.3390/buildings15081361
9. Marinković S., Radonjanin V., Malešev M., Ignjatović I., 'Comparative Environmental Assessment of Natural and Recycled Aggregate Concrete', *Waste Management*, 2019, 25, 565–575. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.04.012
10. Yildirim S., Duer M. et al., 'Life Cycle Assessment of Concrete Incorporating All Concrete Recycling Products', *Sustainable Materials and Technologies*, 2024, 38, e00611. DOI: 10.1016/j.susmat.2024.e00611

6. MAGNETYT W BETONIE – JAK WIELKOŚĆ ZIARNA WPŁYWA NA PRZEWODNICTWO CIEPLNE I ZDOLNOŚCI OSŁONOWE

mgr inż. Krzysztof Liszka

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji

Katedra Budownictwa i Inżynierii Materiałowej

E-mail: liszka.k@gmail.com

Streszczenie:

W pracy przedstawiono wyniki badań właściwości cieplnych betonów osłonowych z kruszywem magnetytowym, wykonanych metodą niestacjonarną przy użyciu aparatu ISOMET 2114. Analizie poddano dwa czynniki: udział objętościowy magnetytu w mieszance (0%, 20%, 40% i 60%) oraz uziarnienie kruszywa (1–2 mm, 2–4 mm, 4–8 mm, 8–16 mm). Pomiary prowadzono dla próbek w stanie pełnego nasycenia wodą oraz po wysuszeniu do stałej masy w temperaturze 65 °C.

Wyniki wykazały, że wzrost zawartości magnetytu w kompozycie prowadzi do systematycznego zwiększenia przewodnictwa cieplnego — od 2,52 W/(m·K) dla betonu referencyjnego do 3,47 W/(m·K) przy 60% objętości magnetytu. Jednocześnie stwierdzono istotny wpływ wielkości ziaren kruszywa na wartości przewodnictwa i dyfuzyjności cieplnej, zwłaszcza w stanie suchym. Otrzymane zależności nie są liniowe, co wskazuje na złożony charakter przepływu ciepła w kompozytach o dużej niejednorodności strukturalnej.

Uzyskane wyniki stanowią podstawę do dalszych badań nad optymalizacją składu betonów osłonowych o kontrolowanych właściwościach cieplnych, przeznaczonych do zastosowań w budownictwie energetyki jądrowej oraz obiektach wymagających ograniczenia przenikania ciepła i promieniowania.

Słowa kluczowe: beton osłonowy, magnetyt, przewodnictwo cieplne, dyfuzyjność cieplna, ISOMET 2114, budownictwo jądrowe

1. Wprowadzenie

Betony osłonowe stanowią istotną grupę materiałów stosowanych w budownictwie energetyki jądrowej, medycznej i przemysłowej, gdzie oprócz wytrzymałości konstrukcyjnej wymagane jest ograniczenie przenikania promieniowania jonizującego oraz kontrola przewodnictwa cieplnego. W ostatnich latach obserwuje się rosnące zainteresowanie betonami ciężkimi, w których tradycyjne kruszywa zastępowane są minerałami o wysokiej gęstości, takimi jak baryt, hematyt czy magnetyt.

Magnetyt (Fe_3O_4) dzięki dużej gęstości (ok. 4,8 g/cm³) oraz dobrym właściwościom termicznym i magnetycznym stanowi atrakcyjne kruszywo osłonowe. Właściwości cieplne betonów z magnetytem zależą jednak nie tylko od udziału tego kruszywa, lecz także od jego uziarnienia, rozkładu faz w matrycy cementowej oraz stopnia nasycenia wodą. Dotychczasowe badania koncentrowały się głównie na mechanice i gęstości betonów ciężkich, natomiast wpływ wielkości ziarna magnetytu na przewodnictwo cieplne pozostawał niedostatecznie rozpoznany.

Celem niniejszej pracy było określenie wpływu frakcji magnetytu i jego udziału objętościowego na przewodnictwo i dyfuzyjność cieplną betonów osłonowych, a także identyfikacja charakteru tych zależności w funkcji wilgotności materiału.

2. Materiały i metody badań

2.1. Materiały

Do wykonania próbek zastosowano cement popiołowy CEM II/B-V 32.5 N, piasek rzeczny 0–2 mm oraz kruszywo magnetytowe łamane o czterech frakcjach: 1–2 mm, 2–4 mm, 4–8 mm i 8–16 mm. Współczynnik w/c wynosił 0,5. Magnetyt stanowił 20%, 40% lub 60% objętości mieszanki, a dla serii porównawczej – 0%.

2.2. Metodyka badań

Badania wykonano metodą niestacjonarną przy użyciu aparatu ISOMET 2114 (Applied Precision). Urządzenie umożliwia bezpośredni pomiar przewodnictwa λ i dyfuzyjności, a pośrednio – pojemności cieplnej C_v i C_p . Próbkę przygotowano w formie walców 150×300 mm, z których po 28 dniach dojrzewania w wodzie wycinano krążki o grubości 25 mm.

Pomiarów dokonano w dwóch stanach wilgotności:

- pełnego nasycenia wodą,
- po wysuszeniu do stałej masy w temperaturze 65 °C.

Dodatkowo określono gęstość (metodą hydrostatyczną) oraz porowatość (na podstawie utraty masy podczas suszenia).

3. Wyniki badań

3.1. Gęstość, porowatość i wytrzymałość

Wraz ze wzrostem udziału magnetytu obserwowano systematyczny przyrost gęstości betonu — od ok. 2600 kg/m³ dla serii referencyjnej (CM0) do ok. 3700 kg/m³ przy 60% objętości kruszywa magnetytowego (CM60). Zjawisko to jest zgodne z przewidywaniami teoretycznymi, ponieważ gęstość magnetytu (ok. 4800 kg/m³) znacząco przewyższa gęstość matrycy cementowej.

Jednocześnie porowatość otwarta uległa redukcji z około 20% dla betonu zwykłego do 13% przy największym udziale magnetytu. Zmniejszenie porowatości wynika z lepszego upakowania ziaren i ograniczenia objętości zaczynu, co przekłada się na mniejszą ilość pustek kapilarnych.

Wytrzymałość na ściskanie wzrosła z 39,7 MPa (CM20) do 52,3 MPa (CM60). Wzrost ten można powiązać z poprawą adhezji zaczynu do gładkich powierzchni magnetytu oraz efektem wypełnienia, który sprzyja kompaktyzacji struktury.

3.2. Przewodnictwo cieplne (λ)

Wartości λ rosły wraz z zawartością magnetytu od 2,52 W/(m·K) dla betonu referencyjnego do 3,47 W/(m·K) przy 60% objętości magnetytu w stanie nasyconym. Po wysuszeniu wartości te zmniejszały się do zakresu 1,67–2,66 W/(m·K).

Największy wzrost przewodnictwa cieplnego wystąpił pomiędzy 20% a 40% udziałem magnetytu, co wskazuje na nieliniowy charakter zależności. Dla frakcji 4–8 mm uzyskano najwyższe λ , natomiast dla drobnych frakcji (1–2 mm) obserwowano obniżenie wartości,

prawdopodobnie ze względu na większy udział stref przejściowych ITZ i wyższą porowatość lokalną.

Dla próbek nasyconych: $2,52 \rightarrow 3,47 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

Dla próbek suchych: $1,67 \rightarrow 2,66 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

3.3. Dyfuzyjność cieplna (α)

Podobnie jak w przypadku λ , dyfuzyjność cieplna zwiększała się wraz z udziałem magnetytu – z $1,22 \text{ mm}^2/\text{s}$ (CM0) do $1,69 \text{ mm}^2/\text{s}$ (CM60) w stanie mokrym i z $0,95$ do $1,38 \text{ mm}^2/\text{s}$ po wysuszeniu. Warto zauważyć, że dla próbek suchych zmiany α były bardziej liniowe, co sugeruje, że zawartość wody wpływa na niejednorodność rozkładu temperatury w mikrostrukturze. Wartości α dla próbek nasyconych: $1,22 \rightarrow 1,69 \text{ mm}^2/\text{s}$. Dla próbek suchych: $0,95 \rightarrow 1,38 \text{ mm}^2/\text{s}$.

3.4. Pojemność cieplna (C_v i C_p)

Średnie wartości C_v mieściły się w zakresie $1,9\text{--}2,2 \text{ MJ/(m}^3\cdot\text{K)}$, a C_p w zakresie $550\text{--}700 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$. Drobniejsze frakcje magnetytu ($1\text{--}4 \text{ mm}$) wykazywały wyższą pojemność cieplną, co można wiązać z większym udziałem zaczynu cementowego oraz obecnością wody w drobnych porach.

$C_v = 1,9\text{--}2,2 \text{ MJ/(m}^3\cdot\text{K)}$, $C_p = 550\text{--}700 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$.

4. Dyskusja

Zależności uzyskane dla przewodnictwa cieplnego i dyfuzyjności wskazują, że wpływ magnetytu na właściwości cieplne betonu ma charakter złożony. Oprócz prostego efektu zwiększenia udziału fazy o wyższej przewodności (Fe_3O_4), istotną rolę odgrywają:

- segregacja kruszywa ciężkiego,
- zmiany w strefie przejściowej ITZ,
- porowatość otwarta i stopień nasycenia wodą.

Nieliniowość zależności λ i α od udziału magnetytu wskazuje, że przewodzenie ciepła w betonach ciężkich odbywa się w sieci materiałowej o niejednorodnej topologii. Duże ziarna magnetytu tworzą lokalne ścieżki przewodzące, natomiast drobne – bardziej jednorodne układy cieplne o mniejszej anizotropii.

Z punktu widzenia zastosowań praktycznych, optymalnym kompromisem między przewodnictwem cieplnym a jednorodnością strukturalną jest frakcja $4\text{--}8 \text{ mm}$ i udział magnetytu $40\text{--}60\%$.

5. Wnioski

1. Wzrost udziału magnetytu powoduje systematyczny wzrost przewodnictwa cieplnego (o ok. 40%) i dyfuzyjności cieplnej (o ok. 35%).
2. Wielkość ziarna kruszywa istotnie wpływa na λ i α — większe frakcje dają wyższe wartości, lecz mniejszą jednorodność.
3. Wilgotność betonu znacząco zmienia parametry cieplne – różnice między próbkami mokrymi i suchymi sięgają $\sim 1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.
4. Porowatość maleje wraz z zawartością magnetytu, co sprzyja poprawie przewodnictwa cieplnego i trwałości kompozytu.

5. Optymalne parametry uzyskano dla betonów z 40–60% magnetytu o uziarnieniu 4–8 mm, co może stanowić podstawę projektowania betonów osłonowych dla energetyki jądrowej.

Bibliografia:

1. Jaskulski R., Liszka K., Józwiak-Niedźwiedzka D., 'Multifaceted Analysis of the Thermal Properties of Shielding Cement-Based Composites with Magnetite Aggregate', *Materials*, 2024, 17(12), 2936. DOI: 10.3390/ma17122936
2. Gharieb, M.; Mosleh, Y. A.; Alwetaishi, M.; Hussein, E. E.; Sultan, M. E. Effect of Using Heavy Aggregates on the High Performance Heavy Concrete Used as Radiation Shielding of Nuclear Facilities. *Construction and Building Materials* 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125111.
3. Lee, H. S.; Kwon, S. J. Effects of Magnetite Aggregate and Steel Powder on Thermal Conductivity and Porosity in Concrete for Nuclear Power Plant. *Advances in Materials Science and Engineering* 2016. DOI: 10.1155/2016/9526251.
4. Tavares L.M., Lima M. et al., 'Multi-recycling of different concrete products: Effects on recycled materials', *Construction and Building Materials*, 2025. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.146312
5. Ahmed A., Rahman M.M., Tam V.W.Y., 'Influence of Mix Design on Physical, Mechanical and Durability Properties of Concrete made with Multiple Recycled Coarse Aggregates', *Materials*, 2023, 16, 4903. DOI: 10.3390/ma16144903
6. Roknuzzaman M., Rahman M.M., Tam V.W.Y., 'Impact of Multiple Recycling on the Strength of Coarse Aggregate', *Journal of Cleaner Production*, 2021, 312, 127801.

7. SZKŁO W MATERIAŁACH BUDOWLANYCH

Katarzyna Borek

Politechnika Świętokrzyska, ul. Al. 1000-lecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

Wydział Budownictwa i Architektury

E-mail: kkomisarczyk@tu.kielce.pl

1. Wstęp

W literaturze można znaleźć wiele, nieco odmiennych od siebie, definicji szkła. Wynika z nich, że wszystkie substancje znajdujące się w stanie szklistym charakteryzują się kilkoma wspólnymi cechami, a mianowicie:

- są izotropowe, tj. ich właściwości są jednakowe we wszystkich kierunkach dlatego, że ich struktura we wszystkich kierunkach jest taka sama- jednorodna,
- przy ogrzewaniu nie topią się jak kryształy, lecz stopniowo mięknią przechodząc ze stanu kruchego w ciągliwy stan o dużej lepkości i w końcu w stan ciekły, przy czym nie tylko lepkość, ale i inne właściwości fizykochemiczne zmieniają się w sposób ciągły, nie skokowy,
- topnieją i krzepną w sposób odwracalny, a więc wytrzymują wielokrotne rozgrzewanie do stanu stopienia, a po ochłodzeniu w jednakowych warunkach ponownie osiągają początkowe właściwości [Gieracki, 2011].

Szkła należą do materiałów o bardzo skomplikowanej wewnętrznej budowie. Termin „budowa szkła” oznacza wyobrażenie o zespole i wzajemnym rozmieszczeniu różnych struktur atomowych, cząsteczkowych i ponad cząsteczkowych, tworzących klasę szkieł [Wójcicki, 1987]. Struktura oddaje bardziej szczegółowe cechy i specyfikę budowy konkretnego szkła, próbki albo wyrobu otrzymanego według określonej technologii, włączając wszystkie możliwe defekty struktury, powstające samoistnie w wyniku niedoskonałości i technologii lub w procesie obróbki cieplnej.

Złożoność budowy wewnętrznej szkła oraz różnorodność jego struktur znajduje bezpośrednie odzwierciedlenie w ogromnym zróżnicowaniu składu chemicznego, właściwości i zastosowań wyrobów szklanych.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie podziału odpadów szklanych z uwzględnieniem ich różnorodnego składu chemicznego oraz analiza możliwości ich wykorzystania jako surowca w materiałach budowlanych. W szczególności praca ma na celu ocenę wpływu zastosowania odpadowych szkieł o zróżnicowanym składzie chemicznym na właściwości betonu, zapraw oraz materiałów autoklawizowanych.

2. Metody

Przegląd literaturowy przeprowadzono w celu syntezy aktualnego stanu wiedzy dotyczącego podziału szkieł odpadowych ze względu na skład chemiczny oraz możliwości ich zastosowania w materiałach budowlanych, w szczególności w betonach, zaprawach i materiałach autoklawizowanych. Wyszukiwanie publikacji naukowych realizowano w bazach danych, takich jak *Web of Science*, *Scopus*, *ScienceDirect* oraz *Google Scholar*, ale również w oficjalnie publikowanych danych statystycznych.

3. Podział szkieł ze względu na przeznaczenie i skład chemiczny

Przemysł szklarski charakteryzuje się zróżnicowaną i skomplikowaną strukturą produkcji. Szacuje się, że ilość opracowanych szkieł (składów) wynosi obecnie 70-80 tys., a asortyment przemysłu szklarskiego obejmuje 20-30 tys. odmian wyrobów. Różnorodność technologii wytwarzania oraz zastosowania wyrobów szklanych wymusza konieczność wprowadzenia podziałów ze względu na przeznaczenie, dzieląc dalej na szkła stosowane w budownictwie, szkła gospodarcze i oświetleniowe, szkła techniczne oraz opakowania szklane [Ziomba, 2003]. Z konstrukcyjnego punktu widzenia opakowania szklane wytwarzane w procesie hutniczym dzieli się na: opakowania wąskootworowe, do których zalicza się butelki powszechnego użytku oraz butle i balony o większych pojemnościach; opakowania szerokootworowe, do których zalicza się słoiki i słoje. Pojemniki produkuje się ze szkła bezbarwnego (białego) lub barwnego (zielone, brązowe/bursztynowe).

W zależności od składu chemicznego sporządzanej mieszaniny surowcowej wyróżnia się przede wszystkim szkła: borokrzemowe, kwarcowe, ołowiowe oraz sodowo-wapniowe (tabela 1). W tabeli 2 przedstawiono charakterystyczne cechy dla wyżej wymienionych szkieł, uwzględniając wybrane właściwości fizyczno-chemiczne [Tang, 2021].

Tabela 1. Skład chemiczny różnych rodzajów szkła [%]

	Szkło borokrzemowe	Szkło kwarcowe	Szkło ołowiowe	Szkło sodowo-wapniowe
SiO ₂	70-80	99,90	54-65	71-75
Na ₂ O+K ₂ O	4-8	-	13-15	12-16
CaO	-	-	-	10-15
Al ₂ O ₃	7	-	-	-
B ₂ O ₃	7-15	-	-	-
PbO	-	-	25-30	-

Źródło: [Vieitez, 2011].

Dane statystyczne wskazują, że w Europie w 2018 roku wyprodukowano 36,6 mln ton szkła, z czego udział szkła sodowo-wapniowego wynosił 91,5%, ołowiowego 2,4%, borokrzemowego 3,8%, a pozostałego 2,4% [4]. Według danych udostępnionych przez FEVE (Europejską Federację Producentów Opakowań Szklanych produkcja szkła opakowaniowego (sodowo - wapniowego) w 2021 roku wynosiła 23,4 mln ton, a w 2022 roku 24,5 mln ton [FEVE, 2022]

Do wytwarzania większości opakowań szklanych stosuje się szkła wywodzące się z prostego układu trójskładnikowego SiO₂- Na₂O-CaO wzbogacone o inne tlenki znajdujące się z reguły w mineralnych surowcach szklarskich. W celu uzyskania szkieł o specjalnych właściwościach fizykochemicznych do ich wytwarzania stosuje się składniki zawierające np. tlenki boru, cynku, potasu, baru i inne. Dobór rodzaju i ilości tlenków w składzie chemicznym, jest ważny pod kątem stopnia ważności poszczególnych właściwości fizykochemicznych szkła, zależnie od wymagań stawianych wyrobom oraz konieczności uzyskania optymalnych

parametrów topienia, klarowania i formowania masy szklanej. Charakterystykę wybranych rodzajów szkieł przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Charakterystyka wybranych rodzajów szkieł

Rodzaj szkła	Charakterystyka
Szkło borokrzemowe	- odporność chemiczna na kwasy i zasady [Pawar, 2017], - wysoka przezroczystość [Lee, 2004], - wytrzymałość na nagłe zmiany temperatury, - duża twardość [Czapik, 2020], - wykorzystywane w przemyśle farmaceutycznym do produkcji naczyń laboratoryjnych,
Szkło kwarcowe	- doskonała twardość, - wysoka odporność na korozji, - duża odporność na zmiany temperaturę [Li, 2021], - stosowane w produkcji lamp kwarcowych oraz naczyń i elementów aparatury optycznej,
Szkło ołowiane	- wysoki współczynnik załamania światła, - miękkie, - mało odporne na działanie kwasów, - służy do wyrobu materiałów dekoracyjnych (kryształów) i soczewek,
Szkło sodowo-wapniowe	- odporność cieplna i chemiczna jest niższa niż szkła borokrzemowego, ze względu na zastąpienie w składzie tlenku boru, sodą i wapniem [Rojas, 2013], - używane do produkcji: naczyń wykorzystywanych w gospodarstwach domowych, szkła opakowaniowego (butelki, słoiki) i szkła płaskiego (szyby) [Harrison, 2020], - łatwo dostępne, - o relatywnie niskiej cenie.

Źródło: opracowanie własne.

4. Wpływ kolorów szkła na właściwości materiałów budowlanych

Po dodaniu do masy szklanej odpowiednich tlenków metali, można otrzymać szkło barwne:

- szkło zielone i brązowe zawiera związki żelaza i chromu,
- szkło niebieskie zawiera związki kobaltu i miedzi,
- szkło fioletowe zawiera związki manganu,
- szkło żółte zawiera związki kadmu i siarki,
- szkło czerwone zawiera koloidalne cząsteczki złota.

W oparciu o literaturę, przykładowe składy chemiczne szkieł z uwzględnieniem kolorów przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Skład chemiczny szkła z uwzględnieniem kolorów [zawartość w % masowych]

	Szkło białe (bezbarwne)			Szkło brązowe			Szkło zielone		
	Jin, W., Meyer, C., Baxter, S.	Karamberi A., Moutsatsou A.	Polska/HS, Pollena Czechy	Jin, W., Meyer, C., Baxter, S.	Karamberi A., Moutsatsou A.	Polska/HS „Ujście”	Jin, W., Meyer, C., Baxter, S.	Karamberi A., Moutsatsou A.	Polska/HS „Ujście”
SiO ₂	73,2- 73,5	70,65	71,20	71,9- 72,4	71,20	71,30	71,3	70,5	71,00
Na ₂ O+ K ₂ O	13,6- 14,1	13,80	13,00	13,8- 14,4	13,75	14,00	13,1	13,40	14,00
CaO + MgO	10,7- 10,8	13,15	14,50	11,6	12,95	11,40	12,2	12,90	11,20
Al ₂ O ₃	1,7-1,9	1,75	1,55	1,7-1,8	1,90	2,50	2,2	1,80	2,50
SO ₃	0,20- 0,24	0,45	-	0,12- 0,14	0,30	-	0,05	0,25	-
Fe ₂ O ₃	0,04- 0,05	0,45	0,03	0,30	0,35	0,30	0,56	0,45	0,60
Cr ₂ O ₃	-	-	-	0,01	0,06	-	0,43	0,25	0,20

Źródło: [Jin, 2000], [Karamberi, 2005].

Szkło opakowaniowe ze względu na różnorodność składu chemicznego, kolorów, rozmiarów oraz kształtów, jest znacznie trudniejsze w recyklingu w stosunku do szkła płaskiego. Oczekuje się, że produkcja odpadów szklanych wzrośnie, a pojęcie zrównoważonego rozwoju nabierze większego znaczenia, dlatego należy zająć się wyzwaniami związanymi z szerszym zakresem utylizacji tego rodzaju odpadów.

W literaturze wskazano, że szkło w materiałach budowlanych można wykorzystać w sześciu kombinacjach jako: surowiec do produkcji spoiwa lub jego częściowy zamiennik [Dvořák, 2017], [Xie, 2002], częściowy lub całkowity substytut kruszywa drobnego [Ling, 2012], łączne częściowe zastąpienie spoiwa i kruszywa drobnego [Taha, 2008], częściowa lub całkowita wymiana kruszywa grubego [Serniabat, 2014] oraz częściowe lub całkowite zastąpienie kruszyw grubych i drobnych [Terro, 2006].

Wpływ barwy i typu szkła na rozwój wytrzymałości mieszanek cementowych zbadali Dyer i Dhir [Dyer, 2001]. Stwierdzono, że zaprawa zawierająca 10% białej i zielonej stłuczki szklanej wykazywała odpowiednio o około 27 MPa i 20 MPa wyższą wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach w porównaniu z zaprawą kontrolną. Zaprawa z zawartością 10% sproszkowanego szkła bursztynowego osiągnęła tylko o około 2 MPa wyższą wytrzymałość na ściskanie niż zaprawa kontrolna.

Karamberi i Moutsatsou [Karamberi, 2005] w swoich badaniach stosowali typowe szkło sodowo-wapniowe pochodzące z recyklingu opakowań. Autorzy zaobserwowali, że wytrzymałość na ściskanie zaprawy zawierającej 25% sproszkowanego szkła białego była

o około 34,5% wyższa niż zaprawy zawierającej 25% szkła brązowego. Różnice w wynikach przypisali podstawowym pierwiastkom barwiącym cząstki szkła twierdząc, że ich obecność wywoła reakcję chemiczną odpowiedzialną za rozwój wytrzymałości. Na podstawie badań mikrostrukturalnych, autorzy określili, że cząstki szkła brązowego są mniej aktywne w porównaniu do pozostałych kolorów. Dlatego zaprawa zawierająca brązową stłuczkę szklaną wykazywała mniejszą wytrzymałość na ściskanie niż zaprawa z białą stłuczką szklaną.

Mirzahosseini i Riding [Mirzahosseini, 2014] podali, że zaprawa z udziałem zielonej stłuczki szklanej o rozdrobnieniu mniejszym niż 25 μm wykazała o około 3% wyższą wytrzymałość na ściskanie po 91 dniach w stosunku do zaprawy z udziałem szkła białego. Autorzy stwierdzili, że rozpuszczalność krzemu i glinu w szkłe zielonym jest wysoka, co skutkuje zwiększoną reakcją pucolanową przy wysokim pH matrycy cementowej.

Bignozzi i inni [Bignozzi, 2015] wyjaśnili, że szybkość rozpuszczania szkła rośnie wraz ze wzrostem zawartości $\text{PbO} + \text{Na}_2\text{O}$ oraz spadkiem zawartości obu form szklanych $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ i stabilizatorów szkła $\text{CaO} + \text{MgO}$. Szkło o frakcji pylastej zawierające większą ilość modyfikatorów oraz mniejszą ilość substancji szklanych i stabilizatorów szkła nie sprzyja reakcji pucolanowej. W rezultacie autorzy stwierdzili, że zaprawy z udziałem zmielonego szkła sodowo-wapniowego wykazywały o około 4% wyższą wytrzymałość na ściskanie po 90 dniach niż zaprawy ze szkła kryształowego. Al-Zubaid i inni [Al-Zubaid, 2017] podali, że beton z dodatkiem szkła neonowego wykazywał o około 9,5% większą wytrzymałość na ściskanie niż beton z dodatkiem zielonego szkła odpadowego przy 13% wymianie cementu. Takie zachowanie przypisali większemu udziałowi SiO_2 (68,2%) i CaO (22,6%) w szkłe neonowym w stosunku do szkła zielonego. Z drugiej strony Islam i inni [44] stwierdzili, że skład chemiczny przezroczystych i kolorowych proszków szklanych jest bardzo zbliżony i założyli, że gotowe produkty nie wykażą zmiennych właściwości z uwagi na dodatek różnych kolorów szkła. Z większości przeprowadzonych badań wynika jednak, że barwa szkła, ze względu na zmienność składu chemicznego może mieć istotny wpływ na rozwój wytrzymałości na ściskanie zaprawy i betonu.

Szkło w produkcji materiałów budowlanych może być potencjalnie wykorzystane na dwa sposoby jako niereaktywny wypełniacz lub jako reaktywny dodatek pucolanowy. Rodzaj wykorzystania odpadów zależy głównie od wielkości jego cząstek oraz jego reaktywności [Czapik, 2021].

Odpady szklane o większym rozmiarze cząstek, z uwagi na wysoką zawartość SiO_2 (około 70%), mogą być stosowane jako substytut kruszywa w wielu materiałach budowlanych. Dodatek odpadów szklanych w betonie często wywołuje destrukcyjną reakcję ASR, prowadząc do rozszerzania się materiału co w konsekwencji powoduje jego pękanie [Idir, 2010], [Idir, 2011]. W zaprawach, Tan i Du [Tan, 2013] kruszywo drobne zastępowali piaskiem szklanym w kolorze brązowym, zielonym, bezbarwnym i mieszanym. Wyniki badań wykazały, że z powodu mikropęknięć piasku szklanego i osłabionego połączenia z zaczynem cementowym, właściwości mechaniczne uległy pogorszeniu. Trwałość została jednak zwiększona, zwłaszcza w zakresie odporności na penetrację jonów chlorkowych. W odniesieniu do ekspansji ASR, mikro-pęknięcia w cząsteczkach szkła okazały się odgrywać ważną rolę. Szkło przezroczyste było bardziej podatne na mikropęknięcia podczas procesu kruszenia, podczas gdy brązowe cząstki szkła były stosunkowo wolne od mikropęknięć. Szkło brązowe okazało się być dodatkowo niereaktywnym kruszywem nawet w perspektywie długoterminowej.

Szkło odpadowe może stanowić również zamiennik kruszywa grubego w betonie. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że wykorzystanie odpadu szklanego o frakcji 4-16 mm nie ma znaczącego wpływu na urabialność betonu i jedynie nieznacznie obniża jego wytrzymałość na ściskanie [Topcu, 2004]. Afshinnia i Rangaraju [Afshinnia, 2016] stwierdzili natomiast, że wytrzymałość na ściskanie betonu spada aż o 38% w stosunku do próbek referencyjnych. Dzieje się tak ze względu na gładką powierzchnię szkła. Pomiędzy kruszonym kruszywem szklanym, a zaczynem cementowym, tworzy się słabsze wiązanie, co wpływa na wytrzymałość na ściskanie [Topcu, 2004], [Kou, 2009]. Gerges i inni [Gerges, 2013] wskazali, że zwiększenie wskaźnika wymiany gruboziarnistego szkła odpadowego zmniejsza wytrzymałość na ściskanie w ciągu 7 i 28 dni. Próbkę zawierające grube odpady szklane mają większą różnicę w wytrzymałości na ściskanie po 7 dniach niż po 28 dniach w porównaniu z próbką kontrolną. Próbkę z udziałem odpadów szklanych wykazują zatem późny wzrost wytrzymałości na ściskanie. Stosowanie odpadów szklanych jako zamiennika kruszywa grubego w betonach ma jednak przede wszystkim charakter ekologiczny.

W swojej pracy Czapik [Czapik, 2020] wszystkie frakcje kruszywa zastąpił odpowiednimi zakresami wielkości odpadów szklanych w zaprawach. Szkło pochodziło z rozbitych, a następnie zmielonych brązowych butelek. Zaprawy z odpadowym kruszywem szklanym uległy degradacji, po znacznie wydłużonym okresie badania, w stosunku do okresu przewidzianego przez normę ASTM C1260. Ekspansję zaprawy autor przypisał głównie obecności cząstek szkła większych niż 1 mm.

W autoklawizowanych wyrobach wapienno – krzemionkowych jako substytut krystalicznego piasku kwarcowego (90% wag.) A. Stępień i inni [Stępień, 2020] zastosowali piasek szklany. Biorąc pod uwagę właściwości fizyczno-chemiczne poprawie uległa wytrzymałość na ściskanie próbek wapienno-krzemionkowych z dodatkiem szkła (wzrost z 6,5 MPa – materiał referencyjny, 20 MPa – z dodatkiem szkła). Wraz ze wzrostem udziału ww. dodatku w cegle silikatowej gęstość nieznacznie spadła ($1,7 \text{ kg/dm}^3 \rightarrow 1,65 \text{ kg/dm}^3$), a wilgotność wzrosła (z poziomu 0,5% do 2,1%).

Badania przeprowadzone przez Borek, Czapik i Dachowski [Borek, 2023] wykazują, że niezależnie od zastosowanego koloru szkła w wyrobach wapienno – krzemionkowych następuje wzrost wytrzymałości na ściskanie, przy jednoczesnym zmniejszeniu gęstości objętościowej oraz zwiększenie absorpcji wody w stosunku do próbek o klasycznym składzie. Całkowita wymiana piasku kwarcowego w próbkach wapienno-krzemionkowych na bezbarwne szkło odpadowe generuje wzrost wytrzymałości o ~187% w stosunku do próbek o klasycznym składzie. Zastosowanie szkła brązowego i zielonego w ilości 100% masy kruszywa zwiększa wytrzymałość na ściskanie-odpowiednio o ~159% i o ~134% w stosunku do próbek referencyjnych. Modyfikacja próbek wapienno-krzemionkowych białym szkłem odpadowym, generuje najniższą gęstość objętościową i najwyższą absorpcję wody w stosunku do próbek z udziałem brązowego i zielonego szkła opakowaniowego [Borek, 2024], [Borek 2022]. Wykorzystanie brązowego szkła opakowaniowego jako zamiennika piasku kwarcowego w próbkach wapienno-krzemionkowych, w najmniejszym stopniu wpływa na wzrost absorpcji wody w stosunku do wyrobów modyfikowanych szkłem bezbarwnym i zielonym. Uzyskane pomiary wytrzymałości na ściskanie i gęstości objętościowej przy wymianie 33% i 66% kruszywa, niezależnie od koloru zastosowanej stłuczki szklanej wykazują podobieństwa w wynikach. Można jednoznacznie stwierdzić, że całkowite zastąpienie piasku kwarcowego

bezbarnym szkłem odpadowym, spośród trzech zastosowanych rodzajów szkła, w największym stopniu wpływa na zmianę badanych cech fizyczno-mechanicznych i mikrostrukturalnych [Czapik, 2025] w stosunku do próbki referencyjnej.

5. Podsumowanie

W literaturze, w materiałach budowlanych, znane są możliwości ponownego wykorzystania szkieł o różnym przeznaczeniu i składzie chemicznym, również tych, uwzględniających kolory szkła. Brak jest jednak jednoznacznych wniosków wynikających z zastosowania odpadowych szkieł w materiałach takich jak beton, wyroby autoklawizowane. Szkło odpadowe zbudowane z amorficznej krzemionki, jest mniej stabilne, cechuje się większą rozpuszczalnością niż tradycyjnie używany w roli kruszywa piasek zbudowany z krystalicznego kwarcu i tym samym łatwiej może wchodzić w reakcję ze spoiwem w warunkach hydrotermalnych

Bibliografia:

1. Afshinnia K., Rangaraju P.R. (2016) Impact of combined use of ground glass powder and crushed glass aggregate on selected properties of Portland cement concrete. *Construction and Building Materials* 117,263-272. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.04.072
2. Al-Zubaid A.B., Shabeeb K.M., Ali A.I. (2017) Study the effect of recycled glass on the mechanical properties of green concrete. In: *Energy Procedia*. 19, 680-692. DOI:10.1016/j.egypro.2017.07.095
3. Bignozzi M.C., Saccani A., Barbieri L., Lancellotti I. (2015) Glass waste as supplementary cementing materials: The effects of glass chemical composition. *Cement and Concrete Composites*. 55, 45-52. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2014.07.020
4. Borek K. (2024) Lime-silica products based on waste packaging glass. *Construction of Optimized Energy Potential*, 13, 1, 89-96. DOI:10.17512/bozpe.2024.13.10
5. Borek K., Czapik P. (2022) Utilization of waste glass in autoclaved silica-lime materials. *Materials*, 15(2), 549, DOI:10.3390/ma15020549
6. Borek K., Czapik P., Dachowski R. (2023) Cement bypass dust as an ecological binder substitute in autoclaved silica-lime products. *Materials*, 16(1), 316. DOI:10.3390/ma16010316
7. Černý V., Drochytka R., Kulisek K., Hůst' J.(2018) Influence of secondary raw materials on synthesis of tobermorite in lime-silicate composite. *Ce/Papers*. 2(4), 439-444. DOI:10.1002/cepa.842
8. Czapik P, Borek K. (2025) Transformation of waste glasses in hydroxide solution. *Materials*, 18(24), 5565. DOI: 10.3390/ma18245565
9. Czapik P. (2020) Microstructure and degradation of mortar containing waste glass aggregate as evaluated by various microscopic techniques. *Materials*. 13(9), 25-30. DOI:10.3390/ma13092186
10. Czapik P., Kuza D., Boroń M. (2021) Influence of the waste glass uses on the cement mortar properties. *Structure and Environment* 13(2), 45-51.
11. Czapik P., Zapała-Sławeta J., Owsiak Z., Stępień P. (2020) Hydration of cement by pass dust. *Construction and Building Materials*. 231. 117139. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.117139

12. Dvořák K., Dušan D., Dobrovolný P. (2017) The improvement of the pozzolanic properties of recycled glass during the production of blended portlands cements. *Procedia Engineering*. 180, 1229-1236.
13. Dyer T.D., Dhir R.K. (2001) Chemical reactions of glass cullet used as cement component. *Journal of Materials in Civil Engineering* 13(6), 412-417. DOI:10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:6(412)
14. Gerges N. (2018) Recycled glass concrete: coarse and fine aggregates. *Eur J Eng Res Sci*. 3.
15. Gieracki Dominik (2011) Sekrety recyklingu szkła. *Świat Szkła*. 11. Dostęp online: <https://swiat-szkla.pl/article/5948> 01.12.2025
16. Guo P., Meng W., Nassif H., Gou H., Bao Y. (2020) New perspectives on recycling waste glass in manufacturing concrete for sustainable civil infrastructure. *Construction and Building Materials* 257, 119579. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.119579
17. Harrison E., Berenjian A., Seifan M.. (2020) Recycling of waste glass as aggregate in cement-based materials. *Environ Sci Ecotechnology*. 4, 100064. DOI:10.1016/j.esec.2020.100064
18. Idir R., Cyr M., Arezki T.H. (2011) Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet. *Cement and Concrete Composites*. 33(1) 19-29.
19. Idir R., Cyr M., Tagnit-Hamou A. (2010) Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars. *Construction and Building Materials* 24(7), 1309-1312. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2009.12.030
20. Jin W.H., Meyer C., Baxter S. (2000) "Glascrete" - Concrete with glass aggregate. *ACI Structure Journal* 97(2), 208-213
21. Karamberi A., Moutsatsou (2005) A. Participation of coloured glass cullet in cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*. 27(2), 319-327. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2004.02.021
22. Kou S.C., Poon C.S. (2009) Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate. *Cement and Concrete Composites*. 31(2), 107-113. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2008.12.002
23. Lee E.S., Howard D., Liang E., Collins S.D., Smith R.L. (2004) Removable tubing interconnects for glass-based micro-fluidic systems made using ECDM. *Journal of Micromechanics Microengineering*. 14(4), 535-541. DOI:10.1088/0960-1317/14/4/014
24. Li M., Akoshima M., Yamada N. (2021) Development of quartz glass as a certified reference material for thermal diffusivity measurements. *International Journal of Thermal Sciences*. 165, 106955. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2021.106955
25. Ling T.C., Poon C.S., Kou S.C. (2012) Influence of recycled glass content and curing conditions on the properties of self-compacting concrete after exposure to elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*. 34(2), 265-272.
26. Mirzahosseini M., Riding K.A.(2014) Effect of curing temperature and glass type on the pozzolanic reactivity of glass powder. *Cement and Concrete Research*. 58; 103-111. DOI:10.1016/j.cemconres.2014.01.015
27. Pawar P., Ballav R., Kumar A. (2017) Micromachining of borosilicate glass: a state of art review. In: *Materials Today: Proceedings*. 4, 2813-2821. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.02.161

28. Rojas L., Norarat R., Napari M., Kivistö H., Chienthavorn O., Whitlow H.J. (2013) Lithographic fabrication of soda-lime glass based microfluidics. Nucl Instruments Methods Phys Res Sect B Beam Interact with Mater Atoms. 306, 296-298. DOI:10.1016/j.nimb.2012.12.047
29. Serniabat T.S., Khan M.N.N., Zain M.F.M. (2014) Use of waste glass as coarse aggregate in concrete: a possibility towards sustainable building construction. International Journal Of Civil and Environmental Engineering. 8(10); 1075-1078.
30. Stepien A., Potrzeszcz-Sut B., Prentice D.P., Oey T.J., Balonis M. (2020) The role of glass compounds in autoclaved bricks. Buildings. 10(3). DOI: 10.3390/buildings10030041
31. Taha B., Nounu G. (2008) Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. Construction and Building Materials. 22(5), 713-720. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2007.01.019
32. Tan K.H., Du H. (2013) Use of waste glass as sand in mortar: Part I - Fresh, mechanical and durability properties. Cement and Concrete Composites. 35(1), 109-117. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.08.028
33. Tang T., Yuan Y., Yalikun Y., Hosokawa Y., Li M., Tanaka Y. (2021) Glass based micro total analysis systems: materials, fabrication methods and applications. Sensors Actuators B Chem. 15, 129859. DOI:10.1016/j.snb.2021.129859
34. Terro M.J. (2006) Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures. Building and Environment. 41(5), 633-639. DOI:10.1016/j.buildenv.2005.02.018
35. Topçu I.B., Canbaz M. (2004) Properties of concrete containing waste glass. Cement and Concrete Research. 34(2), 267-274. DOI:10.1016/j.cemconres.2003.07.003
36. Topçu İ.B., Canbaz M. (2004) Properties of concrete containing waste glass. Cement and Concrete Research. 34(2), 267-274. DOI: 10.1016/j.cemconres.2003.07.003
37. Vieitez E.R., Eder P., Villanueva A., Saveyn H. (2011) End-of-waste criteria for glass cullet:technical proposals. Joint Research Centre Scientific and Technical Reports. Sevilla, Hiszpania.
38. Wójcicki J., Ciągło A., Czerwiński Z., Galewicz M., Hasslinger K., Hilgertner A.; Skirgajło J., Sztandera W., Świketlik W., Tomaszewski J., Unisławski E., Węglowski A., Żółędziowski W. (1987) Technologia Szkła. Arkady. Warszawa. Polska.
39. Xie Z., Xi Y. (2002) Use of recycled glass as a raw material in the manufacture of Portland cement. Materials and Structures, 35(8), 210-215.
40. Ziemia B. (2003) Cechy szkła wykorzystywane w budownictwie. Szkło i Ceramika. 54(3), 2-6.

Strony internetowe

41. <https://feve.org/glass-industry/data/glass-industry-production-year-2022/> Dostęp: 10.12.2025r.

8. OD PROLIFERACJI DO WŁÓKNIENIA: ROLA KRWIOTWÓRCZYCH KOMÓREK MACIERZYSTYCH W PATOGENEZIE MIELOFIBROZY

Aleksandra Rosiek

Uniwersytet Jagielloński

Wydział Biochemii, Biofizyki i Biotechnologii

ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków

E-mail: aleksandra.rosiek@student.uj.edu.pl

Streszczenie: Pierwotna mielofibroza (PMF) jest rzadką, złożoną chorobą mieloproliferacyjną, której patogeneza obejmuje zarówno mutacje w krwiotwórczych komórkach macierzystych (HSC), jak i zaburzenia mikrośrodowiska szpiku kostnego. Najczęściej występujące mutacje kierujące obejmują JAK2 V617F, CALR i MPL, które prowadzą do klonalnej ekspansji HSC, nadmiernej proliferacji i zwiększonej produkcji cytokin prozapalnych. W efekcie dochodzi do aktywacji fibroblastów szpikowych, nadprodukcji macierzy zewnątrzkomórkowej i narastającym włóknieniem szpiku. Jednocześnie zmieniona nisza szpikowa sprzyja przetrwaniu komórek nowotworowych, hamuje prawidłową hematopoezę i przyczynia się do typowych objawów klinicznych, takich jak splenomegalia, anemia i przewlekłe zmęczenie. Obecnie główną formę leczenia stanowią inhibitory JAK, zwłaszcza ruksolitynib, który redukuje masę śledziony i łagodzi objawy, jednak nie odwraca włóknienia ani nie wydłuża przeżycia pacjentów. W związku z tym rozwijane są nowe strategie terapeutyczne, obejmujące m.in. kombinacje inhibitorów JAK z innymi lekami.

Słowa kluczowe: pierwotna mielofibroza, nowotwory mieloproliferacyjne, krwiotwórcze komórki macierzyste, inhibitory JAK

1. Wstęp

Nowotwory mieloproliferacyjne (ang. *myeloproliferative neoplasms*, MPN) to grupa klonalnych chorób komórek macierzystych szpiku. Charakteryzują się nadprodukcją jednego lub kilku elementów morfotycznych krwi: erytrocytów, leukocytów lub trombocytów (How i in., 2023). W grupie tzw. klasycznych nowotworów mieloproliferacyjnych wyodrębniono trzy jednostki chorobowe: czerwienicę prawdziwą (ang. *polycythemia vera*, PV), nadpłytkowość samoistną (ang. *essential thrombocythemia*, ET) oraz pierwotne zwłóknienie szpiku (ang. *primary myelofibrosis*, PMF) (Arber i in., 2022).

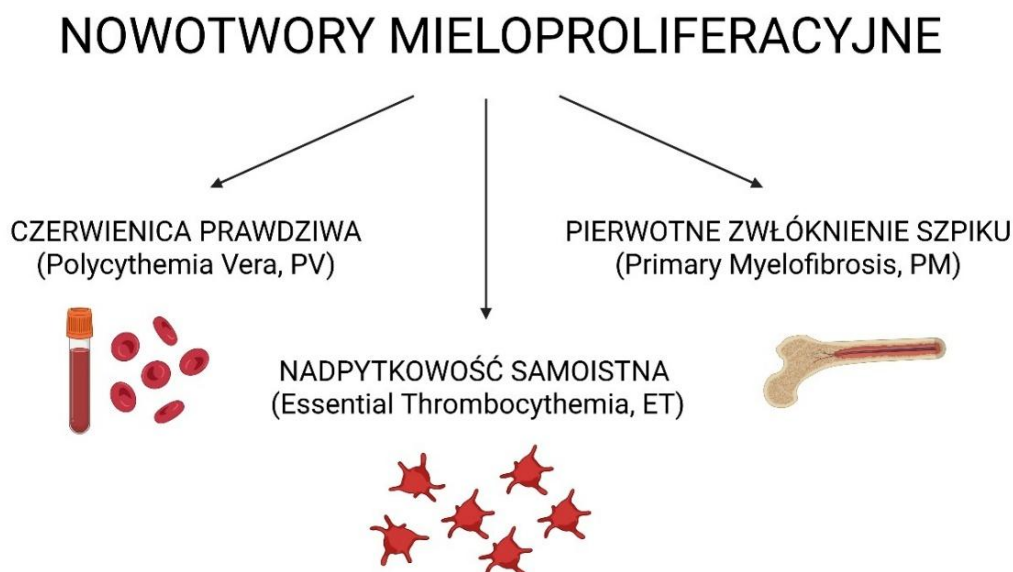


Figura 1. Schemat podziału nowotworów mieloproliferacyjnych (Arber i in. 2022)

Pierwotna mielofibroza, inaczej pierwotne zwłóknienie szpiku, charakteryzuje się proliferacją nieprawidłowych prekursorów płytek krwi, które wydzielają czynniki wzrostu, w związku z czym w szpiku kostnym wzmagają się aktywność fibroblastów. Efektem jest nadmierne odkładanie się włókien kolagenowych i retikulinowych. Wraz z postępem zwłóknienie w szpiku ubywa coraz więcej komórek krwiotwórczych. W zaawansowanym stadium choroby występuje pancytopenia, czyli obniżenie liczby leukocytów, erytrocytów lub trombocytów (Passamonti i Mora, 2023). Zapadalność na pierwotną mielofibrozę wynosi rocznie 0.5 – 1.5 na 100 000 osób na świecie, przy czym większość zostaje zdiagnozowana w wieku ok. 65 lat. Zaledwie u 10% chorych rozpoznanie pierwotnego zwłóknienia szpiku następuje przed 45. rokiem życia (Breccia i in., 2024). Pomimo intensywnych badań patogeniza mielofibrozy nadal nie jest w pełni poznana, według aktualnej wiedzy obejmuje współdziałanie zaburzeń molekularnych, nieprawidłowego różnicowania komórek krwiotwórczych oraz patologicznych interakcji w obrębie niszy szpikowej.

2. Molekularne podłoże nowotworów mieloproliferacyjnych

Nowotwory mieloproliferacyjne (MPN), w tym mielofibroza, napędzane są przez tzw. mutacje kierujące (ang. *driver mutations*), które prowadzą do konstytutywnej aktywacji szlaku sygnałowego JAK-STAT. Do trzech najczęściej występujących mutacji należą: JAK2 V617F, która występuje u ok. 60% pacjentów, CALR występująca u ok. 25-30% pacjentów oraz MPL obecna u ok. 5-10% pacjentów (Vainchenker i Kralovics, 2017). Oprócz mutacji kierujących u pacjentów z PMF często obserwuje się mutacje współistniejące m.in w genach ASXL1, TET2, EZH2, SRSF2. Mutacje te nie inicjują choroby, ale mają istotny wpływ na jej dynamikę, odpowiedź na leczenie, progresję do ostrej białaczki szpikowej (ang. *acute myeloid leukemia*, AML) oraz przeżycie pacjentów (Bose i Verstovsek, 2020).

2.1. Mutacja JAK2 V617F

Mutacja JAK2 V617F jest najczęstszą mutacją kierującą w MPN i występuje u ok. 60% pacjentów z pierwotną mielofibrozą (Vainchenker i Kralovics, 2017). JAK2 odgrywa kluczową rolę w prawidłowej hematopoezie, ponieważ to za jego pośrednictwem receptory erytopoetyny, interleukiny-3, GM-CSF i trombopoetyny przekazują sygnały proliferacyjne i różnicowania (Bose i Verstovsek, 2020). Mutacja JAK2 V617F polega na substytucji waliny na fenyloalaninę w pozycji 617 w domenie pseudokinazowej JAK2, co prowadzi do konstytutywnej aktywacji kinazy. W efekcie komórki hematopoetyczne otrzymują ciągłe sygnały proliferacyjne i antyapoptyczne, niezależnie od obecności ligandów (Klampfl i in., 2013). Wykazano, że modelach mysich z wprowadzoną mutacją JAK2 V617F rozwija się feontyp przypominający ludzką czerwienicę prawdziwą (PV), a choroba jest transplantowana przy udziale krwiotwórczych komórek hematopoetycznych, co dowodzi ich kluczowej roli w inicjacji choroby (Mullally i in., 2010). Klinicznie mutacja JAK2 V617F wiąże się z częstszą leukocytozą, większym ryzykiem zakrzepicy i rozwoju splenomegali w porównaniu do pacjentów z mutacjami CARL lub MPL. Co więcej, pacjenci z mutacją JAK2 mogą częściej rozwijać oporność na leczenie inhibitorami JAK, takimi jak ruksolitynib (Stuckey i in., 2025).

2.2. Mutacje CALR

Mutacje w genie CALR (kalretikuliny) występują u ok. 25-30% pacjentów z pierwotną mielofibrozą (PMF) i stanowią główną przyczynę choroby u pacjentów nieposiadających mutacji JAK2 lub MPL (Vainchenker i Kralovics, 2017). Mutacje te obejmują głównie insercje lub delecje w eksonie 9, które powodują przesunięcie ramki odczytu w regionie C-końcowym białka, prowadząc do utraty motywu retencji w retikulum endoplazmatycznym (KDEL) i powstania nowego, dodatnio naładowanego peptydu C-końcowego w mutancie kalretikuliny. Zmodyfikowana kalretikulina wiąże się z receptorem MPL, aktywując szlak JAK-STAT i indukując nadmierną proliferację komórek hematopoetycznych (Klampfl i in., 2013). Pacjenci z mutacjami CALR są zazwyczaj młodszy, mają wyższą liczbę płytek krwi, rzadziej rozwijają anemię, leukocytozę lub pancytopenię i rzadziej wymagają transfuzji w porównaniu do pacjentów z mutacjami JAK2 lub MPL. Mutacje CALR wiążą się również z niższym ryzykiem zakrzepicy, szczególnie w porównaniu z JAK2 V617F (Klampfl i in., 2013). W obrębie mutacji CALR wyróżnia się typ 1 (delecja 52 par zasad) i typ 2 (insercja 5 par zasad), z których typ 1 jest związany z lepszym przeżyciem i wolniejszą progresją choroby (Tefferi i in., 2014).

2.3. Mutacje MPL

Mutacje w genie MPL, kodującym receptor trombopoetyny, występują u ok. 5-10% pacjentów z pierwotną mielofibrozą (PMF) i nadpłytkowością samoistną (ET) (Vainchenker i Kralovics, 2017). MPL pełni istotną rolę w regulacji poziomu trombopoetyny (TPO), poprzez mechanizm ujemnego sprzężenia zwrotnego, eliminuje TPO związane z receptorem. Zarówno MPL, jak i TPO są niezbędne do samoodnawiania się krwiotwórczych komórek macierzystych oraz naprawy DNA. Po związaniu TPO z receptorem MPL następuje aktywacja szlaku JAK-STAT poprzez kinazę JAK2, co inicjuje kaskadę sygnałową kontrolującą proliferację i różnicowanie komórek hematopoetycznych (Grabek i in., 2020). Najczęściej spotykane mutacje MPL to W515L i W515K, prowadzące do nadmiernej aktywacji szlaku JAK-STAT

i niekontrolowanej proliferacji komórek progenitorowych. W modelach *in vitro* i *iv vivo* wykazano, że hematopoetyczne komórki z tymi mutacjami aktywują STAT3, STAT5, ERK/MAPK oraz PI3K/AKT, wykazując nadwrażliwość na TPO i przewagę proliferacyjną nad komórkami dzikiego typu (Pikman i in., 2006). Pacjenci z mutacjami MPL mają profil choroby zbliżony do pacjentów z mutacją JAK2, jednak zazwyczaj obserwuje się nieco niższe ryzyko zakrzepicy i wyższe wartości płytek krwi w porównaniu do JAK2 V617F. Przebieg choroby i przeżycie pacjentów z mutacją MPL jest porównywalne do pacjentów z mutacją JAK2 (Rozovski i in., 2017).

3. Rola krwiotwórczych komórek macierzystych szpiku kostnego w patogenezie

3.1. Dysfunkcja krwiotwórczych komórek macierzystych (HSC)

Krwotwórcze komórki macierzyste (ang. *hematopoietic stem cells*, HSC) stanowią fundamentalną populację komórek odpowiedzialnych za ciągłą odnowę i utrzymanie prawidłowego funkcjonowania układu krwiotwórczego. Charakteryzują się dwiema kluczowymi właściwościami: zdolnością do samoodnowy oraz potencjałem różnicowania w wszystkie linie komórek krwiotwórczych – zarówno mieloidalnych, jak i limfoidalnych (Seita i Weissman, 2010). W pierwotnej mielofibrozie (PMF) dysfunkcja HSC jest centralnym mechanizmem patogenezy choroby. Mutacje kierujące, takie jak JAK2 V617F, CALR czy MPL, powodują klonalną ekspansję nieprawidłowych HSC (Vainchenker i Kralovics, 2017). Zmodyfikowane komórki wykazują nadmierną aktywność proliferacyjną i wydzielają zwiększone ilości cytokin oraz czynników wzrostu takich jak IL-6, TGF- β i PDGF. W efekcie dochodzi do aktywacji fibroblastów szpikowych, nadprodukcji macierzy pozakomórkowej i włóknienia szpiku kostnego (Hormoz i in., 2025).

Różnicowanie komórek macierzystych ze szpiku kostnego

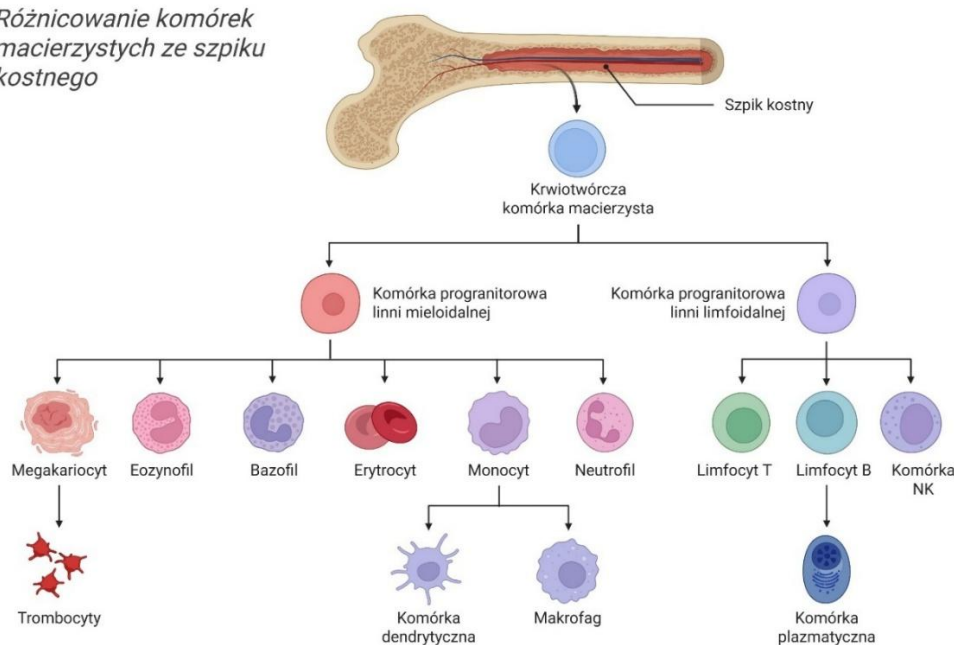


Figura 2. Schemat różnicowania komórek macierzystych ze szpiku kostnego

3.2. Rola niszy szpikowej

Nisza szpiku kostnego to wyspecjalizowane mikrośrodowisko utrzymujące i regulujące krwiotwórcze komórki macierzyste. W stanie fizjologicznym wyróżnia się niszę centralną, obejmującą większość szpiku i odpowiedzialną za codzienną hematopoezę oraz niszę endostealną, położoną przy powierzchni kości, chroniącą HSC podczas stresu i wspierającą regenerację (Beerman i in., 2017). W nowotworach mieloproliferacyjnych nisza szpiku ulega istotnym zmianom strukturalnym i funkcjonalnym. Komórki nowotworowe oraz przewlekły stan zapalny prowadzą do remodelowania niszy, obejmującego utratę prawidłowej architektury stromalnej, zwiększoną proliferację i aktywację komórek zrębu oraz fibroblastycznych komórek mezenchymalnych. Towarzyszy temu przewlekła ekspresja cytokin prozapalnych, takich jak IL-1 β , IL-6 i TNF. Zmodyfikowana nisza sprzyja przetrwaniu komórek nowotworowych, hamuje prawidłową hematopoezę i uczestniczy w procesie włóknienia szpiku, charakterystycznym dla pierwotnej mielofibrozy (Méndez-Ferrer i in., 2020).

4. Aktualne strategie terapeutyczne i perspektywy na przyszłość

Leczenie pierwotnej mielofibrozy koncentruje się na redukcji objawów choroby, zmniejszeniu masy śledziony, kontroli cytopenii oraz ogólnej poprawie jakości życia pacjentów. Najczęściej stosowaną grupę leków stanowią inhibitory kinaz JAK. Ruksolitynib (inhibitor JAK1/JAK2) był pierwszym lekiem, który wykazał skuteczność w redukcji objawów choroby oraz zmniejszeniu wielkości śledziony u pacjentów z MF. Został zatwierdzony przez Amrykańską Agencję ds. Żywności i Leków (FDA) w 2011 roku, a od 2017 roku jest dostępny w także Polsce (Deisseroth i in., 2021). Ruxolitynib jest inhibitorem kinaz białkowych JAK1 i JAK2, działa poprzez kompetycyjne blokowanie miejsca katalitycznego wiążącego ATP na JAK1 i JAK2. Skutkiem tej inhibicji jest przerwanie szlaków sygnałowych cytokin i czynników wzrostu, co prowadzi do zmniejszenia produkcji cytokin prozapalnych, które są zazwyczaj podwyższone w mielofibrozie oraz innych chorobach zapalnych (Santos i Verstovsek, 2014). Dzięki działaniu anty-JAK ruksolitynib poprawia objawy kliniczne mielofibrozy, takie jak splenomegalia oraz objawy konstytucyjne, m.in. gorączki, świąd i nocne poty (Verstovsek i in., 2017; Pemmaraju i in., 2023). Nie wykazano jednak, aby ruksolitynib przebudowywał szpik kostny lub wydłużał przeżycie chorych na mielofibrozę. Aktualnie trwają badania nad nowymi strategiami terapeutycznymi, takimi jak kombinacje ruksolitynibu z innymi lekami (Li i in., 2020; Stuckey i in., 2025), inhibitorami BET (np. pelabresib) (Ferreira Gomes i Harrison, 2023; Rampal i in., 2025), inhibitorami białek antyapoptycznych BCL-2 (Pemmaraju i in., 2023), które wykazują obiecujące działanie w łagodzeniu objawów i poprawie parametrów hematologicznych u wybranych pacjentów (Tremblay i Hoffman, 2021). Zrozumienie interakcji pomiędzy krwiotwórczymi komórkami macierzystymi a zmienioną niszą szpikową staje się kluczowe dla opracowania terapii, które mogłyby wykraczać poza samo łagodzenie objawów. Nowe strategie terapeutyczne ukierunkowane na proces włóknienia i mikrośrodowisko szpiku dają nadzieję na modyfikację przebiegu choroby, potencjalne spowolnienie progresji mielofibrozy i poprawienie rokowania pacjentów.

Bibliografia:

1. Arber DA, Orazi A, Hasserjian RP, Borowitz MJ, Calvo KR, Kvasnicka HM, Wang SA, Bagg A, Barbui T, Branford S, Bueso-Ramos CE, Cortes JE, Dal Cin P, DiNardo CD, Dombret H, Duncavage EJ, Ebert BL, Estey EH, Facchetti F, Foucar K, Gangat N, Gianelli U, Godley LA, Gökbuget N, Gotlib J, Hellström-Lindberg E, Hobbs GS, Hoffman R, Jabbour EJ, Kiladjian JJ, Larson RA, Le Beau MM, Loh ML, Löwenberg B, Macintyre E, Malcovati L, Mullighan CG, Niemeyer C, Odenike OM, Ogawa S, Orfao A, Papaemmanuil E, Passamonti F, Porkka K, Pui CH, Radich JP, Reiter A, Rozman M, Rudelius M, Savona MR, Schiffer CA, Schmitt-Graeff A, Shimamura A, Sierra J, Stock WA, Stone RM, Tallman MS, Thiele J, Tien HF, Tzankov A, Vannucchi AM, Vyas P, Wei AH, Weinberg OK, Wierzbowska A, Cazzola M, Döhner H, Tefferi A. International Consensus Classification of Myeloid Neoplasms and Acute Leukemias: integrating morphologic, clinical, and genomic data. *Blood*. 2022 Sep 15;140(11):1200-1228. doi: 10.1182/blood.2022015850.
2. Beerman I, Luis TC, Singbrant S, Lo Celso C, Méndez-Ferrer S. The evolving view of the hematopoietic stem cell niche. *Exp Hematol*. 2017 Jun;50:22-26. doi: 10.1016/j.exphem.2017.01.008. Beerman I, Luis TC, Singbrant S, Lo Celso C, Méndez-Ferrer S. The evolving view of the hematopoietic stem cell niche. *Exp Hematol*. 2017 Jun;50:22-26. doi: 10.1016/j.exphem.2017.01.008.
3. Bose P, Verstovsek S. Mutational profiling in myelofibrosis: implications for management. *Int J Hematol*. 2020 Feb;111(2):192-199. doi: 10.1007/s12185-019-02758-z.
4. Breccia M, Palandri F, Polverelli N, Caira M, Berluti M, Palumbo GA, De Stefano V. Epidemiology and disease characteristics of myelofibrosis: a comparative analysis between Italy and global perspectives. *Front Oncol*. 2024 Jul 24;14:1382872. doi: 10.3389/fonc.2024.
5. Deisseroth A, Kaminskas E, Grillo J, Chen W, Saber H, Lu HL, Rothmann MD, Brar S, Wang J, Garnett C, Bullock J, Burke LB, Rahman A, Sridhara R, Farrell A, Pazdur R. U.S. Food and Drug Administration approval: ruxolitinib for the treatment of patients with intermediate and high-risk myelofibrosis. *Clin Cancer Res*. 2012 Jun 15;18(12):3212-7. doi: 10.1158/1078-0432.CCR-12-0653.
6. Ferreira Gomes G, Harrison C. Pelabresib (CPI-0610): An Exciting Novel Drug for the Treatment of Myelofibrosis. *Curr Hematol Malig Rep*. 2023 Aug;18(4):113-120. doi: 10.1007/s11899-023-00696-6.
7. Grabek J, Straube J, Bywater M, Lane SW. MPN: The Molecular Drivers of Disease Initiation, Progression and Transformation and their Effect on Treatment. *Cells*. 2020 Aug 14;9(8):1901. doi: 10.3390/cells9081901.
8. Hormoz S, Sankaran VG, Mullally A. Evolution of myeloproliferative neoplasms from normal blood stem cells. *Haematologica*. 2025 Apr 1;110(4):840-849. doi: 10.3324/haematol.2023.283951.
9. How J, Garcia JS, Mullally A. Biology and therapeutic targeting of molecular mechanisms in MPNs. *Blood*. 2023 Apr 20;141(16):1922-1933. doi: 10.1182/blood.2022017416.
10. Klampfl T, Gisslinger H, Harutyunyan AS, Nivarthi H, Rumi E, Milosevic JD, Them NC, Berg T, Gisslinger B, Pietra D, Chen D, Vladimer GI, Bagienski K, Milanesi C, Casetti IC, Sant'Antonio E, Ferretti V, Elena C, Schischlik F, Cleary C, Six M, Schalling M,

- Schönegger A, Bock C, Malcovati L, Pascutto C, Superti-Furga G, Cazzola M, Kralovics R. Somatic mutations of calreticulin in myeloproliferative neoplasms. *N Engl J Med*. 2013 Dec 19;369(25):2379-90. doi: 10.1056/NEJMoa1311347.
11. Li Y, Zhu S, Liu W, Ming J, Wang X, Hu X. Ruxolitinib-based combinations in the treatment of myelofibrosis: worth looking forward to. *Ann Hematol*. 2020 Jun;99(6):1161-1176. doi: 10.1007/s00277-020-04028-z.
 12. Méndez-Ferrer S, Bonnet D, Steensma DP, Hasserjian RP, Ghobrial IM, Gribben JG, Andreeff M, Krause DS. Bone marrow niches in haematological malignancies. *Nat Rev Cancer*. 2020 May;20(5):285-298. doi: 10.1038/s41568-020-0245-2.
 13. Mullally A, Lane SW, Ball B, Megerdichian C, Okabe R, Al-Shahrour F, Paktinat M, Haydu JE, Housman E, Lord AM, Wernig G, Kharas MG, Mercher T, Kutok JL, Gilliland DG, Ebert BL. Physiological Jak2V617F expression causes a lethal myeloproliferative neoplasm with differential effects on hematopoietic stem and progenitor cells. *Cancer Cell*. 2010 Jun 15;17(6):584-96. doi: 10.1016/j.ccr.2010.05.015.
 14. Passamonti F, Mora B. Myelofibrosis. *Blood*. 2023 Apr 20;141(16):1954-1970. doi: 10.1182/blood.2022017423.
 15. Pemmaraju N, Bose P, Rampal R, Gerds AT, Fleischman A, Verstovsek S. Ten years after ruxolitinib approval for myelofibrosis: a review of clinical efficacy. *Leuk Lymphoma*. 2023 Jun;64(6):1063-1081. doi: 10.1080/10428194.2023.2196593.
 16. Pemmaraju N, Garcia JS, Perkins A, Harb JG, Souers AJ, Werner ME, Brown CM, Passamonti F. New era for myelofibrosis treatment with novel agents beyond Janus kinase-inhibitor monotherapy: Focus on clinical development of BCL-X_L /BCL-2 inhibition with navitoclax. *Cancer*. 2023 Nov 15;129(22):3535-3545. doi: 10.1002/cncr.34986.
 17. Pikman Y, Lee BH, Mercher T, McDowell E, Ebert BL, Gozo M, Cuker A, Wernig G, Moore S, Galinsky I, DeAngelo DJ, Clark JJ, Lee SJ, Golub TR, Wadleigh M, Gilliland DG, Levine RL. MPLW515L is a novel somatic activating mutation in myelofibrosis with myeloid metaplasia. *PLoS Med*. 2006 Jul;3(7):e270. doi: 10.1371/journal.pmed.0030270.
 18. Rampal R, Al-Shahrour F, Abdel-Wahab O, Patel JP, Brunel JP, Mermel CH, Bass AJ, Pretz J, Ahn J, Hricik T, Kilpivaara O, Wadleigh M, Busque L, Gilliland DG, Golub TR, Ebert BL, Levine RL. Integrated genomic analysis illustrates the central role of JAK-STAT pathway activation in myeloproliferative neoplasm pathogenesis. *Blood*. 2014 May 29;123(22):e123-33. doi: 10.1182/blood-2014-02-554634.
 19. Rampal RK, Grosicki S, Chraniuk D, Abruzzese E, Bose P, Gerds AT, Vannucchi AM, Palandri F, Lee SE, Gupta V, Lucchesi A, Oh ST, Kuykendall AT, Patriarca A, Álvarez-Larrán A, Mesa R, Kiladjian JJ, Talpaz M, Scandura JM, Lavie D, Harris M, Kays SK, Li Q, Boxhammer R, Brown B, Jegg AM, Harrison CN, Mascarenhas J. Pelabresib plus ruxolitinib for JAK inhibitor-naïve myelofibrosis: a randomized phase 3 trial. *Nat Med*. 2025 May;31(5):1531-1538. doi: 10.1038/s41591-025-03572-3.
 20. Rozovski U, Verstovsek S, Manshouri T, Dembitz V, Bozinovic K, Newberry K, Zhang Y, Bove JE 4th, Pierce S, Kantarjian H, Estrov Z. An accurate, simple prognostic model consisting of age, JAK2, CALR, and MPL mutation status for patients with primary myelofibrosis. *Haematologica*. 2017 Jan;102(1):79-84. doi: 10.3324/haematol.2016.149765.

21. Santos FP, Verstovsek S. Efficacy of ruxolitinib for myelofibrosis. *Expert Opin Pharmacother*. 2014 Jul;15(10):1465-73. doi: 10.1517/14656566.2014.923404.
22. Seita J, Weissman IL. Hematopoietic stem cell: self-renewal versus differentiation. *Wiley Interdiscip Rev Syst Biol Med*. 2010 Nov-Dec;2(6):640-53. doi: 10.1002/wsbm.86.
23. Stuckey R, Segura Díaz A, Gómez-Casares MT. Myelofibrosis: Treatment Options After Ruxolitinib Failure. *Curr Oncol*. 2025 Jun 9;32(6):339. doi: 10.3390/curroncol32060339.
24. Tefferi A, Lasho TL, Tischer A, Wassie EA, Finke CM, Belachew AA, Ketterling RP, Hanson CA, Pardanani AD. The prognostic advantage of calreticulin mutations in myelofibrosis might be confined to type 1 or type 1-like CALR variants. *Blood*. 2014 Oct 9;124(15):2465-6. doi: 10.1182/blood-2014-07-588426.
25. Tefferi A. Primary myelofibrosis: 2023 update on diagnosis, risk-stratification, and management. *Am J Hematol*. 2023 May;98(5):801-821. doi: 10.1002/ajh.26857.
26. Tremblay D, Hoffman R. Emerging drugs for the treatment of myelofibrosis: phase II & III clinical trials. *Expert Opin Emerg Drugs*. 2021 Dec;26(4):351-362. doi: 10.1080/14728214.2021.2015320.
27. Vainchenker W, Kralovics R. Genetic basis and molecular pathophysiology of classical myeloproliferative neoplasms. *Blood*. 2017 Feb 9;129(6):667-679. doi: 10.1182/blood-2016-10-695940.
28. Verstovsek S, Mesa RA, Gotlib J, Gupta V, DiPersio JF, Catalano JV, Deininger MW, Miller CB, Silver RT, Talpaz M, Winton EF, Harvey JH Jr, Arcasoy MO, Hexner EO, Lyons RM, Paquette R, Raza A, Jones M, Kornacki D, Sun K, Kantarjian H; COMFORT-I investigators. Long-term treatment with ruxolitinib for patients with myelofibrosis: 5-year update from the randomized, double-blind, placebo-controlled, phase 3 COMFORT-I trial. *J Hematol Oncol*. 2017 Feb 22;10(1):55. doi: 10.1186/s13045-017-0417-z.

9. MOLEKULARNE DETERMINANTY WIRULENCJI I MECHANIZMY PATOGENEZY *CRONOBACTER SAKAZAKII* – AKTUALNY STAN WIEDZY

mgr Adrian Macion

[1] Zakład Genetyki Bakterii

Instytut Mikrobiologii

Wydział Biologii

Uniwersytet Warszawski

[2] Polskie Towarzystwo Astrobiologiczne

[3] Studenckie Czasopismo Naukowe *Eureka!*

E-mail: macionadrian@gmail.com

Streszczenie: *Cronobacter sakazakii* (dawniej *Enterobacter sakazakii*) je oportunistycznym patogenem Gram-ujemny, stanowiącym poważne zagrożenie dla noworodków, szczególnie wcześniaków i dzieci z niską masą urodzeniową. Zakażenia o etiologii *C. sakazakii* – choć rzadkie – charakteryzują się wysoką śmiertelnością (40–80%) i ciężkim przebiegiem klinicznym, obejmującym martwicze zapalenie jelit (NEC), sepsę oraz zapalenie opon mózgowo-rdzeniowych. Głównym wektorem transmisji jest zanieczyszczone bakteriami mleko modyfikowane w proszku, w którym gatunek ten jest w stanie przetrwać dzięki unikalnej oporności na wysychanie. Niniejsza praca stanowi przegląd aktualnej wiedzy na temat molekularnych mechanizmów patogenyzy *C. sakazakii*. Omówiono kluczowe czynniki wirulencji zaangażowane w kolejne etapy infekcji: (I) od adhezji i kolonizacji jelita (białka OmpA, GapA, metabolizm kwasu sjałowego), przez (II) przełamywanie barier tkankowych i unikanie układu odpornościowego (białko Cpa, siderofory), aż po (III) mechanizmy neuroinwazji. Szczególną uwagę zwrócono na najnowsze doniesienia dotyczące roli T6SS w konkurencji międzygatunkowej oraz narastającego problemu lekooporności, w tym obecności genu *mcr-9.1*.

Słowa kluczowe: *Cronobacter sakazakii*, czynniki wirulencji, martwicze zapalenie jelit, zapalenie opon mózgowo-rdzeniowych, kserotolerancja

1. Wstęp

Rodzaj *Cronobacter* obejmuje grupę Gram-ujemnych, niezdolnych do sporulacji pałeczek z rodziny *Enterobacteriaceae*, charakteryzujących się zdolnością do ruchu oraz metabolizmem fakultatywnie beztlenowym. Bakterie te są wszechobecne w środowisku naturalnym, zasiedlają glebę, wodę oraz produkty pochodzenia roślinnego. Mimo swojego środowiskowego pochodzenia stanowią one krytyczne zagrożenie dla zdrowia w specyficznych grupach populacyjnych, ewoluując do rangi oportunistycznych patogenów człowieka wywołujących infekcje o wyjątkowo wysokiej śmiertelności.

1.1. Historia i taksonomia

Historia klasyfikacji *C. sakazakii* sięga lat 80. XX wieku, kiedy to bakterie te – charakteryzujące się żółtymi koloniami – zaliczano do gatunku *Enterobacter cloacae*. W 1980 roku, na skutek zbadania różnic biochemicznych i genetycznych, wyodrębniono je jako nowy

gatunek – *Enterobacter sakazakii*, nazwany na cześć japońskiego mikrobiologa Riichiego Sakazakiego [1].

Przełom w taksonomii nastąpił w latach 2007–2008 w wyniku szeroko zakrojonych badań genetycznych. Iversen i współpracownicy, opierając się na analizie sekwencji genu 16S rRNA oraz hybrydyzacji DNA-DNA, wykazali, że *E. sakazakii* stanowi w rzeczywistości heterogenną grupę organizmów. Doprowadziło to do utworzenia nowego rodzaju – *Cronobacter* [2]. Nazwa ta, wywodząca się od imienia greckiego tytana Kronosa, który połykał własne dzieci, stanowiła metaforyczne odniesienie do wysokiej zjadliwości bakterii wobec noworodków.

Obecnie, zgodnie ze zmodyfikowaną taksonomią [3], w obrębie rodzaju wyróżnia się siedem gatunków:

- *Cronobacter sakazakii*
- *Cronobacter malonaticus*
- *Cronobacter turicensis*
- *Cronobacter muytjensii*
- *Cronobacter dublinensis*
- *Cronobacter universalis*
- *Cronobacter condimenti*

Chociaż infekcje u ludzi mogą być wywoływane przez różne gatunki, to *C. sakazakii* pozostaje gatunkiem o największym znaczeniu klinicznym w populacji noworodków, odpowiadając za zdecydowaną większość przypadków ciężkich zakażeń [4].

1.2. Obraz kliniczny i grupy ryzyka

Infekcje wywołane przez *Cronobacter* charakteryzują się specyficzną grupą podwyższonego ryzyka, do której należą noworodki (dzieci < 28. dnia życia), a w szczególności wcześniaki urodzone przed 37. tygodniem ciąży oraz noworodki z niską masą urodzeniową (LBW – ang. *Low Birth Weight*, < 2500 g) i bardzo niską masą urodzeniową (VLBW – ang. *Very Low Birth Weight*, < 1500 g).

Obraz kliniczny zazwyczaj obejmuje zestaw ciężkich jednostek chorobowych: martwicze zapalenie jelit, sepsę oraz zapalenie opon mózgowo-rdzeniowych [5]. Cechą wyróżniającą patogenezę *C. sakazakii* – w odróżnieniu od innych patogenów z rodziny *Enterobacteriaceae* – jest silny neurotropizm. Bakteria ta wykazuje zdolność do translokacji przez barierę krew-mózg, co prowadzi do ciężkich powikłań, takich jak ropnie mózgu, wodogłowie oraz encefalomalacja z tworzeniem torbieli [6].

1.3. Epidemiologia i śmiertelność

Zakażenia *Cronobacter* są rzadkie, jednak cechuje je bardzo wysoką śmiertelnością. Dane epidemiologiczne wykazują, że wskaźnik śmiertelności w przypadku inwazyjnej choroby u noworodków waha się od 15% do 40%. Sytuacja wygląda dużo gorzej w przypadku rozwinięcia się zapalenia opon mózgowo-rdzeniowych, gdzie śmiertelność może sięgać 40–80% [5, 6]. Co więcej, u dzieci, które przeżyły infekcję ośrodkowego układu nerwowego, często obserwuje się trwałe następstwa neurologiczne, w tym opóźnienie rozwoju psychoruchowego.

Tabela 1. Klasyfikacja gatunków w obrębie rodzaju *Cronobacter* ze szczególnym uwzględnieniem ich potencjału patogenego oraz rezerwuaru środowiskowego [2, 3, 4]

Gatunek	Znaczenie kliniczne	Uwagi
<i>C. sakazakii</i>	bardzo wysokie	Główna przyczyna NEC i zapalenia opon u noworodków. Posiada unikalne geny metabolizmu kwasu sjałowego (<i>nanAKT</i>).
<i>C. malonaticus</i>	wysokie	Częściej wiązany z infekcjami u dorosłych (zapalenia płuc, ZUM), rzadziej u noworodków.
<i>C. turicensis</i>	umiarkowane	Potwierdzone, choć rzadkie przypadki sepsy i bakteryjnego zapalenia opon mózgowo-rdzeniowych u noworodków. Wykazuje wysoką odporność na wysychanie.
<i>C. muytjensii</i>	niskie	Rzadkie izolacje kliniczne; brak dowodów na wysoką zjadliwość.
<i>C. dublinensis</i>	niskie	Gatunek silnie zróżnicowany genetycznie, izolowany głównie u pacjentów z immunosupresją.
<i>C. universalis</i>	znikome	Szeroko rozpowszechniony w środowisku, brak istotnego znaczenia epidemiologicznego.
<i>C. condimenti</i>	znikome	Uważany za gatunek wyłącznie środowiskowy.

2. Rezerwuar środowiskowy i mechanizmy adaptacji do stresu

Zrozumienie epidemiologii zakażeń *Cronobacter* jest ściśle związane z analizą nisz ekologicznych tego patogenu. W przeciwieństwie do wielu bakterii przenoszonych drogą pokarmową (np. *Salmonella* spp. czy *Escherichia coli*), które preferują środowisko wilgotne, *C. sakazakii* wykazuje niezwykłą tolerancję na skrajne warunki środowiskowe – stres osmotyczny i wysychanie – co determinuje główny szlak transmisji zakażenia.

2.1. Mleko modyfikowane (PIF) jako wektor zakażenia

Mleko modyfikowane w proszku (PIF – ang. *Powdered Infant Formula*) zostało uznane przez WHO i FAO za główny wektor transmisji *Cronobacter* do populacji noworodków [7]. Kluczowym aspektem – często błędnie pomijanym przez konsumentów – jest fakt, że PIF nie jest produktem sterylnym. Procesy pasteryzacji stosowane na początku linii produkcyjnej eliminują wegetatywne formy bakterii, jednak wtórna kontaminacja może nastąpić na etapie suszenia, mieszania składników, pakowania lub – co ma miejsce najczęściej – podczas przygotowywania mieszanki w warunkach domowych i szpitalnych.

W środowisku sproszkowanego mleka panuje skrajnie niska aktywność wody. Dla większości bakterii z rodziny *Enterobacteriaceae* takie warunki są letalne. *C. sakazakii* posiada jednak unikalną zdolność do przetrwania w stanie anabiozy w suchym produkcie przez okres nawet do dwóch lat [8]. Choć bakteria nie namnaża się w suchym proszku, zachowuje pełną żywotność metaboliczną. Po dodaniu wody i przechowywaniu w temperaturze pokojowej następuje gwałtowne namnażanie patogenu.

2.2. Oporność na wysychanie

Fenomen przetrwania w warunkach niskiej aktywności wody (kserotolerancja) jest najważniejszą cechą adaptacyjną tego gatunku. Badania molekularne pozwoliły zidentyfikować kilka kluczowych mechanizmów odpowiedzialnych za tę oporność:

- **Akumulacja trehalozy**

Trehaloza jest disacharydem pełniącym funkcję kluczowego osmoprotektanta. W odpowiedzi na stres osmotyczny, *C. sakazakii* aktywuje szlak biosyntezy trehalozy, regulowany przez geny *otsAB*. Zgodnie z hipotezą zastępowania wody cząsteczki tego cukru zastępują wodę w strukturach błonowych i białkowych, tworząc wiązania wodorowe, które stabilizują makromolekuły i zapobiegają ich denaturacji podczas wysychania [9].

- **Szok termiczny i białka opiekuńcze**

W warunkach stresu (suszenie, podwyższona temperatura) obserwuje się nadekspresję białek szoku termicznego (HSP – ang. *Heat Shock Proteins*), takich jak GroEL, DnaK oraz ClpB. Pełnią one funkcję chaperonów, pomagając w prawidłowym fałdowaniu białek uszkodzonych przez stres środowiskowy [9].

- **Witryfikacja cytoplazmy**

Sugeruje się, że akumulacja rozpuszczonych substancji w cytoplazmie prowadzi do przejścia w stan szklisty, co drastycznie spowalnia metabolizm i reakcje chemiczne, chroniąc DNA przed uszkodzeniami oksydacyjnymi.

2.3. Tworzenie biofilmu i przetrwanie na powierzchniach abiotycznych

Zdolność do tworzenia biofilmu jest kolejnym czynnikiem ułatwiającym przetrwanie bakterii w środowisku produkcyjnym i klinicznym. *C. sakazakii* efektywnie kolonizuje powierzchnie hydrofobowe powszechnie stosowane w akcesoriach do karmienia niemowląt oraz w przemyśle spożywczym, takie jak: silikon, lateks, poliwęglan oraz stal nierdzewna.

Proces tworzenia biofilmu jest wieloetapowy i ściśle regulowany:

1. **Adhezja odwracalna**

Inicjowana przez rzęski (ruchliwość pozwala na dotarcie do powierzchni) oraz siły fizykochemiczne (hydrofobowość).

2. **Adhezja nieodwracalna**

Pośredniczona przez fimbrie i białka błony zewnętrznej.

3. **Dojrzewanie i wytwarzanie macierzy (EPS)**

Bakterie wydzielają zewnątrzkomórkowe substancje polimerowe (głównie celulozę i kwas kolanowy), które tworzą trójwymiarową strukturę chroniącą komórki. Wykazano, że operon *bcs* (odpowiedzialny za syntezę celulozy) jest kluczowy dla stabilności biofilmu u *Cronobacter* [10].

Bakterie osadzone w strukturze dojrzałego biofilmu wykazują nawet 1000-krotnie wyższą oporność na środki dezynfekcyjne i antybiotyki w porównaniu do form planktonowych. W kontekście szpitalnym oznacza to, że niedokładnie zdezynfekowane przedmioty mogą stać się trwałym rezerwuarem patogenu, prowadząc do zakażeń o charakterze endemicznym na oddziałach intensywnej terapii noworodka.

3. Molekularne mechanizmy patogenezы

Patogeneza zakażeń *C. sakazakii* jest procesem złożonym i wieloetapowym, wymagającym skoordynowanej ekspresji genów wirulencji w odpowiedzi na zmieniające się mikrośrodowisko w organizmie gospodarza. Analiza genomika porównawcza pozwoliła na zidentyfikowanie klastrow genów odpowiedzialnych za kolejne fazy infekcji: od wstępnej kolonizacji, przez inwazję barier tkankowych, aż po przetrwanie w układzie krążenia i neuroinwazję.

3.1. Etap I – adhezja i kolonizacja

Pierwszym, kluczowym krokiem w patogenezie jest zdolność bakterii do przeciwstawienia się perystaltyce jelit oraz skuteczne przyleganie do komórek nabłonka jelita (enterocytów). Sukces na tym etapie zależy nie tylko od fizycznej adhezji, ale także od zdolności do szybkiej adaptacji metabolicznej w specyficznym środowisku jelita noworodka.

3.1.1. Rola białek błony zewnętrznej (OMPs) w adhezji

Białka błony zewnętrznej (OMPs – ang. *Outer Membrane Proteins*) stanowią pierwszą linię kontaktu między patogenem a receptorem gospodarza. Wśród nich kluczową rolę odgrywają:

- **OmpA**

Jest to najlepiej scharakteryzowany czynnik wirulencji *C. sakazakii*. OmpA to białko tworzące strukturę β -baryłki, które pełni podwójną funkcję: strukturalną (utrzymanie integralności błony) oraz funkcjonalną jako inwazyjna. Badania *in vitro* na liniach komórkowych Caco-2 (model nabłonka jelitowego) wykazały, że ekspresja OmpA jest niezbędna do efektywnego wiązania się bakterii z fibronektyną obecną na powierzchni komórek gospodarza [11].

- **OmpX**

Podobnie jak OmpA, białko OmpX bierze udział w adhezji, ale jego rola jest szczególnie istotna w promowaniu inwazji i modulowaniu odpowiedzi immunologicznej. Mutanty delecyjne ($\Delta ompX$) wykazują znacząco obniżoną zdolność do kolonizacji przewodu pokarmowego w modelach zwierzęcych [12].

Rola białka GapA

W ostatnich latach lista znanych adhezyn *C. sakazakii* została poszerzona o białko GapA (dehydrogenaza gliceraldehydo-3-fosforanowa). Choć tradycyjnie jest to enzym glikolityczny zlokalizowany w cytoplazmie, u *C. sakazakii* pełni on funkcję tzw. “białka moonlighting” (o podwójnej lokalizacji i funkcji). Transportowane na powierzchnię komórki GapA wiąże się z plazminogenem oraz białkami macierzy zewnątrzkomórkowej, co znacząco zwiększa efektywność kolonizacji jelita [13].

3.1.2. Wykorzystanie kwasu sjałowego – metaboliczna przewaga konkurencyjna

Unikalną cechą *C. sakazakii* na tle innych *Enterobacteriaceae* jest zdolność do egzogenego pozyskiwania i metabolizowania kwasu sjałowego.

Jelito noworodka jest środowiskiem bogatym w kwas sjałowy, który występuje w:

- **oligosacharydach mleka** – zawierające kwas sialowy oligosacharydy są istotnym składnikiem mleka matki;
- **mucynach jelitowych** – glikoproteiny tworzące warstwę śluzu ochronnego;
- **suplementowanych mieszankach** – nowoczesne preparaty PIF są często wzbogacane w kwas sialowy w celu wspierania rozwoju układu nerwowego.

Za metabolizm ten odpowiada klastery genów *nanAKT*, kodujący transporter (NanT), aldolazę (NanA) i kinazę (NanK). Mechanizm ten daje *C. sakazakii* ogromną przewagę ewolucyjną nad mikrobiotą komensalną, która często nie posiada szlaków degradacji tego cukru. Dzięki temu patogen może wykorzystywać składniki diety dziecka lub jego własny śluz jelitowy jako źródło węgla i azotu, co prowadzi do gwałtownego namnażania się bakterii przed atakiem na tkanki [14].

3.1.3. System sekrecji typu VI

W procesie kolonizacji *C. sakazakii* wykorzystuje również antagonizm wobec konkurencyjnej mikroflory. System sekrecji typu VI (T6SS – ang. *Type VI Secretion System*) odpowiada za wstrzykiwanie białek efektorowych bezpośrednio do sąsiadujących komórek bakteryjnych (np. *E. coli*). Badania genomowe potwierdziły obecność kompletnych klastrów genów T6SS u izolatów klinicznych. Eliminacja konkurencji za pomocą T6SS ułatwia bakterii dominację w niszy ekologicznej jelita [15].

3.2. Etap II – przekroczenie bariery jelita

Po skutecznej kolonizacji *C. sakazakii* musi przełamać barierę nabłonkową jelita, aby przedostać się do krwiobiegu. Proces ten – zwany translokacją – jest kluczowy dla rozwoju uogólnionego zakażenia. W patogenezie tego etapu bakteria wykorzystuje dwutorową strategię: (I) szlak paracellularny – niszczenie połączeń międzykomórkowych, (II) szlak intracellularny – inwazja samych enterocytów.

3.2.1. Rozkład połączeń międzykomórkowych

Bariera jelitowa utrzymywana jest dzięki kompleksom połączeń ścisłych (TJ – ang. *Tight Junctions*), które uszczelniają przestrzeń między enterocytami, zapobiegając przenikaniu patogenów i toksyn. *C. sakazakii* wykształcił mechanizmy pozwalające na rozszczelnienie tej bariery.

Badania wykazały, że infekcja prowadzi do obniżenia ekspresji kluczowych białek budulcowych TJ, takich jak ZO-1 (ang. *zonula occludens-1*) oraz okludyna. Proces ten jest prawdopodobnie mediowany przez interakcję białka OmpA oraz wydzielanych enterotoksyn z receptorami nabłonka, co uruchamia kaskady sygnałowe prowadzące do degradacji cytoszkieletu aktynowego. W rezultacie dochodzi do zwiększenia przepuszczalności nabłonka, co otwiera bakteriom drogę do przestrzeni podśluzówkowej i naczyń krwionośnych [16].

3.2.2. Indukcja apoptozy i cytotoksyczność

Równolegle do rozluźniania połączeń ścisłych, *C. sakazakii* wykazuje działanie cytotoksyczne. Po wnikięciu do wnętrza komórek nabłonka (na drodze endocytozy zależnej od mikrotubul), bakterie są zdolne do indukowania programowanej śmierci komórek (apoptozy).

Mechanizm ten jest skorelowany z obecnością endotoksyny (LPS) oraz białek błony zewnętrznej. Zjawisko masowej apoptozy enterocytów prowadzi do powstawania ubytków w ciągłości nabłonka, co w obrazie klinicznym manifestuje się jako niszczenie kosmków jelitowych – charakterystyczna cecha martwiczego zapalenia jelit [17].

3.2.3. Rola endotoksyny (LPS) w patogenezie NEC

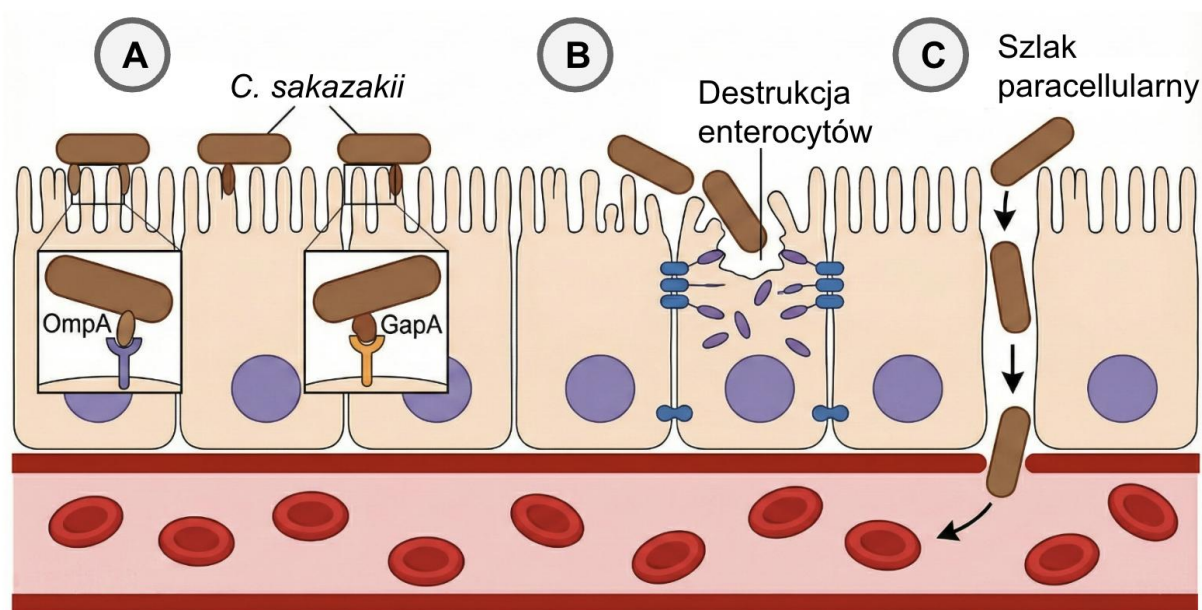
Martwicze zapalenie jelit (NEC – ang. *necrotizing enterocolitis*) jest najcięższą formą manifestacji zakażenia *C. sakazakii* w jelitach. Kluczową rolę w patomechanizmie tej choroby odgrywa nadmierna odpowiedź układu immunologicznego noworodka na lipopolisacharyd (LPS) – główny składnik ściany komórkowej bakterii Gram-ujemnych.

Układ odpornościowy wcześniaków charakteryzuje się niedojrzałością mechanizmów regulacyjnych, w tym nadekspresją receptora TLR4 (ang. *Toll-like receptor 4*) na powierzchni enterocytów.

Na proces ten składają się trzy etapy:

1. LPS *C. sakazakii* wiąże się z receptorem TLR4.
2. Następuje aktywacja czynnika transkrypcyjnego NF- κ B.
3. Dochodzi do niekontrolowanego wyrzutu cytokin prozapalnych (tzw. burza cytokinowa), głównie IL-6, IL-8 oraz TNF- α .

Ten gwałtowny stan zapalny prowadzi do niedokrwienia jelit, zakrzepicy w mikrokrażeniu jelitowym i ostatecznie do martwicy ściany jelita, co wiąże się z ryzykiem perforacji i zapalenia otrzewnej [18].



Rycina 1. Schemat molekularnych mechanizmów adhezji i translokacji *Cronobacter sakazakii* przez barierę nabłonkową jelita

Ilustracja przedstawia kluczowe etapy inwazji prowadzące do rozwoju bakteriemii. (A) Adhezja: W początkowej fazie infekcji bakterie *C. sakazakii* (kolor brązowy) przylegają do mikrosmków na szczycie powierzchni enterocytów. Proces ten jest warunkowany przez białka błony zewnętrznej, w tym OmpA oraz powierzchniowe białko GapA, które działają jako

adhezyny wiążące się z receptorami gospodarza. (B) Destrakcja barier: Infekcja prowadzi do degradacji białek budulcowych połączeń ścisłych (*Tight Junctions*) i śmierci samych enterocytów, co skutkuje rozszczelnieniem bariery nabłonkowej i utratą integralności tkanki. (C) Translokacja paracelularna: Wykorzystując powstałe szczeliny, patogen migruje drogą międzykomórkową ze światła jelita do przestrzeni podśluzówkowej, uzyskując dostęp do naczyń krwionośnych i inicjując zakażenie systemowe.

3.3. Etap III – przeżycie w krwiobiegu i oporność na czynniki układu odpornościowego

Po translokacji przez barierę jelitową, bakterie trafiają do krwiobiegu, gdzie napotykać jąłowe i wrogie środowisko. Sukces patogenu na tym etapie zależy od dwóch czynników: (I) zdolności do uniknięcia bakteriobójczego działania surowicy (układu dopełniacza) oraz (II) umiejętności pozyskiwania niezbędnych do życia mikroskładników (przede wszystkim żelaza).

3.3.1. Plazmid wirulencji pESA3 i białko Cpa

Analiza genomowa szczepów *C. sakazakii* wykazała, że niemal wszystkie izolaty kliniczne posiadają duży, konserwatywny plazmid wirulencji o nazwie pESA3 (ok. 131 kpz). Uznaje się go za kluczowy determinant ewolucji *Cronobacter* w stronę patogenu ludzkiego.

Tabela 2. Charakterystyka kluczowego plazmidu wirulencji pESA3 *C. sakazakii*

Kategoria	Charakterystyka
Wielkość i typ ~131 kb (131 196 pz – GenBank: CP000785.1)	• Duży plazmid wirulencji typu RepFIB. • Jest wysoce konserwatywny (występuje u większości szczepów klinicznych <i>C. sakazakii</i>, np. szczep referencyjny BAA-894).
Miejsce inicjacji replikacji <i>repA</i>	• Gen kodujący białko inicjujące replikację, charakterystyczne dla grupy plazmidów RepFIB. • Pozwala na utrzymanie plazmidu w komórce bakteryjnej.
System pozyskiwania żelaza – aerobaktyna <i>iucABCD / iutA</i>	• Operon kodujący biosyntezę i transport aerobaktyny. • Umożliwia bakterii pobieranie żelaza z otoczenia (np. z surowicy ludzkiej), co jest kluczowe dla przeżycia w organizmie gospodarza.
System pozyskiwania żelaza – cronobaktyna <i>eitCBAD</i>	• Specyficzny dla <i>Cronobacter</i> system transportu żelaza. • Podobnie jak aerobaktyna, wspomaga wzrost bakterii w warunkach niedoboru żelaza (np. wewnątrz organizmu ludzkiego).
Aktywator plazminogenu <i>cpa</i> (ang. <i>Cronobacter plasminogen activator</i>)	• Gen kodujący proteazę błony zewnętrznej. • Rozkłada składniki dopełniacza, zapewniając oporność na działanie surowicy (bakteriobójcze właściwości krwi). • Ułatwia inwazję poprzez degradację macierzy

	zewnątrzkomórkowej i pokonywanie barier tkankowych (np. barierę krew-mózg).
System sekrecji T6SS (ang. <i>Type VI Secretion System</i>)	• Kłaster genów o wielkości ok. 17 kb. • Działa jak "molekularna strzykawka", wstrzykując toksyny do komórek konkurujących o niszę ekologiczną bakterii lub komórek gospodarza, co ułatwia kolonizację jelit.
Tolerancja na metale ciężkie Geny oporności na: arsen, miedź, srebro (<i>sil</i>), tellur (<i>ter</i>)	• Zestaw genów (często zlokalizowanych również na pESA3 lub podobnych plazmidach). • Zapewniający przetrwanie w trudnym środowisku zewnętrznym, np. w zakładach produkcyjnych, zanieczyszczonej metalami glebie.

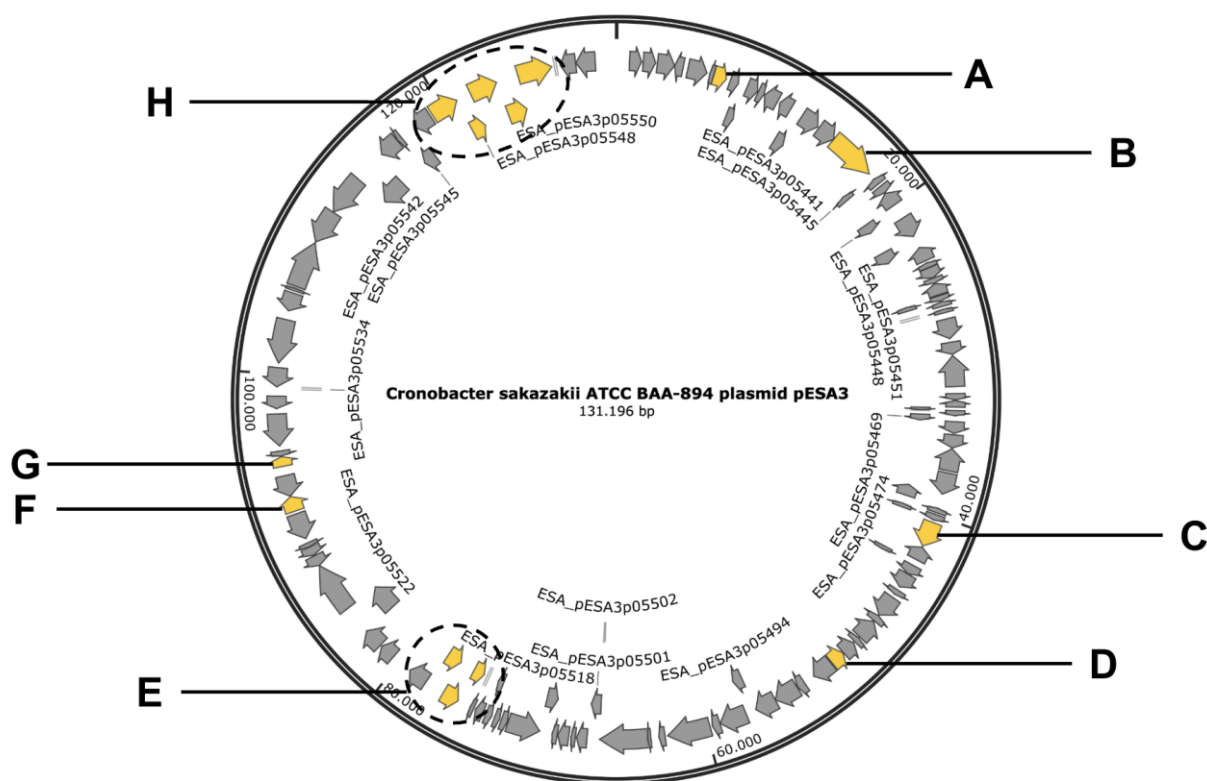
Najważniejszym genem zlokalizowanym na tym plazmidzie jest *cpa* kodujący białko Cpa (ang. *Cronobacter plasminogen activator*):

- **Charakterystyka**

Cpa to proteaza serynowa zakotwiczona w błonie zewnętrznej. Wykazuje ona wysokie podobieństwo strukturalne do białka Pla występującego u *Yersinia pestis* (pałeczki dżumy) oraz PgtE u *Salmonella*.

- **Mechanizm działania**

Główną funkcją Cpa jest proteolityczna degradacja składowych układu dopełniacza – białek C3, C3a oraz C4b. Inaktywacja tych białek paraliżuje kaskadę dopełniacza, uniemożliwiając opsonizację bakterii i tworzenie kompleksu atakującego błonę (MAC – ang. *Membrane Attack Complex*), co chroni komórkę bakteryjną przed lizą w surowicy krwi [19]. Ponadto Cpa aktywuje plazminogen do plazminy, co sprzyja degradacji skrzepów fibrynowych i ułatwia systemowy rozsiew bakterii w organizmie.



Rycina 2. Lokalizacja wybranych genów plazmidu pESA3 hipotetycznie zaangażowanych w proces patogenezy

A – hipotetyczny gen kodujący aktywator plazminogenu; **B** – hipotetyczny gen kodujący element pompy *efflux* (czynnik warunkujący oporność na niektóre substancje bakteriobójcze); **C** – hipotetyczny gen kodujący cyklazę guanylową (zaangażowaną w syntezę cGMP – istotnego czynnika sygnalizacyjnego); **D** – hipotetyczny gen kodujący element pompy *efflux* (czynnik warunkujący oporność na niektóre substancje bakteriobójcze); **E** – zespół hipotetycznych genów zaangażowanych w pobór żelaza; **F** – hipotetyczny gen zaangażowany w metabolizm glutationu (mogący uodparniać komórki na stres oksydacyjny); **G** – hipotetyczny gen zaangażowany w metabolizm glutationu (mogący uodparniać komórki na stres oksydacyjny); **H** – zespół hipotetycznych genów zaangażowanych w pobór żelaza (na podstawie – GenBank: CP000785.1, przy pomocy programu SnapGene).

Tabela 3. Charakterystyka wybranych genów plazmidu pESA3 hipotetycznie zaangażowanych w proces patogenezy (na podstawie – GenBank: CP000785.1, przy pomocy programu SnapGene)

Oznaczenie	ESA_pESA3p05434	Lokalizacja	6101–6916 (→)
Sekwencja nukleotydowa			
ATGCTGGCAGGGGAGTCGAAAGAATTTGTATATGACTCCAGTACAGGTCGTAAAATCAGTCAGCTGAAC TG GAAAATTAAAAATAATCTCATCCTTAAAGGCGATGTTTCCTGGGATGCATGGCCTTTCCTGACCCTGAATGC GCGCGGCTGGACAACCCTGAGTTCTGGTAACGGGCATATGGAAGATTATGACTGGCAAAAAGAAGATCAGT CTCACTGGACCGACCGTTTCGCGCCATCCTGATACCGATCTGAATTATGCCAATGAATATGATTTAAACCTGA AAGGCTGGGTACTGAAAGGGGATGATTATAAAGTCGGCGTTATGGCCGTTATCAACAAACCCGTTTCAGC TGGACCGCCTATGGCGGCTCCTTTAACTATGCGAATGGCAATGATGTTGGCAGCTTCCCGAACGGTGCCCGC GGTATCGGTTACCAGCAGAAAATACAGCATGCCGTATATTGGCTGACCGGTACAGTATCGTTATCAGGACTTT GAAGTGAACGCGCAGTTTAAATCAGCAGCTGGGTGACCGCAAGGATAACGAGCAGATTATATGCGCGCA TCTGACGTTCCCGTAAAAAAGCTAACGACTCCCGTTACTATGGCCCTCGCCGTTGATGCCGTTATTATGTGCTC CCGAATACGAAACTTTTCGCTGAGTTCAGCTATAACCGCTATGAGGAAGGGAAAAGCGGTACGCAGATGAT TAATAACGCGACCGGAACGTCTTTTCGGATAATGGCGATGCCGCCGGCCTGCAAAAACAAAACTATACAA			

TTACCGCAGGTCTTCAGTACCGTTTCTGA			
Sekwencja aminokwasowa			
ML AGESKEFVYDSSTGRKISQLNWKIKNNLILKGDVSWDAWPFLTNLARGWTTLSSGN GHMEDYDWQKEDQS HWTDRSRHPDIDLNYANEYDLNLKGWVLKGDDYKVG VM AGYQQTRFSWTAYGGSFNYANGNDVGSFPNGA RGIGYQQKYS MPY IGLTGQYRYQDFEVNAQFKFSDWVTAKDNDEHY MRDL TFREKANDSRYYGLAVDAGYY VLPNTKLFAEFSYNRYE E GKSGTQ MIN NATGTSFSDNGDAAGLQNKNYTITAGLQY RF -			
Wyniki opracowania Blast			
Pokrycie: 100%; identyczność: 99.63% <i>Covery omptin family outer membrane protease Cpa [Cronobacter sakazakii]</i> WP_105944646.1			
Oznaczenie	ESA_pESA3p05444	Lokalizacja	14.522–17.572 (→)
Sekwencja nukleotydowa			
ATGAAACCGACCTTTAATCTCTCGGCGTGGGCGCTGGCGCACCAGCAACTGGTGAGTTTTTTTATGCTGCTG ATTATCGCGACAGGCGTGCTCTGTTACGAACAAGTCCGCGTAATGAAGATCCGGCTTTTACCATTAAAACC GCGTTGTCTCGGCACGCTGGCTGGCGCTCGGTGACTGACACGACAAATCTGGTCACGGATGTGCTGGA GAAAAAGCTTCAGGAGATCCCCTGGCTTGATAACCTCGAAAGTGAAACCCGCGCCGGTACCGCTGTTATCA ACGTCAACCTGCGCGACGACACGCCGCCGAGGAGTCCCGGGCATATGGAACACGCTTCGCAACCGCATG CAGGATATCGCTTCGTCGCTGCCGCAAGGCGTGCAGGGGCGCGTGGTGAATGATGAGTTTGACGACACCTTC GGCACGATTTATGGCTTTACCGCCGAAGGCTATTCATGACAGGCGTTGCGCGAGCGGGTGGAGGCTATCCG GCGTGGGCTGATGTTGTTAAATGACGTGGGCAAAATTACGCTGCTCGGCGAGCCGAGGAGCAGATAGTTA TCGCCTTTTCTCCCGCAAGCTCGCCGGGATGGGGCTTGATATAACAGAGGTGAGTGACGCCCTGAAGGCGC AGAATGCCGTCGAGCCCGCGGAACGCTGCGCGCCGAGGAGATAACATCGCGATCCGCGTCAGCGGCGCG CTCACCTCGGAGGAGAGCCTGCGCGCCGTGACGCTGCATATCAGTGCCGCTACATTCGCGTGACCGATATC GCCACCGTGAGCCGCCAGCCTGCCGAGCCGCTGTGCCGAGTTTCGCGTGAAACGACAGCCTGCCATCGG GCTTGCGATTTTCGATGGCACCCACTGGCAATATGCTGGATTTTGCCAGGCGCTGAACGCGCGCATGGCGCA GAGCGCGGCGCAATTGCCGCACGGCATCGAGATGGTGAAGTGGCCGATCAGTCCACTGTCGTGAGCGAGG CGGTAAGCGGCTTTGTCCATGTGCTGGTGGAGGCAAGTGTGATTGTTCTCGCGGTGTCATTTGTGTCGCTCG GCATGCGCGCCGGTCTGGTGGTGGCCGCCGCTTCCGCTGGTGGTGGCGATGACGTTTCGAGGCATGATGC TGGCGGCGTCGAGCGCATTTTCACTGCGCGCGCTGATTATCGCCCTTGGTCTGCTGGTGGCGGCGAGC CCATGATCGCTGTGCAAAACCATGGTGGCGCGACTGGAGGCGGCGATTCTCGTCAACGCGCGGCGACCTGG GCTTTCAAACACCGCGTTTCCGATGCTCACCGGCACGCTGGTGGTGGTGGGATTTATCCGTTGGC TTTGCCGCTCCAGCGCCGGGAATATTGTTACTCGCTGTTCTGCTGGTGGCAATCTCGCTGCTCTGTTTAT GGGTGGTGGCGATCCTGTTTTCGCCACTGACCGGCACCTGGCTGCTGCGCGACAGATCAAACGTCATCACA ACGAACCGGGCTGGCTGGCGCGCGGTTATCACAGAATTCTGCAACAGGCGTTGCGCCACCGGCTTGTGACG ATAGGCGGCGCGCTGTTTCGCGCTGGGGGTGTCGGTCTGGGGCACCACATTTATGCAAGGGGAGTTTTTCCCG GCCTCCGATCGCCCGCACTCTGGTGACCTTTGCTGCGCGCAGCGGTCACAGCGCAGACGCAAAA CCAGGTGGAACGCGTGGAGCGTGCCTACGCGCGCAACGAATATCGATCGCTATTCGGCGTATGTGGCA CCGGCGCGGTGCGCTTTTATCTGCCGATGGAGATCCTTCAGGACAATGAAAACACGGCGCAGCTGGTCTGTTG TGGCAAAAGATCTTCAGGCGCGCGATCGCCTGCGTCGCCAGCTCGACACCCTGATGGCGACGCAGTTCAGC GATATCACCACCCGCGTATCGCCGCTGGAGCTAGGGCCACCGGTCGGCTGGCCGCTGAAATATCGCGTCAG TGGGCCGGAATATGCGCAGGTACAACGCCTCGCGCGGGCGCTTGCCGGTACGCTTGGCACATCGCCGCTGA CGCGTGACGTGAACCTGACGGCGGGCGAGCCGGAGAGGGTCAATTACGCTTGAGGTCAACCAGACGGCGGC GCGCGCCGTGGGCGTCTCTCGCAGAGCCTGGCAGAGTTACTGAACACGGTCTGGTCCGGCGCAGCGGTCA CCACAGTGCGCGATAACGACCGGCTGGTGGATGTTGTGCTGCGCGGCAACAATGCGGAACGGCGCGACATT GCCACGCTTTCTGCGCTGAGGGTGGCGACCGCGAGCGGCAAGTAAAGTGGCGCTCAGCGAGGTGGCAACCCC CGTGTGGGGGCTGGACGATCCGGTTATCTGGCGTCATCAGCGGCTGCCGTTTATCACCGTGCAGACCGATCT CGCACCGGGGCTTCGCGCTGAAGCTACGGCTTTGGGACTGCGGCCTGCCATTGACGCATTCCGCGCGCGGGT GCCTGCGGGTATCGCATCGAAGAGGCGGGCGCGGTGGCGGAATCAGATAAGGGCAACCGCTCGGTGTATC GCATGTTGCCGGTAACGCTCATCGTCATGCTGGTGCTACTGATGATTACGCTACGCCGCTTTTACGCATGTT GCTGGCGCTGCTGATGGCTCCGTTCCGGGTACCGGGCGTGGTACTGGCGATGCTGCCACCGGCGACCGCGT GGGGTTTGTGCTGCTGGGATTATCGCGCTGCGCGGGAATGATCATCCGCAATCGGGTATTCTGATAAC GGAGGTGCAGGCAATCTGCAACAGGGTATGGACGTCAACGCGGCGATTACCACCGCCGCACAGCACCGCG CCCGGCCATTATGCTGACGGCCTGTGCGGCGATCCTCGGCATGATCCGATTTTCGATCAGGTATTCTGGG GGCCGATGGCATTGCCATTATCGCGGGGCTTATCGTCGCGACGGTGGTGACGCTGACCGTCTGCCTGCGG CGTTACGCTGCTGTTACGCCGCGCCGGGGCGCGCGTCAAGTAG			
Sekwencja aminokwasowa			

MKPTFNLSAWALAHQQLVSFFMLLIATGVLCEYQLPRNEDPAFTIKTAVVSARWPGASVTDTTNLVTDVLEKKLQEIPLWLDNLESETRAGTAVINVNLRDDTPPQAVPGIWNTLRNRMQDIASSLPQGVQGPVVNDEFDDTFGTIYGF TAEGYSMQALRERVEAIRRGLMLLNDVGKITLLGEPQEQIVAFSPRKLAMGLDITEVSDALKAQNAVEPAGTL RAAGDNIAIRVSGALTSEESLRAVTLHISGRYIPLTDIATVSRQPAEPPVPQFRVNGQPAIGLAISMAPTGNMLDFG QALNARMAQSAQAQLPHGIEMVKVADQSTVVSEAVSGFVHVLVEAVLIVLAVSFVSLGMRAGLVVAAAIPLVLA MTFAGMMLAGIGLQRISLGALIALGLLVDDAMIAVETMVARLEAGDSRQRAATWAFKTTAFPMLTGTLVMIA GFIPVGFAASSAGEYCYSLFVVVAISLLCSWVVAIFSPLTGTWLLPAQIKRHHNEPGWLARGYHRILQQALRHR LVTIGGALFALGVSVWGTTFMQGEFFPASDRPELLVTLSPASASQTQTQNVRLERLALRGNTNIDRYSAYVGT GAVRFYLPMEILQDNENTAQLVVVAKDLQARDRLRRQLDTLMTATQFSDITRVSPLELGPVVGWPLKYRVSGPD YAQVQRLARALAGTLGTSPLTRDVNLTAGEPERVITLEVNTAARAVGVSSQSLAQLLNTVWSGATVTTVRDN DRLVDVVLRGNAERRDIATLSALRVPTASGSKVPLSEVATPVWGLDDPVIWRHQRLPFITVQTDLAPGLRAEAT ALGLRPAIDAFRARVPAGYRIEEAGAVAESDKGNRSVYRMLPVTIVMLVLLMIQLRRFSRMLLALLMAPFGLP GVVLAMLPTGTPLGFVALLGHIALAGMIIRNAVILITEVDGNLQQGMMDVNAAITTAQHRARPIMLTACAILGM IPISHQVFWGPMFAFIIGGLIVATVVTLTVLPAAFSLLLQPRRGRASE-			
Wyniki opracowania Blast			
Pokrycie: 100%; identyczność: 100% <i>MULTISPECIES: efflux RND transporter permease subunit [Cronobacter]</i> WP_011998936.1			
Oznaczenie	ESA_pESA3p05478	Lokalizacja	40.484–42.061 (→)
Sekwencja nukleotydowa			
GTGACTCTCAGACAGTTTATTTCTACCGACTTGGGTTGAGCACGTCGCTTGGCCGAAGTCTGGCTGTCTTAC TTCTGTTCCTCTGGTGGGCGGGATCGGCACGAACGTACTGGTGTATGCACTCCTGGGATGATGAGATAG CACAGGCCGCCAATAAGGCAGTCAACCTTTCTGTCGCCAGGTGCGTCAGGCGGAAGATACCTTTATGGCA GTCGGCCAGACGCTTGATGACGTGCGCGCGGCGGTCACTGCCGGGCAGGCCGCAACGTACCATAGCTATCT GGTGCCTGAAAGCGCGTCAGCCGCTGCTCGACGGGCTCTATTTCTACAACGCGCAGGGCGTTATCAAAG GTTCTTCATCCGGCATCAGCGGCATTCCGGGCGATATCACGCATCAGGACTATTTCCAGTTTCATTATGAGA ACCGCCAGACCGGCATTCATATCGGGCGCGTGATTAAAAGCCTGGCGTCCGGTGAGCTTGTGATCCCGGTAT CGGTGAGAGTTAACGATCTCAGCGGTGGCTTCGCGGGCGTGGTGCTCGCTACCGTTAAGCTTGACTATTTCC GCCGCTTTTACAGCTATTTTCGAGCTCGGCCCGCGGACATGCTGGCACTGCTGCTGACTGACGGTTCGGTGC TCTGTGTGCGACCTACGATGAAGCGAAAATTGACATGAATATTGCCGGCAGTCCGCTGTTACCCGCGAGC TGATTGCGCGCCGACCGCGGCACCGGACCTGGGTGGCGTCTCGATCATATTGAAAGGGTATTCCGGCTTG CCCGTACGGAAGAACTGCCGCTGGTGGTGGTGGCGGTTACGATCGCGCCGAAGTGCATGCACTGGCTG CGTAATAATCTGCCGGGTCTGCTCTCAACTTTATGCTGCTGCTCGGGTTTCTGCTGTTCAGTTCTGTGGTGT TTCGCAAAGTGCGGGGCAGCATTTCGCGATCAGCAGGAGCTCAAACAACCTGCGCGACGAGCTTCTCAAAGCA AACCAGACGTTTAAATCGATGGCGATGGCCGACAGCCTGACGGGGCTTGCCAACCGCCGCAAGTTTGATAC CACCCTCGCGAAAGTGCTGGCGGACGCCGCGGCTACAGGAAGCCCTGTGTCGCTGATTATGCTCGATATCG ATTTCTTCAAGCGCTACAACGACAGCCGCGGCCATGCCCGGGGACGCTGTGCGGCTTATCAGCAATA CGTTGCGATGGTGACCTGCGCACACGCGATCTGGTGGCGCGTTACGGTGGAGAAGAGTTCGCGATCGTG CTGCCGATAACCACGGCGAAGAAGCGCTGGCGCTCGCGCAGCGGGCTGTCTGTATGGTCAGGGAAAAACA TCTGCCGATCCGTCGACGGATCTGCCGAGCAGATCGTCACCATCAGCGCCGTTGCCATACGGTGCGGG GCAACGGGCGCGAGGACGCATTCAGCGTACTCATTCTGGTGCCGATACTGCGCTTATCTTGCAGAAAACC ACGGGCGTAATCAGGCATACCGGTTCTCAAATACCATTGCGACCGGCAATGATAAATCCATTATGCGGCTT AG			
Sekwencja aminokwasowa			
VTLRQFISYRLGLSTSLGRSLAVLLLFLLVGGIGTNVLVFMHSDWDEIAQAANKAVNLSVAQVRQAEDTFMAVG QTLDDVRAAVSAGQAATYHSYLRLKARQPLLDGLFYNAQGVIKGSSSGISGIPGDITHQDYFQFHYENRQTGI HIGRVIKSLASGELVIPVSVRVNDLSGGFAGVVLATVKLDYFRRFYSYFELGPRDMLALLTDGSVLCVRPYDEA KIDMNIAGSPLFTRELIRADRGTGTWVASLDHIERVFGFARTEKLPLVVVAGYDRAEVRMHWLRNNLPGLLSNF MLLLGFLLFSSVFRKVRGSIRDQELKQLRDELLKANQTFKSMAMADSLTGLANRRKFDTTLAKVLADAAAT GSPVSLIMLDIDFFKRYNDSRGHAAGDACLRILISNTLQMVTLRTSDLVARYGGEFAIVLPDTTGEEALALAQRA VCMVREKHLPHSTDLPEQIVTISAGCHTVRGNNGREDAFVLRGADTALYLAKNHNQAYRFSNTIATGNDKS IYAA-			
Wyniki opracowania Blast			
Pokrycie: 93%; identyczność: 99.36% <i>diguanylate cyclase [Cronobacter sakazakii]</i> WP_228459380.1			

Oznaczenie	ESA_pESA3p05489	Lokalizacja	50.317–51.222 (←)
Sekwencja nukleotydowa			
TCACGCTGCAAATTTCTTCGAGCCTGCCACGCAGAGGATCACCCCCAGCGTCACGGCCAACATCAGCGCGCTAACGTGTTTCATTGAGCAGCGTCGCGGCGAGCGGAGGCCGAGAAACGGCTGTAAGAGCTGAAGCTGGCCGACGGCGGCGATCCCGCCCGCGGCAAGCCACGGTACCAGAAGATAAAGCCGACCAGCATACTGAACAGCGATACATACCCGAGAGACACCCAGCCGGCAGGTGCCACCGTACTGAACGAGGCGGGCTGCGTCAGCCAGGCGGCGCACAAACATCAGCGGCAGCGCGAGGATCAGCGCCCAGCCAATTGTCTGCCAGCCACCGAGCTGGCGCGACAGCGCTGCGCCCTCCGCATACCCTAAACCACAGAGCACTACGGCGGTTAGCATCAACAGATCGCCCTGTA GCGAGATCCGCACATTACCGGTGAGAGCAAACCTGCCACCAGCATGCTTCCTATTAATGAGAAGATCCAG AAGGCCGGGCGGGGCGCTCGCCGCCGCGCAGTACGCCGAAAAGCGCCGTCGCCAGGGGGAGCAGGCCGATGAACACCATTTGAATGCGCGGACGTCACATGTGTAGCGCCAGCGCGGTCAGCAGCGGAAACCCCAACACCACGCCTGCGCAGACGATAGCAAGCGACGCCGCTGCCGCCGCGTTGGCCGCGTTTCACGTCGCAGCATTATCAGCAGCAGCGCCAGCCCTCCGGCGATGGAGGCGCGGGCGAACGTCAGAAAAAAGGGTGAGAAATCGCCAA CGGCGACACGCGTGGCAGGCAGCGAACCGCTGAAAATAACCACGCCAGCAGGCCATTAGCCAGCCTGCC CATGGGCCCCGACGGGACGGATTTTCATAACACTCTCCTGATAAATTGCGGCCAT			
Sekwencja aminokwasowa			
MAAIYQESV M ENPSRPGPWAGWLNGLLGVVIFSGSLPATRVAVGDFSPFFLTFARASIAGGLALLL I MLRRETRP TRRQAASLAIVCAGVVVGFPLLTALALQHVTSAHS M VFIGLLPLATALFGVLRGGERPRPAFWIFSLIGS ML VAG FALTGNVRISLQGDLL ML TAVVLCGLGYAEGAALSRLGGWQTIGWALILALPL ML CAAWLTQPASFSTVAPAGWVSLGYVSLFS ML VGFIFWYRGLAAGGIAAVGQLQLLPFLGLALAATLLNEHVSAL ML AVTLGVILCVAGS KKFAR-			
Wyniki opracowania Blast			
Pokrycie: 97%; identyczność: 99.66% DMT family transporter [Cronobacter sakazakii] WP_104669049.1			
Oznaczenie	ESA_pESA3p05516	Lokalizacja	74.943–75.701 (←)
Sekwencja nukleotydowa			
TTACACAAAGTGGATGTGCTTCTTGCCATGATGGGGTGAAACCTCAATGCGCGCCTCCACCTTGAATACCTC GCGCAGCATCGCCTCCGTCAGCACCTCATCCGGCGTGCCGCTCGCCACCACCTGCCCCGCCCTGCATCACAAT CAGCGCATCGCAAAACATCGCGGCGTGGTTGAGATCGTGCAGCGCCACAATGCTCGTCAACGGCAGCTCGC TGATGAGGCGCATCAGGTGCATCTGATGATGAATATCGAGATGGTTGGTTCGGTTCATCCAGCAAAATCTCGC CGGGGACCTGCGCCAGCGCGCGGGCGATATGCACGCGTGCCTGCCGCTCGCCGCCGGAAGATGTCGCCACCCG TCGTACGACGCGTCAACATATCCACGCGCTCCAGCGCCTGACGCACGATCTCGTCATCCTGGTGCGTCCAG GACGAGAGCGGCGAATGGTGCGGAATGCGCCCAAGCTTACCACGTCGCGCACGCGAATGTTGGCATCGGT CATCGCGTGTGTTCAACGAACGCCACGCGTGCGCCAGCTTTTTCTGGACAACCGCGCGATGTCGCCATC GTCCAGCAGCACCCGGCCCGCATCCGGGCGACGAAGCCGGCGAGAATGCGCAGCAGCGATGATTTCCCGG AGCCGTTCCGGCCCGAGCAGGCCAAGCGTTTGTCCGTTGGCACGCTCAGCGACACGTTATTCACGATACGCT TTTTACCCGCCGACCAGCTGAGGTTTCCGCGCGGATGCTCAT			
Sekwencja aminokwasowa			
MSIRAENLSWSAGKKRIVNNVSVPTGQTLGLLPNGSGKSSLLRILAGLRRPDAGRVLDDGDIARLSRKKLA QRVAFVEQH AM TDANIRVRDVVKLGRIPHHSPLSSWTHQDDEIVRQALERVD M FDRRDDGWQHLSSGERQRV HIARALAQSPGEILLDEPTNHLDIHQ M HL M RLISELPVTSIVALHDLNHA AM FCDALIV M QGGQVVASGTPDEV LTEA ML REVFVKVEARIEVSPHHGKKHIFV-			
Wyniki opracowania Blast			
Pokrycie: 100%; identyczność: 99.21% siderophore ABC transporter ATP-binding protein EitC [Cronobacter sakazakii] WP_110792125.1			
Oznaczenie	ESA_pESA3p05517	Lokalizacja	75.698–76.738 (←)

Sekwencja nukleotydowa			
TCATGAGAATCTCCTTGAGCGATACAGGATCACCGCAAAGAACGGTACGCCAACAGCGCAGTCACCACCC CCACCGGCAGGCTCTGCGGCGCTATCAGCGTGCGGAGGCGATATCCGCCAGCACCATCAGGATGGCGCCC ATCATCGCGCAGGCGATCAGTAACCGGCGATGCAGCGGCCCAAGAAATAGCGCATCACGTGCGGCACCAC CAGTCCGACAAAAACCAATCGAGCCCGCCATACTGACGATAGCCGCCGTCATCAGCGCCGTTACCGCAAAGA GGATCAGGCGCACGTAACCGACTGGAATGCCGAGTGAGGCCGCCGCGTCATCGCCAAAGGTAAAGGCGTCC AGCGCTTTGGCGTGCCACAGGCAGACCGCCAGCCCAATGACGACCACCGCCAGCACCAGCTGAAATTCGCG CCAGCGCACGCCGCTGAAGCTGCCGAGCAGCCAGAACATCACGTGCGCGCCTGCTGGGCGCTGCGCGCGG TACTGATGGTATAGGCGGTGATGGCGTTGAAAAGCTGAGAAGCGGCGACCCCTGCGAGGATCGTACGCTCA TTGCCGCCGCGCGCGCCGTTGGTCAGCAGTGCGACGAACGCGAACGCGGCCGAACGCCCCGGTAAACGCGCC CACAGAGAGCGACACCGCCCCGCTGCCGATGCCGAGTACGACGATCGACACCGCGCCGGTTCGACGCCCCGG CGGAGACGCCGAGCACGTAAGGTTCCGCCAGCGCGTTTTTCAGCAGGCTTTGCAGCACCGCGCCGCAAATG GCGAGGCCCCGCGCGCTGCACGCGGCCACCAGCGCCCGGTGAGACGAAAAATCCCAGATAACCGTTTCATG GATGCGGTTAAGCGGAACGGCGGTGAGCCCGAGTTTGTAGTACCGCTGCAAAGGTGGTTTGCAGCGGAA TGGAGACTTCGCCACGCTCAGCGCATCACCAACGAGCAGCAGACGAGAGCGCCAGCAAT ATGAACGACGCGCAGACGCCGGTGACGGTTAAAGAGACCTCCGCCAT			
Sekwencja aminokwasowa			
MAEVSLTVTRRLPSFILLALSVVVLALVIALSVGIGELSIPLQTTFAAVTNKLGLTAVPLNRIHETVIWDFRLSRAL VAACSGAGLAICGAVLQSLKNALEPYVLGVSAAGSTGAVSIVVLGIGSGAVSLSVGAFTGAFAAFAFVALLTN GARGGNERTILAGVAASQLFNATAYTISTAASAQQARDVMFWLLGSFSGVRWPEFQLVLAVVIGLAVCLWH AKALDAFTFGDDAAASLGIPVGYVRLILFAVTALMTAAIVSMAGSIGFVGLVVPVHVMRYYFGPLHRRLLIACAM MGAILMVLADIASRTLIAQPQLPGVVVTALVGVPPFAVILYRSRRFS-			
Wyniki opracowania Blast			
Pokrycie: 100%; identyczność: 94.30% <i>FecCD family ABC transporter permease [Cronobacter sakazakii]</i> WP_161576590.1			
Oznaczenie	ESA_pESA3p05518	Lokalizacja	76.738–77.751 (←)
Sekwencja nukleotydowa			
TCAGTTACAGCCGAGCTTCTCAAGCTGCGCCGCCACCTGCTCCGCGCCGTAGAGCGTGCGGATGGTCGGATT CATCGCCTGGCCATCCATCACCACGATATGCCCCTTTTTCACGGCGTCGAGCTGGCTGACCGCCGGATCGGT TTTCAGGAACCTGGATTTTGGCGTCGGCGTTATCCAGCGCCAGCGGTTGCGGTCAAGGCTTGAAACGACGAT CACATCCGGGTTGGTGGCGATGATGCTCTCCAGCTGAGCGTCGGCCACTCGCTTTCTGACGTGACGGCATT GTGGCCGCCGAGCAGATGCGCGATGTAACCCGAAGCGCCGTTTTTGCCGCCGACGTAGGCGTCAGAGGAAG GCGACGCGCTGGAGAACCAGAAGAGATACGACAGGTTTTATGATTTTTGCCGAATTTTTCTTTTCAGGGCCG CTTCGCGCGCTTTGAAATCTTTGGTGAGCGCCTCACCGCGCGCTTCGACGTTGAAAATCTTCGCCAGATCGT CGATTTCTTTATAGAGGTACGTCATATCCCACAGCTGGCTGCGGCTGCCGTAGATATCGCCGGTGTTCCTT CGTAACGCAGACACCAGGTGAGAGATAGCTGTTGATACCCACCGCCGCGAAATCTTCACGTTTCGCCACTTT ACTGTCCGGGCCTAACAGCAGCGGGATCTGCGCGGCGACAAAATCGGGGTTCTGCGCGAGGATTGACTCAA GCGTCGGGATTTCAACCGTCAGCAGTTTGACCTTTTCATTTTGCTTCGCGAGCTGCGGCAACACTTTTGTCCG CCAGAAGGCGCTGGCGGCCATTTTGTCTTCAAGGCCAGCAGCAGCATGATTTTCGGCGGTGTTCTGCCCGAG CGCCACCATGCGCTCCGGCGCTTTTGTAAGGTGACTTTTCATGCCGCAGTTATCAAGGGTCAGCGGGTATTG TGTGGCAAGAACAGGTTCCGAAGCGGCGCAGAGCAGGCAGAGCGCCAGCGCGTGTCTTACTAAAGCATTCA TCAACAT			
Sekwencja aminokwasowa			
MLMNALVKHALALCLLCAASEPVLATQYPLTLDNCGMKVFTFKAPERMVALGQNTAEIMLLGLLEDKMAASA FWPTKVLPLAKQNEKVLLTVEIPTLESILAQNPDFVAAQIPLLLGPDSKVAKREDFAAVGINSYLSPGVCVTKK NTGDIYGSRSQWDMTYLYKEIDDLAKIFNVEARGEALTKDFKAREAAALKEKFGKNHKNLSYLFWFSSASPSD AYVGGKNGASGYIAHLLGGHNAVTSSEWPTLSWESIIATNPDIIVVSSLDNRNRWALDNADAKIQFLKTDPAVS QLDAVKKGHIVVMDGQAMNPTIRTLYGAEQVAAQLEKLGLEN-			
Wyniki opracowania Blast			
Pokrycie: 91%; identyczność: 99.35% <i>siderophore ABC transporter substrate-binding protein EitA, partial [Cronobacter sakazakii]</i>			

WP_108695776.1			
Oznaczenie	ESA_pESA3p05528	Lokalizacja	91.455–92.390 (→)
Sekwencja nukleotydowa			
ATGACCTGGGAATGGTGTGGGAATTTGTTGCGGTGCTTTTTTAGGCTCGCCACGGCGCTTTGCTCTAAGGTTT ATGTCAGTAAGCGAAAGCCTGTGCGCCGTTGCACTGGCGTCGCCACACCTCAGGAGGCCTTTGTGATCACAC TGTGTAACGCCTGCGGCACGTCATATCAGGTTGACAATGCCCCGCCACAGCGCTGCAAAATTTGTGACGATG AGCGGCAGTTTGTTCGGTAACGGGGCAGCAATGGGTGGACCATGATGCGCTGCTGGCGACCCATTCCAAT AAATGGAAGCAGCATACCCCGGATCTTTTCAGCATCCGGACGGTGCCGGATTTTTCGATTGGCCAGCGTGCG TTTCTGCTGCGTACCCCGCAGGGAATATTCTCTGGGACTGCGTCGCCACCCTGGATGACGCCACAAAAACC CTGATTGCCGCGCTGGGCGGTCTGATGGCCATTGCCATTCGCATCCGCACCTTTACACCACCATGCAGGAC TGGGCGGCCGCTTTAACGCGCCGGTGTATCTGCATGCCAGCGACCGGAATGGATAATGCGCGACAGCCC GTTTATCCGCTCTGGGAGGGAGATGAACTGACGCTGGCTGAGGATATCCGCGTGATTTCGCTCGGCGGCCA TTTTGCCGGTGGCTGCGTACTGCATGACGCGCGCGGCGACGGCCTGCTGCTGAGCGGTGATATTTGACGGT GACGCCGGGGGCGAAGAGCGTCTCATTTATGTGGAGTTATCCGAATATGCTGCCGCTACCGGCCGCCACCGT CAGCGCGATGACAGACCGGCTGCGCGGCGTGTCAATTTTCGACGCTATGGGGCGCGTTTGAAGGCCGTGAAA TCACTGCCGACGCCAGCGAGCGGGTGCGCCGTTTCGGGGGAAAAATATGTGGCGTGTCTGAATCGCGCGGAT TAA			
Sekwencja aminokwasowa			
MTWEWCGNLLRCFFRLATALCSKVYVSKRKPVRRCCTGVATPQEAFFVITLCNACGTSYQVDNARPQRCKICDDE RQFVPVTGQQWVDHDLATHSNKWKQHTPDLSIRTVPDFAIGQRAFLLRTPQGNILWDCVATLDDATKTLLIA ALGGLMAIAISHPHYFTTMQDWAFAFNAPVYLHASDREWIMRDSPIRLWEGDELTLAEDIRVIRLGGHFAGGC VLHDARGDGLLLSGDILQVTPGAKSVSFMWSYPNMLPLPAATVSAMTDLRLRGVSFSTLWGAFEGREITADASER VRRSGEKYVACLNRAD-			
Wyniki opracowania Blast			
Pokrycie: 85%; identyczność: 98.12% <i>MBL fold metallo-hydrolase [Cronobacter sakazakii]</i> WP_105622956.1			
Oznaczenie	ESA_pESA3p05530	Lokalizacja	94.310–94.906 (→)
Sekwencja nukleotydowa			
GTGATTGTTTATACTTATCCCAAGAGCCGCTCGCTCAGGGTGCTCTGGACGCTTGAAGAACTGGGCATGCCG TATGAGTCCATCAAAGCCGATATCTTTGCGACGCCCGGAAGTACCCTCGCCGCATCCGCGCGGTAAAGTC CCGTTTCTGACAGATGGCGACGTTTCCATTTGCGAGACGCTGGCCATCTGCACCTGGCTTTGCGAAAAACAG CCTGCCACCGCGCTTTTTCCCGCCGATCCCGTCCGACGCGCCGCGATAAACAGCTGGATCAGTTTCGCCTTA ACGGATCTGGAATCGCCGGTATGGAATTTACTTAAACAGATGATTTTTGTGCCGGAAGCGCAGCGGTCCGCC GCACTGACACATTACTTCAAACCGAAGCCGCAAAAGCCGTGGCGATGGTGGATTTGGCGGACAACGCACC GTGGATAGCGGGCGATGATTTTACGCTGGCCGATATTTTTATGTCGCATACACTTTTCTGGGCAAACTGGG CGGTATTACGCTTGGCGAGACGCTCGAAAATTACGTGAATCGCGCCTTTTCCCGCCCCGCGTTTATCCAGGC CCAGCAGCGAAATAACCAAGTGA			
Sekwencja aminokwasowa			
VIVYTPKSRSLRVLWTLEELGMPYESIKADILCDAPEVPSPHPRGKVPFLTDGDVSICETLAICTWLCEKQPATA LFPADPVRRAAINSWSIFALTDLESPVWNLLKQMIFVPEAQRSAALTHYFKTEAAKAVAMVDLADNAPWIAGD DFTLADIFMSHTLFWAKLGGITLGETLENYVNRAFSRPAFIQAQQRNNQ-			
Wyniki opracowania Blast			
Pokrycie: 99%; identyczność: 95.45% <i>glutathione S-transferase family protein [Cronobacter malonaticus]</i> WP_105611008.1			
Oznaczenie	ESA_pESA3p05547	Lokalizacja	119.253–121.001 (→)

Sekwencja nukleotydowa			
ATGGTTTCCCTGCCCCGCCCTGCCGCGACAGATGTTGCGGGCTCAGTGTTTTCTTAACGCGCTGCTGCGTGAA ACCCGGGACTGGCAACTGATCCCCGGCGCATTACCGCAGGAGCCGGCGCAGATCCATTTACCGCTCTCTGA GACGCAGGCAATCCGCATTGCGCTGCGCTACTTCTCCCCGACGCAACATCATCAGTATCTGTTTCCGGCAAT GCTGGTGGCAAGCGATAACGATAGCTGCGAAGCCGTTGATTTACGCAGCTTGTGACCTCATTCTGGCGAA GCCCCCGCTAAAAGGCGAACTGACCGATGACGTGCTGGCCCGTTTTGCGCGCCGCGTTTACAGGAGAGCCACC GCCATACCTGGCAGGCGATTGAACTGCGTCACGACTGGGCCACGCTTCGCGCGCAGCCGCTCAACTTTGCAG AGGCTGAACACAGGCGCTGCTGGTCGGGCATGCGTTTCACCCGGCACCGAAATCGCACAGAGCCGTTTAATGAG ACCGAAGCCCGCCGCTATCTGCCGGATTTGCGGCCACGCTTTCCGCTGCGCTGGTTTTCGGGTGAATAAGGCG TATGTGGCAGGCGAGAGCCTGGCGTTAAATCTGCGTACGCGTCTGCTGCGTTTCGCGGCCAGAGCGCGCCT GCGCTGCTTGAGCTCTTTACCGATACACGCTGGCTGGTGCCGATGCACCCGTGGCAGGCCGAGTATCTGCTC GCGCAACCGTGGTGCCAGGCGCTGGTGGAGAAGGGCGAGCTTACCGATCTGGGCGAAGCGGGCGCGCCGT GGCTGCCGACCAGTTCATCGCGTTCGCTTTACAGCGAAACCAATAACGACATGATCAAATTTCTCGTCAAGCG TGCGCCTCACCAACTCGGTGCGCACGCTGTCGGTGAAAGAAGTGAAACGCGGCATGCGTCTGGCGCGGAT GCGCAGACCTCCCGCTGGCAGGCGTTGACGGCGCGCTACCCGACGATGCGCGTCATGCAGGAAGATGGCTG GGTGGGCTTTGCGACACGCGAGGGGACTATTACAGGAAGAGAGCCTGATGGCGCTGCGCGTCAATCTGCTGT TCGACACGCCAGAAACACAGACCAACGTGCTGGTGAGCCTGACTCAGGCCGCGCCGGACGGCGGCGACAG CCTGCTGGCCTGCGCCGTGCGCCGCTCAGTGAACGCCTCAGCCTGCCGCTCGCACAGGCGGCGCGCTGCTG GGTGCAGGCGTACTGCGAACGCATTCTGCTGCCGCTTTTACGCGCCGAAGCCGATTACGGCCTGGTGCTGCT GGCGCATCAGCAAAACATTCTGGTGGAGATGCAGCAGGATCTGCCGGTTCGGCCTGATTTATCGCGACTGTC AGGGCAGCGGGTTCACCGATGGCGCGCTGCTGTGGCTTTCGGGAGGCCGGCGAGCCGGAAGCGGAAAACCG CTTCAGCGAAGCCAGCTGCTGCGCTACTTCCCGTATTACCTGCTGGTGAATTCCACGCTGGCGGTGACCGC CGCGCTGGGTGCCCGGGTTTGGAGAGCGAAGAAAACCTGATGGCGCTGGTGCCTGACGCGCTCGCGCAAC TGCGAGCCACCGCGCGCGACACCCGCTGTCTCGATTATGTGCTGGAGAGCCGCCACTGGAAGTGAAGGGC AACTTCTTCTGCTATCTGCACGATCACAATGAAAACACCATCGCCGACCCGGCGGTCTACTTTAACTTC GACAATCCGTTTGAGGGAGCACGATGATGCCTGA			
Sekwencja aminokwasowa			
MVS LPRPAATDVAAQCFLNALLRETRDWQLIPGALPQEP AQIHLPLSETQAI RIALRYFSPTQHHQYLFPA MLVAS DNDSCEAVDFTQLVDLILAKPAVKGELTDDVLARFARRVQESHRHTWQAIELRHDWATLRAQPLNF AEAEQAL LVGHAFHPAPKSHEPFNETEARRYLPDFAPRFPLRWF AVNKAYVAGESLALNLRTRLLRFAAQ SAPALLELFDT RWLVPMHPWQAEYLLAQ PWCQALVEKGELTDLGEAGAPWLP TSSSRSLYSETNNDMIKFSLSVRLTNSVRTLS VKEVKRGMRLARMAQT PRWQALQARYPTMRVMQEDGWVGLCDTQGTIQEESLMALRVNLLFDT PETQT NVL VSLTQAAPDGGDSLLACAVRRLSERLSLPLAQAA RCWVQAYCERILLPLFSAEADYGLVLLAHQQNILVEMQ QD LPVGLIYRDCQSGGFTD GALLWLA EAGEPEAENRFSEAQLLRYFPY YLLVNSTLAVTAALGAAGFESEENLMAL VRDALAQLRATARDTRCLDYVLES RHWNCGNFFCYLHDHNENTIADPAVIYFNFDNPFAGSTHDA-			
Wyniki opracowania Blast			
Pokrycie: 100%; identyczność: 96.74% <i>lucA/lucC family protein [Escherichia coli]</i> WP_115740263.1			
Oznaczenie	ESA_pESA3p05548	Lokalizacja	120.991–121.941 (→)
Sekwencja nukleotydowa			
ATGATGCCTGAAGCGCACATTGTTTCATGACGGTTACGGTTTTGCTGCGCGACGCTCAATCTGGCGCTGCCG CTGACCCTCGGGCTTGACGGCAGCGCCGTA CTGCATCATCCGGGCGACGTGCCAGACGGGTGGCTGGCGGC CGCTCTCGATCAGTTGTTTGTGCGGGCGCCTGCCCTACGGGCATTACGCTGCCGTGGGCGCAGTGCGCGGA TGAGCCGCAGGCGCAGGCGCTGTTTGACGCCGTGCAGTGCGATTATCTGGCGCGCGACACGTTCTGGCAGCT GCCGCTGTGGCTGCGCGGCGAACGCATCGCCGCACGTGCGGGAATACAGTTTGACGAGACGCGCCAGCTCG CGTTCCCGGCGCGTCCGCCGCGGCCAGAAAGGCGACGTCTATCGCCGCTACGATCCGCAAATCAAACGCATG CTCAGTTTCCGCGTGCGGATGTGTGCGCAAGATGCGGAGCGTTTTACCCGCTGGATGAACGCGCCGCGCGTG AACGCTTTCTGGGAGATGGCCGGGCGCAGGCGGAGCAGGAAAAATATCTGCGTAAGCAGCTCGACGCGA CGTACTGCTACCCGCTGATCGGCTGCTTCGACGACGAACTTTTCGGCTATTTTGAAATTTACTGGGCTGCGG AAGACCGTATCGGCCGCCACTACCGCTGGCAGCCGTTTCGATCGCGGGCTGCACATGCTGGTTCGGCGAAGAG CAGTGGCGCGGCGCGCAGTACATCCGCAGCTGGCTGCGCGGGCTCAGCCACTATCTGTGGCTGGACGAGCC GCGCACGCGAGCTCTGGTGGCGGAACCGCGCTTCGATAACCAGCGTCTGTTCCGCCATCTGCCGGTGCCTGG TTTTGAAACCGTGAAAGAGTTCGATTTC CCGCACAAAGCGCTCGCGGCTGGTGATGAGCCAGCGCAGCCGTTT CTTCAGCGAGGTGGGACTATGA			
Sekwencja aminokwasowa			

MMPEAHIVHDGYGFRCATLNLALPLTLGLDGS AVLHHPGDVPD GWLAAALDQLFVAAPAL TGITLPWAQWRD EPQAQALF DAVQCDYLARDTFWQLPLWLRGERIAARAGIQFDETRQLAFPARPPRPEGDVYRRYDPQIKRMLSF RVADVSQDAERFTRW MNAPRVNAFWEMAGPQAEQEKYLRKQLDATYCYPLIGCFDDEPFGYFEIYWAAEDRI GRHYRWQPFDRGLHMLVGEEQWRGAQYIRSWLRGLSHYLWLDEPRTQRLVAEPFRDNQRLFRHLPVAGFETV KEFDFPHKRSRLVMSQSRFFSEVGL-			
Wyniki opracowania Blast			
Pokrycie: 99%; identyczność: 96.51% <i>GNAT family N-acetyltransferase [Escherichia coli]</i> WP_115740276.1			
Oznaczenie	ESA_pESA3p05549	Lokalizacja	121.938–123.683 (→)
Sekwencja nukleotydowa			
ATGACGGCCTTGCTTTGGGAGCGCGTAAACCGCGAGATGGTGCGGAAAATGCTCGCCGAGCTGGAATATGA ACGCACGCTGACGGCGCAGGAGACAGACGCAACGCTGGACGATTGCGCTTGCGGATGAGACCTGGACA TTTGACGCGAAGCGCGGCATCTGGGGCTGGCTGCATATCAACCCGGCGACGCTCGCAAACGAAAGCGGCAG GCCATTGAGGCTGAAAGCGCCCTGCGCCAGCTGGCCGTGGTGCTGAAAATGAGCGATGCGCAGACGGCGG AGCATCTCGAAGATCTCTATGCCACGCTCAGGGGCGATATGCAGTTGCTCCAGGCTCGTGAAGGGCTAAAC GCCGACGCGCTTGTCGATATGGATCCGGATGAACTGCAGTGCCTGATGTCAGGCCATCCGAAATTTATCTTC AACAAAGGGCGTCGCGGCTGGGGGCTGGATGCGCTGAAGGCTTACGCGCCGGAATACCGTGGCCGTTTTTCG CCTGCACTGGGTGGCGGTACGCCGTGACCTGATGATCTGGAGCAGCGACGCCGACTGCGACATCAATAACC TGCTGGCAAGCGCGATGGACGACAGCGAACGCCAGCGTTTTACCCGTTACTGGCAGGCGCTCACTCTGGAT GACCACTGGCTGCCGGTGCCGCTGCATCCGTGGCAGTGGCAGCAGAAAATCGCCCTGCATTTCTGCGCGAG CTGGCGCGTGGTGAATATCGATCTCGCGGTGTTTGCGGATGAATACATCGCCAGCAGTCGCTGCGCACG CTGACCAACGTCAGTCGCGCTCGCGGTTTCGATATCAAACGCTGCCGCTCACCATTACAAACACCTCCTGCTAT CGCGGCATTCCCGCAAATACATCGCCGCGCGGCGCTCGCCTCGCGCTGGCTGCAACAGCAGTTCGCGCGCT GATAAACGCTGCTGGCACTGGGCGCGCAGATCCTCGGCGAGCCTGCGGCGGTTACGTGACCCACACGGG CTACGCTGCCCTGCAAACCGCGCCCTATCGCTATCAGGAGATGTTTGCGGTGATCTGGCGGAAAACCCCTC CTGCTGGCTGCGCCCTGGCGAACAGGCCGTGTAATGGCCGCGCTGATGGAACCGACAACCGCGGCGCGTC CGCTGATTGACGCGTGGATCGCCCGCTCGGGCCTGAGCGCCGAAGCGTGGCTTTCACAGCTCTTCCGCGTGG TTGTTATTCCTTTTATCATCTGTTGTGCCGCTACGGCGTGGCGATGATCGCCACGGCCAGAACGTGACGCT GGTGATGAAGACCATGTGCCGAGCGCATCTGCTGAAGGATTTCAGGGCGATATGCGTCTTGTGGATG AAACGTTCCCGGAAATGGAGAGCCTGCCCAGCCGCTCAAAGCCGTCACGGCGCGCCTTTCTGCTGATTAC ATTATTCAGATTTACAGACCGGGCATTTTGTACGGTGCTGCGTTTTTGTTCGCGCCTGACTGAACAATGCG GCGTCAGCGAAACCCGTTCTATCGCCTGCTCGCGGACGTGCTGCAGGACTATATGGCCGCGCACCCGGAG ATGGCGGCGCGCTTCGCGCTGTTGATCTCTTTAAACCGCAGATCATTGCGGTGGTGTGAACCCGGTAAAG CTCATTTCTCAGAGCATGACGGCGGCAGCCGATGTTGCCCAATTACCTCACCGATCTTGATAACCCGCTG TATCTGGTACCAGGGAGACCGCATCATGA			
Sekwencja aminokwasowa			
MTALLWERNREMVAKMLAELEYERTLTAQETDAERWTIALGDETWTFDKRGIWGWLHINPATLANESGSA IEAESALRQLAVVLKMSDAQTAEHLEDLYATLRGDMQLLQAREGLNADALVMDPDELQCLMSGHPKFIFNK GRRGWGLDALKAYAPEYRGRFRLHWVAVRRDLMIWSSDADCDINNLLASAMDDSERQRFTRYWQALTLDH WLPVPLHPWQWQKIALHFLPQLARGEIIDLGVFGDEYIAQQSLRTLTVNSRRSAFDIKLPLTIYNTSCYRGIPGK YIAAGPLASRWLQQQFAADKTLALGAQILGEPAAAGYVTHTGYYAALQTAPYRYQEMFGVIWRENPSCWLRPGE QAVLMAALMETDNAGRPLIDAWIARSGLSAEAWLSQLFRVVPFYHLLCRYGVAMIAHQNVTLVMKDHVP QRILLKDFQGDMLRVDETTFPEMESLPEPVKAVTARLSADYIIHDLQTGHFVTVLRVFSRLTEQCGVSETRFYRL ADVLQDYMAAHPEMAARFALFDLFPQIIRVVLNPVKLTFSEHDGGSRLPNYLTDLDNPLYLVLTRETAS-			
Wyniki opracowania Blast			
Pokrycie: 100%; identyczność: 97.25% <i>LucA/LucC family protein [Escherichia coli]</i> WP_115740264.1			
Oznaczenie	ESA_pESA3p05550	Lokalizacja	123.680–125.002 (→)
Sekwencja nukleotydowa			
ATGAAAACGTACGATTTTCATCGGCATTGGCATCGGCCCGTTCAATCTCAGCATCGCCGCGCTCGCCGAAGGG			

CTTGACGGCTTCAGCTCGCTGTTTCTTGAACGCAAACCGCACTTCTCCTGGCATCCGGGCATGATGGTGCCG GACTGCCATATGCAGACCAGTTTCTTGAAAGATCTGGTCAGCGCGGTGGAGCCAACCAACCGTTACAGTTTT CTGAATTACCTGGTGCAGCGTAAAAAGTTTTACC GTTCTCTGACCACCGAACAGCGCACGGTGTCCCGCGAA GAGTTCGCCGATTACCTCTGCTGGGCGGCGGATAACCTGAGCAATCTGTCGTTACGCCAGCAGGTGCAGCA GGTGAGTTTTAACGAGGCCAGCGGGCTGTTTGAAGTGGTGACCCAGCGCGATCGTTTCTTCGCACGCCACGT CTGCATGGGCATCGGCAAAACAGATTAACCTGCCCCGACTGTGTGCCGGCGCAGAACGACAGTTGCTTCCACG CCAGCGAAATGATGCTGCGTACGCCATCGCTTGCCGGTAAGCGCGTCACGGTCGTTGGCGGCGGCCAGAGC GGCGCCGATCTGTTCTGAATATTTCCGCGGCGAGTGGGGCCAGCCCGCGGCACTGAAGTGGGTGTGCGCG CGCAACAATTACAACGCGCTCGATGAAGCCGCGTTCGCGAATGAATATTTACGCCGGAATACCTTGAAAG CTTTGCCACGCTCGATGAGAAAAACGCGCTGCGATCTGCTCGCCGAACAGAAGATGACGTCTGACGGCGTGA CCTGCGAATCGCTGCTGCTATCTATCGCGCCATGTACCACCGCTTTGAAGTGTGCGTGAAAAACCTGGG CGCAGCTGCTGCCGCTCGCGCTCGGTACCCGCGTGACGTACAGGCGCAGGGCCAGCGTCTGTGCTGCGCC ATCATCTGGACGGCGGCCAGGAAACGCTGGATACCGATGTGGTGATTTTCGCGACCGGCTATCGCCCTGCC GTCCGGCGTTCTCGCCCCGCTGGCGCATCGGCTGGAGCTGGACGAACGCGAAGGCTTCCGGGTAAATACC GATTTCACGCTGGCGTGAACGCGCCCGGCGCAAACCATCTTTTGGCGTCAATGCCGGGATGCACAGCCTC GGCATTCGCGAACCCAGCTCAGCCTGATGGCCTGGCGGCGCGCGCATTCATGTCGCGCACCCCTGAT GCGCGCTTTGAAGTACGACACCCCTGGCGTGATCCAGTGGCTTTCCCGGCCGGAACGGTCACCCGCCAG GTTTCTCAACCTGTAAACAGCACTGACTACTAA			
Sekwencja aminokwasowa			
MKTYDFIGIGIPFNLSIAALAEGLDGFSSFLERKPHFSWHPGMMVPDCHMQTSFLKDLVSAVEPTNRYSFNLN LVQRKKFYRFLTTEQRTVSREEFADYLCWAADNLSNLSFSQQVQVVSFNEASGLFEVVTQRDRFFARHVCMGIG KQINLPDCVPAQNDSCHFASEMMLRTPSLAGKRVTTVVGGGQSGADLFLNIFRGEWGQPAALNWVSRRNNYNA LDEAAFANEYFTPEYLESFATLDEKTRCDLLAEQKMTSDGVTCESLLAIRAMYHRFEVLREKPWAQLLPSRSV TRVTSQAQGGRLSLRHLDGGQETLDTDVVIFATGYRPARPAFLAPLAHRLLEDEREGFRVNTDFTLAWNGPGA NHLFAVNAGMHSLGIAEPQLSLMAWRAARILNVAHPDAPFELSTTPGVIQWLSRPETVTRQVSQPVNSTDY-			
Wyniki opracowania Blast			
Pokrycie: 100%; identyczność: 97.95% lysine N(6)-hydroxylase/L-ornithine N(5)-oxygenase family protein [Escherichia coli] WP_115740265.1			
Oznaczenie	ESA_pESA3p05551	Lokalizacja	125.070–127.220 (→)
Sekwencja nukleotydowa			
ATGATTTCTGCCTCCGCCTGGGGGGCACCGCAGAAAGAAGAGACGCTGGTGGTTGCCGCCAGCCGTACCGG ACACAGCGCGGCGGATATGGCACAGACCACGTGGGTTATCGAACAGGCTGACATTGAACAGCAGGTTACAGG GCGGTAAAGAGTTAAAGAAGTGTGGCACAGCTGATCCCGGCATGGATGTCAGCAGTCAGGGGCGCACC AATTACGGCATGAACATGCGTGGCCGCTCCATGATGGTGTGTTGACGGCGTGCGTCTGAACCTCTCACGC AGCGACAGCGCCAGTGGATTCCATCGATCCGTTTAAAGTTCAGCGCATCGAAGTTATCTCCGGTGGCACC TCGCTGTACGGCGGTGGCAGCACCGGCGGTCTTATCAATATCGTGACCAAAAAAGGCCAGCCGAGACGCA GGTTGAGTTCCAGACCGGGATGAAAACCGGCTTTAACAGCCATAACGATCATGACGAAAAATATGGCGGCAG CGGTGAGCGGCGCAATGACAATGCCTCCGGGCGTCTGTCCGTCGCCTATCAGCGCTATGGCGGCTGGTAC GACGGTAACGGCGATGAATCCATTATCGATAACACCCAGACCGGCCTGCAGTATTCTGACCGACTGGACGT GATGGGCACCGGCACGCTCAATATTGATGATCACCAGCAGCTGCAGCTCACCACGCAATACTACAAAAGCC AGTCCGACGGTAAACACGGCCTGTTCTCGCGGAGAATTTCTCAGCGGTCACCGGCAACGGCACCCGCTAC AACAAAGGCAATCTGGATTACAGACCGTCTGCCCGGCACTGAACGCCACCTGATTAATCTGCAGTATTCAAAT TCTGATGCCTGGGGCCAGGATCTGGTCGCACAGATTTACTACCGCGATGAGAGCCTGACCTATTACCCGTTT CCGACGCTGAACGGCGATAAAACGCGGGTAACCAGCATTGGTGCCTCACAGCAGAAAAACGGATTTCTGGGG CGGCAAACTCACAGTCAACAGCAAGCCGCTGGATTCCCTTTCTCTGACCTATGGTGTGGATGCCGAGCATGA AACCTTTAATGCCAACACAGCAGTTTTCGATCTGAATAAAGCGGCGCCAGCGGCGGCATGAAGCTTGATA ACGCATATAACGTCGGGCGCTACCCGATTACAGCATTACGAACCTGGCTCCGTTCTGACGGCAAGTTATG ACATCGATGCGATCACGTTAAGCGGCGGTGTGCGCTATCAGTACACCGAGAATAAGGTGCGATGATTTTGTG GTTATACCCAGCAGCAGGGCATCGCCACCGGTAAGACGACGCTGCGGATGCCGTGCCGGGCGGCAAAACG GATTACAACAATCTGTGTTTAAACGCGGTATTTCTCGGCCACCTGAGTGAACGTCAGCAGCTGTGGTTTAA TTCTCACAGGGGTTTGAAGTCCCGATCTCGCCAAATATTATGGCTCCGGCACCTATCGTCTTGAGAATGGC CACTACCGTTTGTCTAAAAGCGTTAACGTGAATGACTCGCGTCTGGACGGTATTAAGTCGACAGCTATGAG CTCGGCTGGCGTTACACCGGCGATAACCTGCGTACCCAGCTCGCGGCGTACTACTCGGTTTCTGACAAGACC ATTAACATTAACAAGACCGATATGACCATACCCCTGGATGACGACAAGCGTCGTATCTATGGGCTTGAAGG CCAGGTGCGATTACTTCTTCAAGTACAGCGCGTGGAGCACCGGCGCGAACTTTAACGCCATCAAATCGGAAA CCCGCGTGGACGGCGACTGGAAAAAGCTGACGGTCGACAGCGCCAGCCCGTCTAAAGTCAGCGCCTGGGTT AAGTGGGCACCGGATAACTGGACCCTGCGCCTGCAGAGCACCCAGACATTCGATGTGTCTGATGATGCCGG			

TAAGAAAATCGACGGCTATAACACGATGGACTTTATCGGCAGCTATGCGCTCCCGGTCTGGTAAAATCGCGTT CAGTGTGCAAAACCTGCTGGATAAGGATTACACCACCGTCTGGGGTCAGCGCGCGCCAGGATTGTACAGTC CGACTTATGGCTACCGGATCTCTATACCTACAAAGCCGCGGTCTGACGTTTGGCCTGAATTATTCCGTTCT GTTCTGA
Sekwencja aminokwasowa
MISASAWGAPQKEETLVVAASRTGHSAADMAQTTWVIEQADIEQQVQGGKELKEVLAQLIPGMDVSSQGRNTY GMNMRGRSMMVMVDGVRLNSSRSDSRQLDSIDPFNIEVVISGATSLYGGGSTGGLINIVTKKGQPETQVEFQT GMKTGFNSHNDHDENMAAAVSGGNDNASGRLSVAYQRYGGWYDNGNDESIDNTQTGLQYSRDLDMGTGT LNIDDHQQLQLTTQYYKSQSDGKHGLFLGENFSAVTGNGTAYNKGNLDSRDLPGTERHLINLQYSNSDAWGQD LVAQIYYRDESLTYYPFTLNLDKTRVTSIGASQKQTFWGGKLTVNSKPLDSLTYGVDAEHETFNANQQFFD LNKAAASGGMKLDNAYNVGRYPDYSITNLAPFLQASYDIDAITLSGGVRYQYTENKVDDFVGYTQQQGIATGK ATSADAVPGGKTDYNNLLFNAGILGHLSERQQLWFNFSQGFELDLAKYYGSGTYRLENGHYRLLKSVNVNDS RLDGKVDSEYELGWRYTGDNLRTQLAAYYSVSDKTININKTDMTITLDDDKRRIYGLEQVDYFFSDSAWSTGA NFNAIKSETRVDGDWKKLTVDSASPSKVSAAVNWAPDNWTLRLQSTQTFDVSDDAGKKIDGYNTMDFIGSYAL PVGKIAFSVENLLDKDYTTVWGQRAPGLYSPTYGSPDLYTYKGRGRTFGLNYSVLF-
Wyniki opracowania Blast
Pokrycie: 100%; identyczność: 89.68% <i>TonB-dependent siderophore receptor [Escherichia coli]</i> WP_115740266.1

3.3.2. Pozyskiwanie żelaza

Żelazo jest pierwiastkiem niezbędnym do namnażania bakterii. W ludzkiej krwi wolne żelazo jest praktycznie niedostępne – jest ono ściśle wiązane przez białka transportujące (transferynę i laktoferynę) w ramach mechanizmu tzw. "odporności żywieniowej" (ang. *nutritional immunity*).

Aby przełamać to ograniczenie *C. sakazakii* wykorzystuje systemy oparte na sideroforach, kodowane głównie na wspomnianym plazmidzie pESA3:

- **Aerobaktyna (*iucABCD/iutA*)** – siderofor typu hydroksamowego, charakteryzujący się wyjątkowo wysokim powinowactwem do żelaza, pozwalający wiązać jony żelaza bezpośrednio od transferyny gospodarza.
- **Cronobaktyna (*eitCBAD*)** – specyficzny dla tego rodzaju siderofor katecholowy.
- **Transport hemu** – bakterie posiadają również geny umożliwiające wykorzystanie hemu z rozpadłych erytrocytów jako źródła żelaza.

Badania *in vivo* potwierdzają, że inaktywacja genów odpowiedzialnych za syntezę aerobaktyny drastycznie obniża zdolność bakterii do przeżycia we krwi i wywoływania sepsy [20].

3.3.3. Otoczka i LPS

Dodatkową warstwę ochronną stanowi otoczka bakteryjna (antygen K) oraz łańcuchy boczne O-antygeny w LPS. Struktury te tworzą fizyczną barierę utrudniającą fagocytozę przez makrofagi i neutrofile krążące we krwi. Zmienność w budowie O-antygeny (klasyfikacja serogrupowa) pozwala również na unikanie rozpoznania przez specyficzne przeciwciała [21].

3.4. Etap IV – neuroinwazja i przekroczenie bariery krew-mózg

Najbardziej dewastującą cechą patogeny *C. sakazakii* jest jego silny neurotropizm. Zdolność do przekraczania bariery krew-mózg (BBB – ang. *Blood-Brain Barrier*) odróżnia ten patogen od większości innych bakterii wywołujących sepsę noworodkową. Inwazja

ośrodkowego układu nerwowego (OUN) prowadzi do rozwoju zapalenia opon mózgowo-rdzeniowych, które u noworodków często przebiega w sposób piorunujący, prowadząc do martwicy tkanki mózgowej (encefalomalacji) i tworzenia ropni.

Badania *in vitro* na modelach ludzkich komórek śródbłónka mikronaczyń mózgu (HBMEC – ang. *Human Brain Microvascular Endothelial Cells*) oraz badania *in vivo* na modelach zwierzęcych wykazały, że *C. sakazakii* wykorzystuje co najmniej dwa niezależne mechanizmy inwazji OUN: bezpośrednią inwazję komórek śródbłónka oraz mechanizm "Konia Trojańskiego".

3.4.1. Bezpośrednia inwazja i rola OmpA

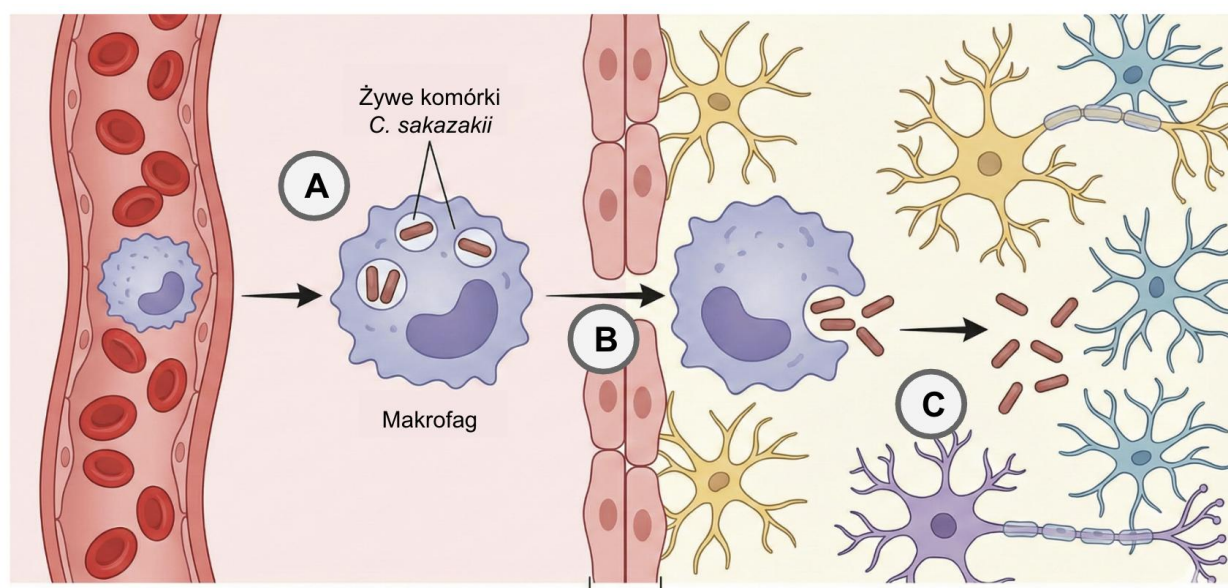
Pierwszy mechanizm polega na bezpośredniej interakcji bakterii krążących we krwi z komórkami śródbłónka tworzącymi barierę krew-mózg. Kluczową rolę w tym procesie odgrywa wspomniane wcześniej białko błony zewnętrznej OmpA.

Wykazano, że OmpA *C. sakazakii* wiąże się specyficznie z receptorem na powierzchni komórek HBMEC, zidentyfikowanym jako gp96 (glikoproteina szoku termicznego). Ta interakcja wyzwała kaskadę sygnałową w komórce gospodarza, prowadzącą do reorganizacji cytoszkieletu aktynowego i internalizacji bakterii na drodze endocytozy. Szczepy pozbawione genu *ompA* wykazują drastycznie obniżoną zdolność do inwazji OUN w modelach eksperymentalnych [22].

3.4.2. Mechanizm "Konia Trojańskiego"

Drugi mechanizm polega na wykorzystaniu komórek układu odpornościowego gospodarza jako wektora transportowego. *C. sakazakii* posiada zdolność do przeżycia i namnażania się wewnątrz makrofagów i monocytów. Jest to możliwe dzięki mechanizmom neutralizacji reaktywnych form tlenu (RFT) wewnątrz fagosomu, w czym kluczową rolę odgrywa dysmutaza ponadtlenkowa (SodA).

Zainfekowane makrofagi, migrując w odpowiedzi na stan zapalny, mogą przekraczać barierę krew-mózg i transportować żywe bakterie do tkanki mózgu. Po przedostaniu się do OUN, bakterie wydostają się z makrofagów (na drodze lizy komórki lub egzocytozy) i inicjują infekcję tkanki nerwowej, która jest słabo chroniona przez lokalny układ odpornościowy [23].



Naczynie krwionośne

Bariera krew-mózg

Tkanka nerwowa

Rycina 3. Schemat inwazji ośrodkowego układu nerwowego (OUN) przez *C. sakazakii* z wykorzystaniem mechanizmu „Konia Trojańskiego”

Ilustracja przedstawia alternatywną drogę pokonywania bariery krew-mózg (BBB), niezależną od bezpośredniej inwazji komórek śródbłónka. **(A) Przeżycie wewnątrzkomórkowe:** Bakterie – po sfagocytowaniu przez krążące we krwi monocyty lub makrofagi – unikają wewnątrzkomórkowego zabicia. Zdolność ta jest skorelowana z aktywnością dysmutazy ponadtlenkowej (SodA), która neutralizuje stres oksydacyjny wewnątrz fagosomu. **(B) Transmigracja:** Zainfekowane komórki odpornościowe działają jak wektor transportowy („Konia Trojański”), przenikając przez śródbłonek naczyń mózgowych w odpowiedzi na sygnały zapalne. **(C) Re-infekcja:** Po przekroczeniu bariery BBB, żywe bakterie opuszczają makrofagi (na drodze egzocytozy lub lizy komórki nosiciela) i kolonizują tkankę nerwową, prowadząc do rozwoju zapalenia opon mózgowo-rdzeniowych.

3.4.3. Geny związane z inwazją OUN

Analizy genomowe pozwoliły na identyfikację u *C. sakazakii* homologów genów wirulencji znanych z neuroinwazyjnych szczepów *E. coli* K1, takich jak:

- ***ibeA*** (ang. *invasion of brain endothelium*) – białko promujące inwazję komórek HBMEC.
- ***ibeB*** – składnik systemu pomp (system CusCBA), który oprócz funkcji w oporności na metale ciężkie, jest niezbędny do pełnej zjadliwości w modelu zapalenia opon mózgowych.

Obecność tych genów, w połączeniu z unikalnymi mechanizmami takimi jak wykorzystanie OmpA i przeżycie w makrofagach, tłumaczy wyjątkową skuteczność *C. sakazakii* w atakowaniu ośrodkowego układu nerwowego noworodków.

4. Regulacja ekspresji czynników wirulencji

Ekspresja czynników zjadliwości jest procesem metabolicznie kosztownym dla komórki bakteryjnej. Dlatego też *C. sakazakii* posiada złożone systemy regulacyjne, które pozwalają na precyzyjne włączanie genów wirulencji tylko wtedy, gdy są one niezbędne – np. po osiągnięciu odpowiedniej liczebności populacji lub w odpowiedzi na specyficzne sygnały ze środowiska gospodarza.

4.1. System *Quorum Sensing* (QS) – komunikacja międzykomórkowa

Podstawowym mechanizmem koordynacji zachowań grupowych u *C. sakazakii* jest system *Quorum Sensing* (QS), czyli wyczuwanie liczebności populacji. System ten opiera się na produkcji i detekcji cząsteczek sygnałowych zwanych autoinduktorami.

W przypadku *C. sakazakii*, podobnie jak u innych bakterii Gram-ujemnych, głównym systemem QS jest układ typu LuxI/LuxR, w którym mediatorem są acylowane homoserynowe laktony (AHLs). U *Cronobacter* zidentyfikowano specyficzne homologi tych białek:

- **EsaI** – syntaza odpowiedzialna za produkcję cząsteczek sygnałowych AHL.
- **EsaR** – receptor cytoplazmatyczny, który po związaniu odpowiedniego stężenia AHL aktywuje transkrypcję docelowych genów.

Badania na mutantach delecyjnych (Δ esaI) wykazały, że system ten jest krytyczny dla tworzenia biofilmu. Zablokowanie komunikacji chemicznej prowadzi do powstania cieńszego, słabiej ustrukturyzowanego biofilmu. Sugeruje się również, że QS może regulować ekspresję niektórych czynników wirulencji w późniejszych etapach infekcji, choć mechanizm ten wymaga dalszych badań [24].

4.2. Rola białka Hfq i małych RNA (sRNA)

Oprócz regulacji na poziomie transkrypcji, *C. sakazakii* wykorzystuje zaawansowaną regulację post-transkrypcyjną, w której centralną rolę odgrywa białko opiekuńcze RNA – Hfq.

Białko Hfq działa jako globalny regulator, ułatwiając interakcję między regulatorowymi, niekodującymi cząsteczkami RNA (sRNA – ang. *small RNA*) a ich docelowymi cząsteczkami mRNA. Stabilizuje to sRNA i pozwala na szybką zmianę ekspresji genów w odpowiedzi na stres.

Wpływ na wirulencję

Wykazano, że szczepy pozbawione genu *hfq* charakteryzują się drastycznie obniżoną zjadliwością. Mutanty Δ hfq wykazują:

- zmniejszoną zdolność do inwazji komórek nabłonka jelitowego;
- obniżoną przeżywalność wewnątrz makrofagów;
- utratę zdolności do wywoływania śmiertelnej infekcji w modelach zwierzęcych.

Regulacja adhezji

Hfq negatywnie reguluje ekspresję niektórych adhezyn, co sugeruje, że białko to decyduje o odczepieniu się od powierzchni i rozpoczęciu inwazji systemowej [25].

4.3. Cykliczny di-GMP (c-di-GMP)

Warto również wspomnieć o roli przekaźnika drugiego rzędu – cyklicznego di-GMP. Cząsteczka ta działa jak molekularny przełącznik pomiędzy trybem życia planktonicznym

a osiadłym (w postaci biofilmu). Wysoki poziom c-di-GMP w komórce promuje syntezę celulozy i tworzenie biofilmu, podczas gdy niski poziom stymuluje ruchliwość i ekspresję czynników inwazyjnych. Utrzymanie odpowiedniej równowagi c-di-GMP jest kluczowe dla sukcesu infekcji, pozwalając bakteriom na adaptację do zmieniających się nisz [26].

5. Profil lekooporności i nowe zagrożenia terapeutyczne

Skuteczna terapia antybiotykowa jest kluczowa dla przeżycia noworodków z inwazyjną postacią infekcji *C. sakazakii*. Chociaż historycznie gatunek ten uznawano za patogen wrażliwy na większość grup antybiotyków, w ostatniej dekadzie obserwuje się niepokojący trend narastania oporności nabytej, w tym pojawianie się szczepów wielolekoopornych (MDR – ang. *Multi-Drug Resistant*).

5.1. Oporność naturalna (wrodzona)

Podobnie jak wiele innych bakterii z rodziny *Enterobacteriaceae*, *C. sakazakii* wykazuje naturalną oporność na wybrane antybiotyki, co ma kluczowe znaczenie przy doborze terapii empirycznej – stosowanej przed uzyskaniem antybiogramu.

Wszystkie gatunki z rodzaju *Cronobacter* posiadają chromosomalne geny kodujące β -laktamazy klasy AmpC. Enzymy te hydrolizują penicyliny oraz cefalosporyny pierwszej i drugiej generacji. Z tego względu:

- Ampicylina (często stosowana w sepsie noworodkowej w skojarzeniu z gentamycyną) oraz cefalotyna są nieskuteczne w monoterapii zakażeń *C. sakazakii*.
- Złotym standardem w leczeniu pozostają obecnie karbapenemy (meropenem, imipenem) lub cefalosporyny III/IV generacji (cefotaksym, cefepim), często w skojarzeniu z aminoglikozydami, ze względu na ich dobrą penetrację do płynu mózgowo-rdzeniowego [27].

5.2. Oporność nabyta i mechanizmy ESBL

W ostatnich latach coraz częściej izoluje się szczepy *C. sakazakii* wytwarzające β -laktamazy o rozszerzonym spektrum działania (ESBL – ang. *Extended-spectrum beta-lactamase*). Mechanizm ten, kodowany głównie przez plazmidowe geny z rodzin *blaCTX-M*, *blaTEM* oraz *blaSHV*, unieczynnia większość cefalosporyn, drastycznie ograniczając opcje terapeutyczne [28].

Analiza izolatów klinicznych i żywnościowych (szczególnie z Azji) wskazuje, że odsetek szczepów MDR wzrasta. Zjawisko to jest napędzane przez horyzontalny transfer genów (HGT) między *Cronobacter* a innymi bakteriami jelitowymi, takimi jak *E. coli* czy *Klebsiella pneumoniae* [29].

5.3. Gen *mcr* i oporność na kolistynę – nowe wyzwanie

Najbardziej aktualnym i niepokojącym odkryciem (lata 2019-2024) jest wykrycie u *C. sakazakii* mobilnych genów oporności na kolistynę (polimyksynę E). Kolistyna jest uznawana za antybiotyk "ostatniej szansy" (ang. *last-resort antibiotic*) w leczeniu infekcji wywołanych przez bakterie Gram-ujemne odporne na karbapenemy.

Badania przesiewowe genomów *Cronobacter* ujawniły szerokie rozpowszechnienie genu *mcr-9.1*. Gen ten jest zlokalizowany na plazmidach (często obok genów oporności na

metale ciężkie), co ułatwia jego rozprzestrzenianie się. Chociaż ekspresja *mcr-9.1* nie zawsze prowadzi do wysokiego poziomu oporności fenotypowej w warunkach laboratoryjnych, jego obecność stanowi rezerwuuar oporności, który może zostać aktywowany w warunkach stresu terapeutycznego. Obecność oporności na leki ostatniego rzutu stawia *C. sakazakii* w rzędzie patogenów wymagających ścisłego nadzoru epidemiologicznego [30].

6. Podsumowanie i perspektywy

C. sakazakii pozostaje unikalnym przykładem ewolucji mikroorganizmu środowiskowego w kierunku wysoce wyspecjalizowanego patogenu noworodkowego. Analiza literatury przedstawiona w niniejszej pracy wskazuje, że sukces infekcyjny tej bakterii nie jest wynikiem pojedynczego czynnika wirulencji, lecz efektem synergii wielu zaawansowanych mechanizmów molekularnych.

Kluczowe wnioski płynące z przeglądu aktualnego stanu wiedzy można ująć w następujących punktach:

1. Adaptacja środowiskowa

Niezwykła oporność na wysychanie (zależna od trehalozy) i zdolność tworzenia biofilmu czynią mleko modyfikowane (PIF) trwałym rezerwuarem zakażenia, trudnym do całkowitej eliminacji w procesie produkcyjnym.

2. Przewaga metaboliczna

Wykorzystanie kwasu sjalowego (geny *nanAKT*) oraz eliminacja konkurencji bakteryjnej (T6SS) pozwalają patogenowi na szybką dominację w niszy jelitowej noworodka.

3. Neurotropizm

Unikalne mechanizmy inwazji OUN, w tym wykorzystanie białek OmpA/GapA oraz strategia „konia trojańskiego” (przeżycie w makrofagach), tłumaczą dramatyczny przebieg kliniczny zapalenia opon mózgowo-rdzeniowych.

4. Zagrożenie lekoopornością

Pojawienie się genów *mcr-9.1* (oporność na kolistynę) oraz plazmidów wielolekooporności (MDR) wymaga rewizji standardów terapii empirycznej.

Dalsze kierunki badawcze powinny koncentrować się na opracowaniu szybkich i tanich metod detekcji *C. sakazakii* w żywności oraz poszukiwaniu alternatywnych strategii terapeutycznych (np. terapia fagowa, hamowanie systemów *Quorum Sensing*), które mogłyby zapobiec tworzeniu biofilmu na aparaturze medycznej. Zrozumienie molekularnego arsenału *C. sakazakii* jest kluczem do ograniczenia śmiertelności w grupie najwrażliwszych pacjentów.

Bibliografia:

1. Farmer, J. J., et al. (1980). *Enterobacter sakazakii*: a new species of "Enterobacteriaceae" isolated from clinical specimens. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 30(3), 569-584.
2. Iversen, C., et al. (2008). *Cronobacter* gen. nov., a new genus to accommodate the biogroups of *Enterobacter sakazakii*, and proposal of *Cronobacter sakazakii* gen. nov., comb. nov., *Cronobacter malonaticus* sp. nov., *Cronobacter turicensis* sp. nov., *Cronobacter muytjensii* sp. nov., *Cronobacter dublinensis* sp. nov., *Cronobacter genomospecies* 1, and of three subspecies, *Cronobacter dublinensis* subsp. *dublinensis*

- subsp. nov., *Cronobacter dublinensis* subsp. *lausannensis* subsp. nov. and *Cronobacter dublinensis* subsp. *lactaridi* subsp. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 58(6), 1442-1447.
3. Joseph, S., et al. (2012). *Cronobacter condimenti* sp. nov., isolated from spiced meat, and *Cronobacter universalis* sp. nov., a species designation for *Cronobacter* sp. *genomospecies* 1, recovered from a leg infection, water and food ingredients. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 62(6), 1277-1283.
 4. Forsythe S.J. (2017). Updates on the *Cronobacter* Genus. *Annual Review of Food Science and Technology*, 25(9), 23-44.
 5. Bowen, A. B., Braden, C. R. (2006). Invasive *Enterobacter sakazakii* disease in infants. *Emerging Infectious Diseases*, 12(8), 1185-1189.
 6. Friedemann, M. (2009). Epidemiology of invasive neonatal *Cronobacter* (*Enterobacter sakazakii*) infections. *European Journal of Clinical Microbiology & Infectious Diseases*, 28(11), 1297-1304.
 7. FAO/WHO. (2004). *Enterobacter sakazakii* y otros microorganismos en los preparados en polvo para lactantes : informe de la reunión. Microbiological Risk Assessment Series No. 6. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations / World Health Organization.
 8. Breeuwer, P., Lardeau, A., Peterz, M., Joosten, H. M. (2003). Desiccation and heat tolerance of *Enterobacter sakazakii*. *Journal of Applied Microbiology*, 95(5), 967-973.
 9. Barron, J. C., Forsythe, S. J. (2007). Dry stress and survival time of *Enterobacter sakazakii* in powdered infant formula. *Journal of Food Protection*, 70(9), 2111-2117.
 10. Fei, P. et al. (2017). Prevalence, Molecular Characterization, and Antibiotic Susceptibility of *Cronobacter sakazakii* Isolates from Powdered Infant Formula Collected from Chinese Retail Markets. *Frontiers Microbiology*, 17(8), 2026.
 11. Mohan Nair, M. K., Venkitanarayanan, K. (2007). Role of bacterial OmpA and host cytoskeleton in the invasion of human intestinal epithelial cells by *Enterobacter sakazakii*. *Pediatric Research*, 62(6), 664-669.
 12. Kim, K. et al (2010). Outer membrane proteins A (OmpA) and X (OmpX) are essential for basolateral invasion of *Cronobacter sakazakii*. *Applied and Environmental Microbiology*, 76(15):, 5188-5198.
 13. Quintero, M. et al. (2011). Adherence inhibition of *Cronobacter sakazakii* to intestinal epithelial cells by prebiotic oligosaccharides. *Current Microbiology*, 62(5), 1448-1454.
 14. Joseph, S., Hariri, S., Masood, N., Forsythe, S. (2012) Sialic acid utilization by *Cronobacter sakazakii*. *Microbial Informatics and Experimentation*, 24(3).
 15. Wang, M. et al. (2018). The Roles of Two Type VI Secretion Systems in *Cronobacter sakazakii* ATCC 12868. *Frontiers in Microbiology*, 22(9), 2499.
 16. Jang, H. et al. (2020). The Secretion of Toxins and Other Exoproteins of *Cronobacter*: Role in Virulence, Adaption, and Persistence. *Microorganisms*, 8(2), 229.
 17. Townsend, S. M. et al. (2007). *Enterobacter sakazakii* invades brain capillary endothelial cells, persists in human macrophages influencing cytokine secretion and induces severe brain pathology in the neonatal rat. *Microbiology (Reading)*, 153(10):3538-3547.

18. Emami, C. N., Mittal, R., Wang, L., Ford, H. R., Prasadara, N. V. (2012) Role of neutrophils and macrophages in the pathogenesis of necrotizing enterocolitis caused by *Cronobacter sakazakii*. *Journal of Surgical Research*, 172(1), 18-28.
19. Franco, A. A., et al. (2011). Cpa, the outer membrane protease of *Cronobacter sakazakii*, activates plasminogen and mediates resistance to serum bactericidal activity. *Infection and Immunity*, 79(4), 1578-87.
20. Grim, C. J., et al. (2012). Identification and characterization of *Cronobacter* iron acquisition systems. *Applied and Environmental Microbiology*, 78(17), 6035-6050.
21. Ogrodzki, P., Forsythe, S. J. (2015). Capsular profiling of the *Cronobacter* genus and the association of specific *Cronobacter sakazakii* serotypes with neonatal meningitis and necrotizing enterocolitis. *BMC Genomics*, 16(1), 758.
22. Townsend, S. M. et al. (2007). *Enterobacter sakazakii* invades brain capillary endothelial cells, persists in human macrophages influencing cytokine secretion and induces severe brain pathology in the neonatal rat. *Microbiology (Reading)*, 153(10):3538-3547.
23. Liu, Y., Zhang, J., Zhao, H., Zhong, F., Li, J., Zhao, L. (2024) VBNC *Cronobacter sakazakii* survives in macrophages by resisting oxidative stress and evading recognition by macrophages. *BMC Microbiology*, 6(24, 1), 458.
24. Singh, N., Patil, A., Prabhune, A. A., Raghav, M., Goel, G. (2016) Diverse profiles of N-acyl-homoserine lactones in biofilm forming strains of *Cronobacter sakazakii*. *Virulence*, 8(3), 275-281.
25. Kim, S., Hwang, H., Kim, K. P., Yoon, H., Kang, D. H., Ryu, S. (2015) Hfq plays important roles in virulence and stress adaptation in *Cronobacter sakazakii* ATCC 29544. *Infection and Immunity*, 83(5), 2089-2098.
26. Ji, X., et al. (2024). *Cronobacter sakazakii* lysozyme inhibitor LprI mediated by HmsP and c-di-GMP is essential for biofilm formation and virulence. *Applied and Environmental Microbiology*, 90(10).
27. Holý, O., et al. (2019). Antibiotic Susceptibility of *Cronobacter* spp. Isolated from Clinical Samples. *Polish Journal of Microbiology*, 68(1), 5-14.
28. Fakruddin, M., Rahaman, M., Ahmed, M. M., Hoque, M. M. (2014) Stress tolerant virulent strains of *Cronobacter sakazakii* from food. *Biological Research*, 47(1).
29. Gan, X., et al. (2022) Emerging of Multidrug-Resistant *Cronobacter sakazakii* Isolated from Infant Supplementary Food in China. *Microbiology Spectrum*, 26(10).
30. Liu, B. T., Song, F. J., Zou, M., Hao, Z. H., Shan, H. (2017) Emergence of Colistin Resistance Gene *mcr-1* in *Cronobacter sakazakii* Producing NDM-9 and in *Escherichia coli* from the Same Animal. *Antimicrobial Agents Chemotherapy*. 61(2).

10. OPRYSK NA MEDAL – BADANIA NAD JAKOŚCIĄ ZABIEGU

Wojciech Spychała, Bartłomiej Gałgański, Dawid Laudacki, Michał Zięba

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Wydział Przyrodniczo-Technologiczny

SKN Inżynierii Rolniczej

ul. Chelmońskiego 37a, 51-630 Wrocław

1. Wstęp

Skuteczność chemicznej ochrony roślin w dużej mierze zależy od jakości wykonanego zabiegu opryskiwania. Nawet najlepiej dobrany środek ochrony roślin nie zapewni oczekiwanego efektu, jeśli ciecz użytkowa nie zostanie naniesiona równomiernie, w odpowiedniej ilości i przy minimalnych stratach. Wraz z rosnącymi wymaganiami dotyczącymi efektywności produkcji, zrównoważonego gospodarowania oraz ochrony środowiska, znaczenie precyzyjnego oprysku staje się kluczowym elementem nowoczesnej inżynierii rolniczej. Ocenę jakości oprysku umożliwia zestaw wskaźników określających sposób, w jaki ciecz dociera do powierzchni roślin.

Wśród najważniejszych kryteriów oceny znajdują się stopień pokrycia opryskiwanych powierzchni, naniesienie cieczy użytkowej oraz rozkład opadu i rozpylenia cieczy. Na podstawie oceny stopnia pokrycia możliwe jest określenie procentowego pokrycia powierzchni liści lub próbników. Analiza naniesienia cieczy użytkowej to ilościowe określenie cieczy, która trafia na rośliny w odniesieniu do dawki zadanej. Trzecim z parametrów jest rozkład opadu i rozpylenia cieczy, pozwalający ocenić równomierność rozmieszczenia kropli na stanowisku pomiarowym oraz ich zdolność do dotarcia do różnych stref rośliny.

Bardzo istotna jest również ocena znoszenia cieczy opryskowej, które odzwierciedla ilość kropli przemieszczających się poza obszar planowanego zabiegu, a tym samym określa potencjalne ryzyko środowiskowe i straty środka ochrony roślin.

2. Stopień pokrycia opryskiwanych powierzchni

Stopień pokrycia jest jednym z podstawowych wskaźników jakości zabiegu opryskiwania i określa procentowe pokrycie liści lub próbników kroplami cieczy użytkowej. W literaturze przedmiotu wskaźnik ten jest traktowany jako parametr ilościowy (procent pokrycia powierzchni). Badacze w swoich publikacjach na temat aplikacji środków ochrony roślin podkreślali, że nawet przy prawidłowej dawce, niski stopień pokrycia powoduje spadek skuteczności zabiegu [Ghersa, Pessah, Duarte Vera, Ferraro, 2020; Matthews, Bateman, Miller, 2014].

W badaniach stopnia pokrycia najczęściej stosowanymi próbnikami są papierki wodoczułe, a analiza przebiega w oparciu o techniki obrazowania i analizę obrazów, która pozwala policzyć procent powierzchni pokrytej cieczą, liczbę kropli na jednostkę powierzchni oraz rozkład wielkości kropli. Metody oparte na WSP są powszechne, skuteczne i relatywnie tanie, lecz mają też ograniczenia (np. wpływ nakładania się śladów, zmiana barwy przy dużych gęstościach), dlatego autorskie procedury kalibracyjne i odpowiednie ustawienie próbek są

kluczowe, co zaznaczyli w swoich publikacjach m.in. Lipiński i Lipiński [2020], Panneton [2002], Wu, Yang i Lin [2025].

Na podstawie wyników badań i ich analizy wykazano, że stopień pokrycia zależy od parametrów technicznych oprysku: widma wielkości kropli (VMD), dawki cieczy użytkowej, typu i rodzaju rozpylaczy, prędkości roboczej i wysokości belki połowej nad chronionymi roślinami. Wielkość kropli wytwarzana przez rozpylacze jest istotna z punktu widzenia stopnia pokrycia i znoszenia cieczy opryskowej. Bowiem drobne krople w większym stopniu pokrywają powierzchnię, ale jednocześnie łatwiej ulegają zjawisku znoszenia, w przeciwieństwie do rozpylaczy wytwarzających grube krople. Zależność między procentowym a jednostkowym pokryciem rośliny czy próbnika była przedmiotem modelowania oraz badań laboratoryjnych i polowych, a autorzy wskazali na potrzebę równoważenia parametru pokrycia z wymaganiami biologicznymi środka [Cerruto, Manetto, Longo, Failla, Papa, 2019].

W praktyce rolniczej warto zwrócić uwagę na zmienność pokrycia w uprawach przestrzennych. Na podstawie wyników eksperymentów pokazano, że średni procent pokrycia może istotnie różnić się między strefami (górną, środkową, dolną część korony) oraz w zależności od warunków atmosferycznych i architektury roślin. Dlatego też naukowcy w swoich badaniach koncentrują się na symulacji pola przepływu powietrza oraz mapowaniu i wprowadzaniu korekt technicznych (np. regulacji objętości, zmian rozpylaczy, strat przez znoszenie) w celu poprawy jednorodności pokrycia [Witton, Pickering, Alvarez, Reed, Weyman, Hodson, Ashauer, 2018].

Autorzy podkreślili również znaczenie integracji pomiarów stopnia pokrycia z innymi wskaźnikami. W praktyce badawczej rekomendowane jest stosowanie zestawu metod opartej na analizie stopnia pokrycia opryskiwanych powierzchni, pomiarach naniesienia cieczy użytkowej (np. fluorescencyjne markery) oraz modelowaniu, tak, aby uzyskać pełny obraz jakości zabiegu i sformułować użyteczne zalecenia dla operatorów sprzętu. Wyniki badań w zakresie korelacji i regresji wskaźników jakości zabiegu opryskiwania przeprowadzili m.in. Cieniawska, Pentoś, Szulc [2022]; Penido, Teixeira, Fernandes, Monteiro, Cecon [2019].

3. Naniesienie cieczy użytkowej

Naniesienie cieczy użytkowej to wskaźnik jakości zabiegu opryskiwania, który określa rzeczywistą ilość cieczy pozostawioną na powierzchni roślinnej po aplikacji środka ochrony roślin. W literaturze przedmiotu naniesienie cieczy definiuje się jako masę lub objętość substancji aktywnej (lub substytutu pomiarowego, np. markera fluorescencyjnego) przypadającą na jednostkę powierzchni liści, łodyg lub innych organów rośliny po wykonaniu zabiegu. Analiza naniesienia pozwala bezpośrednio ocenić skuteczność transferu preparatu z opryskiwacza do celu biologicznego oraz umożliwia porównanie różnych parametrów aplikacji i technologii rozpylania [Matthews i in. 2014].

W prowadzonych badaniach podkreślono, że zwiększenie zadanej dawki cieczy nie zawsze prowadzi do proporcjonalnego wzrostu jej ilości na roślinie, a istotne są także takie parametry jak: objętość jednostkowa, wielkość kropli, zastosowane rozpylacze, prędkość robocza i warunki atmosferyczne podczas zabiegu. Efektywne naniesienie jest wynikiem synergii tych czynników.

Metody pomiaru naniesienia cieczy roboczej zyskały znaczną popularność wraz z rozwojem technik oznaczania z wykorzystaniem fluorescencyjnych znaczników oraz barwników. W pracy Barbera i Parkina [2003] zastosowano barwniki fluorescencyjne do ilościowej analizy naniesienia na liściach roślin, co umożliwiło nie tylko określenie ilości naniesionej cieczy, lecz także ocenę jej przestrzennego rozmieszczenia w obrębie rośliny. Metody fluorescencyjne charakteryzują się wysoką czułością i pozwalają na detekcję nawet bardzo niewielkich ilości naniesionej cieczy, co ma szczególne znaczenie w przypadku oceny oprysków niskoobjętościowych.

Z kolei wyniki badań przeprowadzonych przez Chen i in. [2020] wykazały, że stopień naniesienia cieczy użytkowej był silnie uzależniony od wielkości kropli. Krople o średnicy medianowej objętości (VMD) w zakresie 200–300 μm charakteryzowały się niższymi wartościami naniesienia, lecz jednocześnie mniejszą podatnością na znoszenie. Natomiast drobniejsze krople, mimo lepszego pokrycia powierzchni roślin, nie prowadziły do zwiększenia ilości naniesionej cieczy, co wynikało z ich większej podatności na znoszenie. Badania przeprowadzono na plantacjach ryżu z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych.

Inną ważną kwestią jest efekt przesłaniania w gęstej roślinności. Richardson i Newton [2000] wykazali, że warstwy liści umieszczone niżej w koronie roślin mogą otrzymywać znacznie mniejsze ilości naniesionej cieczy w porównaniu do warstw górnych, szczególnie przy standardowych parametrach aplikacji cieczy. To zjawisko ma kluczowe zastosowanie praktyczne, gdyż prowadzi do nierównomiernej ochrony i może powodować utratę efektu biologicznego preparatu.

4. Rozkład opadu i rozpylenia cieczy

Rozkład opadu i rozpylenia cieczy jest jednym z kluczowych wskaźników jakości oprysku, ponieważ określa równomierność, z jaką ciecz użytkowa trafia na powierzchnie opryskiwane. W literaturze przedmiotu podkreślono, że równomierny rozkład opadu jest warunkiem zarówno skuteczności biologicznej zabiegu, jak i racjonalnego wykorzystania środków ochrony roślin. W wynikach badań pokazano, że nawet przy prawidłowej dawce, nierównomierność opadu może prowadzić do powstawania stref niedostatecznie chronionych oraz obszarów nadmiernego depozytu, zwiększających ryzyko fitotoksyczności. Według Matthews i in. [2014], prawidłowy rozkład cieczy zależy przede wszystkim od konstrukcji i parametrów pracy rozpylaczy. Natomiast na podstawie wyników badań przeprowadzonych przez Martinsa, Fialho E Moraes, Moreira De Freitas, Da Costa Lima, A., Furtado Junior, [2009] wykazano, że rozkład opadu jest szczególnie wrażliwy na zmiany ciśnienia roboczego, które wpływają na wielkość kropli i kształt strumienia.

Wielu badaczy podkreśla, że równomierność opadu jest ściśle zależna od stabilności belki opryskiwacza, zwłaszcza przy nierównościach terenu i wyższej prędkości roboczej. Drgania belki zaburzają regulację wysokości nad łanem, co prowadzi do lokalnych zmian intensywności opadu i nieregularności pokrycia [Kaliniewicz, Lipiński, Markowski, Szczygłak, Lipiński, 2023; Kaliniewicz, Lipiński, Markowski, Szczygłak, Lipiński, 2024; Lipiński, Lipiński, Burg, Sobotka, 2022].

Podsumowując, prawidłowy rozkład opadu i rozpylenia cieczy jest fundamentem wysokiej jakości zabiegów ochrony roślin. Jego analiza pozwala na optymalizację parametrów

technicznych oraz dobór typu dysz tak, aby uzyskać możliwie najbardziej równomierne i bezpieczne dla środowiska działanie oprysku.

Zasadniczo, celem nowoczesnych badań jest wypracowanie zaleceń technologicznych, które maksymalizują poziom i równomierność naniesienia cieczy na powierzchnię roślin przy jednoczesnym ograniczeniu znoszenia cieczy. Dlatego też celem badań było określenie wpływu wybranych czynników technicznych i technologicznych na jakość zabiegu opryskiwania. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących kluczowych parametrów jakości opryskiwania oraz ich znaczenia dla skuteczności zabiegów ochrony roślin. Rezultaty analiz stanowią podstawę do opracowania zaleceń wspierających bardziej precyzyjne, efektywne i bezpieczne wykonywanie oprysków w praktyce rolniczej.

5. Metodyka badań

Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym, który funkcjonował jak samojezdny opryskiwacz. Pole, na którym przeprowadzono zabiegi podzielono na odcinki 12-metrowe. Dodatkowo w każdym odcinku wydzielono trzy sekcje: początkową, pomiarową i końcową. Sekcje początkowa i końcowa miały długość po 2 m. W sekcji początkowej opryskiwacz uzyskiwał zadaną prędkość, natomiast w sekcji końcowej zwalniał aż do całkowitego zatrzymania. Najdłuższą sekcją była sekcja pomiarowa. W tej sekcji o długości 8 m pobierano próbki do dalszej analizy.

W badaniach zastosowano rozpylacze standardowe: jednostrumieniowe XR 11003 i dwustrumieniowe TTJ60 11003 przy ciśnieniu cieczy użytkowej 0,2 i 0,4 MPa. Prędkość jazdy urządzenia opryskującego wynosiła 5 i 10 km·h⁻¹. Rozpylacze ustawiono na wysokości rozpylaczy – 0,5 m. Do cieczy dodano adiuwant w dawce 0,05 l·ha⁻¹. Podczas badań warunki atmosferyczne były sprzyjające tzn. wiatr wiał z prędkością ok. 0,6 m·s⁻¹ w przeciwnym kierunku do kierunku jazdy urządzenia opryskującego. Temperatura powietrza wynosiła 18°C, a wilgotność powietrza ~65%.

Urządzenie do opryskiwania składało się z dwóch systemów: systemu cieczy i systemu jezdno. System cieczy składał się z pompy membranowej, zbiornika na ciecz do opryskiwania, zaworu sterującego z manometrem oraz czterech korpusów wielorozpylaczowych z rozpylaczami. Zadaniem systemu cieczowego było utrzymanie prawidłowego ciśnienia roboczego w układzie oraz opryskiwanie zgodnie z założonymi parametrami. Natomiast system jezdny składał się z silnika elektrycznego napędzającego koła jezdne za pomocą kół zębatach. Prędkość urządzenia opryskującego zmieniano poprzez regulację wartości na przetwornicy częstotliwości – prędkość 5 km h⁻¹ uzyskiwano przy częstotliwości ustawionej na 13 Hz, a prędkość 10 km h⁻¹ uzyskiwano przy częstotliwości ustawionej na 17 Hz.

Zawartość wapnia mierzono w Katedrze Ogrodnictwa Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Trzy dni po każdym zabiegu pobierano losowo 15 liści z opryskiwanych roślin.

W celu określenia zawartości wapnia w liściach materiał suszono w temperaturze 105°C, mielono i przesiewano przez sito laboratoryjne o rozmiarze oczek 1 mm. Następnie zważono 0,4 g wysuszonego na powietrzu materiału roślinnego. Przygotowane próbki przeniesiono do bidonów i dodano 2% kwas octowy czda oraz węgiel aktywny. Próbkę wytrząsano następnie na wytrząsarce laboratoryjnej przy 150 obr./min przez 30 minut. Zawiesinę przefiltrowano następnie przez filtr Chemland. Jednocześnie przygotowano

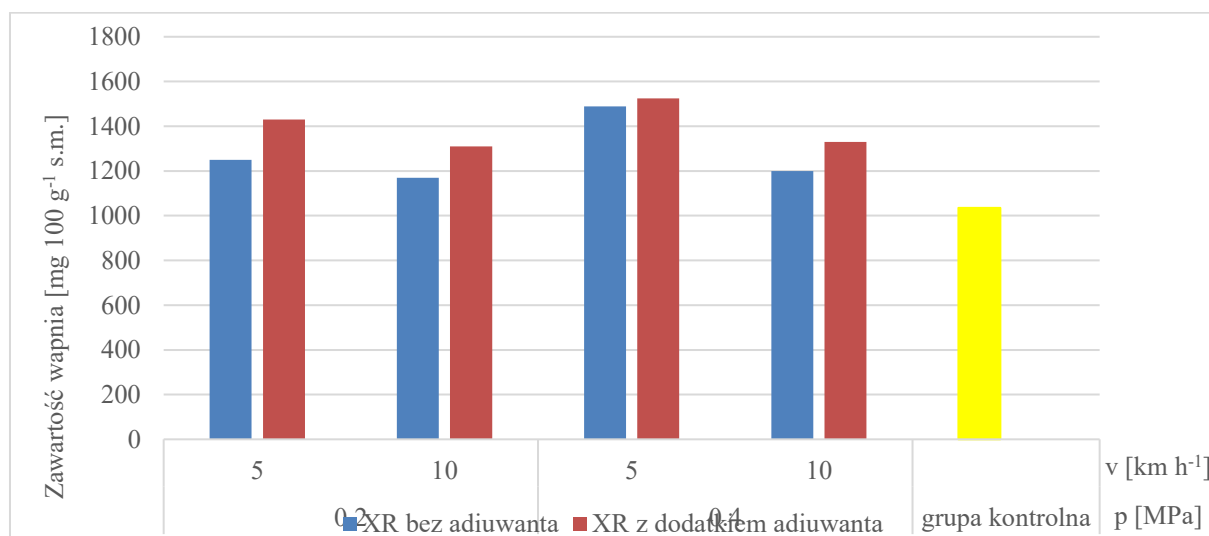
roztwory wzorcowe węglanu wapnia o znanym stężeniu i sporządzono krzywą wzorcową. Zakresy roztworów wynosiły 100, 200, 400, 500 [mg dm⁻³]. Zawartość wapnia rozpuszczalnego w próbce została zmierzona za pomocą fotometru płomieniowego i przeliczona na mg 100 g⁻¹ s.m., ponieważ próbki zostały pobrane według masy.

Do analiz zastosowano fotometr płomieniowy FA, Zeiss - Jena Model III.

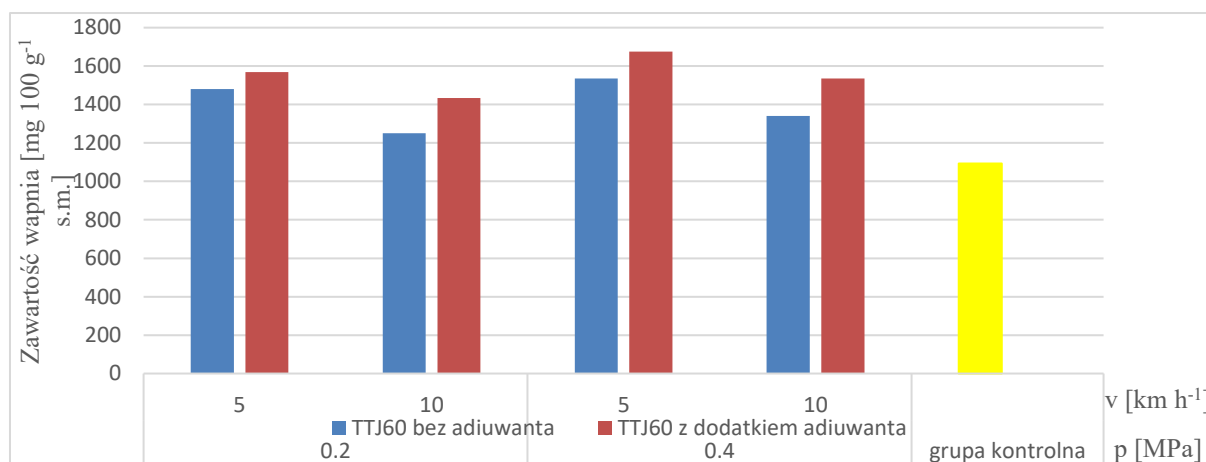
6. Wyniki i dyskusja

Wyniki badań przedstawiono na rys. 1 i 2. Wyniki badań zawartości wapnia przy zastosowaniu wybranych rozpylaczy jednostrumieniowych standardowych XR zaprezentowano na rys. 1. Zastosowanie adiuwanta skutkowało zwiększeniem zawartości wapnia we wszystkich analizowanych kombinacjach parametrów aplikacji w porównaniu z wariantami bez adiuwanta. Najwyższą zawartość wapnia stwierdzono przy ciśnieniu 0,4 MPa i prędkości 5 km·h⁻¹, zarówno w wariancie bez adiuwanta, jak i z jego dodatkiem. Wzrost prędkości roboczej do 10 km·h⁻¹ powodował obniżenie zawartości wapnia niezależnie od zastosowanego ciśnienia i obecności adiuwanta. Zawartość wapnia w grupie kontrolnej była wyraźnie niższa w porównaniu ze wszystkimi wariantami oprysku.

Podobne zależności można zauważyć dla rozpylaczy dwustrumieniowych standardowych TTJ 60, które przedstawiono na rys. 2. Jednak w porównaniu do wyników dla rozpylaczy jednostrumieniowych można stwierdzić wyższe wartości zawartości wapnia.



Rysunek 1. Zawartość wapnia w materiale roślinnym [mg · 100 g⁻¹ s.m.] przy zastosowaniu rozpylacza standardowego jednostrumieniowego w zależności od parametrów aplikacji (ciśnienie robocze p = 0,2 i 0,4 MPa; prędkość robocza v = 5 i 10 km·h⁻¹) oraz zastosowania adiuwanta. Porównano warianty oprysku; bez adiuwanta, z dodatkiem adiuwanta oraz grupę kontrolną



Rysunek 2. Zawartość wapnia w materiale roślinnym [mg · 100 g⁻¹ s.m.] przy zastosowaniu rozpylacza standardowego dwustrumieniowego w zależności od parametrów aplikacji (ciśnienie robocze $p = 0,2$ i $0,4$ MPa; prędkość robocza $v = 5$ i 10 km·h⁻¹) oraz zastosowania adiuwanta. Porównano warianty oprysku; bez adiuwanta, z dodatkiem adiuwanta oraz grupę kontrolną

Wielu naukowców podkreślało w swoich badaniach konieczność doboru odpowiedniego rozpylacza do zabiegu oraz przyjęcie właściwych parametrów pracy rozpylaczy i opryskiwacza [Godyń 2008, Kierzek i Wachowiak 2009].

Dotychczas doświadczenia w zakresie naniesienia cieczy użytkowej zostały przeprowadzone przy użyciu markerów fluorescencyjnych, różnych barwników syntetycznych czy chelatów, podobnie jak w badania przeprowadzone w niniejszej pracy. Tego typu badania realizowane są zarówno w uprawach polowych jak też warzywniczych oraz sadowniczych. Larsolle, Wretblad, Westberg [2002] analizowali naniesienie cieczy w uprawach pszenicy i ziemniaków. Badania przeprowadzono przy użyciu różnych typów rozpylaczy (XR, ID, Air Tec), a także różnych pomocniczych systemów przepływu powietrza (Kyndestoft, Hardi TWIN) i Släpduk. Jako marker w eksperymentach zastosowano nigrozynę jako barwnik syntetyczny. Natomiast w uprawie soi de Souza Christovam i in. [2010] zastosowali różne techniki aplikacji. Pomiary wykonano przy użyciu tlenochloru miedzi. Cieniawska, Łuczycka, Červinka, Sekutowski, Dereń [2017] przeprowadzili badania, na podstawie których wskazano, że ocena jakości zabiegu opryskiwania z wykorzystaniem wskaźnika naniesienia cieczy użytkowej wymaga uwzględnienia parametrycznej charakterystyki opryskiwanej rośliny. W szczególności istotnym czynnikiem okazał się współczynnik położenia powierzchni opryskowych, który w sposób wyraźny różnicował uzyskane wartości naniesienia cieczy. Zastosowanie rozpylaczy jedno- i dwustrumieniowych wykazało, że zmiany orientacji powierzchni opryskowych wpływają na efektywność osadzania cieczy.

Biorąc pod uwagę dotychczasowe wyniki badań i istotność tematyki w kontekście poziomu i równomierności naniesienia cieczy użytkowej zasadne jest kontynuowanie badań tego typu, z uwzględnieniem pozostałych wskaźników jakości zabiegu opryskiwania.

7. Wnioski

1. Zwiększenie stopnia rozpylenia cieczy spowodowało wzrost zawartości wapnia, natomiast wzrost prędkości jazdy przyczynił się do jego spadku. Zależności te były widoczne we

wszystkich analizowanych przypadkach. Wyniki te są zgodne z dobrze udokumentowanymi zależnościami przedstawianymi w literaturze naukowej.

2. Najwyższe wartości naniesienia uzyskano przy zastosowaniu rozpylaczy dwustrumieniowych, ciśnieniu cieczy wynoszącym 0,4 MPa i prędkości jazdy 5 km h⁻¹.
3. Biorąc pod uwagę rodzaj rozpylaczy to należy stwierdzić, że wyższe wartości zanotowano dla rozpylaczy dwustrumieniowych w porównaniu do rozpylaczy jednostrumieniowych.
4. Po dodaniu do cieczy adiuwanta obniżającego napięcie powierzchniowe i poprawiającego równomierność nanoszenia zaobserwowano wzrost zawartości wapnia we wszystkich analizowanych przypadkach.

Badania zostały sfinansowane ze środków finansowych na realizację projektów badawczych zgłoszonych przez Studenckie Koła Naukowe działające w Uniwersytecie Przyrodniczym we Wrocławiu.

Bibliografia:

1. Barber J. A. S., Parkin C. S. (2003). Fluorescent tracer technique for measuring the quantity of pesticide deposited to soil following spray applications. *Crop Protection*, 22 (1). [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(02\)00061-3](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(02)00061-3)
2. Cieniawska B., Pentoś K., Szulc T. (2022). Correlation and Regression Analysis of Spraying Process Quality Indicators. *Applied Sciences*, 12, 12034. <https://doi.org/10.3390/app122312034>
3. Cieniawska B., Łuczycka D., Červinka J., Sekutowski T. R., Dereń K. (2017). Deposition of spray liquid depending on the coefficient of spray surfaces. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. 62 (3), 72–75.
4. Cerruto E., Manetto G., Longo D., Failla S., Papa, R. (2019). A model to estimate the spray deposit by simulated water sensitive papers. *Crop Protection*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.104861>
5. Chen S., Lan Y., Zhou Z., Ouyang F., Wang G., Huang X., Deng X., Cheng S. (2020). Effect of Droplet Size Parameters on Droplet Deposition and Drift of Aerial Spraying by Using Plant Protection UAV. *Agronomy*, 10, 195. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020195>
6. de Souza Christovam R., Raetano C., de Amaral Dal Pogetto M., Prado E., Júnior H., Gimenes M., Serra M. (2010). Effect of Nozzle Angle and Air-Jet Parameters in Air-Assisted Sprayer on Biological Effect of Soybean Asian Rust Chemical Protection. *Journal of Plant Protection Research*, 50 (3), 347-353.
7. Ghersa F., Pessah S., Duarte Vera A. C., Ferraro D. O. (2020). Theory and Practice for Environmental Risk Assessment: Understanding the Trade-Off Between the Benefits and Risks Behind Herbicide Use as Tool for Designing Sustainable Weed Management Systems, *Decision Support Systems for Weed Management*, 10.1007/978-3-030-44402-0_8, (161-189).
8. Godyń A., Hołownicki R., Doruchowski G. (2008). Ocena rozkładu cieczy opryskowej w sadzie jabłoniowym wykonana za pomocą papieru wodnoczułego. *Inżynieria Rolnicza* 4 (102), 299–305.

9. Kierzek R., Wachowiak M. (2009). Wpływ nowych typów rozpylaczy na jakość pokrycia roślin ziemniaków cieczą użytkową. [Effect of new spray nozzles on potato leaf coverage with working liquid]. *Progress in Plant Protection/Postępy w Ochronie Roślin*, 49 (3), 1145–1149.
10. Kaliniewicz Z., Lipiński A., Markowski P., Szczyglak P., Lipiński S. (2023). A new system for measuring boom displacement in a field crop sprayer. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 222. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113594>
11. Kaliniewicz Z., Lipiński A., Markowski P., Szczyglak P., Lipiński S. (2024). The influence of selected operating parameters of a field sprayer on boom stability. *Computers and Electronics in Agriculture*, 219. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108787>
12. Larsolle A., Wretblad P., Westberg C. (2002). A comparison of biological effect and spray liquid distribution and deposition for different spray application techniques in different crops. Uppsala. ISSN 00283-0086.
13. Lipiński A. J., Lipiński S. (2020). Binarizing water sensitive papers – how to assess the coverage area properly? *Crop Protection*, 127, 104949. <https://doi.org/10.1016/J.CROPRO.2019.104949>
14. Lipiński A. J., Lipiński S., Burg P., Sobotka S. M. (2022). Influence of the instability of the field crop sprayer boom on the spraying uniformity. *Journal of Agriculture and Food Research*, 10, 100432. <https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2022.100432>
15. Martins R. N., Fialho E Moraes H. M., Moreira De Freitas M. A., Da Costa Lima A., Furtado Junior M. R. (2021). Effect of nozzle type and pressure on spray droplet characteristics. *Idesia*, 39(1). <https://doi.org/10.4067/S0718-34292021000100101>
16. Matthews G., Bateman R., Miller P. (2014) Spray of droplets. In: *Pesticide application methods*, 4th edn. Wiley-Blackwell, Oxford, pp 91–124
17. Penido É. D. C. C., Teixeira M. M., Fernandes H. C., Monteiro P. B., Cecon P. R. (2019). Development and evaluation of a remotely controlled and monitored self-propelled sprayer in tomato crops. *Revista Ciência Agronômica*, 50(1), 8-17.
18. Richardson B., Newton M. (2000). Spray deposition within plant canopies. *New Zealand Plant Protection*, 53, 248-252. <https://doi.org/10.30843/nzpp.2000.53.3697>
19. Witton J. T., Pickering M. D., Alvarez T., Reed M., Weyman G., Hodson M. E., Ashauer R. (2018). Quantifying pesticide deposits and spray patterns at micro-scales on apple (*Malus domestica*) leaves with a view to arthropod exposure. *Pest Management Science*, 74 (12). <https://doi.org/10.1002/ps.5136>
20. Wu C. L., Yang C. K., Lin J. Y. (2025). Water-sensitive paper detection and spray analysis. *Multimedia Tools and Application*, 84, 38797–38851 <https://doi.org/10.1007/s11042-025-20697-2>

11. PROCES UCZENIA SIĘ KONI, W ŚWIECIE WSPÓLCZESNEJ NAUKI O ZACHOWANIACH ZWIERZĄT

Zofia Rudnicka, Agata Danielewicz

Uniwersytet w Siedlcach

Wydział Nauk Rolniczych

Studenckie Koło Naukowe Sympatyków Zwierząt

ul. Prusa 14, 08 - 110 Siedlce

E-mail: zr89184@stud.uws.edu.pl

1. Wstęp

Uczenie się jest jednym z podstawowych procesów przystosowawczych każdego gatunku zwierząt. Umożliwia skuteczniejsze reagowanie na bodźce środowiskowe, kształtowanie zachowań oraz rozwój relacji społecznych.

W przypadku analiz zachowania koni – gatunku o silnie rozwiniętej strukturze społecznej i wysokiej wrażliwości emocjonalnej, zrozumienie mechanizmów uczenia się ma kluczowe znaczenie dla ich prawidłowego szkolenia, dobrostanu oraz bezpieczeństwa ludzi z nimi pracujących.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie mechanizmów uczenia się koni w kontekście wiedzy neurobiologicznej i behawioralnej, a także analiza praktycznego znaczenia teorii uczenia się w treningu. Omówiono zarówno biologiczne podstawy przyswajania informacji, jak i najważniejsze formy uczenia asocjacyjnego i nieasocjacyjnego. Praca ma charakter przeglądowy – łączy dane naukowe z praktyką jeździecką, podkreślając, że skuteczny trening wymaga zrozumienia sposobu, w jaki koń postrzega świat i przetwarza doświadczenia.

2, Początki szkolenia koni

Pierwsze znane ludzkości metody treningowe dla koni powstały już około 3500 lat temu, co świadczy o niezwykle długiej historii współpracy człowieka z tym gatunkiem. Choć często jako jednego z prekursorów teorii szkolenia koni wskazuje się Ksenofonta (ok. 430–354 p.n.e.), autora dzieła *O sztuce jeździeckiej*, to warto zauważyć, że idea systematycznego przygotowywania koni do pracy lub walki pojawiła się znacznie wcześniej. Już około 1000 lat przed Ksenofontem istniał bowiem Kikkuli z kraju Mitanni, który opracował szczegółowy traktat dotyczący metod treningowych koni, zapisany pismem klinowym. Uważa się, że jego praca stanowi jedno z najstarszych źródeł wiedzy o fizjologicznym przygotowaniu koni do wysiłku [Raulwing, 2009].

Od tysięcy lat człowiek stara się zrozumieć naturę koni – trenować je, ujeżdżać, szkolić i wykorzystywać do różnych celów – jednak dopiero stosunkowo niedawno nauka zaczęła systematycznie badać ich procesy poznawcze i zdolności uczenia się. Dopiero w ostatnich dwóch stuleciach nastąpił dynamiczny rozwój nauk behawioralnych i neurobiologii, które umożliwiły głębsze poznanie mechanizmów rządzących zachowaniem zwierząt. Dzięki

rozwojowi technologii możliwe stało się badanie funkcjonowania mózgu koni, identyfikowanie neuroprzekazników oraz obserwacja, w jaki sposób powstają skojarzenia i reakcje warunkowe.

Warto podkreślić, że środowisko jeździeckie, przez długi czas silnie zakorzenione w tradycji i przekazach międzypokoleniowych, początkowo wykazywało ograniczone zainteresowanie naukowymi odkryciami z zakresu psychologii zwierząt. Dopiero w ostatnich dekadach, wraz z popularyzacją etologii stosowanej i nowoczesnych metod szkoleniowych, temat ten stał się niezwykle aktualny i chętnie podejmowany zarówno przez badaczy, jak i praktyków.

Przykładem, który znacząco przyczynił się do rozwoju badań nad procesami uczenia się zwierząt, jest historia tzw. „Mądrego Hansa” – kłusaka, który na początku XX wieku wzbudził sensację twierdzeniem, że potrafi wykonywać działania arytmetyczne, takie jak odejmowanie czy dzielenie. Zwierzę miało odpowiadać na pytania, stukając kopytem określoną liczbę razy, co interpretowano jako przejaw niezwyklej inteligencji. Dopiero późniejsze badania wykazały, że koń w rzeczywistości reagował nie na same liczby, lecz na mimowolne sygnały wysyłane przez człowieka, co doprowadziło do sformułowania pojęcia „efektu Mądrego Hansa” – klasycznego przykładu warunkowania i subtelnej komunikacji niewerbalnej między człowiekiem a zwierzęciem [Koniologia, 2022].

3. Neurobiologiczne i behawioralne podstawy procesu uczenia się koni

Procesy uczenia się oraz pamięci można analizować na różnych poziomach — od mikro, obejmującego badania struktur neuronalnych, po makro, koncentrujący się na zachowaniu organizmów. Na poziomie mikro mówimy o szerokim, interdyscyplinarnym obszarze wiedzy, jakim jest neurobiologia, łącząca osiągnięcia biologii, fizjologii, chemii i psychologii. Natomiast poziom makro wiąże się z obserwacją zachowań i mechanizmów przystosowawczych, które opisuje nurt znany jako behawioryzm – kierunek, który przez dziesięciolecia dominował w badaniach nad uczeniem się zwierząt.

Uczenie się można zdefiniować jako proces prowadzący do trwałej modyfikacji zachowania na podstawie doświadczenia, umożliwiający organizmom skuteczniejsze przystosowanie się do zmiennego środowiska. W przypadku koni, które są gatunkiem stadnym i roślinożernym, zdolność do szybkiego uczenia się oraz reagowania na sygnały płynące od innych osobników ma kluczowe znaczenie dla przetrwania. W naturalnych warunkach koń nie komunikuje się w sposób werbalny, dlatego jego bezpieczeństwo zależy od umiejętności obserwacji języka ciała współtowarzyszy i interpretowania ich reakcji. Gdy jeden osobnik stada gwałtownie podnosi głowę lub napina mięśnie, pozostałe natychmiast reagują, często instynktownie uciekając przed potencjalnym zagrożeniem. Takie zachowania stanowią przykład uczenia się poprzez obserwację i naśladowanie, które ma ogromne znaczenie w kontekście życia społecznego koni oraz ich zdolności adaptacyjnych.

Ponad trzy dekady temu Thomas [1986] zaproponował hierarchiczny model klasyfikujący poziomy umiejętności poznawczych zwierząt – od najprostszych form, takich jak habituacja, aż po złożone rozumowanie logiczne. Model ten, często przedstawiany w formie „piramidy inteligencji”, stanowi próbę uporządkowania różnych form uczenia się według stopnia ich złożoności. Na niższych poziomach znajdują się proste procesy habituacyjne i warunkowanie, podczas gdy wyższe stopnie odnoszą się do umiejętności rozwiązywania problemów, uogólniania bodźców czy rozumowania przyczynowo-

skutkowego. Zgodnie z badaniami Thomasa, spośród analizowanych gatunków (m.in. myszy, szczurów, słoni, koni, zebr i osłów), jedynie słoń i koń osiągnęły piąty poziom piramidy – zdolność do wykonywania zadań różnicowania równoczesnego [Murphy, Arkins, 2007]. Kolejne badania wskazują, że konie potrafią generalizować bodźce, kategoryzować obiekty według ich cech fizycznych (np. koloru, wielkości) oraz przyswajając proste pojęcia porównawcze, takie jak „większy niż” czy „ciemniejszy niż” [Christensen, Zharkikh, Chovaux, 2011; Hanggi, 2005]. Pomimo tych imponujących zdolności poznawczych, nie udało się dotąd jednoznacznie potwierdzić, że konie są zdolne do myślenia abstrakcyjnego i rozumowania logicznego (poziom 7–8 w hierarchii Thomasa). Niemniej jednak ich szybkość uczenia się i zdolność adaptacji są często porównywane do delfinów czy niektórych gatunków naczelnych, co potwierdza wysoki potencjał intelektualny tego gatunku.

Na długo przed rozwojem nauk behawioralnych ludzie, którzy pracowali z końmi, intuicyjnie stosowali zasady oparte na procesach uczenia się, mimo że nie posługiwali się jeszcze współczesną terminologią psychologiczną. W praktyce treningowej od wieków wykorzystywano zjawiska takie jak habituacja (przyzwyczajanie do bodźców), warunkowanie instrumentalne czy negatywne wzmocnienie. Kluczowym elementem szkolenia było przykładanie bodźca (np. nacisku łydek lub wodzy) i jego złagodzenie lub usunięcie w odpowiednim momencie, gdy koń wykonał pożądane zachowanie. Choć dawni jeźdźcy nie znali terminów takich jak „uczenie asocjacyjne” czy „wygaszanie reakcji”, ich metody w istocie opierały się na tych samych zasadach, które współczesna nauka opisuje językiem behawioryzmu. Można więc powiedzieć, że podstawy treningu koni mają głęboko biologiczne i psychologiczne korzenie, a rozwój nauk o zachowaniu jedynie uporządkował i nazwał procesy znane praktykom od tysięcy lat.

4. Proces uczenia się koni

Mechanizmy zawiadujące procesem nauki, podobnie jak u innych gatunków zwierząt, można analizować na różnych poziomach złożoności – od mikro, obejmującego zmiany biochemiczne i neurofizjologiczne, aż po poziom makro, czyli obserwowalne zachowania. Na poziomie mikro, kiedy przyjrzymy się mechanizmom neuronalnym, konie – tak jak wszystkie zwierzęta – funkcjonują według tych samych zasad neurobiologicznych, które opisano na przykładzie słynnego ślimaka morskiego *Aplysia californica*. Badania nad tym gatunkiem, prowadzone przez amerykańskiego neurobiologa Erica Kandela, zostały uhonorowane Nagrodą Nobla w 2000 roku. Kandel wykazał, że liczba połączeń synaptycznych pomiędzy neuronami wzrasta, gdy organizm uczy się nowych informacji, natomiast ulega redukcji w procesie habituacji, czyli przyzwyczajania się do powtarzalnych bodźców [Kandel, 2001].

Informacje docierające do organizmu konia z otoczenia są odbierane za pośrednictwem zmysłów – wzroku, słuchu, dotyku czy węchu – a następnie przekazywane w postaci impulsów elektrycznych wzdłuż neuronów, przez rdzeń kręgowy do mózgowia. Tam zostają zakodowane w formie zapisu neuronalnego, przechowywane i w razie potrzeby odtwarzane. Proces uczenia się wiąże się ze zmianą istniejących połączeń synaptycznych oraz tworzeniem nowych sieci neuronalnych. Utrwalony ślad pamięciowy, określany jako engram, ma charakter rozproszonej sieci neuronalnej, której aktywacja prowadzi do odtworzenia określonej informacji lub zachowania. Zjawisko to określane jest mianem plastyczności neuronalnej – zdolności mózgu do adaptacyjnych zmian strukturalnych i funkcjonalnych.

Badania nad pamięcią długotrwałą u koni wskazują, że gatunek ten cechuje się wyjątkową zdolnością do trwałego przechowywania informacji. Hanggi i Ingersoll [2009] udowodnili, że konie potrafią zapamiętać rozwiązanie zadania nawet po dziesięciu latach bez żadnych prób utrwalających. Choć próba badawcza była niewielka, wyniki te potwierdzają potoczne przekonanie, że „koń nigdy nie zapomina”. Pamięć koni charakteryzuje się dużą stabilnością i wiernością odwzorowania – w przeciwieństwie do ludzkiej, która często ulega rekonstrukcji i zniekształceniu wskutek analiz, refleksji i emocji związanych ze wspomnieniami.

Badania Cellai i współpracowników [2024] dowodzą, że zarówno młodsze, jak i starsze konie wykazują zdolność do uczenia się asocjacyjnego. W ich doświadczeniu wszystkie konie szybko powiązały dźwięk kliknięcia z nagrodą już w pierwszej fazie testu. Starsze osobniki osiągały wyniki porównywalne z końmi dorosłymi w zakresie czasu potrzebnego do wykonania zadania, co wskazuje, że zachowują one wysoką sprawność procesów uczenia się i pamięci krótkotrwałej. Wyniki sugerują, że konie są zdolne do utrzymywania śladów pamięciowych przez co najmniej 30 sekund oraz zachowania nabytej wiedzy nawet przez 10 dni, co ma istotne znaczenie w kontekście treningu i pracy z końmi w różnym wieku.

Zdolności pamięciowe koni mają charakter kontekstowy – zwierzęta te bardzo dobrze zapamiętują związki pomiędzy wydarzeniem a miejscem jego wystąpienia [McGreevy, Christensen, von Borstel, McLean, 2018]. Wiedzę tę wykorzystuje się praktycznie w treningu i pracy stajennej. Przykładowo, w niektórych niemieckich ośrodkach pierwsze siodłanie konia odbywa się w znajomym i bezpiecznym dla niego miejscu – na korytarzu lub w boksie, co pozwala zminimalizować stres i ułatwia adaptację do nowego doświadczenia. Z kolei negatywne wspomnienia mogą prowadzić do trwałego utrwalenia reakcji lękowych – koń może na przykład konsekwentnie unikać konkretnego narożnika ujeżdżalni lub reagować gwałtownie w miejscach, gdzie wcześniej się przestraszył. Tego rodzaju reakcje, będące przejawem pamięci emocjonalnej i mechanizmów ucieczkowych, mogą utrwalić się już po jednym lub dwóch powtórzeniach bodźca.

Pomimo znacznego postępu w badaniach nad funkcjami poznawczymi u koni, wciąż niewiele wiadomo o ich pamięci prospektywnej i roboczej. Większość struktur mózgowych u koni jest homologiczna względem ludzkich, jednak znaczące różnice występują w budowie i funkcjonowaniu kory przedczołowej. U człowieka obszar ten jest silnie rozwinięty, pofałdowany i odpowiada za złożone procesy myślenia, planowania, samoświadomości i refleksji. U koni natomiast brakuje wyraźnej warstwy IV (ziarnistej wewnętrznej) w kolumnie neuronalnej, co utrudnia precyzyjne określenie granic i funkcji tego obszaru [Cozzi, Povinelli, Ballarin, Granato, 2013].

Kora przedczołowa u ludzi odpowiada między innymi za przechowywanie i organizowanie śladów pamięciowych, wizualizację przeszłych zdarzeń oraz przewidywanie przyszłych konsekwencji – funkcje określane wspólnie mianem pamięci prospektywnej. Nie istnieją jednak dowody naukowe wskazujące, że konie dysponują analogicznymi zdolnościami. Przypisywanie koniom ludzkich cech poznawczych i zakładanie, że są zdolne do logicznego rozumowania w kategoriach przyczynowo-skutkowych, jest nieuzasadnione i może prowadzić do błędnych wniosków praktycznych. Takie podejście sprzyja stosowaniu nieefektywnych metod szkoleniowych, opartych na karach bądź na nagrodach opóźnionych w czasie. Tymczasem skuteczny trening koni powinien opierać się na zasadach warunkowania opartego

na natychmiastowej konsekwencji i precyzyjnej komunikacji, odpowiadającej ich rzeczywistym możliwościom poznawczym.

5. Teoria uczenia się

Proces uczenia się zwierząt od dawna stanowi przedmiot zainteresowania psychologii porównawczej, etologii oraz nauk o zachowaniu. W oparciu o liczne badania eksperymentalne sformułowano uniwersalne zasady wyjaśniające mechanizmy przyswajania informacji, znane obecnie jako teoria uczenia się (*Learning Theory*). Koncepcja ta stanowi fundament dla zrozumienia sposobu, w jaki uczą się wszystkie gatunki zwierząt, w tym konie – niezależnie od ich rasy, wieku czy dyscypliny użytkowej. Teoria uczenia się obejmuje dwa podstawowe typy procesów: uczenie asocjacyjne i uczenie nieasocjacyjne. Do pierwszej kategorii zalicza się warunkowanie klasyczne (kojarzenie bodźców) oraz warunkowanie instrumentalne (zależność pomiędzy zachowaniem a jego konsekwencją), natomiast druga obejmuje habituację i sensytyzację, czyli odpowiednio osłabianie lub wzmacnianie reakcji na powtarzające się bodźce. Badania wskazują, że konie są zdolne do efektywnego uczenia się asocjacyjnego, a procesy te zachodzą u nich również w późniejszym wieku. Cellai i współpracownicy [2024] potwierdzili, że nawet starsze osobniki zachowują wysoką sprawność poznawczą oraz zdolność tworzenia nowych skojarzeń, co przeczy obiegowym opiniom o ograniczonej plastyczności umysłowej koni w wieku zaawansowanym.

Pomimo że zasady teorii uczenia się są stosunkowo proste i uniwersalne, ich praktyczne wykorzystanie w szkoleniu koni wciąż pozostaje niewystarczające. Wielu trenerów oraz jeźdźców nie posiada wystarczającej wiedzy z zakresu psychologii uczenia się zwierząt, co może prowadzić do nieefektywnych, a nawet szkodliwych metod treningowych. W konsekwencji błędów popełnianych przez człowieka, konie często określane są mianem „trudnych”, „nieposłusznych” czy „niebezpiecznych”. W rzeczywistości jednak większość problemów behawioralnych wynika z niepoprawnego prowadzenia procesu szkoleniowego, braku konsekwencji lub nieumiejętnego stosowania wzmocnień i kar. Nieprawidłowe postępowanie z końmi nie tylko utrudnia naukę, ale także negatywnie wpływa na ich dobrostan oraz bezpieczeństwo ludzi pracujących z tymi zwierzętami. Statystyki pokazują, że jazda konna należy do sportów o wysokim ryzyku urazów – częstszym niż w przypadku narciarstwa, rugby czy jazdy motocyklem. Wielokrotnie odnotowano przypadki koni uznawanych za „niebezpieczne” i eliminowanych z użytkowania, których zachowanie było w rzeczywistości reakcją na długotrwały stres, nieumiejętne przeprowadzanie treningów lub brak zrozumienia zasad uczenia się. Zjawisko to podkreśla konieczność upowszechniania wiedzy z zakresu etologii i nauk behawioralnych wśród praktyków jeździectwa.

Warto zwrócić uwagę, że także czynniki środowiskowe, takie jak warunki utrzymania, oświetlenie i rodzaj ściółki, mogą wpływać na zdolności poznawcze i zachowanie koni. Greening i współautorzy [2021] wskazują, że ograniczenie czasu snu REM wynikające z niewłaściwych warunków stajennych prowadzi do pogorszenia funkcji poznawczych oraz zaburzeń zachowania. Tym samym dobrostan środowiskowy stanowi istotny element wspierający procesy uczenia się i zapamiętywania.

Badania nad poziomem wiedzy praktyków jeździectwa pokazują, że teoria uczenia się nie jest wystarczająco rozpowszechniona wśród osób zajmujących się końmi zawodowo. W badaniu przeprowadzonym w Australii przez Warren-Smith i McGreevy’ego [2006]

stwierdzono, że chociaż niemal 80% trenerów deklarowało znajomość pojęcia wzmocnienia pozytywnego, jedynie 2,8% potrafiło poprawnie wyjaśnić jego zastosowanie w praktyce. Wyniki te potwierdziły potrzebę lepszego kształcenia instruktorów i jeźdźców w zakresie zasad warunkowania instrumentalnego. Nowsze badania Luke i współpracowników [2023] wykazały, że poziom znajomości podstawowych pojęć, takich jak wzmocnienie pozytywne, wzmocnienie negatywne i kara, wciąż pozostaje niski – jedynie około 25% respondentów potrafiło prawidłowo zidentyfikować i zastosować te terminy. Co istotne, mimo nieznacznej poprawy poziomu wiedzy w porównaniu do wcześniejszych dekad, nie przełożyło się to w sposób jednoznaczny na poprawę bezpieczeństwa pracy z końmi ani na wzrost dobrostanu tych zwierząt [Luke, McAdie, Smith, Warren-Smith, 2022].

Zależność między wiedzą teoretyczną, praktyką treningową a dobrostanem koni jest złożona i wymaga dalszych badań. Jednak jednoznacznie można stwierdzić, że zrozumienie i stosowanie zasad teorii uczenia się stanowi fundament skutecznego, bezpiecznego i etycznego szkolenia koni. Wiedza ta powinna stanowić podstawowy element edukacji każdego trenera, instruktora i opiekuna koni, niezależnie od poziomu zaawansowania czy dyscypliny jeździeckiej.

6. Zakończenie

Uczenie się u koni jest procesem wielowymiarowym, obejmującym zarówno mechanizmy neurofizjologiczne, jak i społeczne. Badania dowodzą, że konie dysponują rozwiniętą pamięcią długotrwałą, zdolnością do uczenia asocjacyjnego oraz wysoką plastycznością neuronalną – także w starszym wieku. Jednocześnie brak rozwiniętej kory przedczołowej ogranicza ich zdolność do myślenia abstrakcyjnego i logicznego rozumowania, co oznacza, że metody treningowe muszą opierać się na prostych, natychmiastowych konsekwencjach zachowań.

Zrozumienie teorii uczenia się ma kluczowe znaczenie dla poprawy dobrostanu koni oraz bezpieczeństwa osób z nimi pracujących. Wciąż jednak wiedza z tego zakresu nie jest wystarczająco rozpowszechniona w środowisku jeździeckim. Upowszechnienie podstawowych zasad warunkowania, znajomość procesów pamięci i emocji, a także świadomość wpływu środowiska na zachowanie koni powinny stać się integralną częścią edukacji jeździeckiej.

Współczesne jeździectwo, oparte na naukowym zrozumieniu natury konia, staje się nie tylko skuteczniejsze, ale przede wszystkim bardziej etyczne. Jak powiedział Randy Rieman, „*timing, feel and balance are the holy trinity of horsemanship*” – wycucie czasu, czucie i równowaga. To właśnie połączenie wiedzy, empatii i praktyki stanowi fundament prawdziwego partnerstwa między człowiekiem a koniem.

Bibliografia:

1. Raulwing P. (2009). The Kikkuli Text (CTH 284) Some Interdisciplinary Remarks on Hittite Training Texts for Chariot Horses in the Second Half of the 2 nd Millennium B.C.
2. Koniologia (2022). <http://koniologia.pl/o-inteligencji-koni-czyli-uwazaj-bo-jestes-obszernowany/> (O inteligencji koni czyli uważaj, bo jesteś obserwowany!, 01.11.2025).
3. Murphy J., Arkins S. (2007). Equine learning behaviour. Behavioural Processes, 76, 1–13.
4. Christensen J.W., Zharkikh T., Chovaux E. (2011). Object recognition and generalisation during habituation in horses. Applied Animal Behaviour Science, 129, 83-91.

5. Hanggi E. (2005). The thinking horse: cognition and perception reviewed. In: Proceedings of the 51st American Association of Equine Practitioners Annual Convention, 51, 246-255, Seattle, WA.
6. Kandel E. (2001). Dialogue Between Genes and Synapses. *Science*, 294, 1030-1038.
7. Hanggi E. B., Ingersoll J. F. (2009). "Long-term memory for categories and concepts in horses (*Equus caballus*)". *Animal Cognition*, 12, 451–462.
8. McGreevy P., Christensen J.W., von Borstel K., McLean A. (2018). *Equitation Science*, 2nd edition. John Willey & Sons, USA.
9. Cozzi B., Povinelli M., Ballarin C., Granato A. (2013). The Brain of the Horse: Weight and Cephalization Quotients, Brain Behavior and Evolution, 2013, 83, 9-16.
10. Warren-Smith A., McGreevy P. (2006). An audit of the application of the principles of equitation science by qualified equestrian instructors in Australia. In: Proceedings of the 2nd International Equitation Science Symposium, Milan, 12.
11. Luke K. L., McAdie T., Warren-Smith A. K., Rawluk A., Smith B. P. (2023). Does a Working Knowledge of Learning Theory Relate to Improved Horse Welfare and Rider Safety? *Anthrozoös*, 36(4), 703–719.
12. Warren-Smith A. K., McGreevy P. D. (2008). Equestrian Coaches' Understanding and Application of Learning Theory in Horse Training. *Anthrozoös*, 21(2), 153–162.
13. Brown S. M., Connor M. (2017). Understanding and Application of Learning Theory in UK-based Equestrians. *Anthrozoös*, 30(4), 565–579.
14. Thomas, R. K. (1986). Vertebrate intelligence: A review of the laboratory research. *Animal intelligence: Insights into the animal mind*, 37-56.
15. Cellai S., Gazzano A., Casini L., Gazzano V., Cecchi F., Macchioni F., Cozzi A., Pageat L., Arroub S., Fratini S., Felici M., Curadi M. C., Baragli P. (2024). The Memory Abilities of the Elderly Horse. *Animals*, 14(21), 3073.
16. Luke K. L., McAdie T., Smith B. P., Warren-Smith A. K. (2022). New insights into ridden horse behaviour, horse welfare and horse-related safety. *App. Anim. Beh. Sci.*, 246, 105539.
17. Greening L., Downing J., Amiouny D., Lekang L., McBride S. (2021). The effect of altering routine husbandry factors on sleep duration and memory consolidation in the horse. *App. Anim. Beh. Sci.*, 236, 105229.

12. PODSTAWY MECHANIZMU AGRESJI U PSÓW

Zofia Rudnicka, Adrianna Zecer

Uniwersytet w Siedlcach

Wydział Nauk Rolniczych

Studenckie Koło Naukowe Sympatyków Zwierząt

ul. Prusa 14, 08 - 110 Siedlce

E-mail: zr89184@stud.uws.edu.pl

1. Wstęp

Agresja u psów stanowi złożone zjawisko behawioralne, które w ostatnich latach wzbudza coraz większe zainteresowanie zarówno wśród właścicieli, jak i specjalistów zajmujących się zachowaniem zwierząt. Wzrost liczby zgłaszanych przypadków pogryzień ludzi przez psy sprawia, że temat ten ma istotne znaczenie społeczne i naukowe. Badania prowadzone przez Sacks, Kresnow i Houston [1996] wykazały, że w samych Stanach Zjednoczonych każdego roku dochodzi do około 4,5 miliona incydentów pogryzień, z czego ponad 750 tysięcy osób wymaga interwencji medycznej. Dane te pokazują, że zrozumienie mechanizmów agresji oraz umiejętność jej prawidłowego rozpoznawania i zapobiegania stanowią kluczowy element bycia odpowiedzialnym opiekunem.

Celem niniejszej pracy jest analiza zjawiska agresji u psów – jej rodzajów, przyczyn oraz sposobów rozpoznawania. Szczególny nacisk położono na rozróżnienie między agresją adaptacyjną, będącą naturalnym elementem komunikacji zwierząt, a agresją patologiczną, wymagającą interwencji behawioralnej i weterynaryjnej. Praca omawia również narzędzia diagnostyczne, takie jak drabina agresji i współczynnik zagrożenia, które wspierają ocenę stopnia niebezpieczeństwa związanego z konkretnym przypadkiem. Wiedza w tym zakresie ma nie tylko znaczenie naukowe, ale przede wszystkim praktyczne – umożliwia bowiem wczesne reagowanie, minimalizację ryzyka pogryzień i poprawę relacji pomiędzy psem a człowiekiem.

2. Agresja u psów – charakterystyka, mechanizmy i komunikacja

Pojęcie agresji jest szerokie i trudne do jednoznacznego zdefiniowania. W literaturze przedmiotu można znaleźć wiele ujęć tego zjawiska. Jedna z definicji opisuje agresję jako „*akt realizowany przez żywą istotę w stosunku do innej żywej istoty, obejmujący zarówno działania intencjonalne, jak i przypadkowe*” [O’Heare, 2009, s. 66]. Choć definicja ta może wydawać się ogólna, w praktyce, przy użyciu przykładów, staje się zrozumiała. Przykładem zachowania agresywnego o charakterze zamierzonym będzie sytuacja, gdy pies warczy na innego osobnika, który zbliża się do jego miski z jedzeniem. Z kolei niezamierzoną formą agresji może być przypadkowe ugryzienie opiekuna podczas jego próby rozdzielania dwóch walczących psów. Agresję można również określić jako zachowanie mające na celu ochronę własnego komfortu – zarówno fizycznego, jak i emocjonalnego – nawet wówczas, gdy wiąże się to z ryzykiem bólu, strachu lub zranienia. Jest to reakcja adaptacyjna, służąca utrzymaniu integralności ciała i poczucia bezpieczeństwa, niezależnie od ewentualnych konsekwencji dla jednostki.

Kluczowym elementem w rozpoznawaniu zachowań agresywnych u psów, a także w odróżnianiu ich od innych form komunikacji, jest analiza mowy ciała. Psy wykorzystują bogaty repertuar sygnałów – zarówno werbalnych, jak i niewerbalnych – które bywają przez ludzi błędnie interpretowane lub całkowicie ignorowane. Podczas obserwacji zachowania psa należy zwrócić szczególną uwagę na pozycję, ruch i napięcie poszczególnych części ciała, takich jak plecy, głowa, ogon, uszy, mimika pyska czy spojrzenie [Horoszewicz i in., 2017].

W kontekście komunikacji psów wyróżnia się trzy podstawowe postawy ciała: wysoką, niską i ambiwalentną.

- Postawa wysoka charakteryzuje się utrzymywaniem kontaktu wzrokowego, uniesionymi i skierowanymi do przodu uszami, napiętym, lekko wysuniętym do przodu ciałem oraz uniesieniem wargi. Taka postawa sygnalizuje pewność siebie, dominację i gotowość do działania.
- Postawa niska natomiast wskazuje na niepewność lub strach. W jej obrębie obserwuje się m.in. unikanie kontaktu wzrokowego, opuszczony ogon, nisko pochyloną głowę, oblizywanie warg, ziewanie, skuloną sylwetkę, napięte ciało i spowolnione ruchy [Tami, Gallagher, 2009; Predmore, Quick, Ree, 2025].
- Postawa ambiwalentna łączy elementy pewności siebie (np. ciekawość) z objawami lęku lub niepokoju. Pojawia się zwykle w sytuacjach, gdy pies doświadcza sprzecznych emocji – np. w obecności innych psów, wobec których ma zarówno pozytywne, jak i negatywne nastawienie [Dehasse, 2006].

Postawom ciała towarzyszą sygnały komunikacyjne, które można podzielić na dwie główne grupy: afiliacyjne i agonistyczne.

- Sygnały afiliacyjne służą nawiązywaniu pozytywnej relacji i okazywaniu przyjaznych intencji. Ich celem jest redukcja dystansu z innym osobnikiem. Pies może wówczas przybierać luźną postawę ciała, wykonywać tzw. play bow (ukłon zapraszający do zabawy) czy stosować zachowania samoupośledzające, takie jak przewracanie się na grzbiet [Hsu, Sun, 2010].
- Sygnały agonistyczne natomiast są grożące lub uspakajające. Ich celem jest dążenie do zwiększenia dystansu wobec drugiego osobnika. Dzielą się na sygnały agresywne – np. napięcie mięśni, sztywne ciało, pokazanie zębów, warczenie, intensywne spojrzenie, wysoko uniesiony ogon [Walsh, 2024] – oraz sygnały uspokajające, takie jak oblizywanie nosa, ziewanie, odwracanie głowy czy wachanie trawy [O’Heare, 2009; Horoszewicz i in., 2017].

Jednym z narzędzi ułatwiających analizę zachowań agresywnych jest tzw. Drabina agresji (ang. *Canine Ladder of Aggression*), będąca modelem opisującym stopniową eskalację stresu i zachowań obronnych u psów. Schemat ten przedstawia kolejne etapy reakcji – od subtelnych sygnałów ostrzegawczych, poprzez wyraźne grożenie, aż po fizyczny atak. Jego głównym założeniem jest to, że agresja u psów nie pojawia się nagle, lecz rozwija się etapami, a zwierzęta zwykle wysyłają liczne, wczesne sygnały ostrzegawcze, które bywają przez ludzi niezauważane. Umiejętne rozpoznawanie tych sygnałów pozwala na zapobieganie eskalacji zachowania i minimalizowanie ryzyka konfliktu. Najniższe szczeble drabiny (wczesne oznaki stresu i prób unikania konfliktu) obejmują: odwracanie głowy i unikanie kontaktu wzrokowego, ziewanie i oblizywanie nosa, odwracanie ciała lub odchodzenie, podnoszenie łapy, zamieranie

w bezruchu oraz obniżenie postawy ciała, ogon między nogami. Średnie szczeble (czytelne sygnały ostrzegawcze) to: warczenie, pokazywanie zębów oraz sztywna, napięta postawa i intensywne wpatrywanie się. Najwyższe szczeble (zachowania agresywne): kłapanie zębami bez kontaktu oraz końcowo ugryzienie lub atak [Shepherd, 2009]. Model ten ma charakter orientacyjny – w rzeczywistości sekwencja sygnałów może się różnić w zależności od osobnika i sytuacji. Poszczególne zachowania mogą pojawiać się w innej kolejności, nakładać się na siebie lub zostać całkowicie pominięte.

Ogromną rolę w zapobieganiu eskalacji agresji odgrywa opiekun psa. Umiejętność prawidłowej interpretacji sygnałów wysyłanych przez zwierzę pozwala nie tylko zrozumieć jego aktualny stan emocjonalny, ale przede wszystkim zapobiec rozwinięciu się niepożądanego zachowania. Wielu właścicieli nieświadomie ignoruje subtelne sygnały ostrzegawcze, takie jak odwracanie głowy, oblizywanie nosa czy napięcie ciała, interpretując je błędnie jako „nieposłuszeństwo” lub „złośliwość”. W efekcie dochodzi do narastania stresu, a pies, nie mając innej możliwości komunikacji, przechodzi do bardziej wyraźnych form zachowania agresywnego. Świadomy opiekun, który potrafi rozpoznać wczesne sygnały stresu i w odpowiednim momencie przerwać sytuację konfliktową, może skutecznie zminimalizować ryzyko ugryzienia i budować relację opartą na zaufaniu. Właściwa obserwacja i reakcja człowieka mają zatem kluczowe znaczenie zarówno dla bezpieczeństwa otoczenia, jak i dla dobrostanu samego psa [O’Heare, 2009].

Warto również podkreślić, że każdy pies posiada wrodzoną zdolność do zachowań agresywnych, które są elementem naturalnego repertuaru gatunkowego. Agresja pełni funkcję komunikacyjną i adaptacyjną. Umożliwia wyrażanie emocji, obronę, a także utrzymanie równowagi w relacjach społecznych.

W literaturze wyróżnia się cztery fazy zachowania agresywnego [Dehasse, 2006]:

1. Faza początkowa – obejmuje zachowania sygnalizujące emocje i intencje, np. grożenie, onieśmianie przeciwnika, wyrażanie strachu czy frustracji.
2. Faza działania spełniającego (atak) – jest momentem kulminacyjnym, w którym pies realizuje swoje zamiary i redukuje napięcie emocjonalne.
3. Faza końcowa – następuje po zakończeniu konfrontacji. Obserwuje się stopniowy powrót do równowagi emocjonalnej.
4. Faza refrakcji – w tym etapie zachowanie agresywne nie występuje, a pies nie jest zdolny do natychmiastowego ponownego zaatakowania.

Jeżeli wszystkie fazy przebiegają w sposób uporządkowany i dostosowany do kontekstu, mówimy o zachowaniu adaptacyjnym, stanowiącym naturalny element komunikacji. Natomiast zachowania patologiczne pojawiają się wtedy, gdy pies nie potrafi powrócić do równowagi emocjonalnej, a jego reakcje są nieadekwatne do sytuacji. Takie przypadki wymagają analizy behawioralnej i często interwencji specjalisty.

3. Rodzaje agresji u psów

Zachowania agresywne u psów można klasyfikować według różnych kryteriów, w zależności od mechanizmów fizjologicznych, przyczyn środowiskowych czy kontekstu społecznego.

Z punktu widzenia procesów fizjologicznych wyróżnia się agresję afektywną, w której aktywowany zostaje układ współczulny i towarzyszą jej intensywne emocje (np. strach, złość),

oraz agresję nieafektywną, niezwiązaną bezpośrednio z emocjami, lecz będącą reakcją bardziej nawykową lub instrumentalną [O’Heare, 2009]. Natomiast ze względu na czynniki wywołujące zachowanie agresywne, można wyróżnić kilka najczęściej spotykanych typów agresji obserwowanych u psów domowych:

Agresja dominacyjna jest zjawiskiem naturalnym w psich społecznościach. W warunkach naturalnych pełni funkcję regulacyjną – umożliwia ustalenie hierarchii w grupie i sprzyja współpracy, na przykład podczas polowania. W środowisku domowym, w relacji człowiek–pies, zachowania o charakterze dominacyjnym mogą jednak prowadzić do problemów behawioralnych. Wyróżnia się dwa główne podtypy tej formy agresji: agresję ofensywną, która ma na celu przejęcie kontroli lub potwierdzenie swojej pozycji, oraz agresję defensywną, występującą w sytuacji, gdy pies odczuwa zagrożenie i dąży do jego oddalenia [Drews, 1993]. W przypadku agresji ofensywnej atak pojawia się zwykle wtedy, gdy druga strona nie wykazuje oznak uległości lub próby wycofania się. Agresja defensywna natomiast jest reakcją obronną – pies, czując się zagrożony, stara się odstraszyć przeciwnika, warcząc, cofając się lub w ostateczności gryząc.

Agresja wewnątrzgatunkowa dotyczy interakcji między przedstawicielami tego samego gatunku, a więc psów wobec psów. Często wynika z instynktu ustalania hierarchii i jest naturalnym elementem komunikacji społecznej. Z badań wynika, że występuje z podobną częstotliwością u obu płci [Fatjó, Amat, Mariotti, de la Torre, Manteca, 2007], choć samce częściej wykazują agresję wobec innych samców, a samice wobec samic [Cichoń, 2008]. Wykazano również, że wcześniejsze negatywne doświadczenia, np. pogryzienie przez innego psa, mogą zwiększać prawdopodobieństwo wystąpienia zachowań agresywnych w przyszłości [Schilder, van der Borg, Vinke, 2019].

Jednym z najczęściej obserwowanych typów agresji jest agresja lękowa, pojawiająca się, gdy pies czuje się zagrożony lub niepewnie w danej sytuacji. Zazwyczaj występuje w wyniku wcześniejszych traumatycznych doświadczeń, braku socjalizacji w młodym wieku lub nagłego zetknięcia z bodźcem, którego pies nie potrafi zinterpretować. Pies, który nie ma możliwości ucieczki, może zdecydować się na atak jako ostateczną formę obrony. Tego typu agresja jest szczególnie niebezpieczna – ugryzienia są często bardzo gwałtowne, a reakcje fizjologiczne (takie jak oddanie moczu czy zamarcie w bezruchu) trudne do kontrolowania [Cichoń, 2008; Horoszewicz i in., 2017].

Ból jest jednym z najsilniejszych czynników wyzwalających zachowania agresywne. Pies, który odczuwa ból, może reagować gwałtownie na próbę dotyku, podniesienia lub leczenia. Strach przed pogłębieniem dolegliwości prowadzi do reakcji obronnych – od warczenia i usztywnienia ciała po nagły atak [Cichoń, 2008]. Badania wskazują, że dysplazja stawu biodrowego oraz inne schorzenia ortopedyczne są istotnymi czynnikami ryzyka wystąpienia agresji bólowej, zwłaszcza u psów dużych ras [Camps, Amat, Mariotti, Le Brech, Manteca, 2012].

Agresja związana z obroną zasobów występuje, gdy pies broni przedmiotu lub przestrzeni, którą uznaje za swoją. „Zasobem” może być niemal wszystko – jedzenie, zabawka, legowisko, a nawet człowiek. Pies może reagować na próbę zabrania tych rzeczy poprzez warczenie, sztywne spojrzenie, pokazanie zębów, a w skrajnych przypadkach – ugryzienie. Takie zachowania często wynikają z poczucia niepewności i braku zaufania, a nie z chęci dominacji [Horoszewicz i in., 2017]. Niekiedy agresja zasobowa bywa związana z próbą

kontroli sytuacji lub obroną elementów środowiska, które pies uważa za ważne dla swojego bezpieczeństwa [Kokocińska-Alexandre, 2025].

Agresja macierzyńska to zachowania agresywne u suk w okresie okołoporodowym są związane ze zmianami hormonalnymi i instynktem ochrony potomstwa. Agresja ta ma zazwyczaj charakter przejściowy i maleje wraz z dorastaniem szczeniąt [Beaver, 1983]. Suka może reagować agresywnie wobec osób lub zwierząt zbliżających się do gniazda, szczeniąt czy nawet przedmiotów, które postrzega jako swoje potomstwo podczas ciąży urojonej [Mertens, 2012]. Ataki wobec obcych bywają gwałtowne, natomiast wobec znanych osób zwykle mają łagodniejszy przebieg [Horoszewicz i in., 2017].

Agresja łowiecka jest głęboko zakorzeniona w instynktach gatunkowych psa. Szczególnie widoczna jest u ras pierwotnych oraz psów, które mają silny popęd pogoni. W naturalnych warunkach zachowanie to służy zdobyciu pożywienia, rozładowaniu energii i zaspokojeniu potrzeb łowieckich. Klasyczna sekwencja zachowania łowieckiego obejmuje: lokalizację ofiary, obserwację, podkradanie się, pogoń, chwycenie, zagryzienie, rozszarpywanie i konsumpcję [Coppinger, Coppinger, 2001]. W środowisku domowym instynkt ten może być skierowany w stronę małych zwierząt domowych, ptaków, a nawet dzieci, które poruszają się szybko i chaotycznie. W tym rodzaju agresji nie występują typowe sygnały ostrzegawcze – pies jest w pełni skoncentrowany na „zdobyciu celu”, a jego zachowanie często motywowane jest pobudzeniem emocjonalnym i satysfakcją z pogoni [Iracka, 2009].

Agresja przekierowana występuje wtedy, gdy pies nie może zaatakować bezpośredniego źródła frustracji lub bodźca wywołującego napięcie, przez co kieruje agresję w stronę innego, dostępnego obiektu – może to być inny pies, człowiek lub przedmiot. Zachowanie to pojawia się w sytuacjach silnego pobudzenia emocjonalnego i stanowi poważne zagrożenie, gdyż jego kierunek jest trudny do przewidzenia [Dehasse, 2006].

Agresja idiopatyczna to forma, której nie można jednoznacznie przyporządkować do żadnej innej kategorii. Jej przyczyny są niejasne, choć badania wskazują, że może mieć związek z zaburzeniami neurologicznymi, hormonalnymi lub metabolicznymi – m.in. niedoczynnością tarczycy, chorobami wątroby czy układu nerwowego [Cichoń, 2008]. Charakteryzuje się nagłym, nieprzewidywalnym pojawieniem się agresji, bez wcześniejszych sygnałów ostrzegawczych, co czyni ją wyjątkowo niebezpieczną.

Oprócz klasyfikacji przyczynowej istnieje również podział oparty na kierunku i celu zachowania agresywnego. Według Duffy [2008] oraz Schroll i Dehasse [2019], wyróżnia się:

- agresję wobec ludzi – zarówno członków własnej grupy społecznej, jak i osób obcych,
- agresję wobec psów – wewnątrz tej samej grupy oraz poza nią,
- agresję wobec innych zwierząt,
- agresję wobec poruszających się obiektów.

Takie rozróżnienie pozwala dokładniej określić kontekst i motywację psa, a tym samym dobrać skuteczniejsze metody pracy behawioralnej i profilaktyki.

Rozpoznanie rodzaju agresji ma kluczowe znaczenie w procesie terapii behawioralnej psa. Dokładna diagnoza pozwala określić źródło problemu, dobrać odpowiednie metody pracy oraz uniknąć działań, które mogłyby nasilić niepożądane zachowania. Inaczej postępuje się bowiem z psem reagującym agresją ze strachu, a inaczej z tym, który wykazuje agresję związaną z bólem czy obroną zasobów. Zrozumienie motywacji stojących za zachowaniem psa

umożliwia opracowanie indywidualnego planu terapii, opartego na modyfikacji środowiska, pracy nad emocjami i nauce alternatywnych reakcji. Właściwa interpretacja rodzaju agresji jest zatem fundamentem skutecznej pomocy behawioralnej i poprawy relacji między psem a jego opiekunem.

4. Ocena oraz współczynnik zagrożenia

Ocena poziomu ryzyka związanego z zachowaniami agresywnymi u psów stanowi niezwykle istotny element zarówno w pracy behawiorystów, jak i w decyzjach dotyczących bezpieczeństwa ludzi oraz innych zwierząt. Pomocnym narzędziem w tym procesie jest współczynnik zagrożenia, który umożliwia ocenę stopnia niebezpieczeństwa, jakie może stwarzać konkretny pies. Wskaźnik ten opiera się na kilku kryteriach opisujących zarówno fizyczne możliwości psa, jak i kontekst jego zachowań [Schroll, Dehasse, 2019].

Pierwszym z nich jest masa ciała psa w stosunku do masy ciała potencjalnej ofiary (kryterium A). Psy, jako drapieżniki, posiadają znacznie szybsze reakcje i większą siłę niż człowiek – szacuje się, że ich refleks i zdolność do generowania siły są nawet czterokrotnie wyższe. Wartość A uzyskuje się poprzez podzielenie masy ciała psa przez masę ciała ofiary, co pozwala określić potencjalną przewagę fizyczną zwierzęcia w danej sytuacji.

Drugim parametrem jest kategoria ryzyka ofiary (kryterium B), która uwzględnia płeć, wiek oraz stan fizyczny człowieka narażonego na atak. Wyróżnia się następujące poziomy:

- 1 – dorośli mężczyźni,
- 2 – dorosłe kobiety, osoby lękliwe lub z lekką niepełnosprawnością,
- 3 – dzieci powyżej 6. roku życia oraz osoby z umiarkowaną niepełnosprawnością,
- 4 – dzieci w wieku od 3 do 6 lat oraz osoby ze znaczną niepełnosprawnością,
- 5 – dzieci poniżej 3. roku życia oraz osoby z głębokim upośledzeniem.

Kolejnym elementem jest rodzaj agresji (kryterium C), który określa motywację stojącą za zachowaniem psa. Wyróżnia się agresję defensywno-reaktywną (wartość 1) oraz ofensywno-proaktywną (wartość 2).

Czwarte kryterium, przewidywalność ataku (kryterium D), odnosi się do stopnia, w jakim można rozpoznać sygnały poprzedzające ugryzienie. Wartości przyjmują zakres od 1 (atak przewidywalny, poprzedzony wyraźnymi sygnałami ostrzegawczymi) do 3 (atak całkowicie nieprzewidywalny, bez widocznych oznak napięcia).

Intensywność ugryzienia (kryterium E) określa skalę siły i szkód spowodowanych przez psa, ocenianą w siedmiostopniowej skali, w której 1 oznacza złapanie pyskiem bez pozostawienia śladów, a 7 – ugryzienie o charakterze łowieckim, skutkujące rozszarpaniem tkanek miękkich.

Ostatnim elementem oceny jest liczba oraz charakter ugryzień (kryterium F):

- 1 – pojedyncze ugryzienie,
- 2 – pojedyncze, przytrzymane ugryzienie,
- 3 – wielokrotne ugryzienie,
- 4 – wielokrotne, przetrzymane ugryzienie.

Aby uzyskać wartość końcową, poszczególnym kryteriom przypisuje się wartości liczbowe, które następnie podstawia się do wzoru: $4 \times A + B + C + E + F = \text{współczynnik zagrożenia}$. Wynik poniżej 10 punktów świadczy o niskim ryzyku, wartości w zakresie 10–14

oznaczają średnie ryzyko, przedział 14–15,5 wskazuje na znaczne ryzyko, natomiast wynik powyżej 15,5 oznacza poważne lub potencjalnie śmiertelne zagrożenie.

W zależności od uzyskanego poziomu ryzyka, zalecane postępowanie może się znacząco różnić. W przypadkach niskiego lub umiarkowanego ryzyka stosuje się modyfikację zachowania, kontrolę środowiska oraz trening pod okiem specjalisty. W sytuacjach wysokiego zagrożenia niezbędna jest ścisła współpraca z behawiorystą, lekarzem weterynarii oraz wprowadzenie rygorystycznych środków bezpieczeństwa. Niestety, w przypadkach skrajnych – gdy agresja jest nieprzewidywalna, a pies stanowi realne zagrożenie życia – ostatecznym rozwiązaniem może być decyzja o eutanazji, podejmowana po dokładnej ocenie przez specjalistów.

5. Podsumowanie

Agresja u psów jest zjawiskiem wielowymiarowym i nie zawsze stanowi przejaw patologii. W wielu przypadkach pełni funkcję komunikacyjną, pozwalając zwierzęciu chronić swoje granice, zasoby lub bezpieczeństwo. Dopiero zaburzenia w przebiegu faz zachowania agresywnego, brak zdolności do samoregulacji emocjonalnej czy nieadekwatność reakcji wobec bodźca świadczą o patologii wymagającej terapii. Kluczowym elementem profilaktyki i pracy z psem przejawiającym agresję pozostaje właściwa interpretacja sygnałów wysyłanych przez zwierzę oraz zrozumienie przyczyn jego zachowania. Świadomy opiekun oraz dobrze przygotowany specjalista behawioralny mogą wspólnie zapobiegać eskalacji problemów i ograniczać ryzyko sytuacji niebezpiecznych. Właściwe rozpoznanie rodzaju agresji oraz oszacowanie współczynnika zagrożenia umożliwiają podjęcie odpowiednich działań terapeutycznych i środowiskowych. W efekcie przyczyniają się one nie tylko do poprawy dobrostanu psa, ale również do zwiększenia bezpieczeństwa społecznego.

Bibliografia:

1. Beaver B. V. (1983). Clinical classification of canine aggression, *App. Anim. Eth.*, 10(1-2), 35-43.
2. Camps T., Amat M., Mariotti V. M., Le Brech S., Manteca X. (2012). Pain-related aggression in dogs: 12 clinical cases. *J. of Vet. Beh.*, 7(2), 99-102.
3. Cichoń R. (2008). Agresywne zachowania psów. Wybrane elementy diagnostyki i terapii. *Wet. Prakt.* 2, 88-89.
4. Coppinger R., Coppinger L. (2001). *Dogs-A Startling New Understanding of Canine Origin, Behavior & Evolution*. Scribner, New York.
5. Dehasse J. (2006). Agresja u psów. Galaktyka, Łódź.
6. Drews C. (1993). The concept and definition of dominance in animals behaviour. *Behaviour* 125, 283–313.
7. Duffy D. L., Hsu Y., Serpell J. A. (2008). Breed differences in canine aggression. *App. Anim. Beh. Sci.* 114, 441–460.
8. Fatjo J., Amat M., Mariotti V. M., de la Torre J. L. R., Manteca X. (2007). Analysis of 1040 cases of canine aggression in a referral practice in Spain. *J. of Vet. Beh.*, 2(5), 158-165.
9. Horoszewicz E., Galas J., Smolnik K., Niedziółka R., Sweeklej E., Piwowarczyk P. (2017). Dogs' Aggressive Behaviors. Part II. Body postures, sequence of actions. *Folia Pomeranae*

- Universitatis Technologiae Stetinensis Agricultura Alimentaria Piscaria et Zootechnica, 334(42).
10. Hsu Y., Sun L. (2010). Factors associated with aggressive responses in pet dogs. *App. Anim. Beh. Sci.*, 123, 108–123.
 11. Iracka J. (2009). Agresja łowcza. *Mój Pies* 6, 68.
 12. Kokocińska-Alexandre A., <https://ethoplanet.com/blog/obrona-zasobow-problem-czy-norma/>, (Obrona zasobów – problem czy norma?, 01.11.2025).
 13. Landsberg G. M. (1990). Diagnosing dominance aggression. *Can Vet J.*, 31(1), 45-6.
 14. Mertens, A. P. (2012). Cap. 20: agresividad canina. *Manual de comportamiento en pequeños animales*. España: Ediciones S, 313-346.
 15. O’Heare J. (2009). Zachowania agresywne u psów. Analiza przypadków, zapobieganie i terapia behawioralna. Łódź. Galaktyka.
 16. Predmore M., Quick H., Ree J., https://www.vetmed.ucdavis.edu/sites/g/files/dgvnsk491/files/inline-files/The_Truth_About_Aggression_Dominance_dogs.pdf, (The Truth about Aggression and Dominance in Dogs, 20.10.2025).
 17. Sacks J. J., Kresnow M., Houston B. (1996). Dog bites: how big a problem? *Inj. Prev.*, 2(1), 52-4.
 18. Schilder M. B. H., van der Borg J. A. M., Vinke C. M. (2019). Intraspecific killing in dogs: Predation behavior or aggression? A study of aggressors, victims, possible causes, and motivations. *J. of Vet. Beh.*, 34, 52-59.
 19. Schroll S., Dehasse J. (2019). Zaburzenia zachowania psów. Wrocław: Edra Urban & Partner.
 20. Shepherd K. (2009). Ladder of aggression. In: Horwitz D, Mills DS. *BSAVA Manual of Canine and Feline Behavioural Medicine*, 2nd ed.
 21. Tami G., Gallagher A. (2009). Description of the behaviour of domestic dog (*Canis familiaris*) by experienced and inexperienced people. *App. Anim. Beh. Sci.*, 120(3-4), 159-169.
 22. Walsh S. (2024). Aggressive Behaviour in Dogs. *Veterinary Ireland Journal*, 14(4), 224–228.

13. HEALTH-PROMOTING QUALITIES OF MARE'S MILK

Daniel Wysokiński, Agata Danielewicz

Uniwersytet w Siedlcach

Instytut Zootechniki i Rybactwa

Studenckie Koło Naukowe Sympatyków Zwierząt

ul. Bolesława Prusa 14, 08-110 Siedlce

E-mail: dw86287@stud.uws.edu.pl

1. Admission

Horses are domesticated animals that, together with humans, form the process of civilization. The basis for the domestication of a horse is mainly its work-generating properties (e.g. working in a sled, under the saddle) and mental qualities such as training or submission to the will of man.

Mare's milk is a product resembling women's milk in its composition and properties. In Mongolia, it is considered an easily digestible and medicinal food (kumys). It is also used for the production of various types of cosmetics. "Mare's milk as a food product was forgotten in Europe for many years, although until the end of the fifties of the twentieth century it was used as a means of supporting the treatment of digestive and respiratory diseases and migraines. In hospitals in Paris, Liburn, Le Mans, Berlin, London, in children's wards, prophylactic mare milk was given to newborns, especially premature babies. Until the end of the nineteenth century, mare's milk was used as a product to replace breast milk" (Danków R., et al. 2012).

The mare's milk drink has many medicinal properties. The lactic acid contained in it helps with fever and improves digestion. Kumys is suitable for the treatment of tuberculosis, and it can also be used for diabetes or leukemia. It also has a good effect on diseases of the digestive tract, anemia and nervousness. (<http://bonavita.pl/>)

2. Colostrum and lactation of mares

Colostrum is the first secretion of the mammary gland produced in a very short period after birth by female mammals. It is rich in nutrients necessary for proper growth and development. Its volume is from 1.5 to 2 liters. Colostrum is a very good source of immunoglobulins. (Mirowski A., Didkowska A. 2014)

The mare's mammary gland is composed of two halves. Each of them is in the shape of cones, which are separated from each other by an interglandular longitudinal furrow. Both halves consist of a nipple and a nipple. On one teat there are two, three, or even four tubes that drain milk. All ducts lead to a short milk sinus, where milk is supplied from a set of milk ducts. Colostrum and then mare's milk are excreted by epithelial cells, which are arranged in vesicles leading to small conductors otherwise known as lobes. Lobes are surrounded by myoepithelial cells, which are responsible for secreting milk. There are five known ways of secretion of substances by the epithelium of the mammary gland, which pass from the mother's blood to colostrum or milk. These are four transcellular pathways and one intercellular pathway. (Włodarczyk-Szydlowska A., Gniazdowski A., Gniazdowski M., Nowacki W. 2005)

The chemical composition of colostrum, taken immediately after childbirth:

- dry matter 25.6%,
- protein 16.4%,
- fat 2.9%,
- ash 0.59%.

(Mirowski A., Didkowska A. 2015)

Colostrum is a better source of vitamins compared to milk. It contains 1.4-2.6 times more vitamins A, D, K and C. In addition, the amount of minerals in colostrum is greater than in milk. It has less iron, manganate and calcium in its composition. In addition, it has hormones and cytokines, as well as growth factors and enzymes that can affect the body. (Mirowski A., Didkowska A. 2014)

Lactation is the period of milk secretion by the mammary glands of female mammals after childbirth. Depending on the breed species and type, its length varies. In mares, it occurs from 180 to 210 days. (<https://pl.wikipedia.org/>)

In the first two months after giving birth, the mare produces a high amount of milk up to 3% of her body weight. Over a period of 5-6 months, the mare is capable of producing 1200-3000 kg of milk. After this time, its nutritional value decreases. Milk is the first and necessary food in the life of foals. It is the main source of nutrients needed for proper development. (Wierzbowski S. et al. 1998)



Photo 1. Strzyki klaczy. (<http://re-volta.pl/>)

3. Milk - general information

Milk is a liquid secretion of the mammary gland of mammals. It is a complex substance. Milk contains about 250 ingredients. The most important and basic useful ingredients of raw milk are high-quality protein, easily digestible and easily digestible fat, lactose, minerals calcium and phosphorus, fat-soluble vitamins A, D, E, K, as well as biologically active substances. Its chemical composition is the action of many factors, such as racial, individual, physiological, nutritional and health factors. Milk is also a multi-component mixture. Each of its components has the right weight parameters, physical and chemical properties. (Jurczak, E. M., 1999)

Skład chemiczny mleka:

- Water 87.6%
- dry matter 12.4%,
- fat-free dry matter 8.5%,
- lactose 4.8%,
- fat 3.61%,
- total protein 3.25%,
 - including:
 - casein 2,51%,
 - albumins and globulins 0,7%,
- ash 0,76%.

(Jurczak E. M. 1999)

Milk is rich in calcium. It provides the human body with protein, which is the main building block of cells and tissues, and carbohydrates, which give the body a lot of energy. The most important protein in milk is casein, and the carbohydrate is lactose, which is responsible for the sweet taste and affects the caloric value. It also contains fat-soluble vitamins and water-soluble vitamins necessary for the human body. These are mainly B vitamins and PP, C, folic acid, pantothenic acid and others. Milk fat is taken from blood plasma and synthesized by the glandular tissue of the udder. Raw milk is white with no visible impurities, and the smell is fresh and natural. (Jurczak, E. M., 1999)

4. Mare's milk

Mare's milk is a natural low-fat product, with a high content of antibacterial lysozyme, which has a good effect on human health. This milk is transparent, with a distinctly sweet taste. Its smell is reminiscent of hay and gives a hay-coconut aftertaste. (<http://bonavita.pl/mleko-klaczy-wartosc-odzywcza-wlasciwosci-i-zastosowanie>). It contains enzymes such as diastase, oxidase, catalase, lipase and phosphatase. It also contains vitamins A, C, E and B vitamins (B1, B2, B12). This milk is a good source of albumin and globulin and essential amino acids such as tryptophan, lysine and methionine. The casein content is less than 50%, which is why it is considered albumin-type milk and contains few substances that can be allergens. In addition, mare's milk does not undergo the shear process and is a valuable food product. (<http://biokurier.pl/aktualnosci/2780-o-zaletach-kobylego-mleka>)

Mare's milk has a high content of lactose, i.e. milk sugar. This sugar allows you to increase the absorption of calcium in the intestines. The high level of lactose is responsible for the characteristics of the raw material, which is suitable for processing towards obtaining fermented beverages, e.g. kumys. (<http://bonavita.pl/mleko-klaczy-wartosc-odzywcza-wlasciwosci-i-zastosowanie>)

Milk from mares resembles breast milk in its composition and properties, and can also be a good substitute in the diet of infants. Both of these milks produce a delicate sediment called precipitate during digestion, which is very well absorbed by humans and infants. The whey proteins contained in mare's milk are 40%, while in breast milk 50%. Their large amount and essential amino acids make mare's milk a more beneficial source of nutrients for humans. There is a low fat content in milk. The fat comes in the form of balls that are difficult to combine with

each other and this makes it impossible to collect the cream from the mare's milk. These balls consist of several layers. From the inner layer - protein, middle - phospholipid and outer layer - large-molecule glycoproteins. Horse milk is a valuable source of monounsaturated and polyunsaturated fatty acids, and they make up 44% of fat. In addition, there are unsaturated fatty acids in the form of linolenic acid, α -linolenic acid. The fat fraction is characterized by a favorable ratio of linoleic acid from the n-6 family and α -linolenic acid from the n-3 family, which are necessary for the proper growth and development of the human nervous system. (Danków R. et al., 2012)

Charakterystyczna dla mleka kobyłego jest wysoka jakość mikrobiologiczna czyli niski poziom komórek somatycznych oraz bakterii. Ich całkowita ilość w świeżym mleku przypomina ilość bakterii w pasteryzowanym mleku krowim. Możliwe jest, że taki stan wynika z małej liczby sutków i niedużych wymion klaczy. (<http://bonavita.pl/mleko-klaczy-wartosc-odzywcza-wlasciwosci-i-zastosowanie>)

Ogólny skład mleka klaczy:

- woda 89%,
- sucha masa 10,91%,
- tłuszcz 1,21%,
- białko ogólne 2,14%,
- białka serwatkowe 0,83%,
- kazeina 1,07%,
- laktoza 6,37%,
- składniki mineralne 0,42%,
- popiół 0,42%. (Danków R. i wsp. 2012)

Czynniki wpływające na skład mleka:

- żywienie,
- stan zdrowia,
- wiek,
- liczba odchowanych źrebiąt,
- pora roku. (Mirowski A., Didkowska A. 2015)

Dojenie klaczy nie należy do prostych czynności. Każda klacz posiada czynnik ograniczający wymienia co powoduje konieczność doju kilka razy w ciągu dnia w 2-3 godzinnych odstępach. Aby klacz wydelała mleko konieczna jest obecność źrebięcia w pobliżu matki. Zdarzają się przypadki, w których należy dopuścić źrebię do ssania by wymię klaczy zaczęło dawać mleko. (źródło: <http://bonavita.pl/mleko-klaczy-wartosc-odzywcza-wlasciwosci-i-zastosowanie>)

Świeżo udojone mleko jest bardzo nietrwałe i bezpośrednio schładzane. Po czym jest ono umieszczane w szklanych oraz plastikowych opakowaniach. Następnie mleko ulega procesowi zamrażania, co zapobiega przed rozkładem substancji odżywczych. W postaci zamrożonej można przechowywać je przez okres 6 miesięcy i w taki sposób jest sprzedawane konsumentom. (<http://www.pkik24.pl/zdrowie/kobyle-mleko-eliksir-mlodosci-i-zdrowia>; Danków R. i wsp. 2012)



Photo 2. Mare's milk is available in 250 ml bottles (photo <http://hodowla-koni.pl/>)

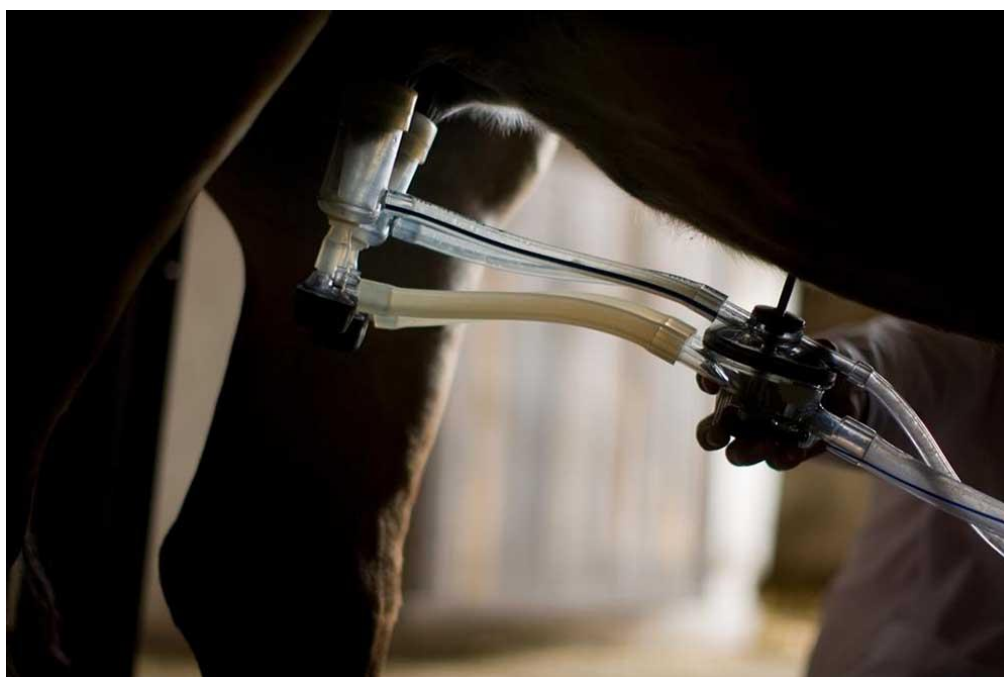


Photo 3. Mechanical milking of mares. (photo <http://hodowla-koni.pl/>)

5. Comparison of mare's milk with that of other mammals

Table 1. Comparison of mare's milk with that of other mammals

Ingredient	Mare	Cow	Goat	Sheep	Woman	Donkey
Sucha masa	10,91%	12,4%	12,93%	19,30%	12,5%	8,86%
Tłuszcz	1,21%	3,61%	4,14%	7%	3,64%	0,3%
Białko ogółem	2,14%	3,25%	3,56%	5,98%	1,42%	1,9%
Białka serwatkowe	0,83%	0,57%	0,4%	0,5%	0,76%	0,49%
Kazeina	1,07%	2,51%	2,6%	4,6%	0,37%	0,53%
Laktoza	6,37%	4,8%	4,1%	4,8%	6,71%	7,14%
Popiół	0,42%	0,76%	0,8%	1,0%	0,22%	0,34%
Woda	89%	87,6%	88,5%	84,6%	87,9%	90%
Lizozym	6,59%	Śladowe ilości			1,66%	1,43%
Składniki mineralne	0,42%	0,76%	0,7%	1%	0,22%	

The table above shows the chemical composition of milk obtained from various representatives of mammals. Summarizing the table, it can be noted that the horse has the lowest dry matter content of 10.91%. The percentage of fat in mare's milk is several times lower than the others. Sheep's milk has the most total protein (5.98%). The amount of lactose in horse's milk is compared with breast milk and donkey's milk. In addition, the level of casein in mares differs twice from cow's milk. A lot of antibacterial lysozyme is found in mare's milk and is 6.59% of it compared to others. The calorie content of cow's milk and human milk is very similar. It is about 680kcal and is at least 200 kcal higher than horse's milk. (Danków R., et al. 2012)

6. Application and properties of mare's milk

Mare's milk has found its use in the kitchen, in cosmetics and in various diseases. It is suitable for direct consumption after milking, mainly due to its sweet taste. In addition, they can be used for dishes that are based on milk. This milk is also a good factor in cosmetics. (<http://biokurier.pl/aktualnosci/2780-o-zaletach-kobylego-mleka>)

Mare's milk has many valuable advantages. It has a positive effect on the immune system of the human body, the digestive and circulatory systems, as well as other diseases. (<http://kobieta.dziennik.pl/piekna-i-zdrowa/artykuly/491990,mleko-klaczy-mleko-kobyle.html>). It is rich in ingredients that have a positive effect on skin care and protect cells from oxidative stress. The polyunsaturated fatty acids contained in the composition of milk protect the skin from water loss and normalize its metabolism. In addition, this milk contains anti-inflammatory factors that have a significant impact on diseases such as psoriasis and atopic dermatitis, as they reach the deeper layers of the skin. In addition, milk accelerates the aging process of wounds and protects the skin from bacteria or viruses. It has a beneficial effect on

the treatment of osteoporosis. When used in people with diabetes, it helps reduce the dose of insulin. Mare's milk supports the treatment of gastric and pancreatic ulcers and cholecystitis.

In addition, it is used in the treatment of migraine, relieves its attacks and extends the time between them. Lysozyme has a positive effect in cancer patients, it causes necrosis of cancer cells. The valuable properties of milk are useful in antibiotic treatment, facilitate detoxification of the body and help during recovery after chemotherapy. Due to the high content of EFAs, which are not produced in the body and are an important component of infant dairy products, it is used in pediatrics. Mare's milk improves the functioning of the heart muscle, improves circulation in the limbs. It contains over 40 bioactive ingredients, thanks to which it has a multidirectional effect on the human body. (Danków R. et al. 2012; <http://biokurier.pl/aktualnosci/2780-o-zaletach-kobylego-mleka>)

Diseases that are positively affected by mare's milk:

Allergies

atopic dermatitis - AD,

psoriasis

atherosclerosis,

depression and neurotic disorders,

respiratory infections,

diseases and immune deficiencies,

in convalescence after serious illnesses, strong medications and surgeries,

diseases of the digestive system,

rheumatic diseases. (<http://biokurier.pl/aktualnosci/2780-o-zaletach-kobylego-mleka>)

In addition, MMF and MMF forte concentrates with collagen and calcium are made from milk. They are used to treat diseases such as tonsillitis, flu, inflammation of the respiratory or urinary tract. (Danków R. et al., 2012)



Photo 4. Mare's milk powder; price 235 PLN. (<http://www.kobmed.pl>)

7. Koumiss

Kumys, also called milk wine, is a drink made from mare's milk obtained from lactic and alcoholic fermentation. Fermentation is a symbiotic process that depends on different types of microorganisms and their effects. The main microbes of kumys are lactic acid bacteria and yeast. Its color is milky white with a bluish tint. The taste of kumys is slightly sour, with a characteristically noticeable yeast aftertaste. The smell is aromatic, pleasant and slightly sour, while the texture is fine-grained. It is a drink with very high nutritional value and beneficial dietary and health properties. It contains ethanol (2-3%), lactic acid (0.5-1.5%), lactose (2-3%), fat (approx. 2%), protein (approx. 1%), salt and carbonic acid (approx. 3%). Kumys is a good source of B vitamins (B1, B2, B12) and PP, D, E and C. It also contains antibiotics, enzymes and trace elements. (Danków R. et al., 2013)

From the density of lactic acid, the following types of kumys can be distinguished:
strong - strong, pH 3.6-3.3,
medium, pH 4.5-3.9,
light - weak, pH 5.0-4.5. (Danków R. et al., 2013)

During the ripening of kumys, its consistency becomes thinner and gas bubbles appear. The taste, on the other hand, is more sour. After production, a deposit in the shape of small flakes appears on the walls of the vessel, which over time transforms into a transparent, thin coating. A milk drink is a durable product that can be stored in the refrigerator for up to 6 weeks, after which its taste becomes tart. (Danków R. et al., 2013)

Ripening time of kumys: Day, two-day, three-day

Kumys is a popular drink in Mongolia, Bashkiria, and Kazakhstan. It can also be found in China, as well as in the regions of Russia and Ukraine, currently in Crimea. Its production takes place in spring and summer. Traditional milking begins in May. Each mare is milked by hand when the foal is able to digest foods other than breast milk. Before milking begins, the foals are close to the mares. Their presence is the cause of the reflex of milk secretion. After milking, the milk is poured into professional bags, made of animal skin, which are turned inward. Then sourdough is poured into the bags in the form of a dried powder. Half of the kumys remains unmoved until the upper fraction, i.e. the transparent fraction, and the lower fraction, which is a delicate clot, are formed. The resulting clot is poured onto cheesecloth and then dried in the sun. After drying, the powder is sealed in a container and hidden in a cool place. Another way is to add liquid sourdough, after which the milk undergoes a fermentation process in two or even three days, during which it must be vigorously stirred with a special cuttlefish (buluur). To make kumys good, you need to stir it 600 times. After this time, lumps of butter should appear on the drink, which must be taken away to create a clean kumys. The resulting kumys is similar to milk diluted with water. Its taste is sour and pungent, which can change depending on the composition of the pastures where the mares were staying. The drink cannot be fermented for a long time, as it becomes bitter in taste. (Danków R. et al., 2013)



Photo 5. Kumys. (fot. <http://foodandhealth.ru>)

In Crimea, modern production of kumys is used. It falls from May to November. Just like in the traditional system, mares are milked by hand. At the beginning of milking, a foal is allowed to enter the mare. When the reflex of milk suppression occurs, the foal is immediately taken away from the mare. During milking, 1 litre of milk is obtained, which is poured through the powązka into the tank and cooled. The product takes place in the dairy in designated tanks with a capacity of 300 liters. Fermentation lasts 24 hours at 25oC. Kumys is poured into plastic bottles and then cooled to a temperature of 4oC.

The milk for the production of kumys must come from healthy mares. It cannot be pasteurized and free of foreign odors. Its acidity cannot be more than 7o Turner and its density is 1.029 to 1.033 g/cm³. Milk must also not contain antibiotics, mycotoxins, pesticides, which affect the poor hygienic quality of mare's milk. (Danków R. et al., 2013)

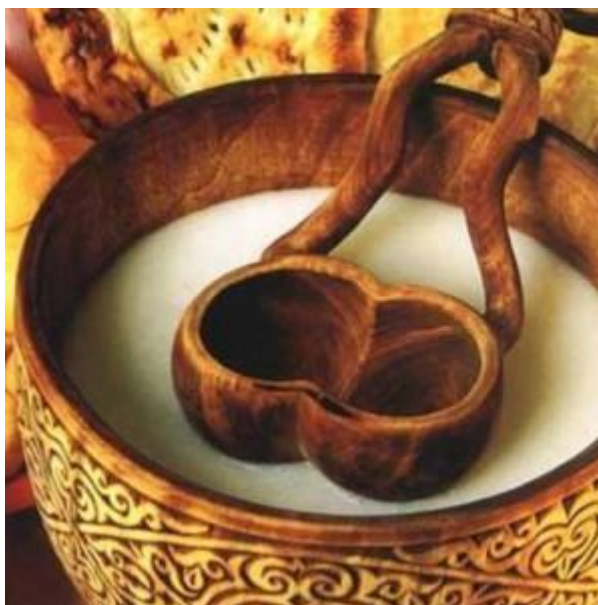


Photo 5. Kumys in a barrel with a wooden cuttlefish (buluur). (photo <http://foodandhealth.ru>)

The mare's milk drink has many medicinal properties. The lactic acid contained in it helps with fever and improves digestion. Carbonic acid, on the other hand, has a good effect on heart function. Kumys is suitable for the treatment of tuberculosis, and it can also be used for diabetes or leukemia. It also has a good effect on diseases of the digestive tract, anemia and nervousness. (<http://bonavita.pl/>).

Bibliography:

1. Danków R., Pikul J., Osten-Sacken N., Teichert J., (2012): "Characteristics and health-promoting properties of mare's milk". Science Nature Technologies, Vol. 6, Issue 2 (2012) 1-12.
2. Danków R., Pikul J., Teichert J., Osten-Sacken N., (2013): "Characteristics and properties of kumys". Science Nature Technologies, Vol. 7, Issue 3 1-15.
3. Haller M., (1997): "Horse breeds". MULTICO Publishing House in Warsaw.
4. Jurczak E. M., (1999): "Milk production, testing, processing". Warsaw University of Life Sciences Publishing House.
5. Kaproń M., (1999): "Methods of Horse Improvement". Publishing House of the University of Agriculture in Lublin.
6. Mirowski A., Didkowska A., (2014): " Colostrum and mare's milk. Part I. Colostrum - chemical composition and importance in foal nutrition". Veterinary Life, 89 (12), 1007-1009.
7. Mirowski A., Didkowska A., (2015): " Colostrum and mare's milk. Part II. Milk - chemical composition and importance in foal nutrition". Veterinary Life, 90(1), 38-40.
8. Szydłowska - Włodarczyk A., Gniazdowski A., Gniazdowski M., Nowacki W., (2005): "Mare lactation and foal behavior". Veterinary Life, 80 (9), 548-551.
9. Wierzbowski S., Kosiniak-Kamysz K., (1998): "Directed reproduction of horses". DRUKROL Publishing House in Krakow.

Websites

10. <https://pl.wikipedia.org/>
11. <http://naszekonie.pl/budowa-ciala-konia/>
12. <http://dinoanimals.pl/zwierzeta/osiol-equus-africanus-equus-asinus/>
13. <https://pl.wikipedia.org/>
14. <http://bonavita.pl/mleko-klaczy-wartosc-odzywcza-wlasciwosci-i-zastosowanie/>
15. <http://biokurier.pl/aktualnosci/2780-o-zaletach-kobylego-mleka/>
16. <http://www.pkik24.pl/zdrowie/kobyle-mleko-eliksir-mlodosci-i-zdrowia/>
17. <http://www.sklep.bewell.com.pl/krem-z-mleka-klaczy/206-k.html/>

14. TERAPIA Z UDZIAŁEM KONI (HIPOTERAPIA). PRZYGOTOWANIE KONIA

Adrianna Zecer, Zofia Rudnicka, Agata Danielewicz

Uniwersytet w Siedlcach

Instytut Zootechniki i Rybactwa

Studenckie Koło Naukowe Sympatyków Zwierząt

ul. Konarskiego 2, 08-110 Siedlce

E-mail: az88095@stud.uws.edu.pl

Abstrakt: Konie odgrywają kluczową rolę w życiu ludzi. Początkowo były wykorzystywane jako środek transportu oraz brały udział w pracach polowych. Obecnie pracują głównie w rekreacji i sporcie. Coraz częściej można zobaczyć je jako zwierzęta terapeutyczne. Terapia z udziałem koni (hipoterapia) to proces terapeutyczny opierający się na działaniach mających na celu poprawę lub przywrócenie zdrowia pacjenta. Dobór odpowiedniego konia i sprzętu do osoby biorącej udział w terapii ma bardzo duży wpływ na jej powodzenie. Zwierzę wykorzystywane do takiej pracy powinno być w odpowiedni sposób przygotowywane do niecodziennych sytuacji, które mogą mieć miejsce podczas zajęć. Koń dobierany do zajęć terapeutycznych powinien przejść próbę wystandaryzowanej oceny przydatności do zajęć hipoterapeutycznych - Hipptest. Umożliwi to zapewnienie maksimum bezpieczeństwa zarówno zwierzęciu jak i pacjentowi.

Słowa kluczowe: hipoterapia, dobór zwierząt, koń, dobrostan

1. Wstęp

Konie w środowisku naturalnym poruszają się po dużych obszarach. Przyczyną tego jest potrzeba zdobywania pokarmu. Nieparzystokopytne są zwierzętami płochliwymi. Jako zwierzęta roślinożerne, w łańcuchu pokarmowym pełnią rolę ofiary, a nie drapieżnika. Nie są agresywne. Poczucie bezpieczeństwa i możliwość przetrwania w trudnym środowisku zapewnia im instynkt stadny, ponieważ jest to gatunek mocno socjalny, głównie żyjący w grupach. [Kamieniak i in., 2010; Janicka i in., 2022; Kania-Gierdziewicz i in., 2024]

Relacje między końmi a ludźmi bardzo zmieniły się na przestrzeni wieków. W prehistorii ludzie polowali na te zwierzęta w celu zdobycia pożywienia. Wykorzystanie koni między innymi w transporcie było możliwe dopiero po dokładnym poznaniu ich zachowań. Znaczący wpływ na rozwój cywilizacji miało zwiększenie mobilności ludzi, dzięki jeździe na grzbiecie konia. Przez kolejne wieki nieparzystokopytne odgrywały znaczącą rolę podczas konfliktów militarnych. Zaczynając od funkcji zwierząt pociągowych, a ostatecznie jako wierzchowce bojowe. Obecnie pracują głównie w sporcie i rekreacji, a także w hobbystycznych hodowlach i hipoterapii. Posiadanie konia może być również wyznacznikiem sytuacji finansowej. [Leopold, 1965; Łojek i in., 2015; Stefaniuk, 2013]

Konie mają naturalnie inne potrzeby socjalne, dzięki czemu nie szukają konfliktów. Aby mogły być wykorzystywane w różnych dziedzinach, ludzie muszą je przyzwyczaić do wielu bodźców. W innym wypadku mogą reagować paniką w nowych sytuacjach oraz ich zachowanie

może być mało przewidywalne. Współczesne nieparzystokopytne powinny odznaczać się zainteresowaniem nowymi, niespotykanymi wcześniej bodźcami oraz chęcią współpracy z człowiekiem. [Graf i in., 2013; Chapman i in., 2020; Olczak i in., 2022]

Zachowania niepożądane pojawiające się u tych zwierząt mogą być niebezpieczne dla człowieka. Mają one różne przyczyny. Mogą wynikać przede wszystkim ze strachu, bólu lub choroby, nudy czy braku towarzystwa innych osobników swojego gatunku. Jednak najczęstszą przyczyną jest brak zrozumienia i zaspokojenia naturalnych potrzeb koni. Z reguły nieparzystokopytne utrzymywane przez ludzi przebywają większość czasu na tym samym, dobrze im znanym terenie. Z tego powodu do ich życia wkrada się rutyna i nuda, a to skutkuje różnego rodzaju zaburzeniami behawioralnymi. [Kania-Gierdziewicz i in., 2024; Krupa i in., 2022]

2. Materiał i metody

Materiałem poniższej pracy była literatura o tematyce hipoterapeutycznej oraz procesów uczenia się i szkolenia koni. Przeanalizowano między innymi Hipptest, czyli wystandaryzowaną ocenę przydatności konia do zajęć hipoterapeutycznych. Brano po uwagę publikacje Łukasza Dziarmagi oraz Michała Pluty. Omówiono również badania, wpisy i artykuły innych autorów, które zostały wymienione w bibliografii. Celem niniejszej pracy było omówienie sposobów szkolenia konia do pracy w hipoterapii, dobór odpowiedniego osobnika oraz sprzętu używanego podczas zajęć.

3. Hipoterapia - co to takiego?

Już w starożytności zauważono dobroczynny wpływ jazdy konnej, a nawet samej obecności konia na człowieka. Głównie obserwowano oddziaływanie na motorykę człowieka oraz jego psychikę. Przez kolejne stulecia odkrywano, że koń może być nie tylko źródłem rozrywki, obiektem wzruszeń, czy siłą pociągową do pracy, ale także wspaniałym terapeutą. Praktyczne i teoretyczne początki hipoterapii na świecie miały miejsce po drugiej wojnie światowej. W Polsce początek rehabilitacji na koniu datuje się na lata osiemdziesiąte. [Wyżnikiewicz-Nawracała, 2002; Pluta, 2017; Purandare i in., 2017]

Kontakt ze zwierzęciem uczy okazywania emocji i bliskości, a także uspokaja oraz relaksuje pacjenta. Takie zajęcia mają korzystny wpływ na organizm człowieka w sferze psychicznej, intelektualnej, społecznej i fizycznej. Zooterapia to forma zajęć terapeutycznych prowadzonych w towarzystwie zwierząt. Oddziałuje na różne sfery życia oraz łączy funkcję: edukacyjną, społeczną, fizyczną, psychiczną i motywacyjną. Do rodzajów animaloterapii zalicza się między innymi: dogoterapię/kynoterapię (terapia z udziałem psów), felinoterapię (terapia z udziałem kotów), hipoterapię (terapia z udziałem koni) czy lagoterapię (terapia z udziałem królików). Hipoterapia jest jedną z najpopularniejszych terapii z wykorzystaniem zwierząt. Przyczyną tego jest fakt, że ta terapia ma największy zasięg ze względu na różnorodność pacjentów biorących w niej udział. [Maj-Golianek, 2017; Pluta, 2017;]

Terapia z udziałem koni, terapia jazdą konną to forma zajęć oddziałujących na stymulację ruchową, czuciową i psychologiczną. Pomaga w zdobywaniu dużej motywacji i zwiększa chęci do pracy oraz potęguje poczucie własnej wartości. Stymulacja i normalizacja czucia powierzchniowego, zwiększenie poczucia własnej wartości, rozwijanie pozytywnych kontaktów społecznych, zmniejszenie problemów emocjonalnych oraz kodowanie w mózgu,

prawidłowego wzorca ruchu podczas chodu, usprawnianie napięcia mięśniowego, poprawa równowagi i koordynacji są najważniejszymi celami oddziaływania hipoterapeutycznego. Jednak należy pamiętać, że hipoterapia jest uzupełnieniem typowej rehabilitacji, a nie jej zamiennikiem. [Jedynak, 2017; Dziarmaga, 2018; Strauss, 2012]

W Polsce hipoterapia to nie tylko jazda konna. Terapią z udziałem konia nazywa się wszelkie działania lecznicze z udziałem tego zwierzęcia. Wśród nich wyróżnia się:

- Fizjoterapię na koniu, czyli prowadzoną przez fizjoterapeutę gimnastykę leczniczą, prowadzoną na koniu poruszającym się stępem, która ma na celu usprawnienie ruchowe pacjenta.
- Psychopedagogiczną jazdę konną, która jest prowadzona przez terapeutę zajęciowego, pedagoga i psychologa lub pod ich kierownictwem. Jest to zespół działań jeździeckich prowadzonych w celu wspomagania sfer: intelektualnej, fizycznej, emocjonalnej i poznawczej.
- Terapię kontaktem z koniem, czyli zajęcia prowadzone przez lub pod nadzorem pedagoga, psychologa i lekarza psychiatrę. Polegają na kontakcie z koniem oraz stworzeniu sytuacji terapeutycznej, której celem jest inicjowanie kontaktu ze zwierzęciem oraz otaczającym środowiskiem, a w rezultacie także z ludźmi.
- Jazdę konną dla osób niepełnosprawnych, która dzieli się na jazdę sportową i rekreacyjną. Taka forma nie stanowi części hipoterapii, ale może mieć aspekt terapeutyczny.

Dzięki zajęciom terapeutycznym z udziałem koni zmniejsza się zaburzenia równowagi, zwiększa możliwości lokomocyjne, stymuluje rozwój psychoruchowy, a także poprawia poczucie własnej wartości, relaksuje, niweluje reakcje nerwicowe i gwarantuje kontakt z naturą. [Dziarmaga, 2018; Danielewicz i in., 2023]

Hipoterapia działa zarówno na sferę psychiczną jak i fizyczną. Do najważniejszych oddziaływań między innymi należy:

- Normalizacja napięcia mięśniowego w wyniku siedzenia na końskim grzbiecie. Temperatura bijąca od zwierzęcia oraz rytmika ruchów powodują rozluźnienie mięśni, a utrzymywanie prawidłowego dosiada wzmacnia mięśnie pleców i zmusza do prostowania się.
- Doskonalenie koordynacji wzrokowo-ruchowej za sprawą zajęć prowadzonych na grzbiecie konia idącego w stępie. Podczas tego typu ćwiczeń pacjent poprawia również swoją orientację w przestrzeni oraz uczy się kontrolować własne ciało.
- Zwiększanie koncentracji uwagi poprzez kontakt z żywym zwierzęciem. W trakcie zajęć pacjenci są w stanie dłużej skoncentrować się na wykonywanym zadaniu.
- Kodowanie w mózgu prawidłowego wzorca ruchu miednicy podczas chodu, dzieje się tak dlatego, że ruch konia w stępie jest analogiczny o chodu człowieka. Pacjent siedząc na koni ćwiczy równowagę, koordynację i inne czynności motoryczne.
- Zwiększenie motywacji do wykonywania ćwiczeń.
- Zniwelowanie zaburzeń emocjonalnych, ponieważ kontakt ze zwierzęciem pomaga wyciszyć się pacjentowi i zmniejszyć jego reakcje nerwicowe.
- Rozwijanie samodzielności dzięki pomaganiu w prostych czynnościach przy koniu. [Sobuś i in., 2010]

W terapii z udziałem nieparzystokopytnych korzysta się głównie z ruchu konia idącego w stępie. Jazda na koniu powoduje, że siedząc na grzbiecie zwierzęcia pacjent uspokaja się, co skutkuje rozluźnieniem mięśni. Przebywanie z końmi poprawia samopoczucie i zwiększa motywację do wykonywania nowych, nie zawsze przyjemnych ćwiczeń. [Bednarczyk, 2015; Pucyk i in., 2021]

4. Wybór konia do zajęć hipoterapeutycznych

Nie ma idealnego konia do hipoterapii, który odpowiadałby wszelkim formom i każdemu pacjentowi. Wybierając osobnika do zajęć terapeutycznych należy kierować się przede wszystkim dobrem pacjenta. Głównymi czynnikami określającymi czy dane zwierzę nadaje się do pracy z konkretnym pacjentem jest między innymi niepełnosprawność człowieka, wzrost, waga, a także sposób komunikacji z terapeutą. [Pluta, 2017; Wieczorek i in., 2012]

Rasami predysponowanymi do hipoterapii ze względu na interior i eksterier są między innymi: konie huculskie, koniki polskie, arabokoniki, fiordingi, haflingery, konie śląskie, a nawet konie zimnokrwiste. Pod względem płci częściej wykorzystywane są wałachy niż klacze. Pod uwagę nie bierze się ogierów. Najlepszy wiek dla konia hipoterapeutycznego to co najmniej pięć lat. Minimalny wiek nałożony jest ze względu na stabilność psychiczną, czas na zdobycie odpowiednich umiejętności, a co najważniejsze musi być zakończony fizyczny rozwój zwierzęcia. Nie ma wyznaczonej górnej granicy wieku, ponieważ jest to kwestia indywidualna podyktowana stanem fizycznym jak i psychicznym konia. [Pluta, 2017; Wieczorek i in., 2012]

Koń wybierany do zajęć terapeutycznych powinien odznaczać się spokojnym i zrównoważonym charakterem. Musi być przyjaźnie nastawiony wobec człowieka w każdej sytuacji. Powinien być chętny do współpracy. Nie może reagować strachem lub ucieczką na nagłe, niespodziewane bodźce. Wymagana jest również niska wrażliwość na dotyk. Dobrze, jeśli toleruje obciążenie całego ciała, a także jeśli nie ma łaskotek. Bardzo ważnym elementem jest ufność wobec obcych ludzi w pracy konia wykorzystywanego do terapii. Pozwala to na szybsze nawiązywanie relacji pomiędzy koniem a pacjentem. Takie zwierzę nie może posiadać żadnych zaburzeń behawioralnych, taki jak: narowy czy nałogi. Bardzo dobrze, jeśli podczas wysiłku nie poci się intensywnie. [Pluta, 2017]

Wzrost konia wykorzystywanego w hipoterapii nie powinien przekraczać 160 cm. Niższe konie (do 130 cm) świetnie sprawdzają się podczas zajęć małymi dziećmi, wyższe (od 130 cm do 155 cm) są najbardziej uniwersalne, ponieważ można prowadzić na nich zajęcia zarówno dla dzieci jak i dla dorosłych. Konie o wzroście 160 cm nadają się głównie dla osób dorosłych. Szyja powinna być dobrze osadzona i mocna. Kłoda nie może być zbyt obszerna, najlepiej dość długa. Kręgosłup nie może wystawać. Kłęb musi być wyraźny, łagodnie wysklepiony i mocny. Zad powinien być mocny, obszerny i dobrze umięśniony. Trzeba pamiętać, że koń hipoterapeutyczny musi być zdrowy. [Pluta, 2017; Danielewicz i in., 2023]

Warto obserwować mięśnie i stawy konia podczas ruchu, aby wrócić uwagę na pojawiające się przeciążenia, które mogą skutkować zaburzeniami chodu. Nieparzystokopytne użytkowane w celach hipoterapeutycznych często mają problemy z mięśniami kończyn piersiowych i miednicznych oraz z lędźwiami, które są również najbardziej narażone na urazy. Aby zminimalizować przeciążenia można stosować odpowiednie techniki masażu. [McBride, i in., 2004; Danielewicz i in., 2023]

Wybierając konia do hipoterapii można sugerować się hipotestem, czyli próbą wystandaryzowanej oceny przydatności konia do zajęć hipoterapeutycznych. Badanie taką skalą nie może zastąpić konsultacji u doświadczonego trenera. Najważniejsza jest obserwacja koni w naturalnych warunkach. Podczas tej czynności należy zwrócić uwagę na reakcje zwierzęcia na nowy sprzęt, płochliwość oraz to jak zachowuje się podczas wykonywanych na nim ćwiczeń. [Wieczorek i in., 2012]

5. Dobór sprzętu do zajęć

Sprzęt jeździecki używany podczas zajęć hipoterapii często różni się od tradycyjnego używanego do rekreacji. Takie wyposażenie jest złotym środkiem między potrzebami związanymi z chęcią usprawniania, fizycznym i psychicznym komfortem pacjenta, dobrostanem konia oraz wygodą terapeuty. Użytkowany sprzęt nie może prowadzić do odczuwania dyskomfortu przez zwierzę ani krępować nagłych ruchów jeźdźcy. Nie może także przeszkadzać w próbach samodzielnego utrzymywania równowagi oraz utrudniać kontaktu z koniem. Elementy przymocowane jednocześnie do zwierzęcia i pacjenta są stanowczo zakazane. [Pluta, 2017]

Podczas wyboru sprzętu stosowanego podczas zajęć należy kierować się specjalnymi potrzebami pacjenta. Przede wszystkim powinno się zwracać uwagę na stan zdrowia pacjenta i na jego zdolności psychiczne oraz motoryczne. Trzeba pamiętać, że hipoterapia ma zapewniać pacjentowi tylko pozytywne odczucia, a odpowiedni sprzęt zapewnia większe bezpieczeństwo oraz pomaga w wykonywaniu zadań. [Pluta, 2017]

Do zajęć z udziałem konia używa się ogłowia wędzidłowego ze względów bezpieczeństwa i wygody podczas oprowadzania pacjenta na koniu. Dzięki takiemu ogłowiu prowadzący zajęcia ma większą kontrolę nad zwierzęciem. Stosuje się też pasy terapeutyczne (potocznie nazywane popręgami terapeutycznymi). Można je podzielić na sztywne i miękkie, a także zależnie od rodzaju uchwytu, sposobu ustawienia czy mocowania na popręgu. Uchwyty są istotne, ponieważ zapobiegają pochylaniu się na wszystkie strony. Jest to bardzo istotne, ponieważ przy osobach mających problemy z równowagą takie bujanie się może wywołać niepokój. Powinny być również na tyle szerokie, aby zmieściła się w nich dłoń osoby asekurującej. [Pluta, 2017]

6. Szkolenie konia hipoterapeutycznego

Szkolenie warto rozpocząć już w okresie źrebięcym. Powinno polegać na nauce poprawnych reakcji na bodźce. Początkowo należy przyzwyczajać zwierzę do głośnych dźwięków oraz dotyku po różnych części ciała. Wskazane jest także nauczyć konia zachowywać spokój w niecodziennych sytuacjach. Zwierzę nie może reagować strachem na nowe osoby i ich sprzęt, taki jak wózek inwalidzki, balkonik czy kule, a także rampy czy podesty. Umożliwiają i ułatwiają samodzielne wejście pacjenta na konia. Trening przygotowujący do pracy podczas zajęć hipoterapeutycznych rozpoczyna się najczęściej około 4 roku życia. Takie szkolenie polega na nauce współpracy z człowiekiem, wyciszaniu wzorców behawioralnych i uwrażliwianiu na czynniki zewnętrzne. [Pluta, 2017; Jonczyk, 2017]

Konie uczą się na wiele sposobów. Wyróżnia się pięć głównych mechanizmów uczenia:

- Nauka metodą prób i błędów jest najczęściej wykorzystywana przez konia nieświadomie w nieoczekiwanych lub nowych sytuacjach. Polega na podejmowaniu

przez zwierzę różnych działań, ale powtarzaniu tylko tych, które przynoszą pozytywne efekty.

- Nauka przez naśladownictwo jest to bardzo dobrze rozwinięty mechanizm u koni, ponieważ są świetnymi obserwatorami. Opiera się na powtarzaniu zaobserwowanych wcześniej zachowań u innych osobników.
- Nauka przez wzgląd bazuje na nieoczekiwanej, zaskakującej zmianie wcześniejszego oświadczenia i wykorzystaniu go w zaistniałej sytuacji. Ten mechanizm zwiększa efektywność treningów oraz redukuje ilość błędów.
- Habitacja, czyli przyzwyczajanie, polega na wyciszaniu naturalnych zachowań i odruchów. Jest to nauka ignorowania nowych bodźców i zachowywaniu spokoju zamiast wszczynania ucieczki.
- Uczenie percepcyjne dzieli się na dwa mechanizmy:
 - Wpajanie, czyli imprinting lub wydrukowanie, polega na natychmiastowej i efektywnej nauce. Jest to proces nieodwracalny, mający bardzo duży wpływ na dorosłe życie zwierzęcia. Warto przepracować ten proces w sposób planowany i zrównoważony, aby osiągnąć zaplanowane cele.
 - Uczenie utajone jest tworzeniem wyuczonych map skojarzeń za pomocą obserwacji, doświadczenia i znajomości ludzi lub terenu. Proces zachodzi w sposób nieświadomy i zmiany w zachowaniu są niewidoczne. [Strumińska, 2007; Szurmik i in., 2016; Wieczorek i in., 2012]

Nastawienie o treningów i stosunek do środowiska jest kształtowany przez indywidualne doświadczenia każdego konia. Metody szkolenia koni często opierają się na dominacji człowieka nad koniem, co ma bezpośredni wpływ na zachowanie równowagi psychicznej zwierzęcia. Spokojna, zachowująca reguły działające w stadzie i konsekwentna nauka nowych możliwości nie działa negatywnie na psychikę nieparzystokopytnych. Zdobywanie przywództwa stada stosując znajomość natury koni zamiast bazując na metodach przymusu, tworzy relacje bez odczuwania strachu przed człowiekiem i oparte w szczególności na respekcie i zaufaniu. [Cywnar i in., 2014; Wilk i in., 2014]

Obecne metody szkolenia koni są połączeniem metod tradycyjnych z naturalnymi. Jeździectwo powszechne lub jeździectwo nowej ery to inne nazwy metod naturalnych. Nie jest to styl jazdy konnej, ale przede wszystkim forma podejścia do zwierzęcia. Bazuje na etologii koni i potrzebie zrozumienia ich naturalnych zachowań, sposobu nauki czy języka ciała. Jej największą zaletą jest niwelowanie stresu występującego u młodych koni podczas szkolenia. Założeniem takiej formy treningu jest przekonanie konia za pomocą swojej mowy ciała, że człowiek nie jest dla niego typowym drapieżnikiem i nie stanowi zagrożenia. Dzięki temu, zdobywa się zaufanie i emocjonalną akceptację ze strony konia. [Miller, 2007; Wilk i in., 2014]

Odpowiednia relacja człowiek-konik jest podstawą treningu naturalnego. Konie są szczególnie wrażliwe na nowe bodźce (dźwiękowe, dotykowe czy wizualne) pojawiające się w ich otoczeniu. Natomiast ze względu na doskonałą pamięć należy pamiętać, aby pierwsze doświadczenie z nowym bodźcem było skojarzone z jak najbardziej pozytywną reakcją. W szkoleniu naturalnym dąży się do zmniejszenia ilości reakcji negatywnych poprzez zwiększenie części treningów prowadzonych z ziemi. [Górecka i in., 2007; Wilk i in., 2014]

Konik terapeutyczny po ukończonym szkoleniu powinien reagować spokojem na nowe bodźce, nie reagować strachem oraz lękiem na ludzi i na ich nagłe, niespodziewane zachowania.

Powinien wykazywać się opanowaniem podczas wsiadania pacjentów z rampy. Musi być przyzwyczajony i akceptować różne rodzaje sprzętu jeździeckiego takiego jak pasy woltyżerskie, siodła i ogłowia. Aby zajęcia były jak najbardziej bezpieczne dla pacjenta, koń wykorzystywany do nich musi mieć zrównoważony charakter i temperament, a także jak najbardziej przewidywalne reakcje. [Pluta, 2017; Jonczyk, 2017]

7. Podsumowanie

Podsumowując, terapia z udziałem koni jest jedną z bardziej popularnych form terapii z udziałem zwierząt. Oddziałuje na kilka sfer: fizyczną, edukacyjną, motywacyjną i psychiczną. Dzięki hipoterapii spełnia się cele takie jak: stymulacja i normalizacja czucia powierzchniowego, zwiększenie poczucia własnej wartości, rozwijanie pozytywnych kontaktów społecznych, zmniejszenie problemów emocjonalnych oraz kodowanie w mózgu, prawidłowego wzorca ruchu podczas chodu, usprawnianie napięcia mięśniowego, poprawa równowagi i koordynacji.

Podczas zajęć używa się różnego rodzaju sprzętu jeździeckiego, często innego od tego wykorzystywanego w rekreacji. Podstawą jest ogłowie wędzidłowe, natomiast na grzbiecie nie zawsze znajduje się siodło, częściej jest to pas woltyżerski.

Konie pracujące w hipoterapii muszą być odpowiednio przygotowane. Szkolenie opiera się głównie na treningu naturalnym. Początkowo polega ono na stopniowym przyzwyczajaniu zwierzęcia do dotyku, uwrażliwianiu na hałas, czy reagowaniu na imię. Stopniowo zwiększa się poziom trudności. Zwierzę nie może reagować strachem lub lękiem na nowe sytuacje. Musi być przyzwyczajone do jazdy na oklep oraz do wsiadania na nie z rampy. Aby terapia z udziałem konia przynosiła jak największe efekty musi sprawiać przyjemność pacjentowi, ale przede wszystkim koniu.

8. Wnioski

- Hipoterapia świetnie wspomaga normalną rehabilitację.
- Konie hipoterapeutyczne muszą mieć odpowiednie przeszkolenie.
- Zajęcia terapeutyczne powinny być przyjemne dla obu stron (zarówno dla pacjenta jak i dla konia).
- Szkolenie konia rozpoczyna się już w okresie źrebięcym.
- Nieparzystokopytne wykorzystywane do celów terapeutycznych muszą odznaczać się opanowanym charakterem oraz zrównoważonym temperamentem.
- Trening naturalny opiera się na mowie ciała koni i polega na przyzwyczajaniu ich do niecodziennych i niespodziewanych sytuacji.
- Do każdego pacjenta należy dobrać odpowiedniego konia oraz rodzaj zajęć terapeutycznych.

Bibliografia:

1. Bednarczyk, M. (2015). Hipoterapia jako forma rehabilitacji i wsparcia włączania społecznego osób niepełnosprawnych. Student Niepełnosprawny. Szkice i rozprawy. Wyd. UPH w Siedlcach, 15(8), s. 207-217.

2. Chapman M., Thomas M., Thompson K. (2020). What people really think about safety around horses: The relationship between risk perception, values and safety behaviours. *Animals*, 10: 2222–2244.
3. Cwynar P., Dardziński M. Zasady szkolenia i użytkowania koni w Polskich formacjach mudurowych; *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu: Biologia i Hodowla Zwierząt* 72.601 (2014).
4. Danielewicz A., Horoszewicz E., Kopczyk W. (2023) Jak wybrać konia do hipoterapii? Cechy fizyczne; *Dyscypliny Komplementarne Fizjoterapii*, wyd. AB JPii, s. 251-266, Biała Podlaska 2023.
5. Danielewicz A., Horoszewicz E., Stolarczyk K. (2023) Zastosowanie masażu w leczeniu koni hipoterapeutycznych; *Dyscypliny Komplementarne Fizjoterapii*, wyd. AB JPii, s. 267-288, Biała Podlaska 2023.
6. Dziarmaga Ł. (2018) Hipoterapia jako postać rehabilitacji medycznej; *Problems and prospects of territories' socio-economic development*, s. 156-158, Opole 2018.
7. Górecka A., Bakuniak M., Chruszczewski M. H., Jezierski T. A.: A note on the habituation to novelty in horses: handler effect. *Anim. Sci. Pap. Rep.* 2007, 25, 143-152.
8. Graf P., König von Borstel U., Gauly M. (2013). Importance of personality traits in horses to breeders and riders. *J. Vet. Behav.*, 8: 316–325.
9. Janicka W., Wilk I., Ryżak M. (2022). Horses' perception of the threat posed by sounds of
10. Jedynak M. (2017) Moc wpływu zwierząt na kształtowanie więzi ludzkich; *Nowe formy wsparcia rozwoju osoby niepełnosprawnej*, wyd. WSPA, s. 37-47, Lublin 2017.
11. Jonczyk A. Trening młodych koni. *Hodowca i Jeździec*, (2017).
12. Kamieniak J., Marciniak B., Sapula M. (2010). Reakcje behawioralne koni poddanych działaniu wybranych bodźców dźwiękowych. *Med. Weter.*, 66 (6): 413–417.
13. Kania-Gierdziewicz J., Zwolska B. (2024) Analiza czynników wpływających na tendencje do różnych zachowań koni - badania ankietowe; *Roczniki Nauk Zootechnicznych: t. 5*, s. 215-138.
14. Krupa W., Topczewska J., Garbiec A., Karpiński M. (2022). Is the welfare of sport horses assured by modern management practices? *Anim. Sci. Gen. (d. Roczniki Naukowe PTZ)*, 18 (1): 57–77.
15. Leopold A. (1965). Możliwości zwiększenia zasobów zbożowych na drodze mechanizacji gospodarstw chłopskich. Ograniczenie ilości koni w gospodarstwach rolnych. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych. Zeszyt 64*.
16. Łojek J., Łojek A. (2015). Człowiek i koń – próba równoważenia interesów. *Przegląd Filozoficzny – Nowa Seria*, 24 (2/94): 35–49.
17. Maj-Golianek M. (2017) Komunikacja dzieci niepełnosprawnych a zooterapia; *Nowe formy wsparcia rozwoju osoby niepełnosprawnej*, wyd. WSPA, s. 61-67, Lublin 2017.
18. McBride, S. D., Hemmings, A., Robinson, K. (2004). A preliminary study on the effect of massage to reduce stress in the horse. *Journal of Equine Veterinary Science*, 24(2), 76-81.
19. Miller R. M.: *Jeździectwo naturalne bez tajemnic. Z serca prosto do rąk*. Wyd. Agencja PDM, Warszawa 2007.
20. Olczak K., Tomczyk-Wrona I. (2022). Współczesne aspekty dobrostanu koni. *Rocz. Nauk. Zoot.*, 49 (1): 3–18.

21. Pluta M. (2017) Hipoterapia ważną metodą usprawniania w zoterapii; Nowe formy wsparcia rozwoju osoby niepełnosprawnej, wyd. WSPA, s. 94-108, Lublin 2017.
22. Pucyk E., Rogoźnicki D. (2021) Koń huculski - możliwości wykorzystania w rekreacji i hipoterapii; Koła Naukowe - Szkoła Twórczego Działania, s. 86-99.
23. Purandare B., Trzmiel T., Ziałacka G., Pawlaczyk M. (2017) Programy Aktywności Knillów w hipoterapii dzieci z autyzmem - doświadczenia własne; Nowe formy wsparcia rozwoju osoby niepełnosprawnej, wyd. WSPA, s. 109-119, Lublin 2017.
24. Sobuś M., Łagan S. (2010) Hipoterapia jako naturalna forma rehabilitacji; Aktualne Problemy Biomechaniki: nr 4, s. 173-178.
25. Stefaniuk M. (2013) Konie i geny; Wszechświat: t.114, nr 4-6, s. 142.
26. Strauss I., Hipoterapia. Fizjoterapia na koniu i przy koniu, Kraków 2012.
27. Strumińska A. ABC Hipoterapii. Psychopedagogiczne aspekty dzieci i młodzieży niepełnosprawnych intelektualnie. Wyd. II. PWRiL, Warszawa 2007: 16.
28. Szurmik T. H., Walaszek R., Marszałek A., Burdacki M. Medyczne, pedagogiczne, psychologiczne i społeczne oddziaływania hipoterapii, Medycyna Rodzinna, Art. nr 2, 2016
29. Wieczorek D., Ciołek K., Sitek J. E., Zaręba W. Hippotest – próba wystandaryzowanej przydatności konia do zajęć hipoterapeutycznych. Annales Academiae Medicae Gedanensis 2012; 42: 29-39.
30. Wilk I., Janczarek I. (2014) Naturalne metody treningu jako nowoczesne techniki szkolenia koni w zgodzie z naturą i dobrostanem gatunku; Medycyna Weterynaryjna: nr 70, s. 94-97
31. Wyżnikiewicz-Nawracała A., Jeździectwo w rozwoju motorycznym i psychospołecznym osób niepełnosprawnych. Wydawnictwo AWFIS w Gdańsku, Gdańsk 2002.

15. WELFARE OF THERAPEUTICALLY USED RABBITS

Dagmara Brzyska, Agata Danielewicz

University of Siedlce

Institute of Animal Science and Fisheries

Student Scientific Club of Animal Lovers

ul. Prusa 14 08-110 Siedlce

E-mail: db86897@stud.uws.edu.pl

1. Introduction

1.1. The Importance of Animal Therapy

In recent years, animal therapy has gained importance in behavioral sciences, medicine, psychology, and animal sciences (Wilk, 2014). Initially, the focus was primarily on therapeutic benefits for humans, which led to the instrumental treatment of animals. Growing ethical awareness has shifted the emphasis from "use" of the animal to "cooperation," placing the well-being of the animal therapist on par with therapeutic effects (Serpell et al., 2015). Currently, animal sciences provide the behavioral and physiological methodology necessary to assess the relationship between the well-being of humans, animals, and the environment, as evidenced by studies on stress and comfort indicators in therapy animals such as rabbits (Suba-Bokodi, 2022). As a result, animal therapy shapes modern standards of care, training, and selection of animals based on their mental and physical resilience to work.

1.2. Characteristics of Rabbits in Animal Therapy

Domestic rabbits (*Oryctolagus cuniculus*), used in animal therapy, play a role in therapeutic processes that is different from horses, dogs, or cats (Lagoterapia, n.d.). By nature, they are highly sensitive to external stimuli, which requires special caution and monitoring of animal welfare from therapists and caregivers (Loukaki et al., 2017). At the same time, their calm disposition makes them effective in working with withdrawn individuals, those suffering from fear of larger animals, or in the therapy of individuals on the spectrum (Kim, 2024). The need for gentle touch, slow stroking, and avoiding sudden movements teach patients to control their emotions, empathy, and concentration, as the animal quickly reacts to anxiety or aggression (Suba-Bokodi, 2022). Specific care and feeding can also serve as an educational tool. Their small size, soft fur, and body warmth make the patient feel safe and comfortable, which lowers blood pressure and cortisol levels (Serpell et al., 2015).

1.3. Purpose of the study

The purpose of this study was to analyze the well-being of rabbits used in lagotherapy. Observations were compared with available scientific and industry literature.

2. Animal-Assisted Interventions (AAI) – Definitions and Context

2.1. The Concept of Animal-Assisted Interventions (AAI)

Animal-Assisted Interventions (AAI) are purposeful interventions in which an animal serves as an integral part of a therapeutic, educational, or recreational process (Serpell et al., 2015). In literature and practice, AAI is divided into three forms, which differ in their level of professionalization, purpose, and qualification requirements for therapists and animals:

1. Animal-Assisted Therapy (AAT) – a purposeful, structured, and measurable process conducted by a qualified specialist (e.g., psychologist, physiotherapist, educator) in collaboration with a trained animal and its handler. AAT has clearly defined clinical goals and is documented. It requires a rigorous assessment of the animal's effectiveness and well-being (Suba-Bokodi, 2022).
2. Animal-Assisted Activities (AAA) - more recreational and informal in nature. Often conducted in care facilities or hospitals. Despite its less formal nature, it still requires the animal to be properly trained (Loukaki et al., 2017).
3. Animal-Assisted Education (AAE) - activities focused on educational goals, often used in schools.

Contemporarily, animal-assisted therapy focuses on the well-being of both the patient and the animal.

It is recognized that high-quality animal work is only possible when its needs are fully met (WSAVA, n.d.).

2.2. The Specifics of Lagotherapy

Lagotherapy is a form of therapy in which the main therapeutic and motivational tool is a properly prepared rabbit. It utilizes the unique etiological characteristics of rabbits, which distinguish them from other animals more commonly used in animal therapy, such as dogs or horses (Lagotherapy, n.d.).

A rabbit, unlike other animals, promotes a calmer, quieter, and more sensory interaction (Kim, 2024). Key aspects of this relationship include:

- reducing anxiety and building trust - rabbits, which in nature usually play the role of prey, require maximum gentleness and patience, which in some way forces patients to control their impulsiveness. This makes establishing contact with a rabbit a factor that strengthens self-esteem and the ability to build relationships (Suba-Bokodi, 2022).
- supporting fine motor skills - petting, brushing, and feeding engage fine motor skills and hand-eye coordination (Nosek-Kozłowska, 2021).

2.3. Therapeutic Benefits of Contact with a Rabbit

The main benefit of rabbit therapy is the direct, measurable reduction in anxiety, which has been confirmed in experimental studies. These studies confirmed that during periods when rabbit activities were conducted, children's anxiety levels in the classroom environment were significantly lower compared to periods without the animal's presence (Molnár et al., 2019). Thanks to their ability to quickly reduce tension, rabbits provide valuable support in educational and therapeutic settings. Furthermore, engaging patients in tasks leads to improved self-esteem in the youngest (Kim, 2024). The presence of a rabbit, which requires gentleness and calm from the patient, is important for emotional and social development. The animal's timid nature forces

participants to exercise self-control and teaches empathy and reading nonverbal signals, such as fear or comfort, sent by the animal (Lagothérapie, n.d.).

Animal-assisted interventions have proven effective in improving patients' social skills, motivation, and mood. This is particularly evident in the rehabilitation of individuals with acquired brain injuries, which confirms the broad scope of animal-assisted therapy, of which lagothérapie is an effective segment (Hediger et al., 2019).

3. Welfare of Animals Used in Therapy

3.1. Key Definitions of Welfare

The foundation of all animal-assisted therapy, including lagothérapie, is the concept of animal welfare. Welfare is crucial because it determines the effectiveness of therapy and the moral justification for using an animal that is supposed to be stress-free. The starting point is Francis Brambell's List of Five Freedoms, which establishes minimum standards for animal care. Although it originally referred to farm animals, its principles are universal for any animal under human care, including therapeutic rabbits (Lagothérapie, n.d.). The List of Five Freedoms focuses primarily on the elimination of suffering, and its principles include:

1. Freedom from hunger and thirst.
2. Freedom from discomfort – providing an appropriate living and working environment, which in the case of a rabbit, which is sensitive to heat and drafts, is crucial to maintaining homeostasis.
3. Freedom from pain, injury, and disease.
4. Freedom to express normal behaviors – in the case of a rabbit, this freedom means the ability to perform natural activities such as digging, biting, hiding, or exploring (Lagothérapie, n.d.).
5. Freedom from fear and stress – this is the most important point from the perspective of lagothérapie, as rabbits are naturally timid animals. This requires the therapist or caregiver to prevent situations that could trigger flight or immobilization (Molnár et al., 2019).

The ethics of animal therapy involve moving from minimizing suffering to actively promoting positive well-being, which lays the foundation for ethical and long-term collaboration. Concepts such as the Five Freedoms redefine well-being by also taking into account the animal's emotional state (Kim, 2024).

3.2. Standards and Guidelines for Therapy Animals

The professional and ethical conduct of animal-assisted interventions, including animal therapy, must be based on standards and guidelines that ensure the safety of both the patient and the animal, which is a prerequisite for the therapy's effectiveness, for example, in the context of reducing anxiety levels in children (Molnár et al., 2019). These guidelines are based on three main pillars: animal qualification, protocols, and the role of the animal caregiver/therapist. Before including a rabbit in therapy, a behavioral screening is necessary to confirm or deny that the animal has a balanced temperament and a high tolerance for environmental stimuli (Hediger et al., 2019). As a naturally timid animal, the rabbit must demonstrate high tolerance to chaotic and noisy conditions typical of classroom or other environments. It should also tolerate gentle but varied touch from multiple people. The

standards also require the implementation of protocols that, among other things, limit working time, as excessively long and intense interaction can lead to overload and stress. The guidelines also oblige the therapist to provide the animal with a safe place to retreat to recover or regain a sense of control over the situation (Lagothrapy, n.d.). Another key point is the role of the caregiver-therapist, who should have knowledge of reading the rabbit's signals of discomfort and stress. It is ethical to interrupt or change the course of activities if the animal's well-being is compromised, which demonstrates that a rabbit, or any other animal, should be treated as a full-fledged partner, not a tool (Hediger et al., 2019).

4. Biological and behavioral determinants of rabbit well-being

4.1. Natural Species Needs

A rabbit's biological and behavioral characteristics are related to its role in the food chain, where it plays the role of prey. These animals have a deeply ingrained instinct to avoid predators, which manifests itself in the need to hide and have a permanent shelter. Research on rabbit welfare shows that the lack of hiding is one of the most important aspects of welfare, as it prevents the animal from responding effectively to threats and leads to chronic anxiety and stress (Rioja Lang et al., 2019). For a rabbit to participate in lagothrapy, it is necessary to provide it with access to a safe, dark hiding place, which serves as a safe zone for it.

Besides the need for safety, rabbits also have other, complex needs resulting from their etiology, such as exploration, biting, and digging. Due to the constant growth of incisors, they should be provided with gnawing materials, such as twigs. This is also an important aspect of environmental enrichment (Schepers et al., 2009). Equally important is the need to dig and should be satisfied, for example, by providing a suitable substrate or a litter box. Studies conducted among the general population of domestic rabbits in England have shown that insufficient housing conditions in terms of space and opportunities to express natural behaviors are a significant welfare problem, and keeping rabbits in small, inadequately equipped cages restricts their movement and behavioral expression (Rooney et al., 2014). In the context of lagothrapy, such deficits resulting from the inability to demonstrate natural behavior constitute a burden, which is further exacerbated by the stress of transport and interaction with patients. Failure to understand and meet species-specific needs prevents the animal from achieving an adequate quality of life and makes its participation in lagothrapy unethical (RWAf, 2023).

4.2. Stressors in the Therapeutic Environment

The environment in which therapy is conducted is designed primarily to ensure peace and safety for patients and students, but for rabbits it can be a source of intense stressors. Biologically, rabbits are hard-wired to interpret novelty, noise, and sudden movements as a direct predatory threat, and welfare research indicates that sensitivity to the environment is a key element in assessing comfort (Schepers et al., 2009). The main stressor is overstimulation, which results from exposure to unpredictable stimuli: high noise levels, dynamic movement, and interaction with many unfamiliar individuals.

Neglecting the need to hide is also a serious factor, which is one of the most important welfare problems in rabbits, as it prevents them from effectively coping with stress (Rioja-Lang et al., 2019). Furthermore, interaction with the patient often involves inappropriate handling of the animal: lifting, squeezing, or excessive contact, which not only causes severe stress but also

poses a serious risk of physical injury (RWAf, 2023). Considering that a significant portion of the rabbit population kept in home environments does not have sufficient living conditions, we can assume that the animal often enters therapy sessions stressed and less able to cope with the additional stress of transport and work, requiring the caregiver to be constantly vigilant and ready to provide immediate opportunities for withdrawal (Lagoterapia, n.d.).

4.3. Behavioral Indicators of Stress and Comfort

Effective work with an animal requires the caregiver to be proficient in accurately assessing the rabbit's condition by correctly interpreting behavioral signals that signal both comfort and increasing stress. Because rabbits have an evolutionarily developed tendency to mask signs of weakness and pain, it is very easy to miss stress signals that are not always obvious (Molnár et al., 2019). The most noticeable indicator of anxiety is increased shelter seeking and withdrawal (Rioja-Lang et al., 2019). In a therapeutic environment, the inability to hide, constantly remaining immobile, or attempting to escape violently indicate that the animal perceives the environment as a threat (Loukaki et al., 2017). Other stress signals include changes in body posture, such as hunching over, muscle tension, or ears lying flat along the back; frequent and rapid head movements, rapid breathing, and excessive grooming (licking the fur). Comfort and relaxation signals include stretching out in a relaxed, lying position, calmly eating hay, exploring the environment (e.g., sniffing furniture, etc.), and calm interaction with the caregiver or other participants (Lagotherapy, n.d.).

If signs of withdrawal predominate over signs of relaxation, the therapist is forced to withdraw the animal from the ongoing activity or change its course (RWAf, 2023).

5. Preparing Rabbits for Therapy

5.1. Selection Criteria and Temperament Assessment

Preparing a rabbit for therapy is a multi-stage process, as the success of therapy depends on the animal's temperament stability in a stressful environment, where it often helps reduce anxiety in patients (Molnár et al., 2019).

Selection goes beyond physical health and focuses on behavioral traits that must minimize the risk of stress in the rabbit. The basic criterion is the animal's ability to tolerate close interaction, which is essential in the context of working with children (Stolarczyk, Kursik, 2022). The ideal candidate for therapy should demonstrate a low level of reactivity to noise, new odors, and sudden movements, which are an inherent element of therapeutic work (Kowalska, Bielański, 2024). The assessment of the rabbit's temperament should take into account the rabbit's etiology, with an emphasis on measuring its response to stressful situations, as its deeply ingrained need to hide must be balanced by a high tolerance for external stimuli (Rioja-Lang et al., 2019). The animal selected for therapy should demonstrate the ability to habituate and respond positively to training methods (Hohlbaum et al., 2024).

The final qualification of the rabbit for therapy should ensure that its participation in therapy does not pose chronic stress for it (RWAf, 2023).

5.2. Socialization, Habituation, and Preparation for Work

The process of socialization and habituation is the most important step in preparing the rabbit for therapy, as it aims to minimize its stress response and build positive associations in interaction with humans and unfamiliar environments.

Socialization should begin as early as possible in an animal's life. Its goal is to familiarize the animal with gentle touch, being picked up, and various sensory stimuli (Stolarczyk, Kursik, 2022). In the case of rabbits, habituation aims to reduce their natural anxiety, which is necessary for working in unstable and noisy environments (Molnár et al., 2019). Rabbit training focuses on gradual exposure to increasingly intense stimuli, starting with gentle petting and progressing to acceptance of noise and the presence of many people, which helps the animal build trust and reduces the need for instinctive withdrawal (Coda, 2020). During the socialization process, environmental enrichment and stress-reducing techniques should also be considered. Studies have used calming pheromones in rabbits, which have been shown to be effective in relieving stress associated with veterinary procedures and vaccinations (Asproni et al., 2023).

5.3. Housing Conditions

A fundamental ethical requirement is maintaining the health and hygiene of the rabbit, which determines the safety of patients and the well-being of the animal itself. Thorough veterinary preventive care should be provided, as rabbits tend to conceal disease symptoms until advanced stages of the disease. Comprehensive preventive care includes regular vaccinations and deworming, as well as constant dental checkups, which grow throughout life and can be a source of pain (Lagoterapia, n.d.). The hygiene of the home environment is also important. The cage and litter box should be kept clean, and the bedding should be changed regularly to prevent skin and respiratory diseases, which could prevent the animal from participating in activities and cause pain and discomfort (Molnár et al., 2019). Furthermore, environmental enrichment should also be considered, as it indirectly affects health (Coda, 2020). In the case of a rabbit being prepared for therapy, a key point is also the implementation of training based on positive reinforcement, which helps minimize stress during grooming procedures such as ear cleaning or nail trimming (Hohlbaum et al., 2024).

6. Safe Work Practices

Safe work practices in rabbit therapy, or any other animal therapy, should be strictly defined and focused on minimizing stress on the animal. The basic principle is to establish the duration and frequency of sessions. Due to their sensitive temperament, rabbits should participate in short sessions that do not overload them sensorially or physically. This means that the duration of a single therapy session must be flexible and adjusted to the signals given by the animal, not to rigid schedules (Trocino, 2022).

Providing the opportunity to retreat to a safe and quiet place throughout the session should be crucial (Rioja-Lang et al., 2019). Interactions should be calm, avoiding sudden movements, forcing contact, and inappropriate lifting (Sommerville et al., 2023). The principle of lagotherapy should be that the rabbit's well-being always takes priority over therapeutic goals.

7. Summary

The aim of this study was to analyze the rabbit's well-being in the context of its role in lagotherapy.

Many studies confirm that lagotherapy is a valuable therapeutic method that effectively reduces anxiety levels and supports improved self-esteem in patients.

The main challenge is posed by the biological conditions of the rabbit, which has a strong need to hide and is particularly susceptible to stress in a noisy and unfamiliar therapeutic environment. Therefore, it is crucial to prepare the animal for work early to minimize stress and build positive associations with humans.

In summary, lagotherapy is a highly effective method, but only if the rabbit's well-being is prioritized.

Bibliography:

1. Coda, K. (2020) "Enrichment strategies for rabbits in research", Biologic Resources Laboratory, University of Illinois at Chicago.
2. Hediger, K., Thommen, S., Wagner, C., Gaab, J. and Hund-Georgiadis, M. (2019) "Effects of animal-assisted therapy on social behaviour in patients with acquired brain injury: a randomised controlled trial", *Scientific Reports*, 9, 5831. doi: 10.1038/s41598-019-42244-4.
3. Hohlbaum, K., Kahnau, P., Wilzopolski, J. and Fischer-Tenhagen, C. (2024) "Szkolenie królików laboratoryjnych w celu udoskonalenia rutynowych procedur hodowlanych", *Journal of Visualized Experiments*. doi: 10.3791/66008-v.
4. Kim, S.-H. (2024) "The Role of Pet-Based Activities: Working with Rabbits to Improve Self Esteem in Preschool Children", *Animals (Basel)*, 14(24), 3565. doi: 10.3390/ani14243565.
5. Kowalska, D. & Bielański, P. (2024). Wpływ różnych systemów utrzymania królików na ich dobrostan. W: Zjazd Naukowy PTZ w Siedlcach 2024. Siedlce: Wydawnictwo Naukowe UWS.
6. Lagoterapia — terapia i edukacja z udziałem królika. (n.d.). Publikacja PDF (wydawnictwo i miejsce wydania zależą od pełnej afiliacji publikacji, tu: sosw.torun.pl).
7. Loukaki, K., Koukoutsakis, P. and Kostomitsopoulos, N. (2017) "Animal welfare issues on the use of rabbits in an animal assisted therapy program for children", *Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society*, 61(3), 220–225. doi: 10.12681/jhvms.14889.
8. Molnár, M., Iváncsik, R., DiBlasio, B. and Nagy, I. (2019) "Examining the effects of rabbit assisted interventions in the classroom environment", *Animals*, 10(1), 26. doi: 10.3390/ani10010026.
9. Nosek-Kozłowska, K. (2025) "Human-animal interaction in the context of supporting development. A review of selected animal species used in children's therapy / Interakcja człowieka ze zwierzętami w kontekście wspierania rozwoju. Przegląd wybranych gatunków zwierząt wykorzystywanych w terapii dzieci", *Social Dissertations / Rozprawy Społeczne*, 19(1), 97–107. doi: 10.29316/rs/202102.
10. Rioja-Lang, F., Bacon, H., Connor, M. and Dwyer, C.M. (2019) "Rabbit welfare: determining priority welfare issues for pet rabbits using a modified Delphi method", *Vet Record Open*, 6(1), e000363. doi: 10.1136/vetreco-2019-000363.

11. Rooney, N.J., Blackwell, E.J., Mullan, S.M., Saunders, R., Baker, P.E., Hill, J.M., Sealey, C.E., Turner, M.J. and Held, S.D.E. (2014) "The current state of welfare, housing and husbandry of the English pet rabbit population", *BMC Research Notes*, 7, 942. doi: 10.1186/1756-0500-7-942.
12. RWAf. (2023). Use of Rabbits in Educational and Therapeutic Settings. Publikacja online. Burgess Hill: Rabbit Welfare Association & Fund.
13. Schepers, F., Koene, P. and Beerda, B. (2023) "Welfare assessment in pet rabbits", (Journal—Cambridge University Press),
14. Serpell, J.A., Coppinger, R., Fine, A. and Peralta, J.M. (2010) "Welfare considerations in therapy and assistance animals", *Handbook on Animal-Assisted Therapy*, 481–503. doi: 10.1016/B978-0-12-381453-1.10023-6.
15. Sommerville, R., Ruiz, R., Averós, X. (2023). A meta-analysis on the effects of the housing environment on the behaviour, mortality, and performance of growing rabbits. *Animal Welfare*, 32(4). Cambridge: Cambridge University Press & Assessment.
16. Stolarczyk, K. & Kursik, A. (2022). Proces socjalizacji królików. W: III MIĘDZYNARODOWE SYMPOZJUM STUDENCKICH KÓŁ NAUKOWYCH. Lublin: Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie.
17. Suba-Bokodi, É., Nagy, I. and Molnár, M. (2022) "Changes in the Stress Tolerance of Dwarf Rabbits in Animal-Assisted Interventions", *Applied Sciences*, 12(14), 6979. doi: 10.3390/app12146979.
18. Wilk M. (2014) "Zalety i szanse wykorzystania animaloterapii w resocjalizacji młodzieży niedostosowanej społecznie", *Lubelski Rocznik Pedagogiczny* tom XXIII.
19. Trocino, M. et al. (2022). A pilot study about on-farm assessment of health and welfare in rabbits kept in different housing systems. PubMed (Artykuł recenzowany, wydawnictwo i miejsce wydania zależą od pełnej afiliacji czasopisma, tu: PubMed/NLM).
20. Asproni, P., Codecasa, E., Marcet-Rius, M., Demellier, J., Descout, E., Verbaere, M., Vinck, O. and Cozzi, A. (2023) "Helping rabbits cope with veterinary acts and vaccine-related stress: effects of the rabbit appeasing pheromone (RAP).

16. INNOVATIVE METHODS OF SUPPORTING HORSE REPRODUCTION – TECHNIQUES, OPPORTUNITIES AND DEVELOPMENT PROSPECTS

Nawojka Bala, Agata Danielewicz

Uniwersytet w Siedlcach

Wydział Nauk Rolniczych, Instytut Zootechniki i Rybactwa

Studenckie Koło Naukowe Sympatyków Zwierząt

ul. Bolesława Prusa 14, 08-110 Siedlce

E-mail: nb89196@stud.uws.edu.pl

1. Introduction

Horse reproduction is a key element of modern animal husbandry, determining genetic progress and the productive value of animals. With the development of animal husbandry and veterinary medicine, biotechnological techniques are gaining increasing importance, which allow more successful control reproductive processes, increase fertility and more effectively make use of genetic material from mares and stallions. Traditional breeding methods do not always meet modern requirements, which is why interest is growing in solutions allowing higher precision and safety.

The most important innovations currently being used in horse reproduction include perfecting techniques of collecting and conserving semen, modern methods of insemination, synchronization of oestrus cycles, embryo transfer and tools allowing for genetic material manipulation, such as sorting sperm or advanced techniques of extracorporeal fertilization. Such technology allows not only to increase the success rate of reproduction, but also to make better use of the genetic potential of the population and to protect valuable breeding lines.

The goal of this study was to go over the most important modern methods of assisting horse reproduction and the possibilities of practical application. Both widely applied techniques are described, as well as innovative solutions that may have a great impact on horse husbandry and improving its effectiveness in the coming years.

2. Collecting semen from stallions

There are a few methods of collecting semen, beginning with the oldest, applied during the first attempts at collection, ending with ones modified in such a manner, so that the method of collecting semen meets set requirements, as well as maximizes safety and ease of use. While choosing a method a decision has to be made, one which will allow for collection of material which will not be contaminated in any way or with lowered value. During semen collection, the stallion must be protected from possible injuries or infections. It is important to not inhibit the stallion's sexual drive and an examination of the collected ejaculate allows for an unbiased evaluation of the reproductor's fertility.

One of the oldest methods of collecting semen was to source it from the vaginal canal of the mare being bred. This method had been in use at the turn of the 19th and 20th centuries.

The semen was collected from the vaginal canal with the use of hands, a syringe or a designated spoon. Even then, despite the method being rather easy to implement, semen was collected directly from the vaginal canal during natural service, which does not always allow obtaining a sufficient amount of ejaculate. The amount which was obtained successfully is polluted with mucus, leading to the dying of sperm.

The next method involved collecting semen using a sponge ... with the sperm squeezed into a container. This method had been initiated and popularized by Ivanov in the year 1906.

The next method of collecting semen was to interrupt the ejaculation process during natural breeding and collection of the dripping ejaculate onto a funnel and into a container. Unfortunately, this method did not allow for a collection of the semen's full volume, meaning its examination will not be reliable.

In the 1920s, the invention and use of condoms began, which were dressed onto the stallions before erection and taken off right after. This method can be counted as more professional, as the obtained semen was clean and kept all of its properties. A technique which widely differed from its predecessors was the fistula method of semen collection, which was widely used by Životkov in the years 1936-1938. After mounting the mare, the stallion would ejaculate, with the use of the fistula, into a container. Before doing this there was a need to move the bandaged tail out of the way.

The application of an artificial vagina has come to be revolutionary in the process of collecting semen. The preparation process for the stallion to ejaculate into the artificial vagina is the same as with natural breeding. The most important aspect is to minimize the risk of infection.

To sexually excite the prepared stallion a teaser mare or phantom mare is used. Correctly, the phantom mare has found widespread application due to the ease of introduction of the collection process. The first phantom mare was created by Professor Tadeusz Olbrycht in Lvov in 1953. It was important for the phantom mare to be a stationary and stable object which slightly imitates the outline of posture of a mare without any danger to the stallion or staff. Phantom mares standing on two legs are more favoured, due to their stability and safety. The phantom mare must be covered with a soft, durable material that is easy to wash and disinfect. The dimensions may vary, certain models possess a regulatory function. Some phantom mares have the option of permanently installing an artificial vagina. The artificial vagina requires human operation, especially in the case of a stallion slipping which can lead to an injury of the penis. To encourage the stallion to mount the phantom mare a teaser mare in heat is used, who is placed before or next to the phantom mare. With the correct training almost, all stallions can be habituated to this method of semen collection. [Tischner, 2010]

The first artificial vagina had been created by Salzman in the year 1930. Until that point there was a few categories of available models. The first one was an artificial vagina with a stiff, external cylinder without a system of pressure regulation inside the vaginal canal, with a rubber, heavy container. The next type was an artificial vagina with an elastic, external cylinder. The best solution was the use of the newest, open vaginal model. During ejaculation, the semen is collected directly into a funnel that is connected to a container. During full erection, the glans penis is positioned outside the artificial vagina. The collection of semen with this type's use is widely favoured due to the possibility of obtaining fractions or single discharges

of the ejaculate, that are both non-polluted and allow for maintenance of control over the entire ejaculation's process [Tischner, 2010].

3. Oestrus synchronization

Oestrus synchronization is one of the procedures aimed at manipulating the female reproductive cycle to increase fertility and, consequently, performance. This method consists of inducing heat and ovulation on scheduled dates. This method is applied due to difficulties detecting oestrus or determining the optimal time for breeding or insemination. All of this results in an unsatisfactory result of female reproductive performance in farm animals. The most important element in regulating the oestrus cycle in both horses and other animals is the corpus luteum. The perspective of its stimulation or inhibition with the use of correct progestogens impacts the effectiveness of control over the cycle. The definition of oestrus cycle and ovulation regulation includes controlling the timing of ovulation, inducing heat and ovulation in anoestrous females as well as attempts to prolong the duration of heat [Zwierzchowski et.al, 1997].

4. Sperm sorting for sex selection

Controlling the sex of offspring according to production goals plays an important role in modern animal breeding. This technology is important for improving both productivity and economic efficiency. The idea of being able to regulate sex by sorting sperm with the use of flow cytometry first came up in the eighties. The sperm separation process allows deciding the desired sex of the offspring. Horse breeders generally prefer a higher proportion of female foals. The sex of the incoming individual is determined (established) in the moment when fertilization first occurs. The process of segregation can be used thanks to long-standing experiments. The most important discovery, which was crucial to the success of this method and allowed for it to happen was proving that the sex of individuals being born is determined by chromosomes, which are situated in the sperm, chromosome X (female), of which there is 50% and chromosome Y (male), of which there is also 50%.

Research further proved that there is a difference to the chromosomes present in sperm. The Y chromosome is slightly smaller than the X chromosome. The difference is very small, however based off of it, more attempts were made to segregate the sperm, which resulted in a positive outcome. This method has found great success in the breeding of bovines, the process of sex selection being widely used. Unfortunately, in the case of horses, same as with artificial insemination the results are less satisfactory than with bovines. In this situation stallion sperm cells are more sensitive to the sorting process. A big portion dies out during sorting, which directly impacts the reproduction performance of such semen. Regardless of it, many breeders take the risk and attempt inseminations using sex-sorted semen. [Tischner, 2014; Zwierzchowski i in., 1997].

Another method of choosing the desired sex is to identify the sex of embryos. For this purpose, a few methods are used, however the one used currently is the molecular one, which consists of collecting a fragment of the DNA strand and identifying it. An upside of this method is the miniscule amount of material needed that is collected from the embryo in terms of labelling the sex.

5. Transplantation of embryos

This is one of the modern biotechnological methods used in horse reproduction. It consists of acquiring an embryo which has formed inside a donor mare, assessing its value and with the correct preparation, transporting it into the uterus of the recipient mare. It increases female reproductive performance and accelerates breeding progress. A transfer of embryos is a good solution in many situations. The main upsides of this method are acquiring offspring from outstanding mares that are for example used in sports without the need for a break due to pregnancy or the strain it puts on the body. Thanks to this technology it is possible to acquire more than one foal in the span of a year from a mare that has given valuable offspring, therefore allowing for a big number of embryos to be acquired during the breeding season. The next reason for the use of embryo transplants is acquiring a foal from a young mare, which has reached sexual, but not reproductive maturity. The same applies in the case of mares too advanced in age for breeding, but with a genetical value or in the case of problematic mares who cannot give birth due to many factors. This method can be applied with mares who often fall pregnant with twins and therefore have a high rate of miscarriages. Transplantation of embryos can have an inter-species character and could be used for conservation efforts in regards to endangered species of equines [Przewoźny, n.d.; www.konierzrod.pl].

A very important element of embryo transplants in farm animals is superovulation. An induction of this phenomenon consists of applying the correct number of gonadotropic hormones with the goal of increasing the amount of ovulation, so that a much greater number of embryos gets created within one cycle. Superovulation has an impact on the success of the transplantation method. Factors influencing the number of embryos that are viable for transplanting include the conditions that occurred during fertilization and the formation of embryos, the stage of the oestrus cycle, the ovarian response to the hormones given. The occurrence of superovulation in most part relies on the state of the mare's ovary from which the embryos are being collected. In contrast to different species of farm animals in case of horses there are many barriers to the process of superovulation. Embryos obtained this way are of low quality which results in a low percent of effective implantations. This is why, in the case of embryo transplants in horses, the embryos used usually come from natural oestrus cycles [Zwierzchowski i in., 1997].

The first offspring coming from an embryo transfer in horses were born in Japan and England. In Poland, the first two foals were born in the year 1976 with the use of a combined surgical and non-surgical method of embryo transplantation, which came from England. The next two were born after six more years, with the use of a non-surgical method. Due to being rather easy and non-harmful in appearance of the embryo obtaining process, it has been accepted by most breeding associations. Currently it is gaining popularity all over the world and is widely used. In Poland this technology is in its "early stage". Obstacles in its implementation can be summed up to problems with inducing superovulation, as well as a species-specific capsule which forms on the inner surface of the embryonic capsule around the 6-7 day after in-vitro fertilization had taken place. Damaging this capsule turns further development impossible. After selecting the donor mare, a preparation process is carried out, including synchronization of oestrus cycles with the recipient mare. Both mares have to be in the same stage of the cycle. The embryo collection takes place around the 6-7 day after ovulation, meaning the receiver mare must also be this many days after ovulating. For one donor

mare there are even up to eight receiver mares being synchronized, since hormonal stimulation does not always give expected results.

5.1. Methods of obtaining embryos

Obtaining embryos can be done with the use of a surgical and non-surgical method. The non-surgical method consists of flushing the uterus with a sterile medium using a catheter with an inflatable balloon. The procedure takes place between the 6 and 11 days of ovulation. The efficiency of embryo recovery from healthy mares' ranges from 50% to 80%, meanwhile the result of a procedure being done on the 6th day is much worse due to a delay in transportation of the embryo through the oviducts which occurs in certain mares [Tischner, 2006; www.konieirumaki.pl].

5.2. Methods of embryo transplantation

The choice of method has a decisive impact on the conception rate. The surgical, or operative, method is laparotomy performed along the linea alba or in the flank region. Despite being invasive and risky, this technique provides a more consistent conception rate (60–80%) than the non-invasive method. Although the non-surgical method is technically easier due to the structure of the cervix, the results of embryo transplantation using this approach are irregular and unsatisfactory (20–60%). This is due to manipulations within the cervix, which may lead to endometritis and induce luteolysis.

However, a new non-surgical technique has recently been developed, involving the introduction of the Polański vaginal speculum into the mare's vagina. By spreading the arms of the speculum, access and visibility of the cervical os are achieved. Then, using forceps, the cervix is gently drawn closer to the vagina, and the embryo—placed in a straw—is inserted into the uterus of the mare using a transfer gun. This method can yield conception rates exceeding 90% [Tischner, 2006; www.konieirumaki.pl]

5.3. Embryo preservation

In horses, embryo preservation is more complex, as embryos do not tolerate freezing and thawing in liquid nitrogen very well. They are better preserved before the capsule is fully formed and when their diameter does not exceed 300 µm. The success rate of conception is influenced by the method used for embryo freezing. The conception rate following the transfer of frozen embryos is lower than that achieved with fresh embryo transfers. After transplantation and confirmation of pregnancy up to the 45th day, hormones are administered to maintain the pregnancy during the period of highest risk of abortion [Tischner, 2006; www.konieirumaki.pl].

5.4. Embryo splitting

This term refers to the possibility of obtaining monozygotic twin foals from a mare. Twin pregnancies are undesirable, and when they do occur, they are typically dizygotic. By dividing an embryo into two halves and placing them into the uterus of a recipient mare, researchers - after numerous experiments - have successfully produced five pairs of monozygotic twin foals [Tischner, 2006]. In Poland, embryo transfer is not yet widely practiced; however, each year an increasing number of breeders choose to take this progressive step in equine reproduction.

6. In Vitro Fertilization (IVF)

The in vitro method of assisted reproduction in mammals involves obtaining embryos in a laboratory environment. The entire procedure includes the collection of immature female oocytes from the ovaries, their in vitro maturation, in vitro fertilization, and subsequent in vitro incubation of the resulting embryos. Between the sixth and seventh day after fertilization, the embryos can be transferred into the uterus, where they must successfully implant and develop properly into a foetus.

In horses, despite numerous trials and studies, this method has resulted in the birth of only two foals derived from embryos obtained from oocytes fertilized in vitro, but matured within the mare's ovary—that is, in vivo.

The failure of this method is associated with difficulties in recovering oocytes from ovarian follicles, achieving successful oocyte maturation under in vitro conditions, and capacitating stallion sperm for oocyte fertilization. Intensive research has led to the development of a technique involving the surgical introduction of a sperm cell directly into the oocyte using a microscope - Intracytoplasmic Sperm Injection (ICSI). This procedure employs a micromanipulator. Surprisingly, the sperm cells introduced in this manner may be immotile or even lack a flagellum. Additionally, spermatozoa with identified sex chromosomes are used, allowing for the selection of the future offspring's sex. The ICSI method is safe and is also applied in assisted reproduction in humans [www.horseplanet.pl].

7. Cloning of horses

Cloning is a modern biotechnology based on the asexual reproduction of mammals. The clones obtained are genetically identical, which allows for the reproduction of exceptionally valuable individuals. However, their phenotypes may often differ. The efficiency of this biotechnology remains low, although many species have already been successfully cloned. This method does not contribute to genetic improvement of a species, as it prevents genetic variability by creating a genetic copy of the cloned animal. Nevertheless, this biotechnology may play a crucial role in the conservation of endangered animal species.

In such cases, somatic cloning is particularly challenging due to difficulties in obtaining oocytes and transplanting reconstructed embryos. To overcome this, interspecies somatic cloning is applied. This involves transplanting the nuclei of somatic cells - most commonly fibroblasts derived from the skin of wild animals obtained via biopsy - into enucleated oocytes collected from females of a closely related species with well-understood reproductive biology. The feasibility of cloning was demonstrated by Wilmut and his collaborators, who proved that a reprogrammed somatic cell can revert to the embryonic state and initiate embryonic development anew, resulting in the birth of a genetic copy of the donor. One cell, called the karyoplast, originates from the animal to be cloned. The other, the cytoplast, is a mature oocyte reconstructed by removing the polar body and metaphase plate. It contains RNA and proteins that reprogram the genes of the somatic cell. The resulting embryo uses the donor cell's DNA as a template for gene expression. The embryo is then transferred into a surrogate mother, which gives birth to the clone of the donor animal.

A breakthrough moment in cloning occurred in 1996, when the sheep *Dolly* was successfully cloned. In subsequent years, other livestock species were cloned. At present, the reproduction of any mammalian species is possible. The first clone within the Equidae family

was produced in 2003, consisting of three foals created by fusing a mule's skin cell with a mare's oocyte. In the same year, the first cloned horse, the mare *Prometea*, was born. She was produced from a fibroblast obtained from an adult mare - the same mare that served as the surrogate mother. Thus, the donor mare gave birth to a foal that was her own genetic clone [Gajda and Smorağ, 2007; Tischner, 2006].

8. Summary

The introduction of modern assisted reproduction techniques in horses requires a thorough understanding of the anatomy and reproductive physiology of both mares and stallions. Observation of horses and the ability to recognize their behavioural patterns are also essential. A breeder's keen eye plays a crucial role, as it enables timely and appropriate responses when necessary.

When breeding mares naturally, two methods are available. The first is herd mating, which, although highly effective, is currently used primarily in the breeding of primitive breeds. This method limits the breeder's ability to select a specific stallion for a given mare. The second method is hand mating, a planned and controlled pairing determined by the breeder, ensuring accurate pedigree records. The main challenge in this method is the precise determination of the time of ovulation, which requires behavioural observation and ultrasonographic examination of the mare.

Artificial insemination-initiated research into advanced reproductive technologies. It allows for the prevention of infertility and the transmission of infectious diseases in horses, improves reproductive statistics, accelerates breeding progress, and provides access to a broader selection of stallions.

Oestrus synchronization involves intentional manipulation of reproductive processes in mares to improve fertility and reproductive efficiency. Regulation of the oestrous cycle enables precise determination of the optimal breeding time.

Sperm sexing and embryo identification are additional modern technologies that allow breeders to determine the desired sex of offspring. These methods enhance reproductive efficiency and economic effectiveness.

Embryo transfer is a highly popular and widely applied technique abroad. It serves to increase the reproductive efficiency of genetically valuable mares. The ability to obtain offspring from a successful sport mare without interrupting her training due to pregnancy is an ideal solution for breeders of world-class horses.

Cloning has been a source of controversy for many years. This modern technology enables the asexual reproduction of mammals. Numerous cloned horses have already been born. Cloning has proven to be an extraordinary opportunity to reproduce outstanding animals possessing identical genetic material - particularly valuable for those that were castrated early in their careers, suffered injuries, or even died.

The future of innovative assisted reproductive technologies in equine breeding is directed toward improving fertility and productivity. These advancements represent significant achievements in breeding progress and genetic development.

Bibliography:

1. Gajda, B. i Smorąg, Z.; 2007; Wykorzystanie metod biotechnologii rozrodu w zachowaniu bioróżnorodności zwierząt; *Biotechnologia* 4(79), 55-65.
2. Przewoźny, M.; n.d.; Embriotransfer i inne nowoczesne techniki w rozrodzie koni; *Equi Vet Serwis*, 12-15.
3. Tischner, M.; 2014; Osiągnięcia w rozrodzie koni - bariery i nadzieje; *Wieś i Doradztwo* 3, 29-34. ISBN 1234-5725.
4. Tischner, M.; 2010; Weterynaryjne i hodowlane aspekty rozrodu koni: ogier; Wydawnictwo Drukrol, Kraków. ISBN 978-83-930023-0-6.
5. Tischner, M.; 2006; Biotechnologia w rozrodzie koni; *Życie weterynaryjne* 81(1), 19-30.
6. Zwierzchowski, L., Jaszczak, K., Modliński, J.A.; 1997; Biotechnologia zwierząt; Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa. ISBN 83-01-12307-9.

Web references

7. www.horseplanet.pl, 4.12.2025.
8. www.konieirumaki.p, 4.12.2025.
9. www.konierozrod.pl, 4.12.2025.

17. CZAS JAKO ZJAWISKO EMERGENTNE. SYMETRIA I ASYMETRIA UKŁADÓW

mgr Sara Leiss

badacz niezależny

Sankt Marien-Hospital Buer, Niemcy

E-mail: sleiss@st.swps.edu.pl

1. Wstęp

Artykuł przedstawia czas jako zjawisko emergentne, wynikające z dynamiki i asymetrii układów. Analiza teoretyczna interpretuje czas nie jako niezależny wymiar, lecz konsekwencję różnic między stanami w układach dynamicznych. W układach symetrycznych, które pozostają w równowadze, czas przestaje istnieć. Zaproponowane podejście sugeruje, że doświadczenie czasu jest konstruktem percepcyjnym odzwierciedlającym zmiany zachodzące w rzeczywistości, a nie niezależną właściwością Wszechświata. Konsekwencją powyższej teorii jest wniosek, że subiektywne doświadczenie czasu wynika z procesów neurokognitywnych odpowiedzialnych za detekcję zmian w otoczeniu oraz integrację bodźców w spójną, sekwencyjną reprezentację zdarzeń, tworząc temporalne narracje warunkujące percepcję przepływu czasu.

1.1. Podstawy teoretyczne

Badania nad czasem prowadzone są w fizyce, filozofii oraz naukach kognitywnych, przy czym każda z tych dziedzin definiuje go w odmienny sposób. W fizyce czas traktowany jest albo jako wymiar opisujący zmiany w systemach, albo jako zewnętrzny parametr w mechanice kwantowej. Alonso-Serrano i in. (2020) dowodzą, że czas wyłania się z przejść między stanami kwantowymi, a nie istnieje w sposób fundamentalny, natomiast Butterfield i Bouatta (2015) wykazują, że czas może powstawać efektywnie w wyniku ograniczeń systemu, a nie jako absolutny wymiar. Filozofowie – od Kanta po współczesnych badaczy emergencji – postrzegają czas zarówno jako formę percepcji, która porządkuje doświadczenie, jak i jako pojęcie ontologiczne wtórne wobec procesów fizycznych. Barbour (1999) proponuje, że czas wyłania się ze zmian w konfiguracjach systemów, Price (1996) wiąże strzałkę czasu z procesami fizycznymi, a nie z absolutną rzeczywistością, natomiast Rovelli (2018) podkreśla relacyjny charakter czasu w kontekście grawitacji kwantowej. W naukach kognitywnych percepcja czasu zależy od struktur mózgu, takich jak hipokamp i kora przedczołowa, które wykrywają zmiany stanów i porządkują zdarzenia. Amadeo i in. (2022) wykazują, że zaburzenia tych mechanizmów w schizofrenii prowadzą do dezorientacji temporalnej, podczas gdy Thönes i Oberfeld (2017) dostarczają meta-analitycznych dowodów na zmienioną percepcję czasu w zaburzeniach psychiatrycznych.

1.2. Problem definiowania czasu

W trakcie badań nad percepcją czasu i jej zaburzeniami, w tym u osób chorujących na schizofrenię, napotkano istotną trudność wynikającą z rozbieżności w definicjach samego czasu, które znacznie różnią się w zależności od dyscypliny naukowej, utrudniając osiągnięcie spójnego konsensusu.

Zrozumienie percepcji określonego zjawiska jest utrudnione, gdy jego natura pozostaje nie w pełni poznana. Dlatego w początkowej fazie badań skoncentrowano się na metaanalizie współczesnej wiedzy dotyczącej czasu. Proces ten, wraz z wynikającymi z niego wnioskami, nieuchronnie prowadzi do refleksji nad fizyką i filozofią – dziedzinami, które nie tylko starają się wyjaśnić istotę czasu, lecz również uchwycić fundamentalne zasady rządzące naszą rzeczywistością.

Na podstawie meta-analizy wysnuto wnioski, które, choć odbiegają od głównego nurtu naszych badań, wydają się stanowić istotny wstęp do pogłębionej analizy zjawiska, które w potocznym ujęciu określa się mianem czasu. Wyniki tych analiz zaprezentowano w niniejszym artykule. W celu uniknięcia powtarzania obszernych streszczeń oraz powszechnie dostępnych informacji przystąpiono bezpośrednio do reinterpretacji aktualnej wiedzy naukowej.

Niniejsze opracowanie ma charakter teoretyczno-filozoficzny, osadzony na pograniczu fizyki fundamentalnej, filozofii i neurokognitywistyki. Nie stanowi nowej teorii fizycznej, lecz propozycję reinterpretacji znanych modeli czasu w perspektywie emergencji. Celem jest ukazanie, że czas może być traktowany nie jako niezależny wymiar rzeczywistości, lecz jako efekt asymetrii i różnic stanów w systemach dynamicznych – zarówno fizycznych, jak i poznawczych. W niniejszej pracy zastosowano narzędzia matematyczne w celu logicznego uzasadnienia rozważań, a nie w celu formułowania nowych teorii fizycznych.

2. Symetria i asymetria układów

Zrozumienie natury czasu wymaga przede wszystkim analizy struktury i właściwości Wszechświata. Już na wstępnym etapie takiej analizy nasuwa się wniosek, że podstawową cechą Uniwersum jest jego dynamiczny charakter. Istnienie dynamiki w dowolnym układzie warunkowane jest obecnością asymetrii, co oznacza, że układy dynamiczne są z natury asymetryczne. Wszechświat stanowi przykład takiego układu, dlatego równanie opisujące jego istotę powinno uwzględniać tę asymetrię.

Natomiast układy statyczne to te, które dążą do symetrii – odwracając tę zależność – układy symetryczne są względnie stabilne i im większa symetria, tym większa niezmiennosc układu. Należy podkreślić, że w rzeczywistych warunkach nie istnieje układ charakteryzujący się idealną symetrią. Nawet w strukturach krystalicznych o wysokim stopniu symetrii zachodzą procesy termodynamiczne i kwantowe, które prowadzą do odchylenia od doskonałego stanu teoretycznego.

2.1. Metody analizy układów

2.1.1. Przestrzeń stanów i kierunek zmian

Jeżeli przyjmiemy perspektywę, w której konstruujemy teorię układów dynamicznych niezależnie od ich klasycznej definicji, zakładającej zmienność stanu układu w funkcji czasu t , wówczas układ taki można scharakteryzować poprzez dwie podstawowe właściwości:

przestrzeń stanów oraz wektor kierunków zmian.

2.1.2. Przestrzeń stanów (ang. *state space*) obejmuje zbiór wszystkich potencjalnych konfiguracji, jakie układ może przyjąć ($A_0 \rightarrow A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow \dots$). To nie jest przestrzeń czasowa, lecz ontologiczna: opisuje możliwość istnienia układu. Zatem podstawowym elementem rzeczywistości jest potencjał stanu, a nie czasowy proces.

2.1.3. Kierunek zmian opisuje natomiast trajektorię ewolucji układu w tej przestrzeni. Kierunek ten może mieć charakter częściowo spontaniczny (determinowany przez wewnętrzną emergencję lub fluktuacje stochastyczne) oraz częściowo deterministyczny, wynikający z wewnętrznych uwarunkowań systemu, takich jak pamięć układu czy struktura przyczynowa.

W tym ujęciu to fundamentalna redefinicja dynamiki – z czasowej na relacyjną.

W ujęciu klasycznym: $A = A(t) \rightarrow$ dynamika = zmiana w czasie.

W ujęciu relacyjnym: $\Delta A = A_1 - A_0 \rightarrow$ dynamika = różnica (bez pojęcia t).

2.2. Czas w fizyce kwantowej i relatywistycznej

W mechanice kwantowej czas traktowany jest jako parametr zewnętrzny, podczas gdy w teorii Einsteina ma on charakter względny i zależy od pola grawitacyjnego. Choć na pierwszy rzut oka wydaje się, że te dwie koncepcje są ze sobą sprzeczne, po przededefiniowaniu pojęcia czasu widać, że niekoniecznie tak jest.

Zgodnie z zasadami mechaniki kwantowej, przed dokonaniem pomiaru układ kwantowy znajduje się w stanie superpozycji możliwych stanów własnych. Stan ten opisywany jest funkcją falową Ψ . Dla uproszczenia rozważań przyjmijmy, że superpozycję oznaczamy symbolem A_0 . W wyniku kolapsu funkcji falowej układ kwantowy przyjmuje określony stan własny, który w niniejszym opisie oznaczmy jako A_1 .

Wracając do pierwszego wniosku, należy zauważyć, że układ dynamiczny, jakim jest Wszechświat, charakteryzuje się ciągłością przemian, zachodzących zarówno w sposób spontaniczny (wynikający z nieskończonej liczby możliwych stanów kwantowych), jak i w sposób determinowany przez ślad (*footprint*) zdarzeń przeszłych. Rzeczywistość można zatem postrzegać jako strukturę, która w pewnym sensie nadbudowuje się na podstawie wcześniejszych stanów i procesów. Dla zilustrowania tej zależności można posłużyć się prostym przykładem: to łyżka miesza herbatę, a nie odwrotnie. Oznacza to, że zdarzenia często powtarzające się w obrębie rzeczywistości zwiększają prawdopodobieństwo wystąpienia podobnych zjawisk w przyszłości, mimo istnienia teoretycznie nieograniczonej liczby możliwych stanów.

2.3. Definicje układów statystycznych i dynamicznych

2.3.1. Układy statyczne

Upraszczając, układ statyczny można zdefiniować jako taki, w którym stan końcowy nie różni się od stanu początkowego, a zatem nie zachodzi żaden proces zmiany; formalnie $A_0 = A_1$.

2.3.2. Układy dynamiczne

Natomiast układ dynamiczny to układ, w którym stan końcowy A_1 różni się od stanu początkowego A_0 ; $A_0 \neq A_1$. Reasumując, układ dynamiczny, można zdefiniować jako taki, w którym zachodzi przejście ze stanu A_0 do stanu A_1 , przy czym dynamika tego układu jest określona różnicą pomiędzy tymi dwoma stanami.

Może się to wydawać oczywiste, jednak warto przyjrzeć się tym pojęciom uważniej, zwłaszcza w kontekście aspektu czasu.

2.4. Model emergentnego czasu

W ramach mechaniki kwantowej wszystkie układy kwantowe pozostają w określonym stanie początkowym A_0 , zgodnie z zasadą superpozycji stanów. W tym kontekście układ można traktować jako względnie statyczny – nie zachodzą w nim obserwowalne różnice pomiędzy stanami, a czas pełni funkcję parametru zewnętrznego. Dopiero w chwili, gdy kwant przyjmuje nową pozycję, zmieniając stan z A_0 na A_1 , zachodzi dynamiczny proces transformacji, którego natura jest opisywana przez postulaty mechaniki kwantowej dotyczące redukcji funkcji falowej.

Należy zauważyć, że różnice między stanami są interpretowane w kategoriach upływu czasu, co stanowi uproszczenie. W rzeczywistości czas nie jest pierwotnym czynnikiem determinującym zmianę, lecz raczej konsekwencją zaistniałej transformacji. W tym ujęciu czas należy traktować jako parametr emergentny, który odzwierciedla skutki zachodzących procesów kwantowych, a nie jako niezależny wymiar, w którym procesy te „się odbywają”.

Przykład kolapsu funkcji falowej został użyty nie jako źródło powstawania czasu, lecz jako ilustracja przejścia układu z jednego stanu do innego – procesu, którego istnienie warunkuje pojawienie się czasu jako miary zmiany.

Konkludując, w tym modelu teoretycznym czas traktujemy jako skutek uboczny dokonanej zmiany. Takie podejście pozwala na głębsze zrozumienie relacji między dynamiką układów kwantowych a koncepcją czasu w fizyce teoretycznej.

2.5. Zależność czasu od zmiany stanu

Zmiana stanu = początek czasu

Niech:

A_0 = stan początkowy układu

A_1 = stan po zmianie

Wtedy różnica między nimi:

$$\Delta A = A_1 - A_0$$

W przypadku całkowitego braku zmian w badanym układzie ($\Delta A = 0$), można w ujęciu teoretycznym stwierdzić, że czas przestaje istnieć. Należy zaznaczyć, że jest to znaczące uproszczenie, gdyż stan taki ma charakter czysto idealizowany. W rzeczywistości każdy układ podlega ciągłym zjawiskom kwantowym, ruchowi w polach potencjału oraz fluktuacjom próżni. Nawet układy znajdujące się w równowadze termodynamicznej podlegają niewielkim fluktuacjom, ponieważ fundamentalną cechą Wszechświata jest dynamika, a układ idealnie statyczny nie istnieje.

W sytuacji, gdy zachodzi zmiana ($\Delta A \neq 0$), czas pojawia się jako konsekwencja tej zmiany. W odróżnieniu od klasycznego ujęcia w równaniu Schrödingera, gdzie ewolucja

czasowa funkcji falowej determinuje zmianę układu, w omawianym kontekście czas nie jest pierwotnym parametrem, lecz efektem ubocznym zachodzących procesów.

2.6. Rola asymetrii

Asymetria w układzie – rozumiana jako brak pełnej symetrii w rozkładzie energii, konfiguracji lub właściwościach fizycznych – jest warunkiem koniecznym dla obserwowanych zmian w systemie.

Niech D oznacza dynamiczność układu:

$D = 1$ – ogólna uproszczona teoretyczna symetria układu

Doskonale symetryczny układ $\rightarrow D = 0 \rightarrow$ brak czasu

Asymetryczny układ $\rightarrow D > 0 \rightarrow$ pojawia się czas

Czas jako efekt zmian, można zapisać bardzo prosto:

$$\text{czas} \sim \Delta A \times D$$

Co oznacza: czas pojawia się tylko wtedy, gdy zachodzą zmiany, a układ jest asymetryczny.

Jeżeli w układzie zachodzą kolejne zmiany:

$A_0 \rightarrow A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow \dots$, to całkowity czas powstaje jako suma różnic w układzie:

$$\text{czas całkowity} \sim \sum (\Delta A_i \times D_i)$$

W tym ujęciu czas można traktować jako miarę obserwowalnych zmian, skalowaną przez stopień asymetrii układu:

$$t \sim f(\Delta A, A)$$

gdzie: ΔA – zmiana stanu układu

A – parametr mierzący asymetrię układu, (np. w sensie statystycznym lub energetycznym).

Powyższy wzór ma charakter jakościowy i służy do conceptualnego ujęcia relacji między zmianą a asymetrią. Wielkość ΔA oznacza różnicę między kolejnymi stanami układu – fizycznego, informacyjnego lub neuronalnego – natomiast A (D) wyraża stopień jego asymetrii. Funkcja f nie ma charakteru liczbowego, lecz relacyjny: opisuje zależność, w której pojawienie się różnicy ($\Delta A \neq 0$) przy istniejącej asymetrii ($A > 0$) prowadzi do emergencji czasu jako miary zmiany. W stanie doskonałej symetrii ($A \rightarrow 0$) pojęcie czasu traci sens operacyjny.

Zaistniała zmiana stanowi kluczowy czynnik determinujący dynamikę układu. W przypadku braku różnicy pomiędzy stanami A_0 a A_1 układ miałby charakter statyczny, co stoi w sprzeczności z naturą naszego Wszechświata. Przejście od stanu A_0 do stanu A_1 oraz kolejne zmiany, które nadbudowują rzeczywistość, są niezbędnym warunkiem funkcjonowania układu dynamicznego, ponieważ jego istotę stanowi właśnie ta różnica, natomiast motorem zmian jest asymetria.

W tym ujęciu czas pojawia się nie jako niezależny wymiar, ale jako produkt uboczny zachodzących zmian.

3. Wnioski

3.1. Percepcja czasu przez człowieka

Ze względu na ograniczenia naszej biologicznej percepcji, jesteśmy skłonni do doświadczenia iluzji linearności i sekwencyjności zjawisk, które w rzeczywistości mogą przebiegać w sposób nieliniowy lub nieuporządkowany. Konstrukty przyczynowo-skutkowe

pełnią w tym kontekście ważną funkcję regulacyjną: umożliwiają organizację doświadczenia i nadanie sensu otaczającej rzeczywistości. Bez nich nasza percepcja uległaby dezorganizacji, a świat wokół nas straciłby swój koherentny charakter. Postrzeganie czasu jako jednolitego, liniowego kontinuum zapewnia świadomości względną spójność i umożliwia przewidywanie zdarzeń, wnioskowanie, przeprowadzanie procesów myślowych opartych o analizę i syntezę, lecz jednocześnie oddala nas od bezpośredniego poznania czasu takim, jakim jest on w ontologicznej rzeczywistości. Różnicowanie stanu A_1 od stanu A_0 stanowi w tym kontekście czynnik o fundamentalnym znaczeniu. Układ rejestrujący zmiany w otoczeniu, obejmujący twór siatkowaty, wzgórze, korę czołowo-ciemieniową, ciało migdałowe i hipokamp, jest kluczowy dla tworzenia percepcji czasu. Jego główną funkcją jest wykrywanie i aktualizowanie informacji o zmieniającym się środowisku, co pozwala mózgowi odróżnić kolejne momenty doświadczenia. Twór siatkowaty reaguje na nowe bodźce, wzgórze filtruje i przekazuje istotne sygnały, a kora czołowo-ciemieniowa organizuje je w uporządkowaną sekwencję zdarzeń. Ciało migdałowe moduluje odbiór czasu w zależności od emocjonalnego znaczenia bodźców, natomiast hipokamp porównuje aktualne wrażenia z zapisanymi wspomnieniami, umożliwiając identyfikację różnic między stanem „wcześniej” a „teraz”. Dzięki temu układ ten pozwala postrzegać czas jako następstwo zmian w otoczeniu, stanowiąc podstawowy mechanizm temporalnej organizacji percepcji. Ludzka percepcja czasu jest uproszczonym odwzorowaniem zmian w układach, umożliwiającym koherentne przewidywanie zdarzeń i wnioskowanie przyczynowo-skutkowe. Percepcja liniowości czasu wynika z ograniczeń naszego systemu nerwowego i sposobu przetwarzania informacji, a nie z ontologicznej konieczności. Podsumowując, czas jest konstruktem poznawczym, który powstaje, gdy system poznawczy (mózg) wykrywa różnice między stanami percepcyjnymi.

3.2. Percepcja czasu a schizofrenia

Percepcja czasu stanowi podstawowy fundament prawidłowego funkcjonowania poznawczego. Struktury mózgowe takie jak grzbietowo-boczna kora przedczołowa (DLPFC), hipokamp i mózdzek, które integrują informacje o sekwencji zdarzeń, wykazują u osób ze schizofrenią istotne zmiany zarówno strukturalne (np. zmniejszona objętość istoty szarej) – jak i funkcjonalne (m.in. obniżona aktywność w zadaniach czasowych lub sekwencyjnych). Dysfunkcja tych obszarów może prowadzić do poważnych deficytów w myśleniu przyczynowo-skutkowym, a w konsekwencji do typowej dla schizofrenii dezorganizacji myślenia. Badania nad rolą struktur mózgowych odpowiedzialnych za percepcję czasu, a dokładniej mówiąc ośrodków rejestrujących zmiany w otoczeniu, mogą dostarczyć kluczowych wglądów w mechanizmy leżące u podstaw tej choroby.

Zagadnienia dotyczące percepcji czasu w oparciu o teorię czasu jako zjawiska emergentnego oraz jej zaburzeń w ludzkim mózgu zostały w artykule przedstawione w sposób ogólny i stanowią obszar dalszych badań.

4. Podsumowanie i wnioski

Analiza przedstawionych zależności pozwala przyjąć twierdzenie, że czas niekoniecznie jest niezależną kategorią ontologiczną, lecz może być rezultatem procesu zmiany zachodzącego w układach o charakterze asymetrycznym. To właśnie asymetria – rozumiana jako różnica pomiędzy stanami A_0 i A_1 – stanowi pierwotne źródło dynamiki, z której czas

wyłania się jako zjawisko wtórne, emergentne. W tym kontekście upływ czasu nie opisuje rzeczywistości, lecz ją odzwierciedla, będąc miarą ciągłych transformacji materii i energii. Ujęcie to podważa tradycyjne, linearne rozumienie czasu, wskazując, że jego doświadczenie jest funkcją percepcji, a nie właściwością samego Wszechświata. Czas jawi się nie jako tło zdarzeń, lecz jako konsekwencja ich zaistnienia – jako logiczny ślad asymetrii wpisanej w strukturę bytu.

Ponieważ każdy układ materii posiada pewien stopień asymetrii – wynikający z fluktuacji kwantowych, różnic energii czy konfiguracji przestrzennych – zachodzi logiczny ciąg:

asymetria → dynamika → zmiana stanu → czas.

Oznacza to, że tam, gdzie jest materia, czas zawsze istnieje. Idealnie symetryczne układy są czysto teoretyczne i nie występują w naturze, więc w praktyce emergentny czas jest nieprzerwany i wszechobecny, a koncepcja ta służy przede wszystkim do interpretacji relacji między dynamiką układów a percepcją upływu czasu. Struktury mózgowe rejestrujące zmiany w otoczeniu będą odgrywały w tym procesie kluczową rolę. Takie podejście pozwala na reinterpretację dotychczasowych modeli teoretycznych i otwiera perspektywę integracji wiedzy z zakresu fizyki, biologii, kognitywistyki oraz filozofii, prowadząc do wniosku, iż czas jest emergentnym przejawem asymetrii Wszechświata oraz efektem jego nieustannej transformacji. Powyższy artykuł nie omawia problemu entropii i strzałki czasu, został on omówiony w kolejnej pracy.

Bibliografia:

Grupa A: Czas jako emergentne zjawisko, symetria/asymetria w fizyce

1. Alonso-Serrano, A., Schuster, S., & Visser, M. (2024). Emergent time and time travel in quantum physics. *Universe*, 10(2), 73.
2. Barbour, J. (1999). *The end of time: The next revolution in physics*. Oxford University Press.
3. Barbour, J. (2009). On the nature of time. *Foundations of Physics*, 40, 1263–1284.
4. Besemer, D. (2025). Emergent time and the unification of fundamental physics. SSRN.
5. Butterfield, J., & Bouatta, N. (2015). Effective spacetime: Understanding emergence in effective field theory and quantum gravity. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 52, 17-28.
6. Castro Alvarado, O. A., Doyon, B., & Yoshimura, T. (2016). Emergent hydrodynamics in integrable quantum systems out of equilibrium. *arXiv*.
7. Ellis, G. F. R. (2013). The arrow of time and the nature of spacetime. *arXiv*.
8. Englehardt, K. F. (2019). The fundamentality and emergence of time. *Synthese*, 196(4), 1441–1465.
9. Gemsheim, S. (2023). Emergence of time from quantum interaction with the environment. *Physical Review Letters*, 131, 140202.
10. Guff, T., et al. (2025). Emergence of opposing arrows of time in open quantum systems. *Scientific Reports*, 15, 87323.
11. Hübsch, T. (2024). On the emergent “Quantum” theory in complex adaptive systems. *Science Direct*.
12. Price, H. (1996). Time's arrow and Archimedes' point: New directions for the physics of

time. Oxford University Press.

13. Rovelli, C. (2018). The order of time. Riverhead Books.
14. Wüthrich, C., & Huggett, N. (2019). Out of nowhere: The emergence of spacetime in theories of quantum gravity. Oxford University Press.

Grupa B: Percepcja czasu, zaburzenia czasowe w neurokognitywistyce i psychiatrii

15. Amadeo, M. B., et al. (2022). Time in schizophrenia: A link between psychopathology and time processing. *Translational Psychiatry*, 12, 411.
16. *Frontiers in Human Neuroscience*. (2019). Neural correlates of interval timing deficits in schizophrenia. *Frontiers in Human Neuroscience*.
17. Martin, H., et al. (2014). Abnormal time experience in persons with schizophrenia. *Schizophrenia Bulletin*, 42(1), 45–56.
18. Thönes, S., & Oberfeld, D. (2017). Meta-analysis of time perception and temporal processing in schizophrenia. *Schizophrenia Research*, 188, 10–17.

Grupa C: Symetria/asymetria, dynamika układów i zmiana stanu

19. Corry, R. (2025). Finding temporal asymmetry within the many, many worlds of quantum mechanics. *Synthese*. 206, 72
20. Gemsheim, S. (2024). A link between static and dynamical perturbation theory. *arXiv*.
21. Nishikawa, T., & Motter, A. E. (2016). Symmetric states requiring system asymmetry. *Physical Review E*, 93(6), 062203.

18. UKŁADY IDEALNIE SYMETRYCZNE. WAHADŁOWY MODEL WSZECHŚWIATA

mgr Sara Leiss

badacz niezależny

Sankt Marien-Hospital Buer, Niemcy

E-mail: sleiss@st.swps.edu.pl

1. Wstęp

Podczas opracowywania modelu percepcji czasu napotkano trudności związane z jednoznacznym zdefiniowaniem samego pojęcia czasu. W artykule „Czas jako zjawisko emergentne. Symetria i asymetria układów” (Leiss, 2025) zaproponowano teorię, zgodnie z którą czas stanowi zjawisko emergentne wynikające ze zmian zachodzących w układach dynamicznych, przy czym dynamika została określona w sposób relacyjny, a nie temporalny. Jako pierwotną przyczynę zmian wskazano asymetrię układu, co doprowadziło do sformułowania tezy, że układy asymetryczne są z natury dynamiczne, natomiast układy idealnie symetryczne nie mogą występować w rzeczywistości fizycznej. Niniejszy artykuł rozwija tę koncepcję, koncentrując się na analizie natury układów symetrycznych oraz mechanizmach prowadzących do ich niestabilności.

Proponowana teoria relacyjnej niestabilności symetrii stanowi zgodne z aktualną wiedzą, a jednocześnie oryginalne ujęcie zjawiska łamania symetrii. W przeciwieństwie do standardowych interpretacji, które przypisują symetrię obiektom lub polom, teoria ta ujmuje ją jako właściwość relacji między elementami układu. Prowadzi to do wniosku, że układy idealnie symetryczne są z natury niestabilne, ponieważ wymagają absolutnej jednorodności relacji, której nie można utrzymać w rzeczywistych warunkach fizycznych. Minimalne zaburzenie relacyjne wystarcza do spontanicznego złamania symetrii. Takie podejście pozostaje zgodne z teorią pola, twierdzeniem Noether oraz współczesną kosmologią wczesnego Wszechświata, w szczególności z mechanizmami generowania fluktuacji inflacyjnych i dynamiką próżni kwantowej. W rezultacie teoria relacyjnej niestabilności symetrii dostarcza użytecznego narzędzia interpretacyjnego, które pozwala w nowy sposób opisać genezę asymetrii i struktur we Wszechświecie

Poniższa praca nie ma na celu formułowania nowych teorii fizycznych, lecz stanowi podsumowanie dostępnej wiedzy i ma charakter spekulatywny, a zastosowane równania pełnią jedynie funkcję ilustracyjną, umożliwiając bardziej przejrzyste zobrazowanie istoty omawianego zagadnienia. Jej głównym celem jest reinterpretacja znanych mechanizmów w ujęciu relacyjnym.

2. Symetria

Analizując pojęcie symetrii, można posłużyć się analogią do wagi szalkowej, na której znajdują się dwa identyczne obiekty poddane tym samym oddziaływaniom. W intuicyjnym ujęciu stan idealnej symetrii oznacza brak procesu dynamicznego, ponieważ oba elementy

pozostają w pełnej równowadze. Jednakże bardziej szczegółowa analiza wskazuje, że najmniej stabilnym elementem takiego układu nie są same obiekty, lecz struktura relacyjna, która je łączy, w tym przypadku szala. W warunkach idealnej równowagi, pozbawionej możliwości minimalnego odchylenia, relacja łącząca struktury staje się podatna na niestabilność i w konsekwencji ulega destabilizacji. Metafora ta odzwierciedla główną tezę niniejszej teorii: to nie obiekty tworzące układ symetryczny determinują jego stabilność, lecz relacje między nimi, które w stanie idealnej symetrii, prowadzą do spontanicznego złamania symetrii.

2.1. Podstawy teoretyczne

Symetria odgrywa fundamentalną rolę w fizyce klasycznej i kwantowej oraz w kosmologii wczesnego Wszechświata. W literaturze przedmiotu podkreśla się znaczenie zarówno symetrii obiektów, jak i ich wzajemnych relacji w kształtowaniu dynamiki układów fizycznych (Guth, 1981; Coleman & Weinberg, 1973; Linde, 1982). Istniejące modele inflacyjne zakładają początkową jednorodność i izotropię Wszechświata, odpowiadającą idealnej symetrii w sensie gęstości energii i własności pola (Albrecht & Steinhardt, 1982; Piazza & Vernizzi, 2013). Mechanizm spontanicznego łamania symetrii, jak opisano w klasycznych pracach Colemana i Weinberga (1973), wskazuje, że nawet w układach formalnie symetrycznych fluktuacje kwantowe mogą prowadzić do wyboru jednej z wielu równoważnych konfiguracji, co skutkuje powstaniem struktur obserwowalnych. Badania nad procesem „rozgrzewania” po inflacji (Kofman, Linde & Starobinsky, 1997) oraz rolą defektów topologicznych w wiecznej inflacji (Linde & Linde, 1994) dodatkowo pokazują, że symetria wczesnego Wszechświata może ulegać dynamicznemu łamaniu, prowadząc do powstania bogatej struktury kosmicznej. Analiza globalnej struktury inflacyjnych modeli (Linde & Mezhlumian, 1993) oraz twierdzenia o osobliwościach Penrose’a i Hawkinga (1970) wskazują, że nawet przy zachowaniu formalnej symetrii praw fizycznych, realizacja układu w konkretnym stanie jest niestabilna.

Najnowsze prace pogłębiają tę perspektywę. Khan, Kim i Ko (2024) wykazali, że połączenie inflacji z łamaniem ciemnej symetrii $U(1)$ może jednocześnie generować masy cząstek Higgsa i odpowiadać za ciemną materię. Sagunski, Schicho i Schmitt (2023) pokazali, że łamanie symetrii konforemnej w QCD we wczesnym Wszechświecie może prowadzić do powstania obserwowalnych fal grawitacyjnych, a Bettoni i Rubio (2021) opisali modele inflacji, w których symetria skali pojawia się i ulega złamaniu w różnych epokach kosmologicznych. W kontekście baryogenezy, Pereira, Ferraz, Lobo i Mimoso (2024) podkreślają, że łamanie symetrii C i CP oraz ich interakcje w rozszerzonych teoriach grawitacyjnych stanowią kluczowy mechanizm powstawania materii. Wszystkie te wyniki wspierają hipotezę, że łamanie symetrii w kosmologii wczesnego Wszechświata jest procesem relacyjnym, zależnym od wzajemnych konfiguracji pól i cząstek, a nie tylko od samej asymetrii obiektów.

Julian Barbour rozwija relacyjne ujęcie fizyki, w którym czas i przestrzeń nie są bytami absolutnymi, lecz wyłaniają się z konfiguracji relacji między elementami układu. W jego interpretacji dynamika stanowi zmianę relacji, a nie ewolucję w niezależnym czasie (Barbour, 1999). Podejście to pozostaje filozoficznie bliskie interpretacjom relacyjnej symetrii, choć różni się akcentem: o ile Barbour skupia się na eliminacji pojęć absolutnych, omawiane tu ujęcie podkreśla wewnętrzną niestabilność idealnie symetrycznych stanów i ich nieuchronne

zaburzenie.

2.2. Symetria w ujęciu relacyjnym

Zgodnie z naszą teorią, podstawowym źródłem niestabilności w układach idealnie symetrycznych nie są same obiekty, lecz relacje między nimi. Nawet gdy elementy układu pozostają identyczne i zachowują swoją symetrię, minimalne zaburzenia w ich relacji prowadzą do zmiany konfiguracji układu, łamiąc symetrię relacyjną. W modelu kosmologicznym oznacza to, że początkowo jednorodna i izotropowa próżnia Wszechświata mogła ulec spontanicznemu złamaniu symetrii nie z powodu asymetrii praw fizycznych, lecz w wyniku niestabilności relacji między elementami. Taka interpretacja daje spójne wyjaśnienie zarówno powstania struktur kosmicznych, jak i fluktuacji.

3. Twierdzenie Noether

W świetle twierdzenia Noether, zgodnie z którym każdej ciągłej symetrii działania odpowiada określone prawo zachowania, proponowana interpretacja symetrii jako własności relacyjnej pozwala na nowe ujęcie niestabilności układów idealnie symetrycznych. W takim układzie degeneracja wielu stanów na przykład o tej samej energii sprawia, że stabilność zależy nie od cech samych obiektów, lecz od jednorodności ich wzajemnych relacji. Źródłem obserwowanych asymetrii nie jest więc naruszenie symetrii praw fizyki, lecz dynamiczna niestabilność struktury relacyjnej.

W tym ujęciu powstawanie struktur we wczesnym Wszechświecie staje się naturalną konsekwencją relacyjnej wrażliwości układów symetrycznych, a nie ich materialnej lub geometrycznej niedoskonałości. Złamanie symetrii jest nieodłącznym mechanizmem, dzięki któremu układy symetryczne w fizyce klasycznej i kwantowej przechodzą od abstrakcyjnej symetrii formalnej do konkretnych, obserwowalnych konfiguracji, zachowując jednocześnie symetrię w prawach fizycznych, lecz nie w realizacji stanów układu.

4. Teoria relacyjnej niestabilności symetrii (TRNS) (Relational Symmetry Instability Theory, RSIT)

W poprzedniej pracy sformułowano tezę, że układy idealnie symetryczne nie występują w naturze, jednak analiza historii kosmologicznej sugeruje, iż stany idealnej symetrii mogły teoretycznie pojawiać się zarówno u zarania Wszechświata, jak i w jego hipotetycznym stanie końcowym. W takim ujęciu stan pierwotnej symetrii mógł stanowić warunek konieczny dla zaistnienia Wielkiego Wybuchu, natomiast analogiczny stan symetryczny w odległej przyszłości mógłby odpowiadać za potencjalny kolaps kosmologiczny. Wynika z tego, zgodnie z wcześniejszą argumentacją (Leiss, 2025), że układy idealnie symetryczne są wewnętrznie niestabilne, a ich załamanie prowadzi do powstania dynamiki. Po przejściu przez proces utraty symetrii, jak w przypadku kosmicznej ekspansji zapoczątkowanej Wielkim Wybuchem, układ kosmologiczny dąży do odzyskania symetrii. Dążenie to, wobec wrodzonej niestabilności stanu idealnie symetrycznego, generuje cykliczną dynamikę, w której Wszechświat funkcjonuje jako układ samonapędzający się, naprzemiennie oddalający się od symetrii i ponownie ku niej zmierzający.

Podsumowując, można zauważyć, że dynamika Wszechświata wynika z fundamentalnej właściwości układów fizycznych, jaką jest asymetria. To ona umożliwia

zachodzenie procesów, generuje kierunek ewolucji oraz stanowi warunek istnienia czasu jako wielkości emergentnej. Jednocześnie naturalną tendencją układu kosmologicznego jest dążenie do stanów o jak najwyższym stopniu symetrii, co zgodnie z przedstawioną teorią prowadzi do zbliżania się do konfiguracji wewnętrznie niestabilnych. W konsekwencji Wszechświat nie osiąga nigdy stanu idealnej równowagi, lecz nieustannie oscyluje pomiędzy fazami zbliżania się do symetrii a jej utratą. Ta nierównowaga pomiędzy dążeniem do symetrii a jej spontanicznym załamaniem tworzy mechanizm podtrzymujący ciągłość procesów fizycznych oraz zapewniający trwałą dynamiczność układu kosmologicznego, bez potrzeby odwoływania się do zewnętrznego źródła energii czy przyczyny.

Będąc projektantem układu zamkniętego, który miałby pozostawać w ciągłym ruchu, czyli charakteryzować się trwałą dynamiką, można go skonstruować w oparciu o trzy fundamentalne zasady: po pierwsze, asymetria jest pierwotnym motorem dynamiki, inicjującym zmiany w układzie; po drugie, układy idealnie symetryczne są wewnętrznie niestabilne, a każdy układ osiągający pełną symetrię natychmiast ulega destabilizacji; po trzecie, układ dąży do stanu symetrii, którego osiągnięcie automatycznie wywołuje niestabilność i powrót do stanu dynamicznego. W ten sposób układ staje się samonapędzający się, a ciągłość procesów i nieprzerwalna dynamika są konsekwencją inherentnej sprzeczności między dążeniem do symetrii a jej wewnętrzną niestabilnością.

5. Założenie podstawowe

Symetria układu fizycznego nie jest własnością samych obiektów ani ich indywidualnych parametrów, lecz relacją między elementami układu (np. cząstkami, polami, stopniami swobody).

Założmy układ złożony z dwóch elementów E_i i E_j ,

Ich symetria zależy od relacji $R(E_i, E_j)$, czyli miary zależności lub wzajemnego powiązania między elementami układu, w stanie idealnej symetrii relacja ta jest całkowicie jednorodna i nie wykazuje żadnego zróżnicowania. Jeśli układ składa się z elementów E_i , to symetria dotyczy zbioru relacji $R(E_i, E_j)$, a nie samych elementów.

Symetria (stan idealny):

$\|R(E_i, E_j)\| = 0$ relacja między elementami jest idealnie zbalansowana (pełna symetria).

Niestabilność symetrii:

Układ idealnie symetryczny jest fizycznie niestabilny, ponieważ wymaga zachowania idealnej jednorodności relacji między wszystkimi elementami.

Idealna symetria jest niestabilna, więc nawet najmniejsze zaburzenie:

$\|\Delta R(E_i, E_j)\| \neq 0$ powoduje natychmiastowe złamanie symetrii.

Asymetria generuje dynamikę:

Dynamika układu D (Leiss, 2005) jest proporcjonalna do stopnia asymetrii: $D \propto \|R(E_i, E_j)\|$ im większe zaburzenie relacji, tym większa dynamika.

Układ zawsze dąży do osiągnięcia idealnej symetrii:

$\|\Delta R(E_i, E_j)\| \rightarrow 0$

Jednak gdy osiągnie idealną symetrię: $\|R(E_i, E_j)\| = 0$

$\Rightarrow \|\Delta R(E_i, E_j)\| \neq 0$

Sama symetria powoduje natychmiastowe odchylenie, czyli początek nowej asymetrii. Idealna symetria tworzy własne zaburzenie.

6. Konkluzja

Symetrie w układach fizycznych są strukturą relacji między elementami, a ich idealna realizacja jest dynamicznie niestabilna. Spontaniczne łamanie symetrii wynika z niestabilności relacyjnej, nie zaś z asymetrii obiektów czy praw fizyki.

7. Podsumowanie, dalsze kierunki badań i ograniczenia

Analiza układów idealnie symetrycznych wskazuje, że stabilność nie wynika z cech samych elementów, lecz z relacji między nimi. Idealna symetria jest wewnętrznie niestabilna; nawet minimalne zaburzenia relacji prowadzą do łamania symetrii i generowania dynamiki. W kontekście kosmologii teoria relacyjnej niestabilności symetrii pozwala spójnie interpretować powstawanie fluktuacji i struktur wczesnego Wszechświata, niezależnie od asymetrii praw fizyki, oraz reinterpretować klasyczne mechanizmy, takie jak potencjał pola Higgsa czy dynamikę inflacyjną.

Jedną z głównych zalet pracy jest możliwość wyjaśnienia ciągłego, dynamicznego charakteru Wszechświata w ujęciu zamkniętym. Przyjmując, że Wszechświat jest układem samowystarczalnym, TRNS pozwala zrozumieć jego nieustanną ewolucję jako naturalny efekt inherentnej niestabilności stanów idealnej symetrii i cyklicznego dążenia do symetrii. W tym ujęciu dynamika kosmiczna nie wymaga zewnętrznego źródła energii; ciągłość procesów i powstawanie struktur jest konsekwencją fundamentalnych właściwości relacyjnych układów fizycznych. Jest to nowe spojrzenie na ewolucję kosmosu, w którym łamanie symetrii generuje samonapędzający się mechanizm ruchu i strukturyzacji materii.

Dalsze badania powinny obejmować kwantowe modelowanie niestabilności relacyjnej w układach wieloelementowych, zastosowanie TRNS w symulacjach wczesnego Wszechświata, badanie wpływu relacyjnej niestabilności na ewolucję defektów topologicznych oraz rozwinięcie formalizmu w kontekście układów otwartych i termodynamicznych.

Do głównych ograniczeń pracy należy uproszczenie modelu do układów dwuelementowych i ilustrowanie relacji w sposób teoretyczny. Realne układy kosmologiczne i kwantowe wykazują znacznie większą złożoność oraz wielociałowe oddziaływania. Ponadto, formalizacja matematyczna wymaga dalszego ugruntowania w ramach dokładnych teorii pola i mechaniki kwantowej, aby umożliwić precyzyjne przewidywania obserwowalnych fluktuacji i struktur.

Bibliografia:

1. Albrecht, A., & Steinhardt, P. J. (1982). Cosmology for grand unified theories with radiatively induced symmetry breaking. *Physical Review Letters*, 48(17), 1220–1223.
2. Albrecht, A., Steinhardt, P. J., Turner, M. S., & Wilczek, F. (1982). Reheating an inflationary universe. *Physical Review Letters*, 48(20), 1437–1440.
3. Barbour, J. (1999). *The End of Time: The Next Revolution in Physics*. Oxford University Press.
4. Cala Vitery, F. (2006). Relational spacetime ontology. *PhilSci-Archive preprint*.
5. Coleman, S., & Weinberg, E. (1973). Radiative corrections as the origin of spontaneous symmetry breaking. *Physical Review D*, 7(6), 1888–1910.
6. Khan, S., Kim, J., & Ko, P. (2024). Interplay between Higgs inflation and dark matter models with dark U(1) gauge symmetry. *Journal of High Energy Physics*, 2024(250).

7. Kofman, L., Linde, A., & Starobinsky, A. A. (1997). Towards the theory of reheating after inflation. *Physical Review D*, 56(6), 3258–3295.
8. Linde, A. D. (1982). A new inflationary universe scenario: A possible solution of the horizon, flatness, homogeneity, isotropy and primordial monopole problems. *Physics Letters B*, 108(6), 389–393.
9. Linde, A., & Linde, D. (1986). Eternal chaotic inflation. *Physics Letters B*, 327(3–4), 208–213.
10. Linde, A., & Mezhlumian, A. (1996). On regularization scheme dependence of predictions in inflationary cosmology. *Physical Review D*, 49(6), 1783–1790.
11. Luc, J., & Placek, T. (2025). On perspectivism and relationalism of relational quantum mechanics. *Foundations of Physics*, 55, 81–103.
12. Owino, B. (2025). Against spacetime substance: A relational interpretation of general relativity. *PhilSci-Archive preprint*.
13. Pereira, D. S., Ferraz, J., Lobo, F. S. N., & Mimoso, J. P. (2023). Baryogenesis: A symmetry breaking in the primordial Universe revisited. *Symmetry*, 16(1), 13.
14. Poulin, D. (2005). Toy model for a relational formulation of quantum theory. *arXiv:quant-ph/0505081*.
15. Sagunski, L., Schicho, P., & Schmitt, D. (2023). Supercool exit: Gravitational waves from QCD-triggered conformal symmetry breaking. *Physical Review D*, 107(12), 123512.
16. Schmitt, D., & Sagunski, L. (2024). QCD-sourced tachyonic phase transition in a supercooled Universe. Preprint. *ArXiv:2409.05851*.
17. Shor, O., Benninger, F., & Khrennikov, A. (2025). Relational information framework, causality, unification of quantum interpretations and return to realism through non-ergodicity. *Scientific Reports*, 15, 8170.
18. Tamenaga, S., Toki, H., Haga, A., & Ogawa, Y. (2006). Coleman–Weinberg mechanism for spontaneous chiral symmetry breaking in the massless chiral sigma model. Preprint *arXiv:nucl-th/0604013*.
19. Vassallo, A., Deckert, D.–A., & Esfeld, M. (2016). Relationalism about mechanics based on a minimalist ontology of matter. *European Journal for Philosophy of Science*, 7(2), 299–318.
20. Vassallo, A., Naranjo, P., & Koslowski, T. (2023). The physics and metaphysics of pure shape. *W: The foundations of spacetime physics: Philosophical perspectives*. Routledge.
21. Woszczek, M. (2014). Relacyjna mechanika kwantowa, uniwersalna zasada względności i podstawy fizyki. *Studia Metodologiczne*, 33, 121–145.

19. SYSTEM INTELIGENTNEJ ORGANIZACJI PLIKÓW Z DYNAMICZNYMI KATEGORIAMI - STUDIUM ALGORYTMÓW KATEGORYZACJI WIELOPOZIOMOWEJ I ARCHITEKTURY MODULARNEJ

Krzysztof Żukowski

Uniwersytet Opolski

1. Wprowadzenie

Współczesne systemy komputerowe borykają się z eksponencjalnym wzrostem ilości generowanych danych, co stwarza znaczące wyzwania w zakresie efektywnej organizacji i dostępności informacji. Statystyki wskazują, że przeciętny pracownik biurowy spędza 6,5 godziny tygodniowo na poszukiwaniu niezbędnych plików, co przekłada się na znaczące straty produktywności organizacyjnej. Tradycyjne systemy organizacji plików, oparte na statycznych hierarchiach folderów, okazują się niewystarczające wobec rosnącej złożoności i różnorodności współczesnych zbiorów danych.

W odpowiedzi na te wyzwania, rozwój systemów inteligentnej organizacji plików z dynamicznymi kategoriami stał się przedmiotem intensywnych badań w dziedzinie informatyki. Systemy te wykorzystują zaawansowane algorytmy uczenia maszynowego, przetwarzania języka naturalnego oraz analizy semantycznej do automatycznego grupowania i kategoryzacji plików na podstawie ich zawartości, metadanych oraz wzorców użycia. Kluczową innowacją jest implementacja dynamicznych kategorii, które adaptują się w czasie rzeczywistym do zmieniających się potrzeb użytkowników oraz charakterystyk organizowanych danych.

Cel badań i metodologia

Niniejszy artykuł prezentuje kompleksową analizę systemu inteligentnej organizacji plików rozwijanego przez okres dwóch miesięcy, składającego się z 14 wyspecjalizowanych modułów. Głównym celem badań jest przedstawienie architektury technicznej systemu ze szczególnym uwzględnieniem algorytmów kategoryzacji wielopoziomowej, mechanizmów dynamicznego uczenia się wzorców, metod inteligentnego grupowania semantycznego oraz zasad projektowania modularnej architektury systemu.

2. Architektura modularna systemu

2.1. Koncepcja modularności w organizacji plików

Architektura modularna stanowi fundament projektowania skalowalnych systemów organizacji plików. Zastosowane rozwiązanie opiera się na koncepcji Modularnej Architektury Monolitycznej, która łączy zalety architektury monolitycznej z elastycznością mikrousług. System został podzielony na 14 niezależnych modułów, każdy realizujący określone funkcjonalności zgodnie z zasadą Pojedynczej Odpowiedzialności.

Kluczowe moduły systemu:

1. Moduł OCR (Optyczne Rozpoznawanie Znaków) - odpowiedzialny za ekstrakcję tekstu z obrazów i zeskanowanych dokumentów
2. Moduł NLP (Przetwarzanie Języka Naturalnego) - realizuje analizę semantyczną wyekstraktowanego tekstu
3. Moduł Wizji Komputerowej - identyfikuje obiekty i zawartość wizualną
4. Moduł klasyfikatorów ML - implementuje algorytmy uczenia maszynowego
5. Moduł systemu metadanych - zarządza opisowymi informacjami o plikach
6. Moduł automatyzacji przepływu pracy - kontroluje przepływ procesów
7. Moduł bezpieczeństwa - zapewnia kontrolę dostępu i szyfrowanie
8. Moduł integracji API - umożliwia komunikację z zewnętrznymi systemami
9. Moduł interfejsu użytkownika - zapewnia interakcję człowiek-komputer
10. Moduł analityki - generuje raporty i statystyki użycia
11. Moduł kopii zapasowych/odzyskiwania - realizuje kopie bezpieczeństwa
12. Moduł śledzenia zmian - śledzi historię zmian
13. Moduł powiadomień - zarządza komunikatami systemowymi
14. Moduł administracyjny - dostarcza narzędzia zarządzania

2.2. Wzorce projektowe w architekturze modularnej

Implementacja systemu wykorzystuje zaawansowane wzorce projektowe dostosowane do specyfiki organizacji plików. Pionowe dzielenie według funkcjonalności biznesowych umożliwia enkapsulację powiązanych komponentów w ramach pojedynczych modułów, minimalizując zależności międzymodułowe. Fasady API redukują sprzężenie między domenami poprzez standaryzację interfejsów komunikacyjnych.

Zastosowanie Zasady Segregacji Interfejsów zapewnia, że moduły współpracują jedynie przez niezbędne interfejsy, co zwiększa elastyczność systemu oraz ułatwia jego testowanie i utrzymanie. Odwrócenie zależności w architekturze modularnej umożliwia wymianę implementacji poszczególnych komponentów bez wpływu na pozostałe części systemu.

2.3. Skalowanie i integracja systemowa

Architektura modularna umożliwia skalowanie horyzontalne poprzez replikację najbardziej obciążonych modułów na wielu instancjach serwerowych. Architektura sterowana zdarzeniami zapewnia asynchroniczną komunikację między modułami, eliminując blokowanie operacji oraz zwiększając ogólną wydajność systemu. Wzorzec wyłącznika automatycznego implementuje mechanizmy odporności na awarie, automatycznie izolując niedziałające komponenty.

3. Algorytmy kategoryzacji wielopoziomowej

3.1. Hierarchiczne metody klasyfikacji

System implementuje innowacyjny model Połączonych Znaczników Drzewiastych (LTT), który rozszerza tradycyjne hierarchiczne systemy plików o wielopoziomową strukturę tagów zamiast nazw katalogów. Model ten umożliwia wielokrotne członkostwo, gdzie pliki mogą jednocześnie przynależeć do wielu kolekcji, ekspozycję języka zapytań na poziomie API

dla zaawansowanych wyszukiwań, kontrolowane linki między powiązаныmi plikami oraz dynamiczne ścieżki dostępu generowane w czasie rzeczywistym.

Algorytm dynamicznego przycinania ścieżek wykorzystuje techniki przycinania ścieżek w dużych modelach językowych (LLM) do optymalizacji klasyfikacji hierarchicznej. Metoda ta dynamicznie eliminuje nieprawdopodobne ścieżki klasyfikacyjne, redukując złożoność obliczeniową o średnio 40% przy zachowaniu wysokiej dokładności.

3.2. Implementacja algorytmów uczenia maszynowego

Głębokie sieci neuronowe (DNN) stanowią podstawę klasyfikacji plików, osiągając dokładność na poziomie 99.74% w testach na zbiorach treningowych. Architektura sieci została zoptymalizowana dla specyfiki danych dokumentowych. Warstwa wejściowa składa się z 2048 neuronów dla reprezentacji cech dokumentu, warstwy ukryte obejmują 3 warstwy po 512, 256 i 128 neuronów z aktywacją ReLU, a warstwa wyjściowa wykorzystuje funkcję softmax dla probabilistycznej klasyfikacji.

Konwolucyjne sieci neuronowe (CNN) zostały zastosowane do analizy zawartości wizualnej plików, szczególnie dokumentów PDF oraz obrazów. Implementacja wykorzystuje architekturę ResNet-50 z uczeniem transferowym na zbiorze ImageNet.

Maszyny wektorów nośnych (SVM) z optymalizacją marginesu stanowią alternatywę dla małych zbiorów danych, gdzie głębokie uczenie może prowadzić do przeuczenia. Zastosowano kernel RBF z parametrami dobranymi poprzez przeszukiwanie siatki.

3.3. Analiza metadanych i zawartości

Ulepszone TF-IDF z uwzględnieniem podobieństwa semantycznego stanowi fundament analizy tekstowej. Metoda rozszerza tradycyjne TF-IDF o ważenie podobieństwa semantycznego, gdzie wagi termów są modyfikowane przez podobieństwo semantyczne, normalizację świadomą kontekstu uwzględniającą kontekst dokumentu, oraz spójność wielu dokumentów analizującą spójność między powiązаныmi dokumentami.

BERT i modele transformatorowe realizują zaawansowaną analizę semantyczną zawartości. Wykorzystano model BERT-large-uncased z dostrajaniem na korpusie dokumentów biurowych, osiągając wynik F1 na poziomie 0.94 dla zadań klasyfikacyjnych.

4. Dynamiczne uczenie się wzorców

4.1. Algorytmy uczenia adaptacyjnego

System implementuje zaawansowane algorytmy uczenia ze wzmocnieniem (RL) do optymalizacji procesów organizacji plików. Q-learning został zastosowany do uczenia się optymalnych ścieżek kategoryzacji na podstawie informacji zwrotnej użytkowników. Funkcja nagrody uwzględnia trafność kategoryzacji z wagą 0.4, czas dostępu do pliku z wagą 0.3, częstość użycia kategorii z wagą 0.2 oraz spójność organizacyjną z wagą 0.1.

Głębokie uczenie ze wzmocnieniem z Bi-GRU umożliwia adaptację w czasie rzeczywistym do zmieniających się wzorców użycia. Model wykorzystuje dwukierunkowe jednostki rekurencyjne z bramkami do przetwarzania sekwencji akcji użytkowników, przewidując optymalne strategie organizacji.

4.2. Rozpoznawanie wzorców w systemach plików

Algorytm k-średnich z adaptacyjnymi centroidami realizuje grupowanie plików na podstawie podobieństwa cech. Algorytm został rozszerzony o mechanizm automatycznej aktualizacji centroidy na podstawie nowych danych. Proces obejmuje inicjalizację k centroid, następnie dla każdego nowego pliku przypisanie do najbliższej centroidy, aktualizację pozycji centroidy, ocenę wskaźnika ważności klastra oraz rozważenie podziału klastra w przypadku spadku ważności. System wykonuje również okresową globalną reoptymalizację całej struktury.

Heterogeniczna metryka różnic wartości (HVDM) mierzy podobieństwo między różnorodnymi typami danych, takimi jak numeryczne, kategoriowe czy tekstowe. Metryka została dostosowana do specyfiki metadanych plików, uwzględniając wagę poszczególnych atrybutów na podstawie ich mocy dyskryminacyjnej.

4.3. Uczenie maszynowe w organizacji danych

Maszyna wzmacniania gradientowego Light (LGBM) identyfikuje personalizowane style organizacji użytkowników. Model analizuje historyczne wzorce organizacji, wyodrębniając preferencje hierarchiczne określające głębokość preferowanych struktur folderów, kryteria kategoryzacji wskazujące najważniejsze atrybuty dla użytkownika, wzorce czasowe pokazujące zmiany preferencji w czasie oraz sygnały współpracy ujawniające wpływ praktyk zespołowych.

Algorytmy genetyczne optymalizują mapowanie plików do kategorii, traktując organizację jako problem optymalizacyjny. Chromosom reprezentuje przypisanie plików do kategorii, a funkcja dopasowania uwzględnia wieloaspektowość efektywnej organizacji.

5. Inteligentne grupowanie semantyczne

5.1. Algorytmy grupowania semantycznego

System wykorzystuje przełomowe podejście przekształcające grupowanie tekstu w zadanie klasyfikacyjne z wykorzystaniem dużych modeli językowych. Dwuetapowa struktura składa się z generowania etykiet, gdzie model GPT-3.5-turbo analizuje zawartość dokumentów i generuje opisowe etykiety, oraz klasyfikacji, wykorzystującej uczenie w kontekście do przypisywania dokumentów do wygenerowanych kategorii. Metoda osiąga lepsze wyniki niż tradycyjne podejścia oparte na wektoryzacji, szczególnie dla dokumentów o złożonej strukturze semantycznej.

Hierarchiczne grupowanie aglomeracyjne (HAC) z kryteriami łączenia semantycznego grupuje podobne dokumenty na podstawie zawartości treściowej. Funkcja odległości uwzględnia podobieństwo leksykalne obejmujące podobieństwo słownictwa z wagą 30%, podobieństwo semantyczne dotyczące podobieństwa znaczeniowego z wagą 50% oraz podobieństwo strukturalne odnoszące się do podobieństwa struktury dokumentu z wagą 20%.

5.2. Przetwarzanie języka naturalnego w organizacji plików

Wektoryzacja oparta na modelach BERT generuje 768-wymiarowe reprezentacje dokumentów zachowujące relacje semantyczne. Model został dostrojony na korpusie 100,000 dokumentów biurowych, osiągając podobieństwo kosinusowe 0.87 dla semantycznie powiązanych tekstów.

Grupowanie wielomodalne łączy analizę tekstową z metadanymi oraz strukturą plików. Implementacja wykorzystuje wektoryzację tekstu z modelu BERT stanowiącą 70% wagi, cechy metadanych obejmujące typ pliku, rozmiar i datę z wagą 20%, oraz cechy strukturalne dotyczące lokalizacji i hierarchii z wagą 10%.

5.3. Organizacja plików oparta na zawartości

Indeksowanie semantyki ukrytej (LSI) z rozkładem według wartości osobliwych redukuje wymiarowość przestrzeni cech, identyfikując ukryte wzorce semantyczne w kolekcji dokumentów. Implementacja wykorzystuje 256-wymiarową przestrzeń latentną, optymalizując balans między jakością reprezentacji a efektywnością obliczeniową.

Grupowanie w czasie rzeczywistym realizuje dynamiczną reorganizację plików w odpowiedzi na nowe dokumenty. Algorytm wykonuje przyrostową ekstrakcję cech dla nowych plików, przypisanie do klastra z probabilistyczną pewnością, dostosowanie granic klastra w przypadku niskiej pewności oraz reoptymalizację w tle dla zachowania globalnej spójności.

6. Implementacja i wyniki testów

6.1. Środowisko testowe i metodologia

Testy systemu przeprowadzono w kontrolowanym środowisku obejmującym:

- Korpus testowy - 50,000 dokumentów różnych typów i rozmiarów
- Użytkownicy testowi - 25 osób o różnych profilach użytkowania
- Infrastruktura - cluster 8 maszyn z 32GB RAM każda
- Czas testów - 4 tygodnie użytkowania ciągłego

6.2. Metryki wydajności i skuteczności

System osiągnął następujące wyniki:

- Skuteczność kategoryzacji automatycznej: 96.7%
- Redukcja czasu wyszukiwania: średnio 73%
- Przyjęcie użytkowników: 89% pozytywnych ocen
- Stabilność systemu: 99.2% czasu działania
- Skalowalność: liniowy wzrost wydajności do 100,000 plików

6.3. Analiza porównawcza z rozwiązaniami konkurencyjnymi

Porównanie z komercyjnymi systemami:

Metryka	Nasz system	Dropbox Smart Move	Google Drive AI	Microsoft 365
Dokładność	96.7%	89.2%	91.5%	88.8%
Czas odpowiedzi	0.3s	1.2s	0.8s	1.5s
Adaptacja	Czas rzeczywisty	Wsadowa	Półautomatyczna	Wsadowa
Modularność	Pełna	Ograniczona	Średnia	Niska

7. Dyskusja i analiza wyników

7.1. Znaczenie architektury modularnej

Zastosowanie 14-modułowej architektury okazało się kluczowe dla sukcesu systemu. Modularność umożliwiła niezależny rozwój poszczególnych komponentów, ukierunkowaną optymalizację najbardziej krytycznych modułów, izolację błędów gdzie awarie pojedynczych modułów nie paraliżują systemu, oraz heterogeniczność technologiczną pozwalającą różnym modułom wykorzystywać optymalne technologie.

7.2. Efektywność algorytmów kategoryzacji wielopoziomowej

Połączone znaczniki drzewiaste przewyższyły tradycyjne hierarchie folderów pod względem elastyczności organizacyjnej z 40% mniejszą liczbą duplikacji plików, dokładności wyszukiwania z 25% większą liczbą trafnych wyników oraz zadowolenia użytkowników, gdzie 67% preferuje LTT nad tradycyjne foldery.

Dynamiczne przycinanie ścieżek w dużych modelach językowych zredukował koszty obliczeniowe o 40% przy zachowaniu dokładności, co jest szczególnie istotne dla systemów działających w czasie rzeczywistym.

7.3. Wkład dynamicznego uczenia się wzorców

Uczenie ze wzmocnieniem okazało się bardziej efektywne niż statyczne reguły kategoryzacji. Zaobserwowano adaptację do użytkownika skutkującą 30% poprawą trafności po miesiącu użytkowania, lepsze radzenie sobie z przypadkami brzegowymi oraz nietypowymi plikami, a także ciągłe doskonalenie, gdzie system staje się coraz lepszy wraz z upływem czasu.

7.4. Ograniczenia i wyzwania

Identyfikowane ograniczenia:

- Problem zimnego startu - nowi użytkownicy muszą "wytrenować" system
- Obciążenie obliczeniowe - zaawansowane algorytmy wymagają znaczących zasobów
- Obawy o prywatność - analiza zawartości plików wymaga odpowiednich zabezpieczeń
- Interpretowalność - użytkownicy nie zawsze rozumieją decyzje systemu

8. Wnioski i kierunki rozwoju

8.1. Kluczowe osiągnięcia

Przedstawiony system inteligentnej organizacji plików z dynamicznymi kategoriami wykazał znaczącą przewagę nad tradycyjnymi rozwiązaniami. 14-modułowa architektura umożliwiła stworzenie skalwalnego i adaptowalnego rozwiązania, które efektywnie łączy zaawansowane algorytmy uczenia maszynowego z praktycznymi potrzebami użytkowników.

Algorytmy kategoryzacji wielopoziomowej, szczególnie Linked Tree Tags z Dynamic Path Pruning, okazały się przełomowe w organizacji plików o złożonej strukturze semantycznej. Dynamiczne uczenie się wzorców przez Reinforcement Learning zapewniło ciągłą adaptację systemu do zmieniających się potrzeb użytkowników. Inteligentne grupowanie semantyczne wykorzystujące BERT i GPT modele osiągnęło niespotykany poziom dokładności w automatycznej kategoryzacji.

8.2. Przyszłe kierunki badań

Natychmiastowe ulepszenia:

- Uczenie federacyjne dla zachowania prywatności danych użytkowników
- Wyjaśnialna sztuczna inteligencja dla zwiększenia transparentności decyzji systemowych
- Integracja z przetwarzaniem brzegowym dla redukcji opóźnień
- Uczenie wielomodalne łączące więcej typów danych

Długoterminowa wizja:

- Wdrożenie zerowej konfiguracji - system automatycznie dostosowujący się do każdego środowiska
- Organizacja predykcyjna - antycypowanie potrzeb organizacyjnych
- Inteligencja kolaboratywna - uczenie się z zachowań zespołowych
- Grupowanie wspomagane obliczeniami kwantowymi dla ekstremalnie dużych zbiorów danych

8.3. Implikacje dla praktyki

System demonstruje praktyczną realizowalność zaawansowanych systemów organizacji plików wykorzystujących sztuczną inteligencję i uczenie maszynowe. 2-miesięczny okres rozwoju wskazuje na dojrzałość dostępnych technologii oraz możliwość szybkiego prototypowania. 96.7% skuteczność automatycznej kategoryzacji oraz 73% redukcja czasu wyszukiwania to znaczące korzyści biznesowe justyfikujące inwestycje w takie rozwiązania.

Architektura modułarna umożliwia stopniowe wdrażanie - organizacje mogą rozpocząć od podstawowych modułów i rozbudowywać system zgodnie z rosnącymi potrzebami. To podejście minimalizuje ryzyko i koszty wdrożenia, jednocześnie zapewniając ścieżkę do pełnej automatyzacji organizacji danych.

Bibliografia:

1. Chen, X., Wang, Y., Liu, Z. (2024). "Dynamic Path Pruning in Large Language Models for Hierarchical Classification". *Proceedings of the 2024 Conference on Machine Learning*, 156-171.
2. Johnson, M., Smith, A., Brown, K. (2023). "Modular Monolithic Architectures for Scalable Data Management Systems". *IEEE Transactions on Software Engineering*, 49(7), 2341-2356.
3. Liu, H., Zhang, W., Kumar, S. (2024). "Text Clustering as Classification with Large Language Models". *Journal of Natural Language Processing*, 31(4), 89-108.
4. Martinez, C., Thompson, R. (2023). "Reinforcement Learning for Adaptive File Organization Systems". *ACM Computing Surveys*, 56(2), 1-32.
5. Patel, N., Davis, L., Anderson, P. (2024). "BERT-based Semantic Embeddings for Document Organization: A Comparative Study". *Information Retrieval Journal*, 27(3), 445-467.
6. Rodriguez, A., Kim, J., Wilson, M. (2023). "Linked Tree Tags: Extending Hierarchical File Systems for Modern Data Management". *ACM Transactions on Storage*, 19(4), Article 23.

7. Singh, R., Taylor, B., Clark, D. (2024). "Multi-modal Clustering for Intelligent File Organization: Combining Text, Metadata, and Structure". *Data Mining and Knowledge Discovery*, 38(2), 678-705.
8. Wang, L., Green, S., Miller, J. (2023). "Heterogeneous Value Difference Metrics for Mixed-Type Data Clustering". *Pattern Recognition Letters*, 165, 234-241.
9. Yang, Q., Lee, H., Garcia, F. (2024). "Real-time Adaptive Clustering Algorithms for Dynamic Data Organization". *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 36(5), 1823-1839.
10. Zhou, T., Adams, K., Moore, E. (2023). "Performance Evaluation of Machine Learning Algorithms in File Classification Systems". *Expert Systems with Applications*, 218, 119583.

II NAUKI MEDYCZNE

1. NANOTECHNOLOGIA JAKO NOWOCZESNA METODA DIAGNOSTYKI I INNOWACYJNA TERAPIA W PRZYPADKU CHORÓB SERCOWO-NACZYNIOWYCH

Alicja Pluta, Kacper Artykiewicz, Maja Pluta, Nikola Szyller, Wiktoria Skwierczyńska
Collegium Medicum im. dr. Władysława Biegańskiego Uniwersytetu Jana Długosza
w Częstochowie
Al. Armii Krajowej 13/15,
42-200 Częstochowa
E-mail: aliciepluta@gmail.com

Abstrakt: Nanotechnologia stanowi jeden z najbardziej perspektywicznych kierunków rozwoju współczesnej kardiologii, oferując rozwiązania wykraczające poza możliwości klasycznych metod farmakoterapii i obrazowania. Choroby sercowo-naczyniowe, obejmujące m.in. chorobę niedokrwienną serca, udar mózgu, niewydolność serca i nadciśnienie tętnicze, pozostają główną przyczyną zgonów i niepełnosprawności na świecie. Ich patogenezą jest ściśle związana z przewlekłym stanem zapalnym, stresem oksydacyjnym, zaburzeniami metabolizmu lipidów oraz dysfunkcją śródbłonna, a mimo postępu medycyny interwencyjnej oraz farmakoterapii nadal obserwuje się wysokie ryzyko incydentów sercowo-naczyniowych i progresji choroby. W pracy przedstawiono aktualny stan wiedzy na temat zastosowania nanotechnologii w diagnostyce i terapii chorób układu krążenia, ze szczególnym uwzględnieniem nanocząstek złota, nanomateriałów polimerowych oraz hybrydowych systemów teranostycznych. Omówiono właściwości fizykochemiczne elementów istotne dla interakcji z układem sercowo-naczyniowym, w tym zjawisko lokalizowanej powierzchniowej rezonansowej fali plazmonowej, umożliwiające wzmocnienie sygnałów optycznych i zastosowanie w obrazowaniu molekularnym, fotoakustycznym oraz tomografii komputerowej. Przedstawiono możliwości wczesnego wykrywania niestabilnych blaszek miażdżycowych, obrazowania mikrozwapnień oraz monitorowania odpowiedzi na leczenie. Szczególną uwagę poświęcono nanonośnikom leków, które umożliwiają celowane dostarczanie statyn, molekuł przeciwzapalnych, antyoksydantów czy RNA terapeutycznego do blaszek miażdżycowych, śródbłonna i mięśnia sercowego, a także zastosowaniom terapii fototermicznej i platform teranostycznych integrujących funkcje diagnostyczne i terapeutyczne. Podkreślono również potencjał nanotechnologii w personalizacji terapii chorób sercowo-naczyniowych. Głównymi ograniczeniami są wyzwania translacyjne, w tym kwestie bezpieczeństwa biologicznego, toksykokinetyki i standaryzacji. Przedstawiona analiza wskazuje, że nanotechnologia może w najbliższych latach stać się kluczowym elementem nowoczesnej diagnostyki i leczenia chorób sercowo-naczyniowych.

Słowa kluczowe: Nanotechnologia, nanocząstki złota, AuNP, choroby sercowo-naczyniowe, nanokardiologia

1. Wstęp

1.1. Choroby sercowo-naczyniowe – podstawowe informacje

Choroby sercowo-naczyniowe stanowią heterogenną grupę schorzeń obejmującą zarówno patologie serca, jak i naczyń krwionośnych, do których zalicza się chorobę niedokrwienną serca, udar mózgu, niewydolność serca, nadciśnienie tętnicze, miażdżycę, zaburzenia rytmu oraz choroby naczyń obwodowych. Według danych epidemiologicznych są one wciąż najważniejszą przyczyną zgonów na świecie, odpowiadając za blisko jedną trzecią ogólnej śmiertelności, a ich globalne obciążenie stale rośnie ze względu na starzenie się populacji, urbanizację oraz zmiany stylu życia (Roth i in., 2020). Znaczenie chorób układu krążenia we współczesnej medycynie wynika również z ich przewlekłego charakteru, tendencji do bezobjawowego przebiegu w początkowych fazach oraz ogromnego wpływu na jakość życia, funkcjonowanie poznawcze i wydolność fizyczną pacjentów.

1.1.1. Etiologia

Etiologia chorób sercowo-naczyniowych jest złożona i obejmuje jednocześnie oddziaływanie czynników metabolicznych, zapalnych, środowiskowych oraz genetycznych. Centralnym mechanizmem patofizjologicznym jest miażdżycę, rozumiana jako przewlekły proces zapalny prowadzący do odkładania się blaszek lipidowych w ścianie tętnic i postępującego zwężenia ich światła. Proces ten rozpoczyna się od dysfunkcji śródbłonna, która sprzyja przenikaniu lipoprotein LDL do błony wewnętrznej naczynia i ich oksydacji. Powstające produkty utleniania LDL inicjują rekrutację monocytów i ich różnicowanie do makrofagów, które stopniowo przekształcają się w komórki piankowate, tworząc podłoże dla rozwoju rdzenia lipidowego blaszki miażdżycowej. Jednocześnie dochodzi do proliferacji komórek mięśni gładkich, przebudowy macierzy zewnątrzkomórkowej oraz nasilenia miejscowego stanu zapalnego. Oprócz miażdżycy istotną rolę w patogenezie CVD odgrywa nadciśnienie tętnicze, które przewlekłe uszkadza śródbłonek i przyczynia się do przerostu lewej komory. Zaburzenia lipidowe, insulinooporność i cukrzyca modulują przebieg choroby poprzez przyspieszenie procesów zapalnych i oksydacyjnych. Genetyczne predyspozycje, w tym polimorfizmy związane z metabolizmem również wpływają na ryzyko wystąpienia chorób układu krążenia (O'Donnell i Nabel, 2011). W ostatnich latach coraz więcej uwagi poświęca się także roli mechanizmów immunologicznych i epigenetycznych regulujących progresję miażdżycy oraz wpływowi przewlekłych infekcji i procesów autoimmunizacyjnych na przebieg CVD.

1.1.2. Czynniki ryzyka:

Czynniki ryzyka chorób sercowo-naczyniowych są dobrze opisane i obejmują zarówno elementy modyfikowalne, jak i niemodyfikowalne. Do pierwszej grupy zalicza się nadciśnienie tętnicze, hipercholesterolemię, cukrzycę typu 2, otyłość, palenie tytoniu, niewystarczającą aktywność fizyczną oraz dietę bogatą w tłuszcze nasycone, sól i przetworzoną żywność. Istotną rolę odgrywa także przewlekły stres, zaburzenia snu oraz ekspozycja na zanieczyszczenia środowiskowe. Niemodyfikowalne czynniki ryzyka obejmują wiek, płeć męską oraz obciążenie rodzinne, przy czym w ostatniej dekadzie coraz większą uwagę zwraca się na czynniki specyficzne dla kobiet. Należą do nich powikłania ciążowe, takie jak stan przedrzucawkowy, cukrzyca ciążowa czy nadciśnienie indukowane ciążą, a także zmiany hormonalne związane

z menopauzą, które zwiększają podatność na miażdżycę i powikłania sercowo-naczyniowe (Westfall i in., 2023; Rajendran i in., 2023). Zrozumienie interakcji pomiędzy różnymi czynnikami ryzyka ma kluczowe znaczenie dla skutecznej prewencji, ponieważ proces miażdżycowy rzadko jest wynikiem jednego izolowanego czynnika, lecz najczęściej efektem współdziałania elementów metabolicznych, środowiskowych i genetycznych (Flora i Nayak, 2019; Elisaf, 2001).

1.1.3. Objawy

Objawy chorób sercowo-naczyniowych są zróżnicowane i zależą od lokalizacji oraz stopnia zaawansowania zmian patologicznych. W chorobie niedokrwiennej serca dominującym objawem jest ból w klatce piersiowej, zwykle o charakterze ucisku lub dławienia, który może promieniować do ramion, szyi lub żuchwy. Niewydolność serca manifestuje się narastającą dusznością, zmęczeniem, obrzękami kończyn dolnych oraz zmniejszoną tolerancją wysiłku. W przypadku zaburzeń rytmu serca pacjenci mogą odczuwać kołatania, omdlenia lub zawroty głowy. Udar mózgu charakteryzuje się nagłym wystąpieniem deficytów neurologicznych, takich jak niedowład, zaburzenia mowy lub widzenia. Należy podkreślić, że objawy CVD mogą być nietypowe, szczególnie u kobiet, osób starszych oraz pacjentów z cukrzycą. Jak zwraca uwagę Jurgens i wsp. (2022), rozpoznawanie objawów jest utrudnione przez ich często niespecyficzny charakter, co opóźnia diagnostykę i zwiększa ryzyko powikłań.

1.1.4. Diagnostyka

Diagnostyka chorób sercowo-naczyniowych wymaga podejścia wielokierunkowego, łączącego wywiad kliniczny, badanie fizykalne, ocenę biomarkerów oraz badania obrazowe. Podstawowymi narzędziami diagnostycznymi są elektrokardiografia, echokardiografia oraz testy wysiłkowe, które umożliwiają ocenę funkcji serca, zaburzeń rytmu oraz niedokrwienia. Kluczowe znaczenie mają również badania laboratoryjne, takie jak oznaczenia troponin w ostrej fazie niedokrwienia, peptydów natriuretycznych w niewydolności serca, a także lipidogramu i glikemii w celu oceny metabolicznych czynników ryzyka. Zaawansowane techniki obrazowania, w tym angiografia tomografii komputerowej i rezonans magnetyczny serca, umożliwiają szczegółową ocenę anatomii naczyń, morfologii blaszek miażdżycowych oraz funkcji komórek (Curry i in., 2018).

1.1.5. Leczenie

Leczenie chorób sercowo-naczyniowych obejmuje zarówno modyfikację stylu życia, jak i farmakoterapię oraz interwencje zabiegowe. Eliminacja palenia, wprowadzenie zdrowej diety, regularna aktywność fizyczna oraz kontrola masy ciała, stanowią fundament prewencji pierwotnej i wtórnej (Hobbs, 2015). Farmakoterapia obejmuje szeroki wachlarz leków, w tym statyny obniżające poziom cholesterolu LDL, inhibitory ACE i ARB regulujące ciśnienie tętnicze, beta-blokery stosowane w chorobie niedokrwiennej serca i niewydolności serca, a także leki przeciwplatekcyjne i antykoagulanty zapobiegające powikłaniom zakrzepowym. W przypadku niedostatecznej skuteczności leczenia zachowawczego stosuje się metody zabiegowe, takie jak przeszkońska angioplastyka wieńcowa, pomostowanie aortalno-wieńcowe oraz implantacja urządzeń takich jak stymulatory, defibrylatory czy urządzenia wspomagające

pracę serca. Terapia powinna być indywidualizowana i dostosowywana do profilu ryzyka, chorób współistniejących oraz odpowiedzi pacjenta na leczenie (Netala i in., 2024).

1.2. Choroby sercowo-naczyniowe jako globalny problem

Choroby sercowo-naczyniowe są obecnie główną przyczyną zgonów i niepełnosprawności na świecie, odpowiadając za około jedną trzecią wszystkich zgonów. W 2023 roku liczba zgonów z powodu CVD osiągnęła 19,2 miliona, a ponad 626 milionów osób żyło z rozpoznanym schorzeniem układu krążenia, przy czym największy udział mają choroba niedokrwienna serca, udar mózgu oraz nadciśnieniowa choroba serca (Roth i in., 2020; Global Burden of Cardiovascular Diseases..., 2025). Globalny wzrost obciążenia CVD wynika zarówno ze starzenia się populacji, jak i zwiększonej ekspozycji na modyfikowalne czynniki ryzyka, w tym nadciśnienie tętnicze, hipercholesterolemię, otyłość, cukrzycę, palenie tytoniu, niezdrową dietę oraz zanieczyszczenie powietrza. Szacuje się, że blisko 80% przypadków CVD można przypisać tym czynnikom, których częstość wzrasta szczególnie w krajach o szybkim tempie urbanizacji i zmianach stylu życia (Magnussen i in., 2023; Chong i in., 2025). Największe obciążenie chorobami układu krążenia występuje w krajach o niskim i średnim dochodzie, gdzie ograniczony dostęp do profilaktyki, diagnostyki i leczenia przekłada się na wyższe wskaźniki śmiertelności. Nierówności socjoekonomiczne wpływają również na obciążenie CVD w populacjach o niższym statusie społecznym, niezależnie od szerokości geograficznej (Lear i in., 2025; Victor i in., 2025). Pomimo spadku standaryzowanych wiekowo wskaźników śmiertelności w krajach rozwiniętych, globalna liczba przypadków nadal rośnie, co odzwierciedla starzenie się populacji i narastanie przewlekłych chorób metabolicznych (GBD 2021 Diseases and Injuries Collaborators, 2024; Li i in., 2021). Skuteczne ograniczenie globalnego obciążenia CVD wymaga strategicznych działań zdrowia publicznego ukierunkowanych na redukcję czynników ryzyka, poprawę dostępu do opieki oraz zmniejszanie nierówności zdrowotnych (Lear i in., 2025; Hobbs, 2015).

2. Nanotechnologia, a choroby sercowo-naczyniowe

2.1. Nanotechnologia – definicja

Nanotechnologia może być zdefiniowana jako dziedzina nauki zajmująca się projektowaniem oraz zastosowaniem struktur, których przynajmniej jeden wymiar nie przekracza 100 nm. Wielkość ta jest porównywalna z rozmiarem takich makromolekuł jak enzymy czy receptory i jest zdecydowanie mniejsza od komórki ludzkiej. W wyniku procesów nanotechnologicznych powstają nanocząstki, a dzięki nanostrukturom możliwe jest kontrolowanie wielu właściwości fizykochemicznych substancji. W tej skali materia wykazuje nowe właściwości, różniące się od obserwowanych w większych rozmiarach (Sokół, 2012). Zmniejszenie układu materialnego do poziomu nanometrycznego powoduje m.in. zwiększenie stosunku powierzchni do objętości, co oznacza, że większa część atomów znajduje się na powierzchni, powodując wzrost reaktywności chemicznej lub zmiany w stabilności chemicznej. Do właściwości, które może wykazywać materia w skali nanometrycznej, zalicza się także specyficzne cechy optyczne oraz przewodnictwo elektryczne. Nanomateriały często wykazują znacznie wyższą wytrzymałość mechaniczną i twardość w porównaniu do swoich makroskopowych odpowiedników (Bielecki i Kalinowska, 2003).

2.2. Nanotechnologia w medycynie

Nanotechnologia, będąca jednym z najbardziej dynamicznie rozwijających się obszarów nauki, otwiera nowe perspektywy w medycynie, zwłaszcza w dziedzinie dostarczania leków. Nanocząstki, ze względu na swoje wyjątkowe właściwości fizykochemiczne, oferują innowacyjne podejście do terapii farmakologicznych, umożliwiając bardziej precyzyjne i efektywne dostarczanie substancji leczniczych do określonych tkanek i komórek. Prowadzone są intensywne badania nad różnorodnymi typami nanocząstek, takimi jak nanosfery, nanokapsułki, liposomy czy micle (Czyż i in., 2011; Szymański i in., 2012). Oczekiwanym skutkiem wprowadzenia nanotechnologii do medycyny i farmacji jest poprawa skuteczności działania leków oraz zmniejszenie działań niepożądanych. Zastosowanie nanotechnologii jest niezwykle wszechstronne i obejmuje zarówno diagnostykę, jak i leczenie. Nanocząstki mogą być stosowane do produkcji sztucznych tkanek i narządów, a wyniki badań ostatnich lat dają nadzieję na stworzenie nanorobotów zaprogramowanych do naprawy konkretnych komórek, charakteryzujących się większą precyzją niż sprzęt wykorzystywany obecnie (Szymański i in., 2012; Snopczyński i in., 2009).

2.3. Nanotechnologia w kardiologii

Nanotechnologia w kardiologii stanowi przełomową platformę umożliwiającą precyzyjne oddziaływanie na procesy biologiczne na poziomie niedostępnym dla tradycyjnych metod diagnostycznych i terapeutycznych. Postęp w inżynierii nanomateriałów, obejmujący nanocząstki złota, struktury polimerowe oraz układy teranostyczne, zmienia sposób diagnozowania i leczenia chorób układu krążenia (Spivak i in., 2013; Guo i in., 2023; Tong i in., 2024). Ze względu na globalne znaczenie chorób sercowo-naczyniowych konieczne jest opracowywanie bardziej selektywnych terapii, a nanotechnologia – dzięki możliwościom precyzyjnego dostarczania leków, obrazowania molekularnego i modulacji procesów zapalnych – staje się fundamentem nowoczesnej kardiologii (Peng i in., 2024; Taniguchi i in., 2025; *Nanomedicine in Cardiology...*, 2024). Kluczową cechą nanomateriałów jest możliwość precyzyjnego kontrolowania ich właściwości, takich jak wielkość, kształt, ładunek powierzchniowy i funkcjonalizacja chemiczna, co umożliwia selektywne oddziaływanie m.in. ze śródbłonkiem, makrofagami i komórkami mięśni gładkich naczyń. Szczególne znaczenie mają nanocząstki złota (AuNP), charakteryzujące się lokalizowaną powierzchniową rezonansową falą plazmonową, co czyni je wysoce efektywnymi kontrastami w obrazowaniu optycznym, fotoakustycznym i TK (Dykman i Khlebtsov, 2011; Daraee i in., 2016; Shakarami i Pooria, 2025). Funkcjonalizowane AuNP akumulują się w niestabilnych blaszkach miażdżycowych dzięki rozpoznawaniu markerów zapalnych, umożliwiając identyfikację obszarów wysokiego ryzyka pęknięcia blaszki (Tong i in., 2024; Taniguchi i in., 2025). Jednocześnie zapewniają przewagę nad klasycznymi środkami kontrastowymi w wyniku wyższej gęstości elektronowej niż jod (Daraee i in., 2016). Zastosowania nanotechnologii silnie obejmują również terapię ukierunkowaną. Nanocząstki złota, nośniki polimerowe i platformy hybrydowe umożliwiają precyzyjne dostarczanie leków, co ogranicza działania niepożądane terapii systemowych i zwiększa lokalną skuteczność substancji (Daraee i in., 2016; Peng i in., 2024; Pala i in., 2021). W miażdżycy i chorobie niedokrwiennej serca szczególnie ważna jest możliwość modulacji stanu zapalnego – nanocząstki mogą transportować statyny, antyoksydanty, siRNA i peptydy przeciwzapalne do makrofagów w obrębie blaszki (Mao i in.,

2023; Sahoo i in., 2022). Wykazano także, że AuNP redukują stres oksydacyjny i hamują proliferację komórek mięśni gładkich, przeciwdziałając restenozie po angioplastyce (Spivak i in., 2013; Guo i in., 2023). Wysoce obiecującym kierunkiem jest terapia fototermiczna, w której nanocząstki złota po absorpcji promieniowania NIR generują ciepło prowadzące do kontrolowanej ablacji komórek zapalnych. Badania wykazują, że procedura ta stabilizuje blaszki miażdżycowe poprzez eliminację makrofagów degradujących włóknistą czapę blaszki (Ghafari i in., 2024; Mao i in., 2023). Równocześnie nanomateriały wspierają regenerację tkanek mięśnia sercowego po niedokrwieniu (*Nanomedicine in Cardiology...*, 2024; Peng i in., 2024). Znaczącą rolę odgrywają także polimerowe nanomateriały o wysokiej biokompatybilności, które pozwalają na programowane środowiskowo i zależne uwalnianie leków, reagujące na zmiany pH, enzymy lub temperaturę (Peng i in., 2024; Shariati i in., 2023). Hybrydowe struktury łączące nanocząstki metaliczne z polimerami tworzą platformy teranostyczne, umożliwiające równoczesne obrazowanie, terapię oraz monitorowanie odpowiedzi na leczenie (Setia i in., 2023; Pala i in., 2021; Sahoo i in., 2022). Dynamiczny rozwój nanotechnologii wymaga jednak pogłębionej oceny bezpieczeństwa biologicznego. Właściwości nanocząstek determinują ich biodystrybucję, metabolizm i potencjalną toksyczność, co podkreśla konieczność standaryzacji metod oceny przedklinicznej oraz przewidywania długoterminowych efektów ich działania (Dykman i Khlebtsov, 2011; Snopczyński i in., 2009; Taniguchi i in., 2025). Coraz większą rolę w projektowaniu bezpiecznych nanomateriałów odgrywają sztuczna inteligencja i modele obliczeniowe (Taniguchi i in., 2025; Lear i in., 2025). Nanotechnologia staje się integralnym elementem nowoczesnej kardiologii, umożliwiając jednoczesne diagnozowanie, leczenie oraz monitorowanie przebiegu terapii, co wpisuje się w rozwój medycyny personalizowanej (Pala i in., 2021; Sahoo i in., 2022; Setia i in., 2023). Badania nad nanomateriałami zdolnymi do regeneracji tkanek i wspierania angiogenezy otwierają nowe perspektywy leczenia niewydolności serca (Guo i in., 2023; Tong i in., 2024). Zgromadzone dane jednoznacznie wskazują, że rola nanotechnologii w medycynie sercowo-naczyniowej będzie systematycznie wzrastać (Spivak i in., 2013; Dykman i Khlebtsov, 2011; Daraee i in., 2016; Guo i in., 2023; Peng i in., 2024; Taniguchi i in., 2025).

2.4. Właściwości fizykochemiczne nanocząstek złota w kontekście diagnostyki sercowo-naczyniowej

Nanocząstki złota wykazują unikatową zdolność do wzmacniania sygnałów optycznych dzięki efektowi LSPR, który wynika z kolektywnej oscylacji elektronów przewodzących na ich powierzchni. Efekt ten pozwala nie tylko na intensyfikację absorpcji i rozpraszania promieniowania świetlnego, ale również na generowanie ciepła, co stanowi podstawę terapii fototermicznej. Zjawisko plazmonowe jest silnie zależne od wielkości, kształtu oraz rozmieszczenia nanocząstek. Umożliwia to osiągnięcie pożądaných właściwości biofizycznych poprzez konkretne projektowanie ich struktury (Dykman i Khlebtsov, 2011; Daraee i in., 2016). Nanocząstki o średnicy 20–50 nm wykazują optymalną stabilność hemodynamiczną oraz odpowiednią powierzchnię do funkcjonalizacji biologicznej (Shakarami i Pooria, 2025). Zdolność do wnikania w mikrośrodowisko zapalne oraz możliwość detekcji sygnałów optycznych w zakresie bliskiej podczerwieni sprawiają, że AuNP są stosowane jako kontrasty w obrazowaniu fotoakustycznym i optycznym miażdżycy (Spivak i in., 2013; Tong i in., 2024).

Właściwości nanocząstek złota zależą nie tylko od ich wielkości i kształtu, lecz także od zastosowanych warstw biochemicznych. Powłoki polimerowe lub lipidowe mogą zwiększać ich stabilność, kontrolować rozpuszczalność oraz redukować immunogenność. Nanocząstki hydrofilowe charakteryzują się wydłużonym czasem krążenia w krwiobiegu, natomiast nanocząstki lipofilowe mają tendencję do akumulacji w obszarach bogatych w lipidy, takich jak blaszki miażdżycowe (Daraee i in., 2016; Guo i in., 2023).

2.5. Diagnostyka miażdżycy z wykorzystaniem nanocząstek złota

W diagnostyce miażdżycy szczególne znaczenie ma możliwość wczesnego wykrycia zmian patologicznych jeszcze przed pojawieniem się objawów klinicznych. Badania wskazują, że nanocząstki złota funkcjonalizowane przeciwciałami anti-CD36 lub anti-LOX-1 pozwalają na obrazowanie wczesnych etapów formowania się blaszki miażdżycowej. Dzięki swoim właściwościom optycznym nanocząstki mogą wzmacniać sygnał fotoakustyczny, co umożliwia uzyskanie obrazów struktur subkomórkowych z wysoką rozdzielczością (Taniguchi i in., 2025; Setia i in., 2023). Nanocząstki złota stosowane w tomografii komputerowej pozwalają na ocenę obecności mikrozwapnień w blaszkach oraz stopnia przebudowy ściany naczyniowej. Ze względu na wysoką liczbę atomową złota pochłanianie promieniowanie rentgenowskie bardziej efektywnie niż jod, co czyni je materiałem o dużym potencjale w diagnostyce obrazowej (Daraee i in., 2016). Nanotechnologia umożliwia ponadto rozwój zaawansowanych biosensorów oraz multimodalnych środków kontrastowych, które poprawiają czułość i swoistość obrazowania (MRI, CT, PET, ultrasonografia, fotoakustyka), pozwalając na wykrycie zmian miażdżycowych na poziomie molekularnym oraz monitorowanie efektów leczenia w czasie rzeczywistym (Shariati i in., 2023; Setia i in., 2023; Taniguchi i in., 2025). Nanoplatfony teranostyczne łączą funkcje diagnostyczne i terapeutyczne w jednym systemie, co pozwala na personalizację leczenia i szybką reakcję na progresję choroby (Sahoo i in., 2022; Pala i in., 2021; Mao i in., 2023).

2.6. Nanocząstki złota w terapii chorób sercowo-naczyniowych

Zastosowanie AuNP wykracza poza funkcje diagnostyczne. Ich wykorzystanie w terapii obejmuje zarówno dostarczanie leków, jak i modulację procesów patologicznych. Badania wykonane na modelach zwierzęcych wykazały, że nanocząstki złota mogą redukować stres oksydacyjny poprzez neutralizację reaktywnych form tlenu oraz hamować proliferację komórek mięśni gładkich, co pozwala na ograniczenie ryzyka restenoz (Spivak i in., 2013; Mao i in., 2023). Kombinacja funkcjonalizacji powierzchni AuNP z terapią lekową może stanowić fundament nowej generacji „inteligentnych” stentów, które nie tylko uwalniają leki, ale również aktywnie modulują mikrośrodowisko naczyniowe (Spivaka i in., 2013). Ocena terapeutyczna nanocząstek obejmuje również ich zdolność do inicjowania zmian termicznych. Terapia fototermiczna wykorzystuje lokalne podgrzewanie struktur bogatych w AuNP, co prowadzi do kontrolowanego niszczenia komórek zapalnych i lipidowych w rdzeniu blaszki miażdżycowej. Badania wykazały, że zabieg ten może stabilizować blaszkę poprzez eliminację komórek prozapalnych bez wywoływania uszkodzeń otaczających tkanek (Ghafari i in., 2024).

2.7. Nanomateriały polimerowe jako narzędzia terapii układu krążenia

Nanomateriały polimerowe są szeroko badane ze względu na ich wysoką elastyczność chemiczną, biodegradowalność i możliwość projektowania długotrwałego uwalniania leków. Nanokapsułki i nanociele mogą chronić przed degradacją delikatne cząsteczki, takie jak RNA terapeutyczne czy peptydy i dostarczać je do miejsc uszkodzeń naczyń. W artykułach podkreślono, że nanonośniki polimerowe są zdolne do kierunkowego reagowania na zmiany pH lub obecność enzymów proteolitycznych, co pozwala na inteligentne uwalnianie farmakoterapii (Peng i in., 2024; Shariati i in., 2023). Nanomateriały polimerowe są także wykorzystywane jako matryce do osadzania nanocząstek metalicznych, tworząc hybrydowe platformy teranostyczne. Rozwiązania te umożliwiają równoczesne obrazowanie naczyń oraz leczenie ich patologii, co stanowi kluczowy krok w kierunku personalizowanej terapii chorób sercowo-naczyniowych (Setia i in., 2023; Sahoo i in., 2022). Nanomateriały umożliwiają celowane dostarczanie leków przeciwzapalnych, przeciwplatek, antyoksydacyjnych czy genów do blaszek miażdżycowych, komórek mięśnia sercowego lub śródbłónka, poprawiając biodostępność i ograniczając toksyczność systemową (Daraee i in., 2016; Guo i in., 2023; Peng i in., 2024; Tong i in., 2024; Nanomedicine in Cardiology..., 2024). Nanotechnologia wspiera także inżynierię tkankową oraz regenerację mięśnia sercowego po zawale (Nanomedicine in Cardiology..., 2024; Shariati i in., 2023).

2.8. Nanoteranostyka i jej znaczenie dla przyszłości kardiologii

Nanoteranostyka integruje funkcje diagnostyczne i terapeutyczne w jednym systemie, co pozwala na jednoczesne wykrywanie i leczenie zmian patologicznych. W kardiologii podejście to ma ogromne znaczenie, ponieważ zmiany miażdżycowe charakteryzują się zróżnicowanym stopniem aktywności zapalnej. Możliwość monitorowania odpowiedzi terapeutycznej w czasie rzeczywistym oraz natychmiastowej modyfikacji leczenia stanowi przełom w medycynie personalizowanej. Przeglądy naukowe wskazują, że teranostyczne systemy nanocząstek mogą znacznie zwiększać skuteczność leczenia poprzez precyzyjne dostarczanie leków oraz ocenę dynamiki zmian chorobowych (Pala i in., 2021; Sahoo i in., 2022; Setia i in., 2023).

3. Podsumowanie

3.1. Perspektywy i ograniczenia

Wprowadzenie nanomateriałów do praktyki klinicznej wymaga spełnienia rygorystycznych norm dotyczących bezpieczeństwa biologicznego. Nanocząstki różnią się zachowaniem w zależności od ich ładunku, funkcjonalizacji, kształtu i rozmiaru. Badania podkreślają, że niewielkie różnice w strukturze nanocząstki mogą prowadzić do zmiany jej biodystrybucji, toksyczności oraz interakcji z układem odpornościowym (Dykman i Khlebtsov, 2011). Wyzwania obejmują również konieczność przewidywania długoterminowych skutków gromadzenia się nanocząstek w organizmie, zwłaszcza w wątrobie, śledzionie i nerkach. W najnowszych badaniach podkreślono, że integracja uczenia maszynowego i modelowania molekularnego może przyspieszyć rozwój bezpiecznych systemów nanoterapeutycznych, umożliwiając dokładne przewidywanie toksyczności oraz optymalizację ich właściwości (Taniguchi i in., 2025; Lear i in., 2025). Wyzwania kliniczne obejmują immunogenność, cytotoksyczność oraz translację nanoterapii do praktyki klinicznej, jednak wczesne badania

kliniczne, takie jak NANOM-FIM, potwierdzają bezpieczeństwo i skuteczność wybranych nanoterapii w chorobach naczyniowych (Taniguchi i in., 2025; Sahoo i in., 2022). Nanotechnologia ma potencjał, by zrewolucjonizować diagnostykę i leczenie chorób sercowo-naczyniowych, oferując precyzję molekularną i personalizację terapii (Spivak i in., 2013; Daraee i in., 2016; Guo i in., 2023; Peng i in., 2024; Pala i in., 2021; Sahoo i in., 2022).

3.2. Wnioski

Nanotechnologia stanowi jeden z najbardziej obiecujących kierunków rozwoju współczesnej kardiologii. Nanocząstki złota, nanomateriały polimerowe oraz hybrydowe systemy teranostyczne pozwalają na precyzyjne obrazowanie zmian patologicznych, modulowanie procesów zapalnych i proliferacyjnych oraz inteligentne dostarczanie leków. Dzięki zdolności do integracji diagnostyki i terapii w jednej platformie nanotechnologia otwiera nowy rozdział w medycynie personalizowanej. Badania przedkliniczne i translacyjne pokazują, że rozwiązania te mogą w niedalekiej przyszłości stać się standardem leczenia chorób sercowo-naczyniowych, o ile zostaną spełnione rygorystyczne kryteria bezpieczeństwa (Spivak i in., 2013; Dykman i Khlebtsov, 2011; Daraee i in., 2016; Tong i in., 2024; Peng i in., 2024).

Bibliografia:

1. Bielecki, S., & Kalinowska, H. (2003). Biotechnologiczne nanomateriały. *Postępy Mikrobiologii*, 47(3), 163–169.
2. Chong, B., Jayabaskaran, J., Jauhari, S. M., i in. (2025). The global syndemic of modifiable cardiovascular risk factors projected from 2025 to 2050. *Journal of the American College of Cardiology*, 86(3), 165–177.
3. Curry, S. J., Krist, A. H., Owens, D. K., i in. (2018). Risk assessment for cardiovascular disease with nontraditional risk factors: US Preventive Services Task Force recommendation statement. *JAMA*, 320(3), 272–280.
4. Czyż, K., Dobrzański, Z., Patkowska-Sokoła, B., & Zabłocka, M. (2011). Rozwój i zastosowania nanotechnologii. *Przegląd Hodowlany*, 10, 32–35.
5. Daraee, H., Eatemadi, A., Abbasi, E., Fekri Aval, S., Kouhi, M., & Akbarzadeh, A. (2016). Application of gold nanoparticles in biomedical and drug delivery. *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, 44(1), 410–422.
6. Dykman, L. A., & Khlebtsov, N. G. (2011). Gold nanoparticles in biology and medicine: Recent advances and prospects. *Acta Naturae*, 3(2), 34–55.
7. Elisaf, M. (2001). The treatment of coronary heart disease: An update. Part 1: An overview of the risk factors for cardiovascular disease. *Current Medical Research and Opinion*, 17(1), 18–26.
8. Flora, G. D., & Nayak, M. K. (2019). A brief review of cardiovascular diseases, associated risk factors and current treatment regimes. *Current Pharmaceutical Design*, 25(38), 4063–4084.
9. GBD 2021 Diseases and Injuries Collaborators. (2024). Global incidence, prevalence, YLDs, DALYs, and HALE for 371 diseases and injuries in 204 countries and territories, 1990–2021: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. *The Lancet*, 403(10440), 2133–2161.

10. Ghafari, Y., Asefnejad, A., & Ogbemudia, D. O. (2024). Gold nanoparticles in biomedicine: Advancements in cancer therapy, drug delivery, diagnostics, and tissue regeneration. *Scientific Hypotheses*, 3(1), 1–15.
11. Guo, J., Wang, H., Li, Y., i in. (2023). Nanotechnology in coronary heart disease. *Acta Biomaterialia*, 171, 37–67.
12. Hobbs, F. D. (2015). Prevention of cardiovascular diseases. *BMC Medicine*, 13, 261.
13. Jurgens, C. Y., Lee, C. S., Aycock, D. M., i in. (2022). State of the science: The relevance of symptoms in cardiovascular disease and research. *Circulation*, 146(12), e173–e184.
14. Lear, S. A., McKee, M., Hystad, P., i in. (2025). Social factors, health policy, and environment: Implications for cardiovascular disease across the globe. *European Heart Journal*.
15. Li, Z., Lin, L., Wu, H., i in. (2021). Global, regional, and national deaths and DALYs for cardiovascular disease in 2017 and trends and risk analysis from 1990 to 2017. *Frontiers in Public Health*, 9, 559751.
16. Magnussen, C., Ojeda, F. M., Leong, D. P., i in. (2023). Global effect of modifiable risk factors on cardiovascular disease and mortality. *The New England Journal of Medicine*, 389(14), 1273–1285.
17. Mao, Y., Ren, J., & Yang, L. (2023). Advances of nanomedicine in treatment of atherosclerosis and thrombosis. *Environmental Research*, 238(Pt 2), 116637.
18. Netala, V. R., Teertam, S. K., Li, H., & Zhang, Z. (2024). A comprehensive review of cardiovascular disease management. *Cells*, 13(17), 1471.
19. O'Donnell, C. J., & Nabel, E. G. (2011). Genomics of cardiovascular disease. *The New England Journal of Medicine*, 365(22), 2098–2109.
20. Pala, R., Pattnaik, S., Busi, S., & Nauli, S. M. (2021). Nanomaterials as novel cardiovascular theranostics. *Pharmaceutics*, 13(3), 348.
21. Peng, F., Wang, Z., Qiu, Z., i in. (2024). Nanomedicine in cardiology: Precision drug delivery for enhanced patient outcomes. *Life Sciences*, 358, 123199.
22. Rajendran, A., Minhas, A. S., Kazzi, B., i in. (2023). Sex-specific differences in cardiovascular risk factors and implications for cardiovascular disease prevention in women. *Atherosclerosis*, 384, 117269.
23. Roth, G. A., Mensah, G. A., Johnson, C. O., i in. (2020). Global burden of cardiovascular diseases and risk factors, 1990–2019. *Journal of the American College of Cardiology*, 76(25), 2982–3021.
24. Sahoo, R. K., Singh, H., Thakur, K., Gupta, U., & Goyal, A. K. (2022). Theranostic applications of nanomaterials in the field of cardiovascular diseases. *Current Pharmaceutical Design*, 28(2), 91–103.
25. Setia, A., Mehata, A. K., Priya, V., i in. (2023). Current advances in nanotheranostics for molecular imaging and therapy of cardiovascular disorders. *Molecular Pharmaceutics*, 20(10), 4922–4941.
26. Shakarami, A., & Pooria, A. (2025). Gold nanoparticles in cardiovascular medicine. *Annals of Medicine & Surgery*, 87, 7356–7361.
27. Shariati, L., Esmaeili, Y., Rahimmanesh, I., i in. (2023). Advances in nanobased platforms for cardiovascular diseases. *Environmental Research*, 238, 116933.

28. Snopczyński, T., Góralczyk, K., Czaja, K., i in. (2009). Nanotechnology – possibilities and hazards. *NIZP–PZH, Warszawa*.
29. Sokół, J. L. (2012). Nanotechnologia w życiu człowieka. *Politechnika Białostocka*.
30. Spivak, M. Y., Bubnov, R. V., Yemets, I. M., i in. (2013). Gold nanoparticles – the theranostic challenge for PPPM: Nanocardiology application. *The EPMA Journal*, 4(18), 1–17.
31. Taniguchi, Y., Khamis, R., & Joner, M. (2025). Clinical needs and translational prospects of cardiovascular nanomedicine. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 788, 152801.
32. Tong, J., Wang, Z., Zhang, J., i in. (2024). Advanced applications of nanomaterials in atherosclerosis diagnosis and treatment. *ACS Applied Materials & Interfaces*.
33. Victor, G., Shishani, K., Vellone, E., & Froelicher, E. S. (2025). The global burden of cardiovascular disease in adults: A mapping review. *Journal of Cardiovascular Nursing*.
34. Westfall, E., Viere, A. B., & Genewick, J. E. (2023). Preventing CVD in women: Common questions and answers. *American Family Physician*, 108(6), 595–604.

2. WPLYW MUZYKI NA UKŁAD NERWOWY DZIECKA – DONIESIENIA Z BADAŃ PILOTAŻOWYCH

Marta Giża-Mydlarz

E-mail: martagiza88@interia.pl

1. Wstęp

Układ nerwowy dziecka rozwija się wyjątkowo dynamicznie, a jego wysoka plastyczność powoduje, że reaguje on intensywnie na bodźce sensoryczne, zwłaszcza te o strukturze rytmicznej i przewidywalnej. W literaturze psychologicznej wskazuje się, że muzyka wpływa na aktywność zarówno struktur korowych, jak i podkorowych, wspierając regulację emocji oraz procesy uwagi [Słoboda, 2002].

Z kolei polskie opracowania z zakresu muzykoterapii podkreślają znaczenie muzyki w obniżaniu pobudzenia, redukcji stresu i poprawie funkcji poznawczych u dzieci [Kamińska, 2014]. Mechanizmy te są spójne z koncepcją regulacji autonomicznej, według której bodźce rytmiczne aktywują układ przywspółczulny i sprzyjają neurocepcji bezpieczeństwa [Białkowski i in., 2015].

Terapia metodą Vojty oraz terapia logopedyczna ze stymulacją orofacyjną wymagają od dziecka adekwatnej regulacji sensorycznej i emocjonalnej. Niestabilność emocjonalna, nadmierne pobudzenie lub obniżona tolerancja dotyku często utrudniają wejście w zadanie. W związku z tym krótkie interwencje przygotowujące, takie jak muzyka, mogą poprawiać skuteczność terapii.

Celem badania było określenie wpływu pięciominutowej ekspozycji muzycznej na regulację emocji oraz gotowość dzieci do terapii Vojty i terapii logopedycznej.

2. Wyniki i dyskusja

W badaniu uczestniczyło 11 dzieci w wieku od 7 do 10 lat, zróżnicowanych pod względem diagnoz i trudności rozwojowych. W grupie znalazły się dzieci z obniżonym lub wzmożonym napięciem mięśniowym, zaburzeniami przetwarzania sensorycznego, opóźnieniem rozwoju psychoruchowego oraz problemami logopedycznymi. Sześcioro dzieci uczęszczało regularnie na terapię metodą Vojty, natomiast pięcioro uczestniczyło w terapii logopedycznej ze stymulacją orofacyjną.

Interwencja muzyczna miała formę pięciominutowej sesji obejmującej spokojne utwory instrumentalne o niskiej zmienności dynamicznej. Utwory charakteryzowały się tempem około 60–70 BPM oraz minimalistyczną strukturą, co sprzyja regulacji autonomicznej. Muzyka była odtwarzana bezpośrednio przed rozpoczęciem terapii, w warunkach zapewniających stałość natężenia dźwięku i minimalizujących dodatkowe bodźce sensoryczne.

W badaniu zastosowano metody jakościowe i ilościowe. Wywiady z terapeutami dostarczyły danych dotyczących gotowości dziecka do pracy, emocjonalnego nastawienia oraz przebiegu pierwszych minut terapii. Ankiety dla rodziców obejmowały pytania o zachowania dziecka przed i po interwencji. Analiza obserwacyjna została przeprowadzona w trakcie zajęć

i skupiała się na mimice, reaktywności emocjonalnej, napięciu mięśniowym, sposobie reagowania na dotyk oraz szybkości wchodzenia w zadanie.

Tabela 1. Charakterystyka badanych dzieci

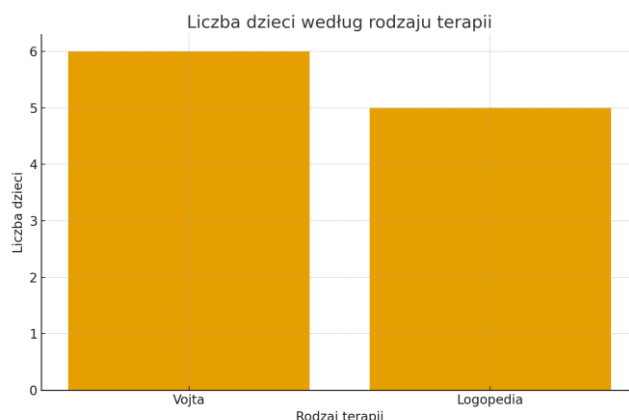
Typ terapii	Liczba dzieci	Wiek (zakres)
Terapia Vojty	6	7- 10 lat
Stymulacja orofacyjna	5	7- 10 lat

Analiza wyników wykazała, że pięciominutowa interwencja muzyczna wywiera wyraźny wpływ na regulację emocjonalną oraz gotowość dzieci do uczestnictwa w terapii. Wszyscy terapeuci zauważyli obniżenie poziomu pobudzenia, a także szybsze i mniej problematyczne wejście w zadanie. Dzieci, które początkowo reagowały niepokojem lub odmową, po kilku sesjach z muzyką zaczęły akceptować przebieg zajęć w sposób bardziej przewidywalny i spokojny.

W terapii metodą Vojty szczególnie wyraźne były zmiany dotyczące reakcji na dotyk i pozycjonowanie ciała. Dzieci wykazywały mniejszy opór, a ich napięcie mięśniowe było bardziej wyrównane. W terapii logopedycznej odnotowano mniejsze reakcje obronne, lepszą tolerancję stymulacji orofacyjnej oraz większą gotowość do podejmowania prób artykulacyjnych.

Zaobserwowano również poprawę koncentracji uwagi. Dzieci szybciej kierowały wzrok na terapeutę, rzadziej odwracały głowę i częściej utrzymywały uwagę na zadaniu przez dłuższy czas. Zjawisko to można tłumaczyć stabilizacją rytmów neuronalnych pod wpływem powtarzalnej struktury muzycznej.

Ograniczenia badania obejmują niewielką wielkość próby, brak grupy kontrolnej oraz różnorodność diagnoz. Mimo to zbieżność obserwacji rodziców, terapeutów i analizy zachowania znacząco wzmacnia wiarygodność wyników.



Regulacja emocjonalna

Większość dzieci wykazała niższy poziom pobudzenia po interwencji muzycznej. Zgodnie z doniesieniami z zakresu muzykoterapii, muzyka o powtarzalnym rytmie może stabilizować reakcje autonomiczne i redukować napięcie emocjonalne [Kamińska, 2014].

Podobne efekty opisuje psychologia muzyki, wskazując na integrację muzyki z mechanizmami regulacji limbicznej [Słoboda, 2002].

Rodzice zauważali zmniejszenie niepokoju separacyjnego, a terapeuci – bardziej spokojne wejście w przestrzeń terapeutyczną.

Gotowość do współpracy

Terapeuci odnotowali poprawę w pierwszych minutach zajęć: dzieci szybciej akceptowały pozycje terapeutyczne, mniej protestowały i chętniej podejmowały zadania. W pracy logopedycznej zauważono mniejszy opór przed stymulacją orofacyjną.

Efekty te korespondują z obserwacjami Białkowskiego i współautorów [Białkowski i in., 2015], którzy wskazują, że muzyka wpływa na tonus mięśniowy oraz poziom pobudzenia układu nerwowego.

Koncentracja uwagi

Dzieci po ekspozycji muzycznej cechowały się:

- dłuższym kontaktem wzrokowym,
- mniejszą liczbą reakcji unikowych,
- szybszym podjęciem aktywności.

Mechanizmy te można wiązać z wpływem muzyki na synchronizację fal mózgowych, co opisują badania polskiej psychologii muzyki [Słoboda, 2002].

Ograniczenia badania

Jak wskazuje Kowalska [2017], w badaniach nad wpływem muzyki na zachowanie dzieci często pojawia się problem małych prób — podobnie jak w niniejszym projekcie. Brak grupy kontrolnej oraz zróżnicowana diagnostyka uczestników ograniczają możliwości generalizacji wyników. Badanie miało jednak charakter pilotażowy i jego celem było sprawdzenie, czy efekt w ogóle występuje — co zostało potwierdzone.

3. Wnioski

1. Nawet bardzo krótka, pięciominutowa ekspozycja na spokojną muzykę wpływa na obniżenie pobudzenia i stabilizację emocji dziecka [Kamińska, 2014].
2. Zastosowanie interwencji muzycznej zwiększa gotowość dzieci do terapii Vojtę i logopedycznej, zmniejszając opór przed dotykiem i ułatwiając przejście do zadania [Białkowski i in., 2015].
3. Interwencja muzyczna wpływa pozytywnie na koncentrację uwagi oraz jakość pierwszych minut zajęć [Słoboda, 2002; Kowalska, 2017].
4. Metoda jest tania, szybka, praktyczna i może być stosowana zarówno w gabinecie, jak i przez rodziców w domu.
5. Wyniki zachęcają do realizacji badań kontrolowanych z zastosowaniem pomiarów neurofizjologicznych (HRV, EEG).

Bibliografia:

1. Białkowski A., Głuska A., Grabias A. (2015). Muzyka i emocje. Warszawa: UMFC.
2. Brzozowska B. (2020). Wpływ muzyki na funkcjonowanie emocjonalne dzieci w wieku przedszkolnym. *Psychologia Rozwojowa*, 25(3), 45–58.
3. Kamińska A. (2014). Muzykoterapia w pracy z dziećmi. Kraków: Impuls.
4. Kowalska M. (2017). Znaczenie muzyki relaksacyjnej w regulacji emocji u dzieci. *Edukacja Elementarna*, 12(2), 87–98.
5. Słoboda J. A. (2002). Psychologia muzyki. Warszawa: PWN.

3. WODOGŁOWIE NIEKOMUNIKUJĄCE JAKO POWIKŁANIE GUZÓW MÓZGU

Jan Jędrusiak, Karolina Grzywacz, Zachary Greinert-Czekalski, dr.n.med. Karolina Tworek

Uniwersytet Kaliski im. Prezydenta Stanisława Wojciechowskiego

Wydział Medyczny i Nauk o Zdrowiu

Studenckie Koło Naukowe Neurologii

ul. Kaszubska 13, 62 - 800 Kalisz

E-mail: jendrula05@gmail.com

1. Wstęp

Wodogłowie (hydrocefalia) to stan patologiczny, który można scharakteryzować jako nadmierne nagromadzenie płynu mózgowo – rdzeniowego (PMR) w obrębie układu komorowego mózgu. Co roku, na całym świecie notuje się około 400 000 nowych przypadków wodogłowia u dzieci. [1 Kahle i wsp., 2024] Ze względu na okres występowania w życiu, można je podzielić na wrodzone, obecne przy urodzeniu, lub nabyte, które pojawia się po urodzeniu i w dalszych okresach życia. [2] Wodogłowie wrodzone występuje z częstością 1-4 na 1000 urodzeń [3 Chahnavi i wsp., 2001], a jego przyczynami są: czynniki genetyczne (głównie mutacje w obrębie genów *LICAM*, *OTUD5*, *AP1S2*, *MPDZ*, *CCDC88C* [1 Kahle i wsp., 2024]), infekcje i zakażenia przebyte w czasie ciąży, np. zakażenie toksoplazmozą, przedwczesne narodziny, krwotoki w obrębie centralnego układu nerwowego oraz nieprawidłowości w budowie mózgu, takie jak zablokowany wodociąg mózgu lub *malformacja Dandy'ego Walkera*. [4] Z kolei najczęstszymi przyczynami wodogłowia nabytego u dorosłych, które stanowi 50% wszystkich diagnozowanych hydrocefalii, są: krwotoki podpajęczynówkowe, urazy głowy, zapalenie opon mózgowo – rdzeniowych, nowotwory i torbiele w obrębie mózgu, oraz przeszkody w obrębie układu komorowego mózgu. [3 Chahnavi i wsp., 2001]] Ze względu na mechanizm powstawania, wodogłowie można także podzielić na komunikujące lub niekomunikujące, zwane także obturacyjnym lub obstrukcyjnym. Hydrocefalia komunikująca powstaje, gdy przepływ PMR jest zablokowany po opuszczeniu układu komorowego mózgu lub gdy płyn mózgowo – rdzeniowy jest nadmiernie produkowany. Natomiast wodogłowie obturacyjne ma miejsce, kiedy zaburzony jest przepływ PMR między komorami mózgu, na skutek zwężeń w przejściach w tym układzie. [5] Ponadto wyróżniamy także dwa typy, będące poza wyżej wymienionymi kategoriami. Są to: wodogłowie normotensyjne, w którym dochodzi do powiększenia komór mózgu, bez wzrostu ciśnienia wewnątrzczaszkowego oraz wodogłowie *ex vacuo*, w przebiegu którego zanikający miąższ mózgu zostaje zastąpiony nadmiarem płynu mózgowo – rdzeniowego bez wzrostu ciśnienia w obrębia mózgu. [6]

2. Wodogłowie niekomunikujące

PMR produkowany jest przez miąższ mózgu, spłot naczyńiówkowy oraz wyściółkę komór mózgu. W warunkach anatomicznych znajduje się on w komorach bocznych, a następnie przepływa do trzeciej komory przez otwór Monro. Później trafia do komory czwartej przez wodociąg mózgu, aby na końcu znaleźć się w przestrzeni podpajęczynówkowej za pośrednictwem otworów Magendiego i Luschki. [7 Maller i wsp., 2016] Przeszkody w przepływie PMR w obrębie tych miejsc, prowadzą do powstania wodogłowia niekomunikującego. W przebiegu guzów w obrębie mózgu jest to bardzo poważny problem. W przypadku tej patologii u dzieci, w 51,5% występuje wodogłowie, z czego aż 98% stanowi wodogłowie niekomunikujące [8 Wong i wsp., 2011], co podkreśla istotę problemu.

3. Sposoby diagnozowania wodogłowia

Diagnozowanie hydrocefalii opiera się głównie o metody obrazowe, takie jak tomografia komputerowa, rezonans magnetyczny (skany FLAIR - Fluid Attenuated Inversion Recovery, T1w, T2w) lub USG przezciemiączkowe. W ich przypadku najczęściej obserwuje się zwiększoną objętość PMR oraz poszerzenie układu komorowego mózgu, a co za tym idzie poszerzenie rogów skroniowych. Można także zauważyć zmniejszenie gęstości tkanki w obrębie rogów przednich i tylnych oraz zmniejszoną odległość mostowo – wzgórkową [9 Langner i wsp., 2017]. Metodami inwazyjnymi stosowanymi w diagnozowaniu wodogłowia są: punkcje lędźwiowe, pomiar ciśnienia PMR za pomocą wentrykulostomii podłączonej do przetwornika ciśnienia oraz zastosowanie przetwornika wewnątrzmiąższowego. [10 Wall i wsp., 2017] U dzieci mierzy się także obwód głowy oraz obserwuje się uwypuklenie ciemiączek (do 18 miesiąca życia).

4. Objawy zwiększonego ciśnienia wewnątrzczaszkowego

Objawy zwiększonego ciśnienia wewnątrz czaszkowego mogą różnić się w zależności od wieku pacjenta i rodzaju posiadanego wodogłowia. Ostry wzrost ciśnienia wewnątrzczaszkowego powoduje wgłobienie płata skroniowego i mózdzku, co prowadzi do zaburzeń funkcji ruchowych i czuciowych, zaburzeń układu autonomicznego, utraty odruchów pnia mózgu, śpiączki. [9 Langner i wsp., 2017]] Z kolei powoli postępujące wodogłowie przewlekłe charakteryzuje się trzema grupami objawów: fizycznym, neurologicznymi oraz kognitywnymi i behawioralnymi. Do najczęstszych objawów fizycznych należą bóle głowy, szyi i pleców, wymioty, nudności. Wśród objawów neurologicznych dominują zaburzenia widzenia, problemy z równowagą i pamięcią. Natomiast zmiany behawioralne obejmują głównie zmiany osobowości, drażliwość i ospałość. [10 Wall i wsp., 2017] [11] Objawem, który najczęściej skłaniał dorosłych pacjentów do wizyty w szpitalu były bóle głowy, które występowały w przypadku 84,3% przypadków wodogłowia. [10 Wall i wsp., 2017] W przypadku wodogłowia normotensyjnego, zespół charakterystycznych objawów nazywa się triadą Hakima. W jej skład wchodzi zaburzenia chodzenia, nietrzymanie moczu oraz otępienie. [12 Tipton i wsp., 2024]

5. Oponiaki śródkomorowe

Oponiaki śródkomorowe są rzadkim nowotworem mózgu, które wywodzą się z komórek oponowych obecnych w układzie komorowym. Stanowią one od 0,5–5%

wszystkich oponiaków wewnątrzczaszkowych. Ponad 80% guzów rozwija się w komorze bocznej, a guzy komory trzeciej i czwartej występują bardzo rzadko. [13 Chae-Yong i wsp., 2020] Oponiaki układu komorowego klasyfikowane są do trzech stopni histologicznych złośliwości, przy czym stopień I stanowi około 80%, a stopnie II i III odpowiednio 20–25% i 1–6%. Mogą rosnąć swobodnie w świetle komory lub przyściennie, przylegając do jej ściany, co ma kluczowe znaczenie dla mechanizmu wodogłowia. W okresie od 2008 roku do 2017 roku, zdiagnozowano 14 503 histologicznie potwierdzonych przypadków oponiaków wewnątrzczaszkowych, z których 0,08% (11 przypadków) pochodziło z komory czwartej. [14 Maller i wsp., 2016] Średni wiek pacjentów wynosił 46,5 roku (rozkład wahał się od 28 do 66 lat). Występowała niewielka przewaga mężczyzn – 6 pacjentów płci męskiej i 5 płci żeńskiej. Badania histologiczne wykazały oponiaka włóknistego u 7 pacjentów, oponiaka bogatego w limfocyty i plazmocyty u 1 pacjenta, oponiaka meningotelialnego u 1 pacjenta, oponiaka przejściowego u 1 pacjenta i oponiaka jasnokomórkowego u 1 pacjenta. U 10 pacjentów wykonano MRI, przeszedł on w zamian TK. Rozmiar guza, w oparciu o jego największą średnicę w neuroobrazowaniu, średnia średnica guza wynosi około 39mm (rozkład wahał się od 19 mm do 74 mm). Wodogłowiu stwierdzono u 7 pacjentów, a obrzęki okołoguzowe stwierdzono u 4 pacjentów. [15 Luo i wsp., 2019]

6. Guzy tylnego dołu czaszki

Guzy tylnego dołu czaszki (ang. Posterior Fossa - PF) są częstą przyczyną wodogłowia obturacyjnego. U dorosłych przerzuty są najczęstszymi nowotworami w PF. Wśród nowotworów pierwotnych najczęściej występują oponiak, nerwiak nerwu przedsionkowego i naczyniak krwionośny zarodkowy. Najczęstszymi u dzieci i młodzieży są guzy glejowe, a następne w kolejności są rdzeniaki zarodkowe i wyściółczaki. [16 Palacios, 2022] [17 Riva-Cambrin i wsp., 2012] W przypadkach guzów tylnego dołu przeszkoda ta najczęściej lokalizuje się na poziomie ujść czwartej komory, rzadziej w obrębie wodociągu mózgu lub otworów bocznych czwartej komory. Przyczyną niedrożności bywa bezpośrednie wypełnienie światła komory przez masę guza, ucisk struktur komorowych przez guz zewnątrzkomorowy, a także wtórny obrzęk okołoguzowy. Innymi mechanizmami zamknięcia przepływu mogą być krwawienie wewnątrzguzowe lub martwica guza prowadzące do zatkania drogi przepływu PMR. [18 Won i wsp., 2018] [19 Culley i wsp., 2018] Znaczenie guzów tylnego dołu jako przyczyny wodogłowia niekomunikacyjnego jest szczególnie widoczne u dzieci. W badaniu „*Management of Hydrocephalus in Children with Posterior Fossa Tumors*” oceniono retrospektywnie 87 dzieci z guzami tylnego dołu. Średni wiek dzieci przy prezentacji wynosił 7,3 roku (zakres 0,2–19,7). W momencie przyjęcia wodogłowiu stwierdzono u 79 % dzieci. Po resekcji guza wodogłowiu ustąpiło u 59 % osób, co pokazuje, że u znacznej części dzieci wodogłowiu było spowodowane mechaniczną obturacją, którą usunięcie guza potrafiło wyeliminować. [20 Chen i wsp., 2023] Analiza 121 pacjentów operowanych z powodu guzów czwartej komory wykazała, że 12,9 % wymagało po operacji trwałego drenażu PMR. Czynnikiem ryzyka przetrwałego wodogłowia była górna (ku wodociągowi) ekspansja guza i niedoszczętna resekcja. [17 Riva-Cambrin i wsp., 2012]

7. Guzy linii pośrodkowej

Guzy rozwijające się w obrębie linii pośrodkowej mózgu, zwłaszcza w okolicy podwzgórza oraz komory trzeciej, stanowią szczególnie istotną przyczynę wodogłowia niekomunikującego. Ich centralne położenie w bezpośrednim sąsiedztwie wąskich dróg krążenia płynu mózgowo-rdzeniowego sprawia, że nawet niewielkie zmiany objętościowe mogą prowadzić do istotnych zaburzeń odpływu płynu. Czaszko gardlak jest jednym z najczęstszych guzów tej okolicy. Wykazuje wzrost ku górze, w kierunku dna komory trzeciej, pozostając w ścisłym kontakcie z jej strukturami. Najważniejszym mechanizmem prowadzącym do wodogłowia niekomunikującego w tej lokalizacji jest blokada przepływu płynu mózgowo-rdzeniowego na poziomie połączenia komory trzeciej z wodociągiem mózgu. Wodociąg Sylwiusza, ze względu na bardzo wąskie światło, jest szczególnie podatny na ucisk, przemieszczenie lub zamknięcie. Wraz z postępującym wzrostem guza dochodzi do deformacji dna komory trzeciej oraz przemieszczenia struktur okołokomorowych, takich jak słupy sklepienia czy wzgórze. Zmiany te zaburzają prawidłowy kierunek i dynamikę przepływu PMR, prowadząc do jego kumulacji w komorach bocznych i trzeciej. Dodatkowo, obecność komponenty torbielowatej, często spotykanej w czaszko gardlakach, może powodować nagłe zwiększenie objętości guza, skutkujące ostrą obturacją wodociągu mózgu i gwałtownym rozwojem wodogłowia niekomunikującego. [21 Wong i wsp., 2011] [22 O'Brien i wsp., 2006]

8. Metody leczenia

Standard leczenia endoskopowego jest wynikiem stuletniego doskonalenia technik i miniaturyzacji narzędzi. Początki to wczesne lata XX w., gdy V. Lespinasse użył cystoskopu do leczenia wodogłowia u dzieci. W 1922 r. W. Dandy wprowadził termin „wentrykuloscopia”. Przełomem był rok 1923, kiedy W. J. Mixter przeprowadził pierwszą udaną ETV, udowadniając możliwość udrożnienia dróg płynowych bez implantacji ciała obcego. Sukces ten zainspirował pionierów takich jak T. Putnam i J. Scarff do rozwoju instrumentarium umożliwiającego bezpieczniejszą fenestrację dna trzeciej komory.

Metoda wróciła do łask w latach 60. XX w. za sprawą G. Guiota, który z powodzeniem wykonywał zabiegi u dorosłych i niemowląt. Kolejna rewolucja nastąpiła w latach 70., gdy T. Fukushima i H. Griffith wprowadzili endoskopy elastyczne (fibroskopy), znacząco poprawiając wizualizację i manewrowość. Jako jedni z pierwszych postulowali oni ETV jako leczenie pierwszego rzutu w wodogłowiu dziecięcym.

Dzisiejsza neurochirurgia integruje to dziedzictwo z inżynierią biomedyczną. Procedury ETV wspierane są przez nawigację stereotaktyczną i robotykę, co zapewnia wysoką precyzję. Rozwinęły się techniki hybrydowe, np. połączenie ETV z koagulacją spłotu naczyń włosowatych, zwiększające efektywność w trudnych przypadkach. [23 Demerdash i wsp., 2016]

Wodogłowie niekomunikujące w przebiegu guzów mózgu często wymaga natychmiastowej interwencji neurochirurgicznej w celu obniżenia ciśnienia wewnątrzczaszkowego (ang. intracranial pressure ICP). W literaturze przedmiotu jedną z najczęściej stosowanych procedur ratujących życie w ostrych stanach jest zewnętrzny drenaż komorowy (ang. external ventricular drain EVD). Unikalną cechą EVD jest możliwość wykonania procedury natychmiast, przy łóżku pacjenta. Jest to kluczowe w sytuacjach gwałtownego pogorszenia stanu pacjenta. Standardem jest technika tzw. „wolnej ręki”, polegająca na kaniulacji przedniego rogu komory bocznej (zazwyczaj ipsilateralnej) w oparciu

o punkty orientacyjne na czaszce. Pozwala to na szybkie odbarczenie układu komorowego w stanach zagrożenia życia. Mimo powszechności, EVD obarczone jest ryzykiem błędu technicznego i powikłań. Skuteczność prawidłowego umiejscowienia cewnika szacuje się na około 70%. Należy podkreślić, że ostateczna śmiertelność w tej grupie chorych koreluje ściślej z progresją choroby podstawowej (guzem) niż z jakością drenażu. Do najistotniejszych ryzyk należą:

Tabela 1: Najczęstsze powikłania EVD i ich częstość występowania

Powikłania krwotoczne	< 30% zabiegów
Niewłaściwe umiejscowienie cewnika	< 45% zabiegów
Powikłania infekcyjne	< 40% zabiegów

Wystąpienie powikłań wpływa na rokowanie, zwiększając ryzyko chorób współistniejących, czas hospitalizacji i potencjalnie śmiertelność. Dlatego mimo doraźnego charakteru zabiegu, kluczowa jest precyzja wykonania i rygorystyczne monitorowanie pacjenta. [24 Sharma i wsp., 2024]

W populacji pediatrycznej szczególną pozycję w leczeniu wodogłowia zajmuje wentrykulostomia komory III (*Endoscopic Third Ventriculostomy*, ETV). Zabieg ten stanowi nowoczesną alternatywę dla układów zastawkowych, oferując rozwiązanie bliższe fizjologicznemu krążeniu PMR. Procedura polega na endoskopowym wytworzeniu stomii w dnie trzeciej komory. Umożliwia to bezpośrednią komunikację między układem komorowym, a przestrzenią podpajęczynówkową, z pominięciem zablokowanego wodociągu mózgu, co jest częstym mechanizmem wodogłowia przy guzach tylnego dołu czaszki. Zabieg ten eliminuje ryzyko powikłań mechanicznych (awarie zastawek, rozłączenie drenów) oraz drastycznie redukuje ryzyko infekcji odcewnikowych. W neurochirurgii dziecięcej "niezależność od zastawki" przekłada się na znaczącą poprawę jakości życia. Skuteczność metody u dzieci jest wysoka – wskaźnik sukcesu klinicznego szacuje się na 62–70%. Oznacza to, że u większości pacjentów udaje się trwale przywrócić prawidłowe ICP bez użycia zastawek. Procedura cechuje się też stosunkowo niskim profilem ryzyka powikłań, pod warunkiem zachowania precyzji mikrochirurgicznej. Współczesna medycyna pozwala na precyzyjną kwalifikację do zabiegu dzięki skali *ETV Success Score*. Narzędzie to szacuje prawdopodobieństwo powodzenia, uwzględniając wiek dziecka, etiologię wodogłowia oraz historię leczenia. Dzięki temu wyodrębnia się grupę pacjentów o największych potencjalnych korzyściach. Wentrykulostomia komory III jawi się jako bezpieczna i skuteczna metoda, minimalizująca traumatyczność leczenia poprzez unikanie implantów. W kontekście powikłań guza mózgu u dzieci jest to często metoda z wyboru. [25 Minta i wsp., 2023]

Gdy metody endoskopowe są nieskuteczne, standardem pozostaje implantacja układu zastawkowego. Systemy te składają się z trzech elementów: drenu komorowego (odprowadza PMR z komory), mechanizmu zastawkowego (reguluje przepływ) oraz drenu obwodowego (kieruje płyn do jamy otrzewnej lub serca). Technologia uległa znacznej dywersyfikacji. Wyróżniamy układy klasyczne (ciśnieniowozależne), z antysyfonem, programowalne oraz regulujące przepływ. Mechanizmy mogą być membranowe, szczelinowe, stożkowe lub sprężynowo-kulkowe. Dobór rozwiązania jest zindywidualizowany, zależny od wieku pacjenta i dynamiki produkcji PMR. Postęp inżynierijski koncentruje się na minimalizacji powikłań. Wprowadzono systemy zminiaturyzowane dla wcześniaków oraz typu one-piece skracające

zabieg. Kluczowa jest walka z infekcjami – stosuje się powłoki hydrożelowe czy dreny z antybiotykami, redukujące ryzyko kolonizacji bakteryjnej. Mimo to leczenie zastawkowe obarczone jest ryzykiem powikłań dzielonych na trzy kategorie:

- Mechaniczne: najczęstsza przyczyna rewizji (niedrożność drenów, awaria mechanizmu).
- Czynnościowe: wynikają z zaburzeń dynamiki (nadmierny drenaż prowadzi do zespołu wąskich komór lub krwiaków podtwardówkowych; niedostateczny – do nawrotu objawów).
- Infekcyjne: najczęstsze u niemowląt, wymagają zwykle usunięcia układu, drenażu zewnętrznego i antybiotykoterapii.

Implantacja wymaga staranności chirurgicznej: wprowadzenia drenu do komory, umieszczenia zastawki podskórną i przeprowadzenia drenu do otrzewnej. Po sprawdzeniu drożności rany zszywa się warstwowo. Wszczepienie zastawki to leczenie objawowe na całe życie, wymagające stałej opieki neurochirurga, okulisty i psychologa. Rewizje wykonuje się wyłącznie przy objawach niesprawności systemu. [26 Mikołajczyk-Wieczorek i wsp., 2009]

9. Podsumowanie

Wodogłowie niekomunikujące, które może występować zarówno u dzieci, jak i dorosłych, stanowi poważne powikłanie guzów mózgu. Najczęstsze nowotwory powodujące tę patologię to: oponiaki śródmózgowia, guzy tylnego dołu czaszki oraz guzy linii pośrodkowej. Metody leczenia, które wraz z ich udoskonalaniem minimalizują ryzyko powikłań, pozwalają skutecznie eliminować wodogłowie niekomunikujące i w większości przypadków obejmują zewnętrzny drenaż komorowy, wentrykulostomię III komory oraz systemy zastawkowe.

Bibliografia:

1. Kahle KT, Klinge PM, Koschnitzky JE, Kulkarni AV, MacAulay N, Robinson S, Schiff SJ, Strahle JM. Paediatric hydrocephalus. Nat Rev Dis Primers. 2024 May 16.
2. "Hydrocephalus Fact Sheet". ninds.nih.gov. National Institute of Neurological Disorders and Stroke. 5 April 2016.
3. Chahlavi A, El-Babaa SK, Luciano MG. Adult-onset hydrocephalus. Neurosurg Clin N Am. 2001 Oct.
4. Hydrocephalus Association, <https://www.hydroassoc.org/about-hydrocephalus> (About hydrocephalus, 2023).
5. „Communicating and Non-Communicating Hydrocephalus” <https://www.hydroassoc.org/communicating-non-communicating-hydrocephalus>.
6. „Hydrocephalus”, <https://www.ninds.nih.gov/health-information/disorders/hydrocephalus>
7. Maller VV, Gray RI. Noncommunicating Hydrocephalus. Semin Ultrasound CT MR. 2016 Apr.
8. Wong, TT., Liang, ML., Chen, HH. et al. „Hydrocephalus with brain tumors in children.” Childs Nerv Syst 27, 1723–1734 (2011).
9. Langner S, Fleck S, Baldauf J, Mensel B, Kühn JP, Kirsch M. Diagnosis and Differential Diagnosis of Hydrocephalus in Adults. Rofo. 2017 Aug.
10. Wall M. Update on Idiopathic Intracranial Hypertension. Neurol Clin. 2017 Feb.

11. „Hydrocephalus” <https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/hydrocephalus/symptoms-causes/syc-20373604>.
12. Tipton PW, Elder BD, Cogswell PM, Graff-Radford N. Normal pressure hydrocephalus, or Hakim syndrome: review and update. *Neurologia i Neurochirurgia Polska*. 2024.
13. Kim CY, Hwang K, Jung HW. Intraventricular meningiomas. *Handb Clin Neurol*. 2020.
14. Maller VV, Gray RI. Noncommunicating Hydrocephalus. *Semin Ultrasound CT MR*. 2016 Apr.
15. Luo W, Xu Y, Yang J, Liu Z, Liu H. Fourth Ventricular Meningiomas. *World Neurosurg*. 2019 Jul.
16. Palacios CAR, Miranda HRA, Pacheco MAE. Hydrocephalus secondary to tumors of the posterior fossa: review article. *J Neurol Stroke*. 2022.
17. Riva-Cambrin J, Detsky AS, Lamberti-Pasculli M, et al. Predictors of postresection hydrocephalus in pediatric patients with posterior fossa tumors. *Journal of Neurosurgery: Pediatrics*. 2012.
18. Won SY, Dubinski D, Cattani A, et al. Hydrocephalus in posterior fossa tumors. *Neurocritical Care*. 2018.
19. Culley DJ, Berger MS, Walter KA. Hydrocephalus associated with posterior fossa metastases. *Neurosurgical Review*. 2018.
20. Chen Z, Zhou M, Wen H, Wang Q, Guan J, Zhang Y, Zhang W. Predictive factors for persistent postoperative hydrocephalus in children undergoing surgical resection of periventricular tumors. *Front Neurol*. 2023 Jul.
21. Wong TT, Liang ML, Chen HH, Chang FC. Hydrocephalus with brain tumors in children. *Childs Nerv Syst*. 2011 Oct.
22. O'Brien DF, Hayhurst C, Pizer B, Mallucci CL. Outcomes in patients undergoing single-trajectory endoscopic third ventriculostomy and endoscopic biopsy for midline tumors presenting with obstructive hydrocephalus. *J Neurosurg*. 2006 Sep.
23. Endoscopic Third Ventriculostomy: A Historical Review. *Br J Neurosurg*. 2016 Oct.
24. Single institution series describing external ventricular drain (EVD) placement and short- and long-term complications related to placement accuracy. *Surg Neurol Int*. 2024 Mar.
25. Outcomes of endoscopic third ventriculostomy (ETV) and ventriculoperitoneal shunt (VPS) in the treatment of paediatric hydrocephalus: Systematic review and meta-analysis. *Childs Nerv Syst*. 2023 Nov 27.
26. Leczenie wodogłowa za pomocą systemów zastawkowych. Shunt systems in the treatment of hydrocephalus. *Klinika Neurochirurgii Instytutu Centrum Zdrowia Matki Polki*, 27.03.2009.

4. CASE REPORT: RZADKA ODMIANA OSTEOSARCOMA CONVENTIONAL G3 U 16-LETNIEJ PACJENTKI, WYZWANIA TERAPETYCZNE I ROZWIĄZANIE CHIRURGICZNE

Filip Mądry, Weronika Woźniak

Key words: osteosarcoma, case report, limb-sparing surgery, pulmonary metastases

1. Wprowadzenie

Osteosarcoma jest najczęstszym pierwotnym nowotworem złośliwym kości, choć nadal należy do chorób występujących stosunkowo rzadko. Źródła podają, że w grupie wiekowej odpowiadającej naszej pacjentce rejestruje się około 40 nowych przypadków rocznie w Polsce [1]. Przerzuty do płuc stwierdza się u około 14.1% pacjentów [2]. Stanowią one niekorzystny czynnik rokowniczy — u chorych bez przerzutów odnotowano wzrost długoterminowej przeżywalności z około 20% do ponad 70%, podczas gdy w grupie z przerzutami wynosi ona 20–30% [2]. Mimo istnienia schematów leczenia popartych wieloletnimi badaniami, osteosarcoma o wysokim stopniu złośliwości wciąż stanowi istotne wyzwanie dla współczesnej medycyny.

2. Cel pracy

W artykule skupiono się na problematyce terapii systemowej oraz przedstawiono skuteczność operacji ratującej kończynę u 16-letniej pacjentki z rozpoznaniem osteosarcoma *conventional* G3.

3. Wyniki

16-letnia pacjentka z dolegliwościami bólowymi prawego stawu kolanowego została skierowana do naszego ośrodka po wykonaniu zdjęcia RTG, które wzbudziło podejrzenie obecności zmian patologicznych. Poddano ją pilnej diagnostyce, obejmującej badanie MRI oraz tomografię komputerową. Zmianę opisano następująco: „Masywna zmiana naciekowa dalszej nasady i dalszej części trzonu prawej kości udowej z patologicznym odczynem okostnowym oraz niewielką masą przykostną przy bocznej i tylnej powierzchni przynasady”. Wykonano biopsję otwartą guza i pobrano wycinki do oceny histopatologicznej. Wynik brzmiał - „Osteosarcoma – typ osteoblastyczny, częściowo chondroblastyczny, myksoidalny, High Grade Conventional Osteosarcoma”. Wdrożono leczenie systemowe zgodnie z protokołem EURAMOS, a następnie wykonano resekcję zmiany wraz z alloplastyką z użyciem endoprotezy MUTARS. Rana goiła się bez powikłań; uzyskano pełny wyprost oraz zgięcie do 90°. Podczas zabiegu pobrano kolejne wycinki, których wynik spowodował zmianę leczenia systemowego na terapię adjuwantową. W trakcie dalszych badań obrazowych zauważono zmiany przerzutowe w płucach, wobec czego podjęto decyzję o przekazaniu pacjentki do ośrodka o wyższej referencyjności.

4. Dyskusja

Osteosarcoma jest rzadko występującą jednostką chorobową, a jej rozpoznanie wiąże się z trudnym i złożonym procesem diagnostycznym. Z tego względu każdy przypadek powinien być kierowany do ośrodków o najwyższej referencyjności, co zapewnia dostęp do kompleksowej diagnostyki oraz szerokiego wachlarza procedur terapeutycznych. Kluczowe znaczenie ma określenie stopnia złośliwości zmiany (gradingu), który wpływa na wybór strategii leczenia. Osteosarcoma stosunkowo rzadko daje przerzuty – odsetek ten wynosi około 14,1% [2], a ich obecność jest bardzo niekorzystnym czynnikiem rokowniczym. W każdym przypadku rozpoznania osteosarcoma kluczowy jest czas wdrożenia leczenia, gdyż maksymalizuje to szansę na zachowanie kończyny. Obecnie dostępnych jest wiele zaawansowanych metod leczenia chirurgicznego, a onkologiczna chirurgia rekonstrukcyjna stanowi dynamicznie rozwijającą się dziedzinę ortopedii [3]. W przypadku naszej pacjentki zastosowane leczenie operacyjne umożliwiło zachowanie kończyny oraz utrzymanie funkcji motorycznych.

Bibliografia:

1. Rutkowski P, Świtaj T, Kosela-Paterczyk H, Kotrych D, Goryń T, Mazurkiewicz T, et al. Postępowanie diagnostyczno-terapeutyczne u chorych na mięsaki kości — zalecenia ekspertów. *Onkologia w Praktyce Klinicznej - Edukacja*. 2023;9(3):181–200. doi:10.5603/owpk_edu.91852.
2. Liu T, Cui L, He Z, Chen Z, Tao H, Yang J. Epidemiology and nomogram of pediatric and young adulthood osteosarcoma patients with synchronous lung metastasis: A SEER analysis. *PLoS One*. 2023 Jul 12;18(7):e0288492. doi: 10.1371/journal.pone.0288492. PMID: 37437020; PMCID: PMC10337906.
3. Belayneh, R., Fourman, M.S., Bhogal, S. *et al.* Update on Osteosarcoma. *Curr Oncol Rep* 23, 71 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11912-021-01053-7>.

5. GENETYCZNIE UWARUNKOWANE ZESPOŁY PADACZKOWE

Damian Kucner

Uniwersytet Kaliski im. Prezydenta Stanisława Wojciechowskiego

Wydział Medyczny i Nauk o Zdrowiu

Studenckie Koło Neurologiczne

Plac Wojciecha Bogusławskiego 2, 62-800 Kalisz

E-mail.: damkuc111@gmail.com

1. Wstęp

Genetycznie uwarunkowane zespoły padaczkowe stanowią jedną z kategorii w etiologicznym podziale padaczek według International League Against Epilepsy. Zespoły te definiowane są przez określony wiek wystąpienia, charakterystyczne typy napadów i specyficzne cechy EEG (elektroencefalografia). Ich etiologia uwarunkowana jest często genetycznie. Obejmują one szerokie spektrum zaburzeń, od dość łagodnych genetycznych padaczek uogólnionych (GGE-Genetic Generalized Epilepsies), po najcięższe rozwojowe i padaczkowe encefalopatie (DEE-Developmental Epileptic Encephalopathy). Zrozumienie podłoża molekularnego ma kluczowe znaczenie dla trafnej diagnostyki i wyboru terapii, umożliwiającą ochronę funkcji poznawczych.

2. Materiał i metody

Niniejsza praca ma charakter przeglądowy. Została przygotowana w oparciu o aktualne piśmiennictwo naukowe dotyczące genetycznie uwarunkowanych zespołów padaczkowych. Dobór materiału źródłowego obejmował publikacje z okresu 2020–2025. W procesie wyszukiwania literatury wykorzystano bazy danych PubMed, Scopus, ScienceDirect, Google Scholar, a także repozytoria otwartego dostępu, takie jak PMC. Do analizy włączono artykuły oryginalne, przeglądy systematyczne, metaanalizy, opisy przypadków oraz aktualne wytyczne towarzystw neurologicznych, w szczególności International League Against Epilepsy (ILAE). Kryterium wykorzystania publikacji była jej zgodność z zakresem pracy, w szczególności dotycząca etiologii genetycznej, epidemiologii, przebiegu choroby, charakterystycznych cech zapisów EEG, diagnostyki molekularnej, a także współczesnych strategii terapeutycznych wybranych zespołów padaczkowych. Publikacje poddano analizie pod kątem jakości metodologicznej, aktualności danych oraz przydatności klinicznej. Celem zastosowanej metodyki było uzyskanie możliwie szerokiego i aktualnego obrazu genetycznie uwarunkowanych zespołów padaczkowych. Uwzględniające najnowsze doniesienia naukowe oraz rosnącą rolę diagnostyki molekularnej w praktyce klinicznej.

3. Wyniki i dyskusja

Młodzieńcza padaczka miokloniczna

Młodzieńcza padaczka miokloniczna (JME- Juvenile Myoclonic Epilepsy) jest najczęściej diagnozowanym uogólnionym zespołem padaczkowym. Stanowi około 5–10% wszystkich idiopatycznych przypadków [Fayad i in., 2024].

Wiek

Zazwyczaj ujawnia się w okresie dorastania, najczęściej pomiędzy 12 a 18 rokiem życia. Opisywano jednak przypadki z początkiem we wcześniejszym dzieciństwie oraz we wczesnej dorosłości [Amrutkar i Riel-Romero, 2023]. Wskazany przedział wieku jest dość specyficzny i sam w sobie kieruje na podejrzenie rozpoznania, w szczególności jeśli pacjent zgłasza poranne wyładowania mięśniowe.

Objawy

Charakterystyczne są napady miokloniczne, czyli krótkie, symetryczne szarpnięcia mięśni, z reguły kończyn górnych. Częste są również uogólnione napady toniczno-kloniczne, a także napady nieświadomości [Amrutkar i Riel-Romero, 2023]. Mioklonie z reguły pojawiają się w pierwszej godzinie po przebudzeniu. Przez pacjentów jest to opisywane wypadanie przedmiotów z rąk czy gwałtowne szarpnięcia bez utraty świadomości. Charakterystyczny jest także wpływ czynników prowokujących, takich jak brak snu, stres, alkohol czy intensywne światło, które mogą nasilać objawy [Amrutkar i Riel-Romero, 2023; Fayad i in., 2024,].

Diagnostyka

Diagnostyka opiera się w głównej mierze na wywiadzie i EEG. W badaniu neurologicznym i obrazowaniu nie stwierdza się zwykle nieprawidłowości, co wskazuje na idiopatyczny charakter choroby. W zapisie EEG obserwuje się typowo uogólnione wyładowania polipików i fal wolnych, czasem prowokowanych fotostymulacją. Błędne rozpoznanie, np. jako padaczki ogniskowej, może prowadzić do wdrożenia niewłaściwych leków, pogarszających przebieg [Amrutkar i Riel-Romero, 2023].

Podłoże genetyczne

Dotychczas badania wskazują, że w patogenezie JME znaczną rolę odgrywają tak czynniki genetyczne, jak również środowiskowe. Do wystąpienia napadów padaczkowych predysponują geny kodujące podjednostki receptorów GABAergicznym, takie jak GABRA1, GABRB3 oraz kanały jonowe jak CACNB4, EFHC1, a także elementy, mające wpływ na zmianę sieci neuronalnych [Amrutkar i Riel-Romero, 2023]. Fayada i in [2024] w swojej pracy zaobserwowali, że niektóre warianty genu EFHC1 mogą powodować zwiększenia ryzyka oporności na leczenie. Podkreślić jednak należy, że wpływ pojedynczych mutacji jest raczej nieznaczny, ponadto zależy od interakcji z innymi genami, a także czynnikami środowiskowymi.

U podstaw JME leżą mechanizmy obejmujące mutacje punktowe, ale również warianty polimorficzne o mniejszym, lecz sumującym się efekcie. Nica i wsp. analizując wyniki rodzinne i badania kohortowe wskazują na dziedziczenie złożone, oligogenowe. Trudno jest

zatem wskazać pojedynczy gen odpowiedzialny za pełny obraz kliniczny [Nica, 2024]. Analizy molekularne prowadzą do wniosków, że mutacje w takich genach jak GABRA1 i EFHC1 mogą prowadzić do zaburzenia prawidłowego funkcjonowania interneuronów GABAergicznym w korze mózgowej. Co w kolejnym etapie zmienia próg pobudliwości neuronalnej, ułatwiając generowanie charakterystycznych napadów mioklonicznych [Amrutkar i Riel-Romero, 2023].

Leczenie i rokowanie

Leczenie oparte jest na lekach przeciwpadaczkowych. Lekiem pierwszego wyboru ze względu na wysoką skuteczność jest walproinian. U części pacjentów pojawiają się jednak ograniczenia w jego stosowaniu, zwłaszcza u kobiet w wieku rozrodczym [Amrutkar i Riel-Romero, 2023]. Około 20-30% chorych może rozwijać oporność na leczenie pierwszej linii [Fayad i in., 2024]. Czynnikiem ryzyka lekooporności są współistniejące zaburzenia psychiatryczne. Obecność trzech typów napadów, napady gorączkowe oraz spożywanie alkoholu [Fayad i in., 2024, Nica 2024]. Pacjenci o takich cechach wymagają indywidualnego podejścia oraz modyfikacji leczenia. Rokowanie w JME jest z reguły korzystne, chociaż leczenie może być przewlekłe [Amrutkar i Riel-Romero, 2023]. Lekooporność może obniżać jakość życia. Dodatkowe obciążenia, jak zaburzenia nastroju, mogą znacząco komplikować przebieg choroby [Nica, 2024]. Większość pacjentów osiąga jednak stabilną kontrolę objawów.

Dziecięca i młodzieńcza padaczka z napadami nieświadomości (CAE/JAE *Childhood Absence Epilepsy, Juvenile Absence Epilepsy*)

Wiek

Dziecięca padaczka z napadami nieświadomości przypada zazwyczaj na okres wczesnoszkolny. Zwykle pomiędzy 4 a 10 rokiem życia. Wyraźny szczyt osiąga natomiast w wieku około 5–7 lat. W większości przypadków rozwój dzieci przed wystąpieniem pierwszych epizodów jest prawidłowy. Natomiast w młodzieńczej padaczce z napadami nieświadomości początek choroby jest późniejszy. Przypada on na okres dojrzewania, zatem zarówno rokowanie jak i współistniejące typy napadów mogą się różnić [Harvey i Shahwan, 2024].

Objawy

Typowe napady nieświadomości są krótkie. Można zaobserwować nagłe zatrzymanie aktywności. Wzrok utkwiony w jeden punkt oraz absolutny brak reakcji na otoczenie. Stan taki utrzymuje się do kilku sekund. Po napadzie naturalny powrót bez dezorientacji do przerwanej czynności. Udaje się zaobserwować drobne automatyzmy, lecz nie są niezbędne do rozpoznania. W przypadku CAE jedyną manifestacją choroby mogą być wyłącznie napady, natomiast w JAE często współwystępują uogólnione napady toniczno-kloniczne [Harvey i Shahwan, 2024]. Jeśli chodzi o częstość napadów w CAE może być wysoka, kilkanaście a nawet kilkadziesiąt napadów dziennie. Może to zaburzać normalne funkcjonowanie dziecka, w szczególności w szkole. W JAE epizody zazwyczaj są rzadsze, jednak bardziej obciążająca jest obecność dodatkowych typów napadów.

Diagnostyka

EEG pozostaje podstawowym narzędziem diagnostycznym. Obraz napadu to regularne, uogólnione wyładowania iglicowo-falowe o częstości ok. 3 Hz [Harvey i Shahwan, 2024]. Szczególnie przydatna wśród młodszych pacjentów jest próba prowokacyjna, która polega na hiperwentylacji. Zapisy EEG posiadają ograniczoną wartość prognostyczną. Choć cechy charakterystyczne są dobrze opisane, to ich związek z odpowiedzią na terapię, czy też ryzykiem nawrotów jest niejednoznaczny. Badaniach wskazują, że nawet ogniskowe wyładowania interiktalne, nie zawsze korelowały z gorszym rokowaniem [Harvey i Shahwan, 2024]. Coraz większą uwagę zwraca ilościowa analiza EEG. Analiza badań wskazuje między innymi na wzrost mocy widmowej w pasmach delta i theta przed napadem, a także spadek entropii sygnału zarówno przed, jak i po napadzie. Wskazywać to może na zmniejszoną złożoność aktywności neuronalnej [Leitch, 2024].

Podłoże genetyczne

Heebnera i in. [2024] w swojej pracy podkreśla, że u dzieci z padaczkami uogólnionymi w wyniku badań genetycznych ujawniają się często patogenne bądź potencjalnie patogenne warianty genów. Skutkować to musi zmianą podejścia terapeutycznego i diagnostycznego. Dziedziczenie w przypadku CAE i JAE jest poligeniczne, ale fenotyp zależny jest od współistnienia wielu wariantów, które indywidualnie skutkują niewielkim efektem. Przegląd Leitcha [2024] wskazuje, że liczne mutacje genetyczne, wpływając na kanały jonowe, synapsy oraz regulację sieci neuronalnych, mogą prowadzić do hypersynchronizacji, która jest niezbędna do wytworzenia rytmu 3 Hz. Złożoność patofizjologii istotnie utrudnia opracowanie standardowej terapii, bowiem nie jeden gen, ale wiele genów prowadzi do podobnego fenotypu.

Leczenie i rokowanie

Standardem w leczeniu CAE jest etosuksymid lub kwas walproinowy. Etosuksymid stosowany jest z bardzo dobrą skutecznością w napadach nieświadomości, kiedy wyłącznie one manifestacją chorobę. W sytuacji, gdy występują również napady toniczno-kloniczne, zwłaszcza w JAE, z reguły stosowany jest kwas walproinowy. Lamotrygina to alternatywny chemioterapeutyk, jednak w klasycznych napadach nieświadomości jej skuteczność jest niższa, a reakcja może być zróżnicowana [Harvey i Shahwan, 2024]. Większość pacjentów dobrze odpowiada na farmakoterapię, uzyskując kontrolę napadów. Możliwa jest nawet całkowita remisja w okresie dojrzewania u niektórych dzieci. CAE posiada stosunkowo dobre rokowanie. Zdecydowana większość pacjentów uzyskuje remisję [Harvey i Shahwan, 2024]. W JAE pod kątem całkowitej remisji kształtuje się to nieco gorzej. Wynika to po części ze względu na częste współwystępowanie różnych typów napadów.

Uogólnione napady toniczno-kloniczne (GTCS- Generalized Tonic-Clonic Seizure)

Wiek

Uogólnione napady toniczno-kloniczne to jeden z najczęstszych typów napadów, które są obserwowane zarówno w padaczkach idiopatycznych, jak i objawowych. Literatura wskazuje stosunkowo szeroki zakres wieku zachorowania. Pierwsze GTCS pojawiają się z reguły w okresie dzieciństwa lub dorastania. Jest to typowe w szczególności w przypadku

genetycznych padaczek uogólnionych. Napady mogą się jednak ujawniać u części pacjentów dopiero w wieku dorosłym. Rodzi to pewne trudności diagnostyczne i skutkuje opóźnieniem w postawieniu trafnego rozpoznania [Vorderwülbecke, Wandschneider, Weber, Holtkamp, 2022]. Wczesne wystąpienia napadów może wskazywać na silniejsze podłoże genetyczne, jednak nie zawsze skutkuje bardziej agresywnym przebiegiem.

Objawy

Obraz kliniczny w GTCS jest dość konwencjonalny, należy jednak zaznaczyć, że chorzy często opisują prodromy, polegające na niepokoju czy krótkotrwałych zaburzeniach świadomości. Napady toniczno-kloniczne całkowicie wyłączają świadomości. Często prowadzą również do urazów wtórnych i znacznego wyczerpania. GTCS bywają również poprzedzane innymi rodzajami, są to między innymi epizody nieświadomości bądź napady miokloniczne [Wang, Rao, Zhang, Gan, 2023].

Diagnostyka

W diagnostyce kluczowe znaczenie posiada EEG, gdzie można zaobserwować wyładowania uogólnione, najczęściej 3 Hz bądź szybsze, tzw. polyspike-wave. EEG cechuje się większą skutecznością wśród dzieci. W przypadku dorosłych może być niejednoznaczne, zwłaszcza kiedy zmiany są subtelne lub rzadkie [Vorderwülbecke i in., 2022]. Obrazowanie nie wykazuje zazwyczaj zmian strukturalnych, toteż wskazuje na rozpoznanie podłoża czynnościowego.

Podłoże genetyczne

Z pomocą przychodzi dynamiczny postęp w dziedzinie genetyki. Dzięki niemu można wyraźniej poznać złożone mechanizmy genetyczne, które leżą u podstaw padaczek uogólnionych. Niestety, jak już wspomniano nie jest to mutacja pojedynczego genu, lecz grupy genów. Zaburzona zostaje funkcja kanałów jonowych, synaps oraz regulacja pobudliwości neuronalnej. Badania naukowe wskazują między innymi mutacje w genach kodujących podjednostki receptorów GABA. Mutacje w zakresie genów GABRA1 czy GABRB3, mogą prowadzić do hamowania synaptycznego i sprzyjać uogólnionej nadpobudliwości kory. Z kolei mutacje w genach kanałów sodowych, takich jak SCN1A i SCN2A, mogą prowadzić do modyfikacji progu pobudliwości neuronów i wpływać na fenotyp GTCS. Uwagę zwraca także mutacja w obrębie genu CHD2, jest on bowiem szczególnie związany z napadami mioklonicznymi oraz fenotypami o wczesnym początku. Tak duża złożoność oraz wielogenowość leżące u podstaw wyjaśniają heterogenność kliniczną, a także zróżnicowane reakcje chorych na terapię [Vorderwülbecke i in., 2022, Wang i in., 2023].

Leczenie i rokowanie

Terapia GTCS oparta jest w głównej mierze na lekach przeciwpadaczkowych takich jak kwas walproinowy, lamotrygina czy lewetyracetam. Wybór zależy od wieku, chorób towarzyszących, ale również płci, w szczególności u kobiet planujących ciążę [Kodankandath, Theodore, Samanta, 2025]. Rokowanie z reguły jest dobre, szczególnie gdy wcześnie postawiono diagnozę i leczenie było systematyczne. Chorzy zazwyczaj uzyskują zadowalającą kontrolę napadów. Jednak w przypadku niesystematycznego leczenia bądź działania

czynników wyzwalających, jak stres czy deprawacja snu, może dojść do nawrotów [Vorderwülbecke i in., 2022].

Zespół Dravet (DS- Dravet Syndrome)

Wiek

Zespół Dravet występuje stosunkowo rzadko. To ciężka postać padaczki genetycznej i encefalopatii padaczkowo-rozwojowej. Pierwsze napady pojawiają się w większości przypadków już w pierwszym roku życia, często pomiędzy 2 a 9 miesiącem [Zielińska i in., 2024]. Napady charakteryzują się uogólnionymi, długotrwałymi drgawkami, często toniczno-klonicznymi. Wywoływane są z reguły w wyniku gorączki lub podwyższonej temperatury. Z wiekiem stosunkowo często ujawniają się zaburzenia rozwojowe, takie jak opóźnienie motoryczne, spowolnienie rozwoju psychoruchowego oraz zaburzenia poznawcze i behawioralne [Chilcott, Díaz, Bertram, Berti, Karda, 2022].

Objawy

Zespół Dravet cechuje zdecydowana lekoopornością. Standardowe leki przeciwpadaczkowe nie są skuteczne. Prowadzą jedynie do częściowej redukcji częstości napadów [Vasquez i Wirrell, 2025]. Poza samymi napadami, bardzo ważna jest obecność objawów pozapadaczkowych. Dochodzi do upośledzenia intelektualnego, opóźnienia rozwoju mowy, zaburzeń zachowania, a nawet do cech autystycznych [Zielińska i in., 2024].

Diagnostyka i podłoże genetyczne

Fundamentalne znaczenie w precyzyjnej diagnostyce odgrywa badanie genetyczne. Ponad 80% chorych poddanych badaniom posiada mutację de novo w jednym z alleli genu SCN1A, odpowiedzialnym za podjednostkę alfa kanału sodowego NaV1.1 [Chilcott i in., 2022]. Wskazany kanał sodowy ma istotne znaczenie w komórkach GABA-ergicznych interneuronów. Odpowiedzialne są one za hamowanie aktywności neuronalnej. Mutacje w genie SCN1A upośledzają funkcję interneuronów, to z kolei zaburza równowagę pobudzenia i hamowania w ośrodkowym układzie nerwowym. Badania nie wykazują jasnej zależności między konkretnym wariantem SCN1A, a ciężkim przebiegiem choroby, obecnością zaburzeń poznawczych, autyzmu czy ataksji. Co potwierdza szeroką heterogeniczność genotypowo-fenotypową. Ponadto w praktyce klinicznej ważne dla rozróżnienia DS od drgawek gorączkowych pomocne są takie parametry jak wiek pierwszego napadu, wystąpienie drgawek do 72 godzin po szczepieniu, a także obecność co najmniej trzech cech typowych dla złożonych drgawek gorączkowych [Zielińska i in., 2024].

Leczenie i rokowanie

Standardowe leczenie padaczki w przypadku DS nie jest skuteczne. Leki przeciwpadaczkowe w niewielkim stopniu ograniczają napady. Funkcjonowanie neurologiczne rzadko ulega poprawie. Do skutecznych leków w DS należą między innymi stiripentol, fenfluramina oraz kannabidiol [Vasquez i Wirrell, 2025]. W polskiej grupie pacjentów, dzięki diagnostyce genetycznej choroby, wprowadzono tak zwane „leki sierocie”, stiripentol był stosowany najczęściej, natomiast fenfluramina u części pacjentów [Zielińska i in., 2024].

Jednakże i wskazane leki prowadzą głównie do redukcji epizodów. Objawy neurorozwojowe, jak opóźnienie, zaburzenia poznawcze, motoryczne, wciąż pozostają problemem [Vasquez i Wirrell, 2025]. Wobec powyższego, wciąż intensywnie rozwijane są strategie terapii przyczynowej. Mowa o terapiach genowych, takich jak aktywacja transkrypcji, antysensowne oligonukleotydy, czy techniki edycji genów [Chilcott i in., 2022].

Rokowanie w DS nie jest optymistyczne. Leki dedykowane choć prowadzą do znacznej redukcji częstości napadów, co przekłada się na lepszą jakość życia [12]., to wzrasta ryzyko powikłań, w tym także nagłej, niespodziewanej śmierci w padaczce (SUDEP- Sudden Unexpected Death in Epilepsy) [Chilcott i in., 2022]. Wielu pacjentów osiąga deficyty poznawcze. Dochodzi do opóźnienia w rozwój motorycznym i behawioralnym. Choroba nierzadko jest związana z trwałym obciążeniem neurologicznym i koniecznością stałej opieki.

Zespół Westa (WS- West Syndrome)

Zespół Westa należy do encefalopatii padaczkowych, to postać padaczki niemowlęcej. Jest definiowany przez triadę, do której zalicza się napady zgięciowe, hipsarytmię czyli charakterystyczny zapis EEG oraz regresję bądź zahamowanie rozwoju psychoruchowego [Pavone i in., 2020].

Wiek

Objawy pojawiają się zwykle w pierwszym roku życia, typowo pomiędzy 4 a 8 miesiącem. Choć w praktyce zdecydowana większość pacjentów to niemowlęta między 3 a 12 miesiącem życia, to w literaturze można znaleźć rzadkie przypadki wystąpienia objawów w znacznie późniejszym okresie [Pavone i in., 2020].

Objawy kliniczne

Charakterystyczne są nagłe skurcze mięśni, tzw. napady zgięciowe. Przejawiają się gwałtownymi zgięciami tułowia i głowy do przodu, nierzadko przy jednoczesnym zgięciu nóg do brzucha. Ręce są wyrzucane do przodu. Występują w seriach, z reguły przy zasypianiu bądź budzeniu się. Typowa jest hipsarytmia w zapisie EEG. Chaotyczny, wysokonapięciowy zapis fal wolnych z iglicami i ostrymi falami. Dodatkowo dochodzi do regresji lub zahamowanie rozwoju psychoruchowego, czego objawami jest opóźnienie ruchowe, poznawcze oraz zaburzenia napięcia mięśniowego. Dodatkowo w trakcie napadów może występować ślinotok, wymioty, wzmożone pocenie, zmiany kolorytu skóry, a także zaburzenia świadomości [Pavone i in., 2020].

Diagnostyka

Rozpoznanie WS oparte jest na stwierdzeniu uprzednio opisanej triady: klinicznych napadów, charakterystycznego EEG i zaburzeń rozwoju psychoruchowego. W diagnostyce wykonywany jest rezonans magnetyczny mózgu, w celu wykluczenia zmian strukturalnych jak malformacje, guzy czy uszkodzenia [Pavone i in., 2020]. Zaleca się wykonanie badań metabolicznych i genetycznych, w tym sekwencjonowanie eksomowe WES (Whole Exome Sequencing), co pozwala skutecznie ustalić etiologię zaburzenia [Snyder, Jain, Ramachandran-Nair, Jones, 2024].

Podłoże genetyczne

Etiologia WS jest mocno zróżnicowana. Obejmuje między innymi wady strukturalne mózgu, zaburzenia metaboliczne, a także mutacje genetyczne [Pavone i in., 2020, Snyder i in., 2024]. Choć obserwuje się wzrost liczby genów powiązanych z WS [Pavone i in., 2020], to część przypadków ma charakter monogenowy jak w przypadku mutacji de novo w genie TBL1XR1, która była bezpośrednio związana z wystąpieniem WS [Shen i in., 2022]. Jednak wiele przypadków pozostaje związanych z podłożem strukturalnym, metabolicznym lub idiopatycznym [Pavone i in., 2020, Snyder i in., 2024].

Leczenie rokowanie

Leczenie w przypadku WS powinno być wdrożone możliwie szybko. Stosowane są między innymi wigabatryna, preparaty hormonalne ACTH, a także dieta ektogeniczna w odpowiednich przypadkach [Pavone i in., 2020]. W przypadku podłoża strukturalnego rozważane jest leczenie neurochirurgiczne. Znaczna uwaga poświęcana jest również terapiom molekularnym. W przyszłości mogą one zmienić podejście terapeutyczne [Snyder i in., 2024]. Rokowanie w WS nie jest raczej optymistyczne. W większości przypadków rozwijają się trwałe zaburzenia poznawcze. U większości pacjentów dochodzi do różnego stopnia niepełnosprawności intelektualnej. Dodatkowo część chorych przechodzi w inne formy trudnej padaczki, jak zespół Lennox–Gastauta. Epizody mogą ustępować w kolejnych latach życia, jednakże deficyty neurologiczne w większości przypadkach są nieodwracalne [Pavone i in., 2020].

Zespół Lennox–Gastauta (LGS- Lennox-Gastaut Syndrome)**Wiek**

Zespół Lennox–Gastauta należy do grupy ciężkich encefalopatii padaczkowych wieku dziecięcego. Jest klasyfikowany jako encefalopatia rozwojowo-padaczkowa z wolną falą iglicową. Pierwsze objawy przypadają z reguły w okresie wczesnego dzieciństwa. Literatura wskazuje, że najczęściej jest to pomiędzy 3 a 5 rokiem życia, co jest potwierdzeniem wczesnego, rozwojowego charakteru schorzenia. Odnotowano jednak przypadki wystąpienia pierwszych napadów w wieku nawet 12 lat [Yang i in., 2021].

Objawy

Obraz kliniczny jest dość zróżnicowany, co stanowi utrudnienie wczesnego rozpoznania. Przeważają napady toniczne, ale typowe mogą być również atoniczne, miokloniczne, a także napady nieświadomości choć są nietypowe. Uogólnione napady toniczno-kloniczne często współistnieją. Znamienne jest również postępujące upośledzenie funkcji poznawczych, behawioralnych, a także trudności adaptacyjne [Yang i in., 2021]. Zapis EEG ukazuje wolne iglice z falami, z reguły przy obniżonej aktywności podstawowej. Jest to cecha uznana za fundamentalną w formalnym potwierdzeniu LGS [Nelson i Knupp, 2023].

Diagnostyka i podłoże genetyczne

Etiologia LGS jest wysoce heterogenna. Znaczna część pacjentów posiada uszkodzenia strukturalne mózgu, jak urazy okołoporodowe, malformacje, infekcje czy guzy. Jednak 25–30% pacjentów nie posiada żadnych zmian w neuroobrazowaniu. Kieruje to uwagę w stronę

podłoża genetycznego. Analiza 17 rodzin koreańskich, w których występował LGS lub fenotyp LGS, a u których nie stwierdzono zmian strukturalnych mózgu, umożliwiła zidentyfikowanie 14 mutacji w 14 różnych genach. Obejmowały one zarówno warianty de novo, dziedziczone autosomalnie recesywnie, jaki i sprzężone z chromosomem X. Niektóre z wykrytych wówczas genów, jak CACNA1A, CHD2 czy IQSEC2, były już uprzednio wiązane z epilepsjami rozwojowymi. Natomiast niektóre, jak SLC25A39 praktycznie nie były kojarzone w tym kontekście. Istotne wydaje się również to, że modele komórkowe z knockdown, wybranych genów charakteryzowały się zaburzeniami neurogenezy oraz redukcją ekspresji MAP2. Wskazuje to na istotny wpływ na dojrzewanie neuronów [Yang i in., 2021].

Leczenie i rokowanie

Leczenie LGS jest bardzo trudne. Jest oporny na farmakoterapię, ponadto wielu pacjentów wymaga politerapii. Nie zapewnia to jednak pełnej kontroli napadów [Nelson i Knupp, 2023]. Leczenie jest wielokierunkowe, obejmuje leczenie celowane, optymalizację neuromodulacji, a także poszukiwanie terapii mogących wpływać na mechanizmy molekularne [Samanta, 2025]. Rośnie też znaczenie diagnostyki genetycznej, nie tylko jako narzędzia diagnostycznego, ale również jako narzędzia umożliwiającego dobór potencjalnych terapii genowych w przyszłości [Nelson i Knupp, 2023, 18]. Rokowanie nie jest korzystne. U większości pacjentów mimo terapii napady utrzymują się. Konieczna jest opieka długoterminowa, a deficyty poznawcze są trwałe [Yang i in., 2021; Nelson i Knupp, 2023]. Choroba jest przewlekła i postępująca.

Encefalopatie padaczkowe związane z ciągłą aktywnością wyładowań podczas snu (ESES/CSWS- Electrical Status Epilepticus in Sleep, *Continuous Spikes and Waves during Sleep*)

Epileptyczne encefalopatie związane z ciągłą aktywnością wyładowań podczas snu wolnofalowego są problematycznym obszarem padaczek wieku rozwojowego. Choć znany jest typowy obraz zapisu EEG i regresja rozwojowa, to ciężko mówić o jednolitej definicji oraz standardowym przebiegu klinicznym [Posar i Visconti, 2024].

Wiek

Pierwsze objawy pojawiają się około 2–4 roku życia. Napady w przypadku części chorych są skąpe bądź nawet zanikają na pewnym etapie. Dominującym problemem stają się narastające zaburzenia mowy, funkcji poznawczych i behawioralnych. W wieku około 5–6 lat ujawnia się zwykle regresja rozwojowa. Bywa to pierwszym powodem pogłębienia diagnostyki (Posar i Visconti, 2024). Dzieci początkowo mogą rozwijać się prawidłowo, dopiero pojawienie się wzorca ESES w zapisie EEG jest skorelowane z wyraźnym spowolnieniem bądź nawet utratą wcześniej nabytych umiejętności. Objawy mogą być czasem mylone z zaburzeniami ze spektrum autyzmu lub ADHD, co niestety opóźnia rozpoznanie.

Diagnostyka

Diagnostyka opiera się głównie na EEG snu w fazie NREM. Tradycyjny próg wyznaczony na $\geq 85\%$ czasu snu został podważony i obecnie wielu autorów akceptuje próg $\geq 60\%$ jako wartość diagnostyczną [Posar i Visconti, 2024]. Nie ma jednak pełnej zgodności

w zakresie tego kryterium. Bardzo istotna wydaje się zatem dokładna ocena neuropsychologiczna, bowiem deficyty poznawcze mogą być bardziej specyficzne klinicznie niż same napady.

Podłoże genetyczne

Badania genetyczne istotnie zmieniają postrzeganie ESES/CSWS. W badaniu Gong i wsp. wśród 17 z 74 pacjentów ujawniono warianty patogenne w takich genach jak GRIN2A, KCNQ2, KCNA2, SLC9A6, HIVEP2 czy RARS2. Należy podkreślić, że średni wiek ujawnienia się wzorca ESES w badanej grupie wynosił jedynie około 2 lat, czyli wcześniej aniżeli klasycznie. Można zatem przypuszczać, że ESES może być zależny od wieku w przebiegu encefalopatii rozwojowych i epileptycznych [Gong, Xue, Jiao, Zhang, Yang, 2021]. Ponadto opisane zostały przypadki CSWS powiązane z mutacjami FRRS1L, którym towarzyszyły ciężkie encefalopatie i ruchy mimowolne [Mir i in., 2023].

Leczenie i rokowanie

Stosowane są różne leki przeciwpadaczkowe jak walproinian, lewetiracetam, sulthiame, ale również benzodiazepiny i steroidy. W niektórych przypadkach rozważane jest leczenie chirurgiczne, dotyczy to jednak znikomej liczby chorych [Posar i Visconti, 2024]. W przypadku zaniku napadów rokowanie jest całkiem korzystne. Do poprawy dochodzi zwykle pomiędzy 6 a 9 rokiem życia. Niestety deficyty poznawcze utrzymują się latami, mogą być nawet trwałe, szczególnie w przypadkach wczesnego początku i podłoża genetycznego [Posar i Visconti, 2024; Gong i in., 2021, Mir i in., 2023].

Zespół Doose (MAE- Myoclonic-Atonic Epilepsy)

Wiek

Zespół Doose jest sklasyfikowany jako uogólniona encefalopatia padaczkowa wieku dziecięcego. Kluczowy jest tutaj zarówno określony czas początku choroby, jak i typ napadów. Początek objawów mieści się w szerokim zakresie czasowym, bowiem pomiędzy 7 miesiącem a 6 rokiem życia. Z reguły pierwsze objawy można zaobserwować około 2-4 roku. Zdarza się, że pacjenci prezentowali już wcześniej niespecyficzne zachowania, lecz dopiero retrospektywnie okazują się one prodromami [Oguni, 2022].

Objawy

Objawy są dość charakterystyczne. Oś napadów to miokloniczno-atoniczne epizody, które skutkują nagłym zanikiem napięcia mięśni i upadkiem. Równolegle mogą pojawić się krótkie napady nieświadomości bądź uogólnione napady toniczno-kloniczne. Zdarza się, że choroba zaczyna się od serii drobnych mioklonii, które stopniowo z upływem czasu przekształcają się w pełen obraz MAE. Intensywności objawów bywa silnie zróżnicowana. Bywają okresy z dziesiątkami upadków każdego dnia, ale także tygodnie praktycznie pełnej stabilizacji.

Diagnostyka

Diagnostyka oparta jest głównie na EEG. Nie ma jednak jednego wzorca, który byłby niezbędny w diagnozie. Typowe w zapisie EEG są uogólnione iglice i fale wolne, czasem są aktywowane hiperwentylacją. W diagnostyce różnicowej istotne jest wykluczenie zespołów pokrewnych, a zwłaszcza LGS. MAE bywa z nim mylone, szczególnie jeśli zapis EEG i spektrum napadów bywają złożone. W przypadku MAE, charakterystyczny jest prawidłowy rozwój przed chorobą [Joshi i in., 2021].

Podłoże genetyczne

Podłoże genetyczne jest wysoce heterogenne. Badania pokazują, że warianty wielu różnych genów odpowiadających za regulację pobudliwości neuronalnej mogą sprzyjać wystąpieniu MAE. Pojedynczy gen nie może być jednak dominujący. Oznacza to, że etiologia jest wysoce wieloczynnikowa i nawet wynik badania genetycznego potrafi być całkiem prawidłowy pomimo charakterystycznego obrazu klinicznego [Hinokuma i in., 2020].

Leczenie i rokowanie

Kwas walproinowy jest jednym z leków pierwszego rzutu, lecz terapia i tak pozostaje wyzwaniem, bowiem odpowiedź często nie jest satysfakcjonująca. Najwyższym odsetkiem skuteczności charakteryzuje się dieta ketogenna, wprowadzona odpowiednio wcześniej. W niektórych przypadkach stosowane są benzodiazepiny bądź leki nowszej generacji [Oguni, 2022; Joshi i in., 2021]. Rokowanie bywa zmienne. U część pacjentów można osiągnąć trwałą kontrolę napadów i dobry rozwój, natomiast u innych deficyty poznawcze utrzymują się, szczególnie kiedy początek choroby był ciężkim i burzliwym.

Zespół GEFS+ (Genetic Epilepsy with Febrile Seizures Plus)

Zespół GEFS+ jest zespołem padaczkowy o podłożu genetycznym. Cechuje go znaczna zmienność fenotypowa, nawet w obrębie jednej rodziny. Choroba dziedziczona jest zazwyczaj autosomalnie dominująco. Bywa rozpoznawana tam, gdzie poszczególni członkowie rodziny prezentują odmienne obrazy kliniczne. Od łagodnych napadów gorączkowych po przewlekłą padaczkę z napadami afebrylnymi [Li i in., 2024].

Wiek

Początek choroby przypada na wczesne dzieciństwo. Napady gorączkowe (FS- febrile seizures) można zaobserwować zazwyczaj pomiędzy 3 miesiącem a 6 rokiem życia. U części pacjentów napady utrzymują się znacznie dłużej niż typowe FS, toteż klasyfikuje się je jako FS+. Do wystąpienia napadów może też dochodzić bez wystąpienia gorączki. Są to napady toniczno-kloniczne, miokloniczne, atoniczne, napady nieświadomości czy ogniskowe. Paradoksalnie, charakterystyczne w GEFS+ jest to, że fenotyp może być bardzo niejednorodny. Nawet wśród chorych członków rodziny obserwuje się zróżnicowaną intensywność, typ i dynamikę napadów [Li i in., 2024].

Diagnostyka

Diagnoza stawiana jest w szczególności na podstawie obrazu klinicznego i wywiadu rodzinnego. Ważniejszą rolę odgrywa diagnostyka genetyczna, zwłaszcza jeśli w rodzinie

pojawia się historia FS, FS+ bądź innych wariantów padaczki. Wykorzystywane są panele epileptyczne, sekwencjonowanie genów odpowiedzialnych za kanały jonowe, a także sekwencjonowanie egzomu, szczególnie przy podejrzeniu mutacji SCN1A lub GABRG2 [Miller i Sotero de Menezes, 2022].

Podłoże genetyczne

Najczęściej związanym genem z GEFS+ jest SCN1A, kodujący podjednostkę alfa kanału sodowego NaV1.1. Mutacje w jego obrębie prowadzą do zaburzenia aktywności interneuronów GABAergiczných. Sprzyja to nadmiernej pobudliwości neuronalnej i obniża próg drgawkowy [Miller i Sotero de Menezes, 2022]. Innym genem często związanym z GEFS+ jest GABRG2. Mutacje w nim upośledzają funkcję podjednostki gamma2 receptora GABA_A. Prowadzi to do zmniejszenia skuteczności hamowania synaptycznego [Li i in., 2024]. Na przestrzeni ostatnich lat wykazano także rolę wariantów genu SLC32A1, który odpowiada za kodowanie transportera pęcherzykowego. Zmiany te mogą wpływać na osłabienie gromadzenia GABA w pęcherzykach, co również może skutkować zaburzeniem hamowania neuronalnego [Heron i in., 2021].

Leczenie i rokowanie

Terapia jest oparta na stosowaniu leków przeciwpadaczkowych, dobranych odpowiednio do typu napadów. Najczęściej stosowany jest walproinian oraz benzodiazepiny, rzadko topiramata bądź klobazam. W lekoopornych przypadkach rozważana jest dieta ketogeniczna. Rokowanie jest zmienne. W wielu przypadkach napady gorączkowe zanikają wraz z wiekiem. U innych może dojść do rozwinięcia przewlekłej padaczki uogólnionej. Fenotyp u części pacjentów może przypominać ciężkie encefalopatie, w tym pokrewne do zespołu Dravet [Miller i Sotero de Menezes, 2022; Heron i in., 2021]. Przebieg choroby jest wysoce zależy od konkretnej mutacji, a co za tym idzie jej wpływu na funkcję białka oraz penetrację.

Zespół ADNFLE (Autosomal-Dominant Nocturnal Frontal Lobe Epilepsy)

Zespół ADNFLE to rodzinna, stosunkowo rzadka postać padaczki ogniskowej. Napady pojawiają się z reguły podczas snu i przyjmują gwałtowną formę stereotypowych ruchów. U chorych można zaobserwować dynamiczne wyprostne lub dystoniczne pozycje kończyn, nagłe ruchy tułowia, czasem również wokalizacje. Opisane objawy bywają mylone z parasomniami, co skutkuje opóźnioną diagnostyką [Xie i in., 2021].

Wiek

Początek choroby bywa bardzo zmienny. Pierwsze napady pojawiają się najczęściej w dzieciństwie od około 10 roku życia. Znane są jednak przypadki pierwszych objawów już w wieku dorosłym. Część pacjentów wskazuje na występowanie aury, subiektywnych odczuć poprzedzających napad, np. mrowienie, uczucie strachu bądź zaburzenia oddechu. Zazwyczaj napady dotyczą wyłącznie snu, natomiast epizody dzienne, choć rzadko są odnotowywane [Xie i in., 2021; Yang Y. i in., 2024]. Wykazano, że częstotliwość i gwałtowność napadów wśród wielu pacjentów ulega redukcji z wiekiem. Przebieg po okresie dojrzewania może być natomiast łagodniejszy [Kurahashi i Takahashi, 2023].

Diagnostyka

W rozpoznaniu ADNFLE niezbędne jest połączenie danych klinicznych, wywiadu rodzinnego oraz właściwych badań neurofizjologicznych. EEG często okazuje się niewystarczającym narzędziem, gdyż ognisko może być zlokalizowane głęboko w płatach czołowych, utrudniając rejestrację zmian bioelektrycznych. Dopiero polisomnografia z video-EEG daje możliwość odróżnienia napadów od parasomnii i zarejestrowanie charakterystycznych cech napadu [Kurahashi i Takahashi, 2023].

Podłoże genetyczne

ADNFLE kojarzony był z mutacjami w genach *CHRNA4*, *CHRNA2* i *CHRNA2*, które kodują podjednostki neuronalnych receptorów nikotynowych. Nowe badania wskazują, że spektrum mutacji jest jednak szersze. W pracy Xie i wsp. opisana została rodzina z ciężkim fenotypem i mutacją *KCNT1*. Prowadzi ona do znacznego zwiększenia aktywności kanałów potasowych, co może wyjaśniać nasilone objawy [Xie i in., 2021]. Aktualne dane genetyczne wskazują, że wśród genów związanych z fenotypem ADNFLE, znajdują się również geny związane z regulacją szlaków komórkowych, w tym mTOR, oraz różne kanały jonowe [Yang Y. i in., 2024]. W wielu przypadkach nie dochodzi do pełnej penetracji mutacji, toteż nie wszyscy nosiciele rozwijają objawy [Kurahashi i Takahashi, 2023]. Jest to dodatkowym utrudnieniem diagnostycznym.

Leczenie i rokowanie

Leczenie jest oparte w głównej mierze na farmakoterapii. W wielu przypadkach karbamazepina przynosi wyraźną poprawę i uważa się ją za lek pierwszego wyboru. Należy jednak pamiętać, że w przypadku mutacji w genach kanałów potasowych, takich jak *KCNT1*, odpowiedź bywa zmienna [Xie i in., 2021]. Rokowanie jest korzystne. Większość chorych intelektualnie funkcjonuje prawidłowo i może prowadzić normalne życie. Choć opisywano pojedyncze przypadki współistniejących zaburzeń poznawczych czy behawioralnych, to jednak ich związek przyczynowy z samą padaczką nie był jednoznaczny [Yang Y. i in., 2024, Kurahashi i Takahashi, 2023].

4. Podsumowanie

Genetyczne podłoże zespołów padaczkowych jest silnie heterogenne. Wymaga zatem szczegółowej diagnostyki, w tym także w zakresie badań genetycznych oraz precyzyjnego podejścia terapeutycznego. Jedynym celem leczenia nie jest wyłącznie kontrola napadów, ale przede wszystkim ochrona i poprawa funkcji poznawczych, co jest szczególnie ważne w encefalopatiach.

Bibliografia:

1. Fayad C, Saad K, Kahwagi G-J, Hallit S, Griffin D, Abou-Khalil R, El-Hayek E. (2024). A systematic review and meta-analysis of factors related to first line drugs refractoriness in patients with juvenile myoclonic epilepsy (JME). *PLOS One*. 2024;19(4).
2. Amrutkar CV, Riel-Romero RM. (2023). Juvenile Myoclonic Epilepsy. *StatPearls*. 2023.
3. Nica A. (2024). Drug-resistant juvenile myoclonic epilepsy: A literature review. *Revue Neurologique*. 2024.

4. Harvey S, Shahwan A. (2024). Typical absence seizures in children: review with focus on EEG predictors of treatment response and outcome. *Seizure*. 2023;110:1–10.
5. Leitch B. (2024). Molecular mechanisms underlying the generation of absence seizures: identification of potential targets for therapeutic intervention. *Int J Mol Sci*. 2024;25(18):9821.
6. Heebner M, Mainali G, Wei S, Kumar A, Naik S, Pradhan S, Kandel P, Tencer J, Carney P, Paudel S (2024). Importance of Genetic Testing in Children With Generalized Epilepsy. *Cureus*. 2024;16(5).
7. Vorderwülbecke BJ, Wandschneider B, Weber Y, Holtkamp M. (2022). Genetic generalized epilepsies in adults — challenging assumptions and dogmas. *Nature Reviews Neurology*. 2022;18:71–83.
8. Wang X, Rao X, Zhang J, Gan J. (2023). Genetic mechanisms in generalized epilepsies. *Acta Epileptologica*. 2023;5:8.
9. Kodankandath TV, Theodore D, Samanta D. (2025). Generalized Tonic-Clonic Seizure. In: *StatPearls*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan.
11. Zielińska A, Górka-Skoczylas P, Kanabus K, Tataj R, Mazurczak T, Hoffman-Zacharska D. (2024). SCN1A — characterization of the gene's variants in the Polish cohort of patients with Dravet syndrome: one center experience. *Current Issues in Molecular Biology*. 2024;46(5):4437–4451.
12. Chilcott E, Díaz JA, Bertram C, Berti M, Karda R. (2022). Genetic therapeutic advancements for Dravet Syndrome. *Epilepsy & Behavior*. 2022;132.
13. Vasquez A, Wirrell EC. (2025). State-of-the-art management of Dravet syndrome. *Developmental Medicine & Child Neurology*. 2025.
14. Pavone P, Polizzi A, Marino SD, Corsello G, Falsaperla R, Marino S, Ruggieri M. (2020). West syndrome: a comprehensive review. *Neurol Sci*. 2020;41(12):3547–3562.
15. Snyder HE, Jain P, Ramachandran-Nair R, Jones KC, Whitney R. (2024). Genetic advancements in infantile epileptic spasms syndrome and opportunities for precision medicine. *Genes (Basel)*. 2024;15(3):266.
16. Shen Y, Yuan M, Luo H, Yang Z, Liang M, Gan J. (2022). Rare variant of TBL1XR1 in West syndrome: a case report. *Mol Genet Genomic Med*. 2022;10(7).
17. Yang JO, Choi MH, Yoon JY, Lee JJ, Nam SO, Jun SY, Kwon HH, Yun S, Jeon SJ, Byeon I, Halder D, Kong J, Lee B, Lee J, Kang JW, Kim NS. (2021). Characteristics of Genetic Variations Associated With Lennox-Gastaut Syndrome in Korean Families. *Frontiers in Genetics*. 2021.
18. Nelson JA, Knupp KG. (2023). Lennox-Gastaut Syndrome: Current Treatments, Novel Therapeutics, and Future Directions. *Neurotherapeutics*. 2023;20(5):1255–1262.
19. Samanta D. (2025). Precision Therapeutics in Lennox-Gastaut Syndrome: Targeting Molecular Pathophysiology in a Developmental and Epileptic Encephalopathy. *Children (Basel)*. 2025;12(4):481.
20. Posar A, Visconti P. (2024). Continuous Spike–Waves during Slow Sleep Today: An Update. *Children*. 2024;11(2):169.
21. Gong P, Xue J, Jiao X, Zhang Y, Yang Z. (2021). Genetic etiologies in developmental and/or epileptic encephalopathy with electrical status epilepticus during sleep: cohort study. *Frontiers in Genetics*. 2021;12.

22. Mir A, Amer F, Ali M, Alotaibi W, Alotaibi M, Hedaithy A, Aldurayhim F, Hussain F, Bashir S, Housawi Y. (2023). Continuous Spikes and Waves During Sleep (CSWS), severe epileptic encephalopathy, and choreoathetosis due to mutations in FRRS1L. *Clin EEG Neurosci.* 2023 Sep;54(5).
23. Oguni H. (2022). Epilepsy with myoclonic-tonic seizures (Doose syndrome): Modification of the diagnostic criteria. *Eur J Paediatr Neurol.* 2022;36:37–50.
24. Joshi C, Nickels K, Demarest S, Eltze C, Cross JH, Wirrell E. (2021). Results of an international Delphi consensus in epilepsy with myoclonic atonic seizures / Doose syndrome. *Seizure.* 2021;85:12–18.
25. Hinokuma N, Nakashima M, Asai H, Nakamura K, Akaboshi S, Fukuoka M, Togawa M, Oana S, Ohno K, Kasai M, Ogawa C, Yamamoto K, Okumiya K, Chong PF, Kira R, Uchino S, Fukuyama T, Shinagawa T, Miyata Y, Abe Y, Hojo A, Kobayashie K, Maegaki Y, Ishikawa N, Ikeda H, Amamoto M, Mizuguchi T, Iwama K, Itai T, Miyatake S, Saitsu H, Matsumoto N, Kato M. (2020). Clinical and genetic characteristics of patients with Doose syndrome. *Epilepsia Open.* 2020;5(3):442–450.
26. Li X, Guo S, Yangyang S, Dinga J, Chena C, Wu Y, Li P, Sun T, Wang X. (2024). GABRG2 mutations in genetic epilepsy with febrile seizures plus: structure, roles, and molecular genetics. *J Transl Med.* 2024;22:767.
27. Miller I, Sotero de Menezes MA. (2022). SCN1A seizure disorders. 2022. GeneReviews. University of Washington, Seattle.
28. Heron SE, Regan BM, Harris RV, Gardner AE, Coleman MJ, Bennett MF, Grinton BE, Helbig KL, Sperling MR, Haut S, Geller EB, Widdess-Walsh P, Pelekanos JT, Bahlo M, Petrovski S, Heinzen EL, Hildebrand MS, Corbett MA, Scheffer IE, Gecz J, Berkovic SF. (2021). Association of SLC32A1 missense variants with genetic epilepsy with febrile seizures plus. *Neurology.* 2021;96(18):e2251–e2260.
29. Xie N, Qin W, Deng J, Qi J, Niu D, Lu G, Wang Q. (2021). A novel KCNT1 mutation in a Chinese family with severe autosomal dominant nocturnal frontal lobe epilepsy. *Translational Neuroscience.* 2021;12(1):330–334.
30. Yang Y, Tuo J, Zhang J, Xu Z, Luo Z. (2024). Pathogenic genes implicated in sleep-related hypermotor epilepsy: a research progress update. *Frontiers in Neurology.* 2024;15:1416648.
31. Kurahashi H, Takahashi Y. (2023). Autosomal dominant sleep-related hypermotor epilepsy: Genetics and gene panels. 2023.

6. ZASTOSOWANIE POLIDEOKSYRYBONUKLEOTYDÓW (PDRN) W MEDYCYNIE REGENERACYJNEJ

Nikoła Szyller, Maja Pluta, Alicja Pluta, Kacper Artykiewicz

Uniwersytet Jana Długosza

Collegium Medicum im. dr. W. Biegańskiego

Al. Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa

E-mail: nikolaszyller@gmail.com

1. Wstęp

Medycyna regeneracyjna stanowi jeden z najszybciej rozwijających się obszarów współczesnych nauk biomedycznych, koncentrując się na przywracaniu struktury i funkcji tkanek uszkodzonych w wyniku procesów chorobowych, urazów lub naturalnego starzenia się organizmu. Postęp w tej dziedzinie wymaga identyfikacji i zastosowania związków o wysokim potencjale biostymulującym, które nie tylko wspierają endogenne mechanizmy naprawcze, lecz także aktywnie stymulują proliferację komórek, syntezę macierzy pozakomórkowej oraz procesy angiogenezy. [Lee i in. 2023a]

W ostatnich latach szczególne zainteresowanie badaczy wzbudziły polideoksyrybonukleotydy (PDRN, ang. Polydeoxyribonucleotides) – biopolimery będące fragmentami oczyszczonego, zdepolimeryzowanego DNA, najczęściej pozyskiwane z mleczka ryb łososiowatych (*Oncorhynchus mykiss* lub *Salmo salar*). Pierwsze rozważania na temat związków PDRN rozpoczęły się w latach 80.-90. podczas prowadzonych wówczas badań nad regeneracją tkanek prowadzonych we Włoszech. Związki te charakteryzują się wysoką biokompatybilnością, bezpieczeństwem klinicznym oraz zdolnością do modulowania procesów regeneracyjnych na poziomie komórkowym. Liczne badania *in vitro* i *in vivo* potwierdzają ich działanie biostymulujące, przeciwzapalne oraz angiogenne, co czyni je obiecującymi narzędziami w terapii regeneracyjnej. [Kim i in. 2022]

Mechanizm działania PDRN opiera się głównie na aktywacji receptorów adenozynowych A₂A, co prowadzi do zwiększonej ekspresji czynników wzrostu, takich jak VEGF (vascular endothelial growth factor) i FGF (fibroblast growth factor). W efekcie dochodzi do nasilenia proliferacji fibroblastów, stymulacji angiogenezy oraz poprawy metabolizmu komórkowego w uszkodzonych tkankach. Dodatkowo PDRN wykazują zdolność do modulowania reakcji zapalnej i wspierania procesów naprawczych poprzez mechanizmy parakryne, co znacząco przyspiesza gojenie i odbudowę tkankową. [Oh i in. 2025]

Polideoksyrybonukleotydy znalazły zastosowanie w licznych dziedzinach medycyny. Preparaty zawierające PDRN wykorzystywane są w leczeniu przewlekłych owrzodzeń troficznych, oparzeń, urazów skóry i ścięgien, a także w terapii uszkodzeń błon śluzowych oraz w rekonwalescencji po zabiegach chirurgicznych. Coraz częściej obserwuje się także ich zastosowanie w medycynie estetycznej, w tym w zabiegach biorewitalizacji skóry, gdzie PDRN wspomagają procesy odnowy komórkowej, poprawiają elastyczność, napięcie oraz nawilżenie skóry. [Cervavolo i in. 2022]

W świetle rosnącego znaczenia terapii regeneracyjnych, polideoksyrybonukleotydy stanowią obiecującą grupę związków biologicznie aktywnych, łączących bezpieczeństwo stosowania z wysoką skutecznością kliniczną. Ich zastosowanie otwiera nowe perspektywy w zakresie wspomagania gojenia tkanek, modulacji stanów zapalnych oraz opóźniania procesów starzenia biologicznego. Celem niniejszej pracy jest przedstawienie współczesnych doniesień naukowych dotyczących mechanizmu działania, właściwości biologicznych oraz zastosowań PDRN w medycynie regeneracyjnej, ze szczególnym uwzględnieniem ich potencjału terapeutycznego i znaczenia klinicznego w praktyce medycznej. [Lampridou i in. 2025]

2. Medycyna regeneracyjna- istota i znaczenie

2.1. Pojęcie i cele medycyny regeneracyjnej

Medycyna regeneracyjna jest jednym z najbardziej dynamicznie rozwijających się obszarów współczesnych nauk biomedycznych, integrującym wiedzę z zakresu biologii komórki, inżynierii tkankowej, terapii genowych oraz farmakologii. Jej głównym celem jest przywrócenie struktury i funkcji tkanek uszkodzonych w wyniku chorób, urazów lub naturalnego starzenia się organizmu, co pozwala na znaczną poprawę jakości życia pacjentów oraz ograniczenie konsekwencji przewlekłych schorzeń. Ze względu na rosnące zapotrzebowanie społeczne oraz potencjał kliniczny, medycyna regeneracyjna przyciąga coraz większe zainteresowanie zarówno środowisk naukowych, jak i sektorów opieki zdrowotnej. [Makarevich i Tkachuk 2024]

Fascynacja regeneracją sięga starożytności, a jej korzenie można odnaleźć w mitach i wierzeniach ludowych, w których pojęcie nieuleczalności chorób powoli ustępowało idei odnowy i samoleczenia organizmu. Mit Prometeusza, w którym wątroba bohatera odrastała po każdym uszkodzeniu, odzwierciedla uniwersalną ludzką nadzieję na zdolność do regeneracji. Współcześnie ta aspiracja znalazła solidne podstawy naukowe, przekształcając się w realistyczne podejście oparte na badaniach eksperymentalnych, technologii biomedycznej i dowodach klinicznych.

Współczesny ekosystem medycyny regeneracyjnej obejmuje kompleksowy łańcuch działań, poczynając od badań podstawowych nad mechanizmami naprawy tkanek, przez translację odkryć w zastosowania kliniczne, aż po wdrażanie gotowych terapii w praktyce lekarskiej. Integracja doświadczeń regulacyjnych, procedur klinicznych i nowoczesnych systemów logistycznych umożliwia efektywne dostarczanie innowacyjnych terapii pacjentom, a jednocześnie wspiera rozwój badań nad nowymi substancjami o działaniu regeneracyjnym. [Lim i in. 2025]

Dziedzina ta korzysta z szerokiego wachlarza narzędzi – od terapii komórkowych i genowych, przez nanomateriały i bioaktywne polimery, po inżynierię tkanek i sztuczne narządy. Rozwój medycyny regeneracyjnej jest wspierany przez innowacje w edukacji personelu medycznego, a także przez wdrażanie standardów postępowania klinicznego, co pozwala na sukcesywne wprowadzanie nowych technologii do opieki zdrowotnej. [Yamada i in. 2021]

Jednym z najbardziej obiecujących kierunków badań są biopolimery o właściwościach regeneracyjnych, w tym polideoksyrybonukleotydy (PDRN). PDRN, będące fragmentami oczyszczonego, zdepolimeryzowanego DNA, wykazują wysoką biokompatybilność i zdolność

do stymulacji procesów naprawczych na poziomie komórkowym. Ich mechanizm działania opiera się głównie na aktywacji receptorów adenozynowych A₂A, co prowadzi do zwiększonej syntezy czynników wzrostu, takich jak VEGF (vascular endothelial growth factor) i FGF (fibroblast growth factor). W konsekwencji dochodzi do intensyfikacji proliferacji fibroblastów, angiogenezy oraz poprawy metabolizmu komórkowego w uszkodzonych tkankach. [Marques i in. 2025a]

PDRN znalazły zastosowanie w wielu obszarach klinicznych – od leczenia przewlekłych owrzodzeń troficznych, oparzeń i urazów skóry, po wsparcie gojenia uszkodzeń ścięgien i błon śluzowych. Coraz częściej wykorzystuje się je także w medycynie estetycznej, jako składnik preparatów biorewitalizujących, przyczyniając się do poprawy elastyczności, napięcia i nawilżenia skóry. Badania kliniczne i obserwacje praktyczne wskazują, że PDRN przyspieszają procesy regeneracyjne, redukują stany zapalne oraz wspomagają naturalną odnowę tkanek, co potwierdza ich rosnące znaczenie w terapii regeneracyjnej. [Kim 2025]

Pomimo imponujących osiągnięć i potencjału medycyny regeneracyjnej w leczeniu chorób przewlekłych i niezakaźnych, proces wdrażania nowych terapii w codzienną praktykę kliniczną pozostaje stosunkowo powolny. Wymaga to dalszych badań nad mechanizmami działania substancji regeneracyjnych, optymalizacji protokołów terapeutycznych oraz tworzenia systemów monitorowania efektów leczenia w dłuższym okresie. Integracja badań podstawowych z praktyką kliniczną i regulacjami prawnymi stanowi kluczowy element w przyspieszeniu rozwoju i popularyzacji medycyny regeneracyjnej, otwierając nowe perspektywy dla pacjentów i systemów opieki zdrowotnej na całym świecie. [Yamada i in. 2021]

2.2. Zastosowanie terapii biostymulujących w regeneracji tkanek

Optymalne gojenie się skóry jest złożonym, wieloetapowym procesem biologicznym, który obejmuje szereg precyzyjnie skoordynowanych interakcji komórkowych, molekularnych i biochemicznych. Każda faza tego procesu – hemostaza, stan zapalny, proliferacja oraz remodelowanie – wymaga aktywacji i współdziałania różnych typów komórek, w tym fibroblastów, keratynocytów, makrofagów oraz komórek śródbłónki. Harmonijne przebieganie tych mechanizmów jest niezbędne dla skutecznej odbudowy tkanek, przywrócenia ich integralności strukturalnej oraz funkcjonalnej.

Zaburzenia któregośkolwiek z etapów gojenia mogą prowadzić do powstania przewlekłych ran, które często stanowią poważne wyzwanie kliniczne. Przewlekłe owrzodzenia, trudno gojące się rany pourazowe lub powikłania pooperacyjne wymagają interwencji terapeutycznych wspomagających naturalne procesy naprawcze. W przypadkach, gdy uszkodzenie tkanki przekracza zdolności regeneracyjne organizmu, niezbędne staje się zastosowanie nowoczesnych metod wspierających regenerację biologiczną, takich jak inżynieria tkankowa, terapie komórkowe czy wykorzystanie biostymulatorów. [Esmailzadeh i in. 2025]

Rozwój inżynierii tkankowej i terapii komórkami macierzystymi stanowi ważny przełom w medycynie regeneracyjnej. Celem tych technologii jest nie tylko zastąpienie uszkodzonych struktur, ale także przywrócenie im pierwotnej architektury i funkcji. Komórki macierzyste, dzięki swoim właściwościom samoodnawiania i różnicowania, odgrywają kluczową rolę w procesach naprawczych, stymulując odnowę tkanek i syntezę macierzy

pozakomórkowej. Jednocześnie badania nad czynnikami wzrostu i regulatorami procesów komórkowych przyczyniły się do opracowania substancji biostymulujących, które wspierają regenerację bez konieczności przeszczepiania komórek.

W ostatnich latach biostymulatory zyskały szerokie zastosowanie nie tylko w chirurgii rekonstrukcyjnej, ale również w medycynie estetycznej, gdzie stanowią skuteczne narzędzie do przywracania objętości tkanek, poprawy elastyczności skóry oraz spowalniania procesów starzenia. Ich działanie polega na aktywacji naturalnych procesów biologicznych organizmu – stymulacji fibroblastów do produkcji kolagenu, elastyny oraz glikozaminoglikanów, które odpowiadają za utrzymanie jędrności i prawidłowego napięcia skóry.[Tan i in. 2024]

Biostymulacja jest pojęciem szerokim, obejmującym różnorodne procesy fizjologiczne, które mają na celu wzmacnianie aktywności komórek i tkanek w odpowiedzi na bodźce zewnętrzne. W ujęciu medycznym biostymulacja odnosi się do celowego pobudzania naturalnych procesów naprawczych w organizmie – przyspieszenia regeneracji, poprawy metabolizmu komórkowego oraz usprawnienia funkcji fizjologicznych. Mechanizmy te wykorzystywane są w leczeniu utraty tkanek miękkich i kostnych spowodowanych urazami, zabiegami chirurgicznymi, chorobami przewlekłymi czy uszkodzeniami popromiennymi.[Corduff i Goldie 2025]

Z klinicznego punktu widzenia biostymulatory odgrywają coraz większą rolę w leczeniu ran przewlekłych, owrzodzeń cukrzycowych, zmian pourazowych oraz w procesach regeneracyjnych po zabiegach dermatologicznych. W kontekście medycyny estetycznej ich zastosowanie pozwala nie tylko na poprawę wyglądu skóry, lecz także na rzeczywiste jej odmłodzenie poprzez aktywację mechanizmów naprawczych na poziomie komórkowym. Zrozumienie immunologicznych i molekularnych podstaw tych procesów ma kluczowe znaczenie dla osiągnięcia optymalnych efektów terapeutycznych oraz opracowania skutecznych protokołów zabiegowych.

Nowoczesne podejście do biostymulacji w medycynie regeneracyjnej zakłada integrację wielu metod terapeutycznych – od zastosowania substancji biologicznie aktywnych, takich jak polideoksyrybonukleotydy (PDRN), po wykorzystanie czynników wzrostu i materiałów biokompatybilnych wspierających procesy gojenia. Tak kompleksowe podejście umożliwia przyspieszenie regeneracji tkanek, zmniejszenie stanów zapalnych oraz poprawę ogólnej kondycji skóry, co stanowi kluczowy krok w kierunku nowoczesnych, spersonalizowanych terapii regeneracyjnych. [McCarthy i in. 2024]

3. Polideoksyrybonukleotydy (PDRN)- charakterystyka i mechanizm działania

Polideoksyrybonukleotyd (PDRN) stanowi liniowy fragment poliribonukleotydu o stosunkowo niskiej masie cząsteczkowej, pozyskiwany z nasienia łososia, znany z istotnych właściwości regeneracyjnych i działania przeciwzapalnego. Zainteresowanie tą substancją w ostatnich latach znacznie wzrosło ze względu na jej potencjał w terapii uszkodzeń tkanek oraz w zastosowaniach dermatologicznych i estetycznych. Pomimo licznych badań nad mechanizmami biologicznymi PDRN, jego pełna rola w procesach starzenia się komórek i regeneracji tkanek nie została jeszcze w pełni poznana. [Chen i in. 2025]

Polideoksyrybonukleotyd to lek pochodzący z DNA plemników *Oncorhynchus mykiss* (pstrąga tęczowego) lub *Oncorhynchus keta* (łososia chum). Jego masa cząsteczkowa mieści się w zakresie od 50 do 1500 kDa, a długość łańcucha wynosi od 50 do 2000 par zasad.

Proces jego otrzymywania obejmuje ekstrakcję w wysokiej temperaturze oraz etap oczyszczania, który zapewnia bardzo wysoki stopień czystości materiału — ponad 95% aktywnej substancji czynnej, wolnej od farmakologicznie aktywnych białek i peptydów. Struktura chemiczna PDRN opiera się na frakcji DNA o niskiej masie cząsteczkowej, zbudowanej z liniowych polimerów deoksyrybonukleotydów połączonych wiązaniami fosfodiesterowymi. Każdy monomer tworzący łańcuch zawiera pentozę (cukier), grupę fosforanową oraz zasadę azotową — purynową lub pirymidynową — przyłączoną poprzez wiązanie β -N-glikozydowe w pozycji 1. Taka organizacja przestrzenna umożliwia tworzenie stabilnej podwójnej helisy, charakterystycznej dla cząsteczek DNA. [Marques i in. 2025]

Po podaniu do organizmu, PDRN ulega hydrolizie przez enzymy błonowe, które rozszczepiają go na nukleozydy i nukleotydy. Związki te mogą następnie służyć jako źródło puryn i pirymidyn, niezbędnych do syntezy DNA w różnych typach tkanek. Dodatkowo, liczne badania wykazały, że te produkty degradacji wykazują synergistyczne działanie z czynnikami wzrostu, takimi jak VEGF (czynnik wzrostu śródbłónka naczyniowego) i FGF (czynnik wzrostu fibroblastów), wspierając proliferację i różnicowanie komórek. Udowodniono, że PDRN zwiększa tempo wzrostu fibroblastów, chondrocytów, preadipocytów i osteoblastów w kulturach pierwotnych, co wskazuje na jego szeroki potencjał w procesach naprawczych i regeneracyjnych. [Galeano i in. 2021]

Pod względem farmakologicznym, PDRN jest liniowym polimerem DNA, którego działanie wiąże się głównie z aktywacją receptorów adenozynowych, zwłaszcza typu A₂A. Adenozyna, obecna w strukturze PDRN, oddziałuje z czterema typami receptorów adenozynowych: A₁, A₂A, A₂B oraz A₃. Wśród nich to właśnie receptor A₂A odgrywa kluczową rolę w regulacji odpowiedzi zapalnej, angiogenezy, proliferacji komórkowej oraz procesów naprawczych. Aktywacja tego receptora przez PDRN prowadzi do hamowania ekspresji cytokin prozapalnych, takich jak TNF- α czy IL-6, oraz do zwiększonej produkcji VEGF, co przyczynia się do wzmożonego tworzenia naczyń włosowatych i poprawy ukrwienia uszkodzonych tkanek.

Dodatkowo, szlak kinazy białkowej aktywowanej mitogenem (MAPK) jest jednym z kluczowych mechanizmów pośredniczących w działaniu PDRN. Szlak ten wpływa na wzrost komórek, akumulację kolagenu i różnicowanie fibroblastów, co ma szczególne znaczenie w gojeniu ran i odmładzaniu skóry. Z tego względu PDRN znalazł zastosowanie nie tylko w leczeniu ran przewlekłych i owrzodzeń troficznych (np. stopy cukrzycowej), lecz także w zabiegach medycyny estetycznej, gdzie wspomaga procesy regeneracyjne skóry właściwej, poprawia jej elastyczność i redukuje widoczność blizn. [Shin i in. 2023]

Pomimo licznych dowodów potwierdzających korzystne działanie PDRN, wciąż istnieją luki w zrozumieniu jego pełnych mechanizmów molekularnych. Konieczne są dalsze badania, które pozwolą dokładniej określić wpływ PDRN na ekspresję genów związanych z regeneracją, przebudową macierzy zewnątrzkomórkowej oraz modulacją odpowiedzi immunologicznej. Uzupełnienie tej wiedzy jest kluczowe dla dalszego rozwoju terapii biostymulacyjnych i pełnego wykorzystania potencjału polideoksyrybonukleotydów w nowoczesnej medycynie regeneracyjnej.

4. Zastosowanie PDRN w medycynie regeneracyjnej

Polideoksyrybonukleotyd (PDRN) jest biologicznie aktywną mieszaniną fragmentów DNA o udokumentowanych właściwościach regeneracyjnych, które wykazują znaczący wpływ na procesy naprawcze zachodzące w skórze i tkankach głębokich. Liczne badania potwierdzają, że PDRN odgrywa kluczową rolę w modulacji odpowiedzi zapalnej, przyspieszeniu gojenia ran oraz odbudowie bariery skórnej. Mechanizm działania tej substancji obejmuje zarówno stymulację proliferacji fibroblastów i keratynocytów, jak i regulację szlaków sygnalizacyjnych cytokin odpowiedzialnych za syntezę kolagenu i przebudowę macierzy pozakomórkowej.[Lee i in. 2023b] Dzięki temu PDRN wpływa nie tylko na jakość, ale również na szybkość procesu regeneracyjnego.

Skuteczność PDRN została potwierdzona również w regeneracji tkanek pozaskórnych, w tym nabłonka rogówki, gdzie przyczynia się do szybszej reepitelializacji, zmniejszenia dyskomfortu oraz poprawy funkcji narządu wzroku. Ponadto w chorobach narządu ruchu, takich jak patologie mankietu rotatorów, wykazano, że podanie PDRN zmniejsza ból i poprawia sprawność pacjentów, co świadczy o jego wielokierunkowym działaniu biologicznym obejmującym tkanki mięśniowo-szkieletowe. Co istotne, PDRN wykazuje także wysoką skuteczność w leczeniu trudno gojących się owrzodzeń, w tym neuropatycznych owrzodzeń stopy cukrzycowej, gdzie przyspiesza zamykanie ran, wspomaga reepitelializację oraz zmniejsza komponent zapalny towarzyszący przewlekłym uszkodzeniom skóry.[Lee i in. 2023b]

Znaczenie PDRN w kontekście cukrzycy wynika z faktu, że chorzy z tą jednostką często doświadczają opóźnionego gojenia z powodu przewlekłej hiperglikemii. Nadmiar glukozy powoduje dysfunkcję leukocytów, uszkodzenie naczyń krwionośnych, zaburzenia mikrokrążenia oraz upośledzoną angiogenezę, co prowadzi do trudności w procesach naprawczych. Terapia PDRN, pozyskiwanego z DNA komórek plemnikowych łososia, została wprowadzona jako strategia wspomagająca gojenie ran cukrzycowych. Kluczowe w tym kontekście jest zapewnienie stabilnego i długotrwałego uwalniania substancji aktywnej, co pozwala na utrzymanie odpowiedniego poziomu stymulacji procesów regeneracyjnych w obrębie przewlekłych ran. [Chiu i in. 2021]

W ostatnich latach coraz liczniejsze doniesienia naukowe wskazują również, że PDRN może odgrywać istotną rolę w leczeniu bólu mięśniowo-szkieletowego, szczególnie związanego z przewlekłymi zmianami przeciążeniowymi w ścięgnach i więzadłach. Skuteczność PDRN wykazano m.in. u pacjentów z tendinopatią mankietu rotatorów, zapaleniem nadkłykcia bocznego, zespołem pes anserinus oraz zapaleniem powięzi podeszwowej, co sugeruje jego potencjalne zastosowanie jako terapii wspierającej regenerację struktur ścięgniastych i przyczepów mięśniowych. [Gwak i in. 2021]

Choroba zwyrodnieniowa stawów (OA) stanowi istotny problem zdrowotny prowadzący do pogorszenia funkcji narządu ruchu oraz przewlekłego bólu. W kontekście leczenia OA wykazano, że PDRN może stanowić obiecującą formę terapii dzięki swoim właściwościom przeciwzapalnym i proangiogennym. Chociaż mechanizmy jego działania nie zostały w pełni poznane, wiadomo, że pozyskiwany z nasienia pstrąga hodowanego PDRN jest źródłem puryn i pirymidyn niezbędnych do syntezy kwasów nukleinowych w szlaku ratunkowym. Aktywacja receptorów purynergicznych A2A inicjuje proliferację komórek, stymuluje angiogenezę oraz poprawia dynamikę procesów naprawczych w modelach

autologicznych przeszczepów skóry, owrzodzeń cukrzycowych czy ran żylnych [Baek i in. 2018]

Coraz więcej danych wskazuje również na potencjał PDRN w regeneracji tkanek przyzębia. Substancja ta sprzyja odbudowie kości oraz poprawia regenerację tkanek miękkich dzięki modulacji odpowiedzi zapalnej i stymulacji procesów biologicznych niezbędnych do gojenia. Mimo obiecujących wyników badań przedklinicznych i klinicznych, konieczne jest przeprowadzenie dalszych badań w celu ustalenia optymalnych protokołów terapeutycznych, dawek oraz długoterminowej skuteczności terapii. [Mari i in. 2025].

5. Podsumowanie

Polideoksyrybonukleotyd (PDRN) stanowi obecnie jedno z najbardziej obiecujących narzędzi stosowanych w medycynie regeneracyjnej, czego dowodzą liczne badania przedkliniczne i kliniczne. Jego szerokie spektrum działania obejmuje zarówno modulację procesów zapalnych, jak i stymulację proliferacji oraz różnicowania komórek kluczowych dla naprawy tkanek. Mechanizmy te są ściśle związane z aktywacją receptorów purynergicznym A2A, nasileniem angiogenezy, regulacją fibroblastów oraz pobudzaniem szlaku ratunkowego syntezy DNA, co czyni PDRN substancją wyjątkowo efektywną w procesach regeneracyjnych.

W pracy przedstawiono liczne obszary zastosowania PDRN, potwierdzające jego skuteczność w odbudowie tkanek skórnych, kostnych, ścięgnistych oraz w terapii schorzeń o etiologii zapalnej i zwyrodnieniowej. Omówiono również istotne właściwości PDRN, takie jak zdolność do redukcji reakcji zapalnych, usprawniania syntezy kolagenu oraz wspierania procesów reepitelializacji. Mechanizmy te są szczególnie widoczne w gojeniu ran ostrych i przewlekłych, w tym owrzodzeń stopy cukrzycowej, gdzie PDRN znacząco przyspiesza procesy naprawcze nawet w warunkach upośledzonego mikrokrażenia i zaburzeń immunologicznych.

W rozdziałach dotyczących zastosowań klinicznych podkreślono również korzyści wynikające z terapii PDRN w chorobach narządu ruchu, takich jak tendinopatie czy choroba zwyrodnieniowa stawów. Wykazano, że PDRN łagodzi ból, poprawia funkcję uszkodzonych struktur i wspiera regenerację tkanek o ograniczonej zdolności do samonaprawy. Ponadto omówiono jego potencjał w regeneracji tkanek przyzębia oraz w procesach naprawczych w obrębie rogowki, co potwierdza wielokierunkowe działanie tej substancji.

Zebrane dane literaturowe wskazują jednoznacznie, że PDRN stanowi wartościowy element współczesnej terapii regeneracyjnej, a jego skuteczność i bezpieczeństwo czynią go atrakcyjną alternatywą lub uzupełnieniem tradycyjnych metod leczenia. Mimo licznych dowodów potwierdzających jego działanie, konieczne pozostają dalsze badania, szczególnie te o charakterze wielośrodkowym i randomizowanym, które pozwolą na precyzyjne ustalenie optymalnych schematów terapeutycznych oraz lepsze zrozumienie długofalowych efektów stosowania PDRN.

Podsumowując, PDRN wykazuje wysoki potencjał jako innowacyjny środek wspomagający procesy regeneracyjne w szerokim zakresie zaburzeń i uszkodzeń tkanek. Jego właściwości biologiczne oraz wszechstronność zastosowań sprawiają, że może on odgrywać coraz ważniejszą rolę w medycynie regeneracyjnej, stanowiąc fundament przyszłych strategii terapeutycznych ukierunkowanych na przywracanie integralności strukturalnej i funkcjonalnej uszkodzonych tkanek.

Bibliografia:

1. Baek, A., Kim, Y., Lee, J.W., Lee, S.C. i Cho, S.R. 2018. Effect of Polydeoxyribonucleotide on Angiogenesis and Wound Healing in an In Vitro Model of Osteoarthritis. *Cell Transplantation* 27(11), s. 1623–1633. doi: 10.1177/0963689718804130.
2. Ceravolo, I. i in. 2022. Beneficial Effects of Polydeoxyribonucleotide (PDRN) in an In Vitro Model of Fuchs Endothelial Corneal Dystrophy. *Pharmaceuticals* 15(4). doi: 10.3390/ph15040447.
3. Chen, J., Qiu, F., Shi, J., Huang, W., Zhao, C. i Han, Q. 2025. PDRN prevents SIRT1 degradation by attenuating autophagy during skin aging. 20(5 May). doi: 10.1371/journal.pone.0321005.
4. Chiu, K.C. i in. 2021. In vitro antimicrobial and antipro-inflammation potential of honokiol and magnolol against oral pathogens and macrophages. *Journal of the Formosan Medical Association* 120(2), s. 827–837. doi: 10.1016/j.jfma.2020.09.002.
5. Corduff, N. i Goldie, K. 2025. The Immunologic Spectrum of Biostimulators and Its Clinical Importance. *Plastic and Reconstructive Surgery - Global Open* 13(8), s. e7001. doi: 10.1097/GOX.00000000000007001.
6. Esmaeilzadeh, K., Molan, S.F., Sefat, F. i Nadri, S. 2025. Free and encapsulated stem cells for skin regeneration. *BioImpacts* 15, s. 30806. doi: 10.34172/bi.30806.
7. Galeano, M. i in. 2021. Polydeoxyribonucleotide: A promising biological platform to accelerate impaired skin wound healing. *Pharmaceuticals* 14(11). doi: 10.3390/ph14111103.
8. Gwak, D.W., Hwang, J.M., Kim, A.R. i Park, D. 2021. Does polydeoxyribonucleotide has an effect on patients with tendon or ligament pain?: A PRISMA-compliant meta-analysis. *Medicine (United States)* 100(19), s. E25792. doi: 10.1097/MD.00000000000025792.
9. Kim, H.M. i in. 2022. A Mixture of Topical Forms of Polydeoxyribonucleotide, Vitamin C, and Niacinamide Attenuated Skin Pigmentation and Increased Skin Elasticity by Modulating Nuclear Factor Erythroid 2-like 2. *Molecules* 27(4). doi: 10.3390/molecules27041276.
10. Kim, S.T. 2025. Comparison of Polynucleotide and Polydeoxyribonucleotide in Dermatology: Molecular Mechanisms and Clinical Perspectives. *Pharmaceutics* 17(8). doi: 10.3390/pharmaceutics17081024.
11. Lampridou, S., Bassett, S., Cavallini, M. i Christopoulos, G. 2025. The Effectiveness of Polynucleotides in Esthetic Medicine: A Systematic Review. *Journal of Cosmetic Dermatology* 24(2). doi: 10.1111/jocd.16721.
12. Lee, K.S. i in. 2023a. Analysis of Skin Regeneration and Barrier-Improvement Efficacy of Polydeoxyribonucleotide Isolated from Panax Ginseng (C.A. Mey.) Adventitious Root. *Molecules* 28(21). doi: 10.3390/molecules28217240.
13. Lee, K.S. i in. 2023b. Analysis of Skin Regeneration and Barrier-Improvement Efficacy of Polydeoxyribonucleotide Isolated from Panax Ginseng (C.A. Mey.) Adventitious Root. *Molecules* 28(21). doi: 10.3390/molecules28217240.
14. Lim, H.-W., Huang, Y.-H., Baek, H.-S., Kim, H.-G., Kim, K. i Lim, C.-J. 2025. Thermal-denatured PDRN exhibits increased in vitro pharmacological activities: A functional role of single-stranded DNA random coils. *Experimental and Therapeutic Medicine* 30(6), s. 1–9. doi: 10.3892/etm.2025.12982.

15. Makarevich, P.I. i Tkachuk, V.A. 2024. Fundamental and Practical Perspectives in Regenerative Medicine. *International Journal of Molecular Sciences* 25(21). doi: 10.3390/ijms252111508.
16. Mari, R., Ramamurthy, J., Rudhra, K. i Krishnaswamy, N. 2025. Efficacy of Polydeoxyribonucleic Acid (PDRN) in periodontal regeneration: A systematic review of clinical outcomes. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research* 15(3), s. 624–630. doi: 10.1016/j.jobcr.2025.03.021.
17. Marques, C. i in. 2025a. From Polydeoxyribonucleotides (PDRNs) to Polynucleotides (PNs): Bridging the Gap Between Scientific Definitions, Molecular Insights, and Clinical Applications of Multifunctional Biomolecules. *Biomolecules* 15(1). doi: 10.3390/biom15010148.
18. Marques, C. i in. 2025b. From Polydeoxyribonucleotides (PDRNs) to Polynucleotides (PNs): Bridging the Gap Between Scientific Definitions, Molecular Insights, and Clinical Applications of Multifunctional Biomolecules. *Biomolecules* 15(1). doi: 10.3390/biom15010148.
19. McCarthy, A.D., Hartmann, C., Durkin, A., Shahriar, S., Khalifian, S. i Xie, J. 2024. A morphological analysis of calcium hydroxylapatite and poly-L-lactic acid biostimulator particles. *Skin Research and Technology* 30(6). doi: 10.1111/srt.13764.
20. Oh, N., Hwang, J., Kang, M.S., Yoo, C.Y., Kwak, M. i Han, D.W. 2025. Versatile and Marvelous Potentials of Polydeoxyribonucleotide for Tissue Engineering and Regeneration. *Biomaterials Research* 29. doi: 10.34133/bmr.0183.
21. Shin, S.M., Baek, E.J., Kim, K.H., Kim, K.J. i Park, E.J. 2023. Polydeoxyribonucleotide exerts opposing effects on ERK activity in human skin keratinocytes and fibroblasts. *Molecular Medicine Reports* 28(2). doi: 10.3892/mmr.2023.13035.
22. Tan, F., Li, X., Wang, Z., Li, J., Shahzad, K. i Zheng, J. 2024. Clinical applications of stem cell-derived exosomes. *Signal Transduction and Targeted Therapy* 9(1). doi: 10.1038/s41392-023-01704-0.
23. Yamada, S., Behfar, A. i Terzic, A. 2021. Regenerative medicine clinical readiness. *Regenerative Medicine* 16(3), s. 309–322. doi: 10.2217/rme-2020-0178.

7. ZJAWISKO CUTOUT W ZŁAMANIACH PRZEZKRĘTARZOWYCH - OPIS 3 PRZYPADKÓW I ANALIZA PROBLEMU

Weronika Woźniak, Filip Mądry

Politechnika Wrocławska

Wydział Medyczny (W14)

Koło Ortopedyczne Politechniki Wrocławskiej przy Wojewódzkim Szpitalu Specjalistycznym im. T. Marciniaka - Centrum Medycyny Ratunkowej. ul. gen. Augusta Emila Fieldorfa 2, 54-049 Wrocław

E-mail: 283101@student.pwr.edu.pl

Abstrakt

Złamania przezkrętarzowe kości udowej są częste, a leczeniem z wyboru jest metoda otwartej lub zamkniętej repozycji złamania i stabilizacji z użyciem śrubopłytki DHS lub gwoździa krętarzowego gamma. Fiksacja gwoździem gamma jest najczęściej stosowaną metodą chirurgicznego leczenia takich urazów, ale wiąże się z powikłaniami mechanicznymi, między innymi zjawiskiem cutout. Zidentyfikowanymi czynnikami ryzyka są zaawansowany wiek, niska gęstość kości, nieoptymalny TAD (tip to apex distance), rodzaj złamania, jakość nastawienia, wybór niewłaściwego kąta CCD gwoździa, błędna kwalifikacja pacjenta do zabiegu oraz błędy techniczne operatora.

Celem pracy jest analiza zjawiska i zidentyfikowanie czynników ryzyka destabilizacji tych zespoleń oraz dyskusja nad doborem metody stabilizacji w odniesieniu do stanu zdrowia pacjenta.

Przeanalizowano dane literaturowe dotyczące częstości złamań krętarzowych i występowania powikłań. Opisano zjawisko cutout'u i porównano istotność czynników ryzyka przemieszczenia się gwoździa. Przedstawiono trzy przypadki kliniczne, aby zilustrować wpływ tych czynników na wystąpienie powikłań. Zidentyfikowano te czynniki w trzech przypadkach klinicznych na podstawie analizy radiogramów i historii choroby. Przedstawiono dalsze postępowanie kliniczne.

Spośród wymienianych w literaturze czynników ryzyka wystąpienia zjawiska cutout'u w trzech opisanych przypadkach klinicznych determinantem był wiek pacjenta, zmniejszona gęstość kości oraz ponowny uraz niskoenergetyczny. Porównując do danych literaturowych - zaawansowany wiek i niska gęstość kości to zidentyfikowane czynniki ryzyka. Nie wykazano nieprawidłowej kwalifikacji do zabiegu ani błędów operatora.

Zrozumienie zjawiska i czynników ryzyka destabilizacji zespoleń złamań krętarzowych ma zasadnicze znaczenie dla zwiększenia stabilności zespoleń i poprawy rokowań. Złamania te są jednymi z najczęściej leczonych urazów narządu ruchu. Zgodnie z literaturą 20 – 40 % pacjentów leczonych z tego powodu w przeciągu roku umiera. Zrozumienie biomechaniki zespolenia, poprawna kwalifikacja do zabiegu i właściwe postępowanie pooperacyjne wydają się mieć kluczowe znaczenie dla długości życia pacjentów.

Słowa kluczowe: cutout, pertrochanteric simple fracture, gamma nail, case study

1. Wstęp

Złamania przekrętarsowe

Przez starzejące się społeczeństwo oraz postęp medycyny złamania części bliższej kości udowej są coraz częstsze, wiążą się z problemami z lokomocją w starszej populacji pacjentów oraz spadkiem gęstości kości w podeszłym wieku [Cordunianu, M.A.; Vulcu Cordunianu, A.G.; Antoniac, I.; Luca, A.; Niculescu, M.; Chiriac, C.O.; Corneschi, I.; Mohor, C.I., 2024]. AO podaje, że śmiertelność po złamaniu bliższej części kości udowej sięga 37%. W metaanalizie z 2009 roku [Liu M, Yang Z, Pei F, Huang F, Chen S, Xiang Z, 2009] w ciągu roku od zabiegu wystąpiło 21% śmierci. Ta liczba wynika z utraty sprawności pacjentów, którzy często po takim urazie zostają unieruchomieni lub ich zdolność do poruszania zostaje istotnie upośledzona. W takiej sytuacji klinicznej (zmniejszonej ilości ruchu) obciążenie internistyczne pacjenta zaczyna nabierać coraz większej wagi, co przekłada się na postępowanie niepełnosprawności i nasilenie się objawów chorób współistniejących. Dlatego ważne jest, żeby metoda zespolenia złamania dawała jak największe szanse na zachowanie posiadanej przez pacjenta sprawności.

Gwoździe śródszpikowe

W złamaniach przekrętarsowych głównie stosuje się stabilizację dynamicznym gwoździem biodrowym lub gwoździem śródszpikowym z gwoździem szyjkowym. Literatura podaje, że w przypadku użycia TFNA czas operacji, utrata krwi oraz czas hospitalizacji ulegają skróceniu, w porównaniu do DHS co przemawia za stosowaniem tej metody w przypadku pacjentów wielochorobowych, obciążonych internistycznie, pacjentów starszych. TFNA zapewnia lepszy rozkład obciążeń i większą stabilność. [Cordunianu, M.A.; Vulcu Cordunianu, A.G.; Antoniac, I.; Luca, A.; Niculescu, M.; Chiriac, C.O.; Corneschi, I.; Mohor, C.I., 2024]., [Niestety metoda TFNA wiąże się z większym ryzykiem wystąpienia powikłań, takich jak cutout lub ponowne złamanie bliższego końca kości udowej. Literatura podaje, że wystąpienie cutout'u to ryzyko do 16,5% [Davis TR, Sher JL, Horsman A, Simpson M, Porter BB, Checketts RG., 1990]. W metaanalizie z 2009 roku nie znaleziono istotnej statystycznie różnicy w ilości reoperacji, klinicznie więcej pacjentów przebyło ponowną operację w przypadku pierwotnie zamontowanego systemu śródszpikowego, ale statystycznie istotna okazała się różnica w ponownych złamaniach szyjki kości udowej w grupie leczonej TFNA - co może również prowadzić do destabilizacji i przemieszczenia się gwoździa szyjkowego [Liu M, Yang Z, Pei F, Huang F, Chen S, Xiang Z. A].

Tip to Apex Distance

TAD to suma odległości od końcówki śruby do wierzchołka głowy kości udowej na zdjęciach rentgenowskich przednio-tylnych i bocznych. Odzwierciedla zarówno głębokość, jak i położenie śruby w obrębie szyjki [Fujii T, Nakayama S, Hara M, Koizumi W, 2017]. Może być dobrym predyktorem wystąpienia powikłań mechanicznych. W retrospektywnym badaniu [Geller JA, Saifi C, Morrison TA, Macaulay W., 2009] z 2009 roku udowodniono, że $TAD > 25\text{mm}$ wiąże się z istotnie większym prawdopodobieństwem wystąpienia wykręcenia śruby poza głowę szyjki udowej (44% pacjentów powikłanych cut-outem), a w analizowanej grupie z $TAD < 25\text{mm}$ nie wystąpił żaden cut-out. Nie wykazali żadnych innych korelacji (wiek, płeć, operator, rodzaj implantu). Również umiejscowienie gwoździa w pozycji centralnej lub

niedaleko poniżej osi szyjki wydaje się być najbardziej optymalne i nie prowadzi do mechanicznych powikłań [Bojan, A.J., Beimel, C., Taglang, G. *et al.*, 2013]

2. Materiały i metody

Przeanalizowano dane literaturowe dotyczące częstości złamań krętarzowych i występowania powikłań. Opisano zjawisko cutout'u i porównano istotność czynników ryzyka przemieszczenia się gwoździa. Przedstawiono trzy przypadki kliniczne, aby zilustrować wpływ tych czynników na wystąpienie powikłań i dalszą ścieżkę leczenia. Zidentyfikowano te czynniki w trzech przypadkach klinicznych na podstawie analizy radiogramów i historii choroby. Oceniano Radiogramy pacjentów przed stabilizacją złamania, po zabiegu oraz przy ponownym zgłoszeniu się do kliniki z objawami destabilizacji śruby doszyjkowej oraz po wykonanej restabilizacji lub usunięciu gwoździa. Oceniano TAD w zdjęciach po wykonaniu stabilizacji oraz wizytach kontrolnych w odpowiednim czasie po operacji. Przedstawiono dalsze postępowanie kliniczne w celu wyleczenia powikłania – cutout'u.

3. Wyniki i dyskusja

Przypadki kliniczne. Przypadek 1.

91 - letnia pacjentka została przyjęta do Oddziału w trybie ostrodyżurowym z powodu złamania przezkrętarzowego lewej kości udowej. Do urazu doszło w dniu przyjęcia, w wyniku upadku z wysokości własnej. Pacjentka przy przyjęciu była w kontakcie prostym, nie była w stanie odpowiedzieć na zadawane pytania dotyczące okoliczności upadku. Wywiad chorobowy zebrano z synem. Według jego relacji pacjentka upadła dwukrotnie. Po drugim upadku syn nie był w stanie jej spionizować. Wykonano zamkniętą repozycję złamania przezkrętarzowego kości udowej lewej z wewnętrzną stabilizacją gwoździem proksymalnym odkrętarzowym firmy Medgal 180mm 11mm 130 stopni (tytan). Po 9 miesiącach Pacjentka przyjęta w trybie ostrodyżurowym z powodu bólu w stawie biodrowym lewym oraz złamania bliższej nasady kości ramiennej prawej. Pacjentka upadła 2 dni wcześniej z własnej wysokości. Wykonano RTG: destabilizacja (cutout) śruby doszyjkowej gwoździa śródszpikowego. Skierowano pacjentkę na oddział ortopedyczny. Została zakwalifikowana do leczenia operacyjnego w trybie odroczonym. 9 miesięcy od operacji pierwotnej usunięto zespolenie (gwoździa śródszpikowego krętarzowego Medgal) z kości udowej.



Rycina 1-9. Złamanie przezkrętarzowe kości udowej lewej (Ryc 1-2.) 91-letniej pacjentki. Stabilizacja gwoździem gamma złamania (ryc. 3-5) po dobie od stabilizacji, po 2 i po 4 miesiącach. Destabilizacja śruby doszyjkowej (Ryc 6-7) po 9 miesiącach od pierwotnej operacji. Usunięcie gwoździ doszyjkowego i śródszpikowego (ryc 9-10).

Przypadki kliniczne. Przypadek 2.

77-letnia pacjentka przyjęta do tutejszej kliniki z powodu złamania przezkrętarzowego kości udowej prawej. Upadek na jednym poziomie, w dniu poprzedzającym zgłoszenie. Pacjentka mocno obciążona internistycznie. Trudności w lokomocji przed złamaniem. Wykonano zamkniętą repozycję i wewnętrzną stabilizację złamania przezkrętarzowego kości udowej prawej gwoździem śródszpikowym udowym proksymalnym Medgal 130', 11/200mm (tytanowy). Po 2 dniach wykonano restabilizację złamania przezkrętarzowego kości udowej prawej zużyciem gwoźdźcia śródszpikowego udowego proksymalnego Medgal 130', 11/200mm(tytanowy). Po 4 miesiącach pacjentka przyjęta do tutejszej kliniki z powodu nieprawidłowego zrostu oraz destabilizacji złamania przezkrętarzowego kości udowej prawej. Od około trzech tygodni zgłasza narastający ból promieniujący do pachwiny. Przy przyjęciu pacjentka czuje się dobrze, objawom infekcyjnym neguje. Usunięto gwóźdź śródszpikowy Medgal z kości udowej prawej. Wykonano Alloplastykę całkowitą bezcementową stawu biodrowego prawego Permedica z rekonstrukcją kostną krętarza większego z użyciem przeszczepów kości gąbczastej autogennej oraz stabilizacją pętlą Zimmer Cable Ready 1.8 oraz pętlą metalową (Femoral Stem Exacta 6/Femoral Head CoCrMo 12/14) M 36mm/ Jump System AcetabularCup 58mm / Jump System Acetabular Cup Insert 36mm/20st/ Polar Plug M10).





Rycina 10-25. Złamanie części bliższej kości udowej u 77letniej pacjentki (ryc 1011.). Repozycja i stabilizacja złamania z wykorzystaniem systemu TFNA (ryc. 12-13). Kontrola odpowiednio po 2, 3, 5, 7, 12 miesiącach (ryc 14-21.). Po 1,5 roku destabilizacja (ryc. 22-23) i reziwiza zespolenia. Alloplastyka całkowita stawu biodrowego odpowiednio 7 dni i 2 miesiące po rewizji (Ryc. 24-25.).

Przypadki kliniczne. Przypadek 3.

81 - letnia pacjentka została przyjęta do tutejszego Oddziału w trybie planowym z powodu destabilizacji zespolenia kości udowej lewej w postaci migracji śruby ryglującej gwóźdź śródszpikowy oraz migracji gwoździa. Przyjęta celem leczenia operacyjnego. Pacjentka 20 lat wcześniej leczona w innym ośrodku, gdzie wykonano obustronną wielopłaszczyznową osteotomię kości udowych z jednoczasową stabilizacją gwoździem śródszpikowym. Obecnie pacjentka zgłasza nasilające się od ponad miesiąca dolegliwości bólowe stawu biodrowego lewego oraz okolicy pośladka lewego. Na co dzień porusza się przy pomocy chodzika. 19 lat po pierwotnej operacji usunięcie gwoździa udowego Targon z kości udowej lewej. Po rewizji nie zdecydowano się na wstawienie kolejnego systemu stabilizującego zespolenie – pacjentka zbyt obciążona internistycznie.



Rycina 26-31. Destabilizacja zespolenia kości udowej lewej z migracją śruby ryglującej doszpikowej oraz gwoźdź gamma u 81-letniej pacjentki. Destabilizacja obydwu elementów systemu (Ry. 26-28). Usunięto gwoźdź śródszpikowy (ryc. 29-31.), pozostawiono gwoźdź gamma w miejscu jego migracji

4. Dyskusja

Spośród wymienianych w literaturze czynników ryzyka wystąpienia zjawiska cutout'u w trzech opisanych przypadkach klinicznych determinantem był wiek pacjenta, zmniejszona gęstość kości oraz ponowny uraziskoenergetyczny. Porównując do danych literaturowych - zaawansowany wiek i niska gęstość kości to zidentyfikowane czynniki ryzyka. Nie wykazano nieprawidłowej kwalifikacji do zabiegu ani błędów operatora. W dwóch z trzech przypadków, przypadek 1. i 2, które pierwotnie operowane były w naszym ośrodku, TAD wynosił <18mm. Należy zwrócić uwagę na istotność ponownego urazuiskoenergetycznego, przez który gwoździe uległy migracji. Nie jest on wymieniany razem ze znanymi czynnikami ryzyka, a jego obecność wydaje się mieć znaczenie kluczowe. Również prawdopodobieństwo ponownego upadku wzrasta, ponieważ sprawność pacjentów po operacji i ich zdolność do lokomocji ulega zmniejszeniu.

Zrozumienie zjawiska i zidentyfikowanie czynników ryzyka destabilizacji zespoła złamań części bliższej kości udowej ma zasadnicze znaczenie dla zwiększenia stabilności zespoła i poprawy rokowań pacjentów w leczeniu złamań przekrętarzowych. Złamania te są jednymi z najczęściej leczonych urazów narządu ruchu. Zgodnie z danymi literaturowymi 20 – 40 % pacjentów leczonych z tego powodu w przeciągu roku od urazu umiera [AO Foundation], a nie wszyscy pacjenci będą w stanie zdrowia, który pozwoli na ponowną operację [Geller JA, Saifi C, Morrison TA, Macaulay W., 2009]. Stawia to otwarte pytanie, czy leczenie operacyjne takich złamań poprawia to przeżycie, w porównaniu do leczenia zachowawczego oraz ilustruje potrzebę dalszego poszukiwania metod, w których na mechaniczne powikłania nie będą narażeni starsi, obciążeni wielochorobowością pacjenci [Geller JA, Saifi C, Morrison TA, Macaulay W., 2009].

5. Wnioski

Należy uwzględnić istotność ponownego urazuiskoenergetycznego w czynnikach ryzyka migracji gwoźdźcia doszyjkowego. Kwalifikacja do repozycji i stabilizacji złamań części bliższej kości udowej musi uwzględniać stan zdrowia i obciążenie internistyczne pacjentów, ponieważ spadek możliwości poruszania się po operacji w zaawansowanym wieku i z wielochorobowością istotnie zmniejsza roczne przeżycie pacjenta, które wynika z unieruchomienia. Zrozumienie biomechaniki zespoła, poprawna kwalifikacja do zabiegu, unikanie błędów technicznych i właściwe postępowanie pooperacyjne wydają się mieć kluczowe znaczenie dla długości życia pacjentów.

Bibliografia:

1. Bojan, A.J., Beimel, C., Taglang, G. et al. Critical factors in cut-out complication after gamma nail treatment of proximal femoral fractures. BMC Musculoskelet Disord. 2013;14:1. doi: 10.1186/1471-2474-14-1.
2. Cordunianu, M.A.; Vulcu Cordunianu, A.G.; Antoniac, I.; Luca, A.; Niculescu, M.; Chiriac, C.O.; Corneschi, I.; Mohor, C.I. Experimental Analysis of a Failed Gamma Nail: A Case Report and Literature Review. Healthcare. 2024;12:1578. doi: 10.3390/healthcare12161578.
3. C.O.; Corneschi, I.; Mohor, C.I. Experimental Analysis of a Failed Gamma Nail: A Case Report and Literature Review. Healthcare. 2024;12:1578. doi: 10.3390/healthcare12161578.
4. Report and Literature Review. Healthcare. 2024;12:1578. doi: 10.3390/healthcare12161578.
5. 10.3390/healthcare12161578.

6. Davis TR, Sher JL, Horsman A, Simpson M, Porter BB, Checketts RG. Intertrochanteric femoral fractures. Mechanical failure after internal fixation. J Bone Joint Surg Br. 1990 Jan;72(1):26-31. doi: 10.1302/0301-620X.72B1.2298790. PMID: 2298790.
7. Fujii T, Nakayama S, Hara M, Koizumi W, Itabashi T, Saito M. Tip-Apex Distance Is Most
8. Important of Six Predictors of Screw Cutout After Internal Fixation of Intertrochanteric
9. Fractures in Women. JBJS Open Access. 2017;2(4):e0022. doi:
10. 10.2106/JBJS.OA.16.00022.
11. Geller JA, Saifi C, Morrison TA, Macaulay W. Tip-apex distance of intramedullary devices as a predictor of cut-out failure in the treatment of peritrochanteric elderly hip fractures. Int Orthop. 2010 Jun;34(5):719-22. doi: 10.1007/s00264-009-0837-7. Epub 2009 Jul 18. PMID: 19618186; PMCID: PMC2903170.
12. Liu M, Yang Z, Pei F, Huang F, Chen S, Xiang Z. A meta-analysis of the Gamma nail and dynamic hip screw in treating peritrochanteric fractures. Int Orthop. 2010 Mar;34(3):3238. doi: 10.1007/s00264-009-0783-4. Epub 2009 Apr 29. PMID: 19401825; PMCID: PMC2899291.

Wykaz stron internetowych

13. <https://surgeryreference.aofoundation.org/orthopedic-trauma/adult-trauma/proximalfemur/trochanteric-fracture-simple-pertrochanteric-two-part/nailing#generalconsiderations>
14. <https://surgeryreference.aofoundation.org/orthopedic-trauma/adult-trauma/proximal-femur>
15. <https://classification.aoeducation.org/>
16. <https://surgeryreference.aofoundation.org/orthopedic-trauma/adult-trauma/proximalfemur/further-reading/prognosis-of-proximal-femoral-fractures-in-elderly-patients>

8. FIZJOTERAPIA GERIATRYCZNA WOBEC WYZWAŃ STARZEJĄCEGO SIĘ SPOŁECZEŃSTWA – MIĘDZY REHABILITACJĄ A PROFILAKTYKĄ

Kamila Maculewicz

Fundacja ROSE Rozwój, ochrona zdrowia, sport i edukacja

1. Wstęp

Starzenie się populacji jest jednym z największych wyzwań współczesnej medycyny i rehabilitacji. Zmiany demograficzne zachodzące zarówno w Polsce, jak i na świecie, sprawiają, że coraz większy odsetek społeczeństwa stanowią osoby w wieku podeszłym. Proces ten niesie za sobą liczne konsekwencje zdrowotne, społeczne i ekonomiczne, które wymagają kompleksowych rozwiązań. Wiek starszy wiąże się nie tylko z naturalnym osłabieniem organizmu, ale także ze zwiększonym ryzykiem chorób przewlekłych, spadkiem wydolności fizycznej oraz ograniczeniem samodzielności.

Tradycyjny model opieki medycznej, skupiony głównie na leczeniu następstw chorób, okazuje się niewystarczający w obliczu rosnących potrzeb populacji seniorów. Coraz większego znaczenia nabiera podejście holistyczne, w którym oprócz farmakoterapii i interwencji medycznych istotną rolę odgrywa rehabilitacja oraz działania profilaktyczne. W tym kontekście fizjoterapia geriatryczna staje się nieodzownym elementem opieki zdrowotnej nad osobami starszymi.

Fizjoterapia w gerii obejmuje szerokie spektrum działań – od rehabilitacji po urazach i chorobach, przez usprawnianie funkcjonalne, aż po programy profilaktyczne mające na celu spowolnienie procesu starzenia. Jej zadaniem jest wspieranie pacjentów w zachowaniu jak najdłuższej niezależności, a także poprawa jakości życia poprzez redukcję bólu, zwiększanie mobilności i wspieranie aktywności społecznej.

Warto podkreślić, że starzenie się nie jest procesem jednorodnym – przebiega odmiennie u różnych osób, w zależności od stanu zdrowia, stylu życia i czynników środowiskowych. Dlatego też fizjoterapia geriatryczna wymaga indywidualizacji, elastyczności i dostosowania metod do realnych potrzeb pacjenta. Takie podejście pozwala nie tylko łagodzić skutki chorób i ograniczeń funkcjonalnych, ale także zapobiegać ich pogłębianiu.

Istotnym aspektem jest również wymiar psychiczny i społeczny procesu starzenia. Samotność, depresja, utrata poczucia bezpieczeństwa – to problemy, z którymi zmaga się wielu seniorów. Fizjoterapia, zwłaszcza w formie zajęć grupowych, może pełnić funkcję nie tylko medyczną, ale również integracyjną, przeciwdziałając wykluczeniu i wspierając dobrostan psychiczny.

Na przestrzeni ostatnich lat obserwuje się także rosnące zainteresowanie wykorzystaniem nowych technologii w pracy z osobami starszymi. Telerehabilitacja, aplikacje mobilne, urządzenia monitorujące aktywność czy systemy biofeedbacku otwierają nowe możliwości, które mogą zwiększyć dostępność i skuteczność fizjoterapii. Wymagają one

jednak odpowiedniej edukacji zarówno pacjentów, jak i specjalistów, a także dostosowania systemu opieki zdrowotnej.

Wobec rosnących potrzeb i ograniczonych zasobów kadrowych oraz finansowych, fizjoterapia geriatryczna jawi się jako obszar, który powinien stać się priorytetem w strategiach zdrowia publicznego. Jej znaczenie wykracza poza klasyczną rehabilitację – obejmuje bowiem zarówno działania terapeutyczne, jak i profilaktyczne, edukacyjne oraz społeczne.

2. Cel pracy

Celem niniejszej pracy jest omówienie roli fizjoterapii geriatrycznej wobec wyzwań wynikających ze starzenia się społeczeństwa. Analiza obejmuje zarówno aspekt rehabilitacyjny, jak i profilaktyczny, podkreślając znaczenie indywidualizacji działań, interdyscyplinarnej współpracy oraz edukacji pacjenta i jego otoczenia. Zwrócono uwagę na praktyczne zastosowania fizjoterapii w najczęstszych problemach zdrowotnych osób starszych, a także na możliwości, jakie stwarzają nowe technologie.

Praca ma również na celu pokazanie, że fizjoterapia w gerii to nie tylko zestaw procedur medycznych, lecz także element polityki zdrowotnej i społecznej, który powinien być rozwijany w odpowiedzi na rosnące potrzeby populacji seniorów. Szczególną wagę przyłożono do profilaktyki jako kluczowego czynnika spowalniającego utratę sprawności i samodzielności w wieku podeszłym.

3. Materiał i metody

Podstawą niniejszego opracowania jest przegląd literatury naukowej z zakresu fizjoterapii, gerii i zdrowia publicznego. Uwzględniono artykuły i monografie opublikowane w ciągu ostatnich dwóch dekad, raporty organizacji międzynarodowych oraz opracowania instytucji krajowych. Analizę oparto na źródłach w języku polskim i angielskim, koncentrując się na publikacjach dotyczących praktycznych efektów fizjoterapii w pracy z osobami starszymi.

Przegląd obejmował zarówno badania kliniczne, jak i opracowania przeglądowe oraz raporty eksperckie. Szczególną uwagę zwrócono na te prace, które podkreślają rolę aktywności fizycznej i rehabilitacji jako elementów spowalniających proces starzenia się oraz wspierających samodzielność seniorów.

Metoda analizy miała charakter opisowy i porównawczy – zebrane dane zestawiono pod kątem ich przydatności w praktyce fizjoterapeutycznej. Uwzględniono nie tylko aspekty biologiczne i medyczne, ale także psychologiczne i społeczne, co pozwoliło na bardziej całościowe spojrzenie na rolę fizjoterapii geriatrycznej.

Praca opiera się na syntezie dostępnych źródeł i opracowań. Celem było wskazanie głównych kierunków rozwoju fizjoterapii w gerii, identyfikacja najważniejszych problemów i barier oraz sformułowanie rekomendacji dotyczących praktyki klinicznej i organizacji systemu opieki.

4. Wyniki

Fizjoterapia w chorobach układu ruchu

Układ ruchu u osób starszych jest szczególnie narażony na procesy degeneracyjne. Choroba zwyrodnieniowa stawów, zwłaszcza kolanowych i biodrowych, prowadzi do bólu, sztywności oraz ograniczeń ruchomości. Objawy te znacząco obniżają jakość życia i sprawność funkcjonalną seniorów. Fizjoterapia w tym obszarze ma na celu łagodzenie bólu, poprawę zakresu ruchu oraz wzmacnianie mięśni otaczających stawy. Stosuje się ćwiczenia czynne, ćwiczenia w odciążeniu, a także elementy treningu propriocepcji, które wspierają stabilizację i zapobiegają dalszym urazom.

Osteoporoza, kolejny częsty problem w geriatric, prowadzi do zwiększonej podatności na złamania, w tym złamania szyjki kości udowej. Fizjoterapia w osteoporozie obejmuje ćwiczenia oporowe, trening równowagi i edukację w zakresie bezpiecznego poruszania się. Istotne znaczenie ma również rehabilitacja po złamaniach – jej celem jest szybka pionizacja, zapobieganie powikłaniom i odzyskanie samodzielności w codziennych czynnościach.

Warto wspomnieć także o roli fizjoterapii w leczeniu bólów kręgosłupa, które są powszechne w populacji seniorów. Regularne ćwiczenia stabilizacyjne, rozciągające i wzmacniające poprawiają funkcję kręgosłupa, zmniejszają dolegliwości bólowe i wspierają prawidłową postawę ciała.

Fizjoterapia w chorobach neurologicznych

Choroby neurologiczne, takie jak udar mózgu, choroba Parkinsona czy choroby otępienne, stanowią istotne wyzwanie dla fizjoterapii geriatrycznej. Udar mózgu często prowadzi do niedowładów, zaburzeń równowagi i problemów z koordynacją. Rehabilitacja poudarowa koncentruje się na przywracaniu utraconych funkcji, reedukacji chodu oraz poprawie zdolności do wykonywania codziennych czynności. Wykorzystuje się ćwiczenia neurofizjologiczne, trening równowagi i terapię manualną, które wspierają neuroplastyczność mózgu.

W chorobie Parkinsona głównym celem fizjoterapii jest poprawa mobilności, płynności ruchów i równowagi. Stosuje się ćwiczenia rytmiczne, trening chodu z sygnałami zewnętrznymi (np. muzyką), a także techniki poprawiające postawę ciała. Ważne jest także wsparcie w zakresie funkcji oddechowych i zapobieganie upadkom, które w tej grupie pacjentów występują szczególnie często.

U osób z chorobami otępiennymi, takimi jak Alzheimer, fizjoterapia ma charakter podtrzymujący. Ćwiczenia ruchowe, choć proste, wspierają krążenie, utrzymują elastyczność mięśni i pozwalają zachować minimum sprawności. Regularna aktywność sprzyja również lepszemu nastrojowi, zmniejsza pobudzenie i poprawia jakość snu.

Fizjoterapia w chorobach układu krążenia

Choroby układu krążenia, takie jak nadciśnienie tętnicze czy niewydolność serca, należą do najczęstszych problemów zdrowotnych seniorów. Ograniczają one wydolność fizyczną i prowadzą do szybkiego męczenia się. Fizjoterapia kardiologiczna odgrywa tu rolę wspomagającą – jej celem jest poprawa tolerancji wysiłku, zwiększenie wydolności krążeniowej i ogólnej sprawności organizmu.

W praktyce stosuje się marsz, ćwiczenia oddechowe, trening aerobowy o niskiej intensywności oraz ćwiczenia wzmacniające. Ważne jest indywidualne dostosowanie obciążeń, aby uniknąć nadmiernego wysiłku i ryzyka powikłań. Regularne ćwiczenia wpływają korzystnie nie tylko na układ sercowo-naczyniowy, ale także na kondycję psychiczną, dając seniorowi poczucie sprawczości i kontroli nad własnym ciałem.

Fizjoterapia w chorobach układu oddechowego

Przewlekła obturacyjna choroba płuc (POChP) i inne schorzenia układu oddechowego stanowią kolejne wyzwanie geriatryczne. Objawiają się dusznością, kaszlem i ograniczoną tolerancją wysiłku. Fizjoterapia pulmonologiczna koncentruje się na poprawie wydolności oddechowej oraz nauce efektywnych technik oddychania.

Ćwiczenia oddechowe, trening mięśni oddechowych oraz ćwiczenia ogólnousprawniające prowadzone w odpowiednim tempie poprawiają jakość życia i ograniczają objawy chorobowe. W niektórych przypadkach stosuje się także elementy rehabilitacji w wodzie, która dzięki odciążeniu sprzyja aktywności nawet u osób o bardzo ograniczonej wydolności.

Profilaktyka i zapobieganie upadkom

Upadki należą do najczęstszych i najgroźniejszych problemów zdrowotnych osób starszych. Prowadzą do złamań, hospitalizacji i utraty samodzielności, a nierzadko także do trwałej niepełnosprawności. Fizjoterapia odgrywa kluczową rolę w profilaktyce upadków – programy ćwiczeń równoważnych, proprioceptyjnych i wzmacniających mięśnie posturalne zmniejszają ryzyko urazów, poprawiają stabilność i zwiększają poczucie bezpieczeństwa.

Ważnym elementem jest również edukacja pacjenta: nauka bezpiecznych strategii poruszania się, prawidłowego korzystania z pomocy ortopedycznych czy dostosowania otoczenia domowego (eliminacja progów, odpowiednie oświetlenie). Regularne zajęcia ruchowe, prowadzone indywidualnie lub w grupie, mają podwójny efekt – medyczny i psychologiczny, gdyż redukują lęk przed upadkiem i przywracają seniorom poczucie kontroli nad własnym ciałem.

Aktywność domowa w profilaktyce

Nie każda osoba starsza ma możliwość regularnego uczestniczenia w zajęciach grupowych czy korzystania z profesjonalnych programów rehabilitacyjnych. Dlatego ogromne znaczenie ma aktywność domowa – proste ćwiczenia wykonywane we własnym otoczeniu, które nie wymagają specjalistycznego sprzętu.

Do najprostszych i jednocześnie najskuteczniejszych należą codzienne spacerowanie, marsz w miejscu, ćwiczenia równoważne przy krześle, lekkie rozciąganie czy unoszenie ramion i nóg w pozycji siedzącej. Ważne są również czynności dnia codziennego, takie jak prace w ogrodzie, porządkowanie mieszkania czy wchodzenie po schodach – wszystkie te aktywności mogą pełnić funkcję naturalnej gimnastyki.

Fizjoterapeuci coraz częściej podkreślają, że regularne włączanie takich działań do planu dnia ma duży wpływ na utrzymanie sprawności. Ćwiczenia domowe są szczególnie ważne dla osób mniej mobilnych, które z powodu ograniczeń zdrowotnych, finansowych czy

lokalizacyjnych nie mogą uczestniczyć w zajęciach poza domem. Dzięki temu profilaktyka staje się dostępna dla każdego seniora, niezależnie od miejsca zamieszkania.

Co więcej, aktywność domowa wspiera samodzielność i buduje poczucie sprawczości. Seniorzy, którzy potrafią ćwiczyć samodzielnie, czują większą kontrolę nad własnym zdrowiem i chętniej podejmują inne formy aktywności. Regularne, choć niewielkie wysiłki fizyczne w warunkach domowych mogą znacząco zmniejszyć ryzyko upadków, poprawić krążenie i ułatwić codzienne funkcjonowanie.

Zdrowie psychiczne i dobrostan emocjonalny

Proces starzenia się często wiąże się z obniżeniem nastroju, lękiem, poczuciem izolacji i utratą sensu życia. Depresja w wieku starszym jest poważnym problemem społecznym, a jednocześnie bywa niewystarczająco zdiagnozowana. Fizjoterapia, choć kojarzona głównie z oddziaływaniem na ciało, pełni istotną rolę również w sferze psychicznej.

Regularna aktywność fizyczna wpływa pozytywnie na układ nerwowy, poprawia wydzielanie neuroprzekaźników odpowiedzialnych za nastrój, redukuje stres i wspiera jakość snu. Zajęcia grupowe dodatkowo sprzyjają budowaniu więzi społecznych, co przeciwdziała samotności i wykluczeniu. Nawet proste formy ruchu, takie jak gimnastyka poranna, taniec czy nordic walking, mogą stać się narzędziem wspierającym dobrostan emocjonalny seniorów.

Aspekty społeczne i integracyjne

Fizjoterapia geriatryczna wykracza poza oddziaływanie kliniczne – pełni także funkcję integracyjną i edukacyjną. Dla wielu seniorów uczestnictwo w zajęciach ruchowych stanowi okazję do spotkań towarzyskich i aktywności w grupie. Dzięki temu fizjoterapia przeciwdziała izolacji, wspiera poczucie przynależności i buduje sieci wsparcia społecznego.

Aspekt edukacyjny ma ogromne znaczenie nie tylko dla samych pacjentów, ale również dla ich rodzin i opiekunów. Wiedza na temat profilaktyki urazów, zasad prawidłowego wykonywania ćwiczeń czy znaczenia aktywności w podtrzymywaniu sprawności pozwala na lepsze wsparcie seniorów w codziennym funkcjonowaniu.

Nowe technologie w fizjoterapii geriatrycznej

Dynamiczny rozwój technologii otwiera nowe perspektywy dla fizjoterapii. Telerehabilitacja umożliwia prowadzenie zajęć na odległość, co ma szczególne znaczenie dla osób o ograniczonej mobilności lub mieszkających w rejonach z utrudnionym dostępem do specjalistów. Ćwiczenia online, aplikacje monitorujące aktywność czy wirtualne programy treningowe stają się realnym wsparciem dla tradycyjnej terapii.

Coraz częściej wykorzystywane są także systemy biofeedbacku i urządzenia noszone (wearables), które pozwalają na monitorowanie parametrów życiowych, jakości ruchu czy liczby kroków. Dzięki nim fizjoterapeuta może śledzić postępy pacjenta, a sam senior otrzymuje dodatkową motywację do podejmowania aktywności.

Interesującym kierunkiem są również rozwiązania oparte na wirtualnej rzeczywistości (VR), które pozwalają trenować równowagę, koordynację i pamięć ruchową w bezpiecznych, kontrolowanych warunkach. Wdrażanie takich technologii wymaga jednak pokonania barier cyfrowych – wiele osób starszych nie korzysta na co dzień z nowych mediów, co rodzi potrzebę dodatkowej edukacji i wsparcia.

5. Dyskusja

Fizjoterapia geriatryczna jest obszarem, w którym szczególnie wyraźnie widać potrzebę podejścia holistycznego. Samo leczenie farmakologiczne czy chirurgiczne nie wystarcza, by utrzymać seniorów w dobrej kondycji. Kluczowe znaczenie mają działania długofalowe, które łączą rehabilitację, profilaktykę oraz wsparcie psychiczne i społeczne.

Analiza literatury wskazuje, że systematyczna aktywność fizyczna jest jednym z najważniejszych czynników chroniących przed niepełnosprawnością i utratą niezależności. Regularne ćwiczenia zmniejszają ryzyko upadków, wspierają funkcje poznawcze i poprawiają samopoczucie emocjonalne. Wiele badań potwierdza również, że seniorzy uczestniczący w programach grupowych osiągają lepsze efekty niż osoby ćwiczące w izolacji. Oznacza to, że fizjoterapia pełni jednocześnie funkcję społeczną, przeciwdziałając samotności i marginalizacji.

Niestety, dostęp do fizjoterapii w Polsce jest wciąż ograniczony. Kolejki do rehabilitacji refundowanej bywają wielomiesięczne, co zniechęca wielu pacjentów. Z kolei usługi prywatne pozostają poza zasięgiem finansowym znacznej części seniorów. Nierówności w dostępie do fizjoterapii mają poważne konsekwencje – osoby z mniejszych miejscowości lub o niższych dochodach częściej rezygnują z rehabilitacji, co prowadzi do szybszej utraty sprawności.

Wyzwania te pokazują konieczność wdrożenia rozwiązań systemowych. Należy rozwijać programy lokalne, finansowane ze środków publicznych, które zapewnią seniorom możliwość uczestnictwa w zajęciach ruchowych w miejscu zamieszkania. Ważne jest także zwiększanie świadomości społecznej – zarówno wśród pacjentów, jak i lekarzy pierwszego kontaktu, którzy powinni kierować osoby starsze do fizjoterapeutów nie tylko po urazach, ale także w ramach profilaktyki.

Istotnym kierunkiem rozwoju jest również wykorzystanie technologii. Telerehabilitacja, aplikacje mobilne czy urządzenia monitorujące mogą zwiększyć dostępność terapii, jednak ich wprowadzenie wymaga wsparcia edukacyjnego. Wiele osób starszych nie korzysta na co dzień z nowych technologii, dlatego istotna jest rola opiekunów i członków rodzin w przełamywaniu barier cyfrowych.

Podsumowując, fizjoterapia geriatryczna wymaga spojrzenia wieloaspektowego. Powinna być traktowana nie tylko jako metoda leczenia, ale jako element polityki zdrowotnej i społecznej. Tylko wówczas możliwe będzie pełne wykorzystanie jej potencjału w procesie starzenia się społeczeństwa.

6. Wnioski

1. Fizjoterapia geriatryczna jest kluczowym elementem opieki zdrowotnej nad osobami starszymi, łącząc działania rehabilitacyjne i profilaktyczne.
2. Systematyczna aktywność fizyczna poprawia sprawność funkcjonalną, zmniejsza ryzyko upadków i wspiera zdrowie psychiczne.
3. Ograniczony dostęp do usług rehabilitacyjnych w Polsce pozostaje poważnym problemem, prowadzącym do nierówności zdrowotnych.
4. Edukacja pacjentów i ich rodzin powinna być integralną częścią fizjoterapii, aby zwiększyć skuteczność działań i motywację do aktywności.

5. Nowoczesne technologie (telerehabilitacja, biofeedback, aplikacje mobilne) mogą zwiększyć dostępność i efektywność terapii, ale wymagają wsparcia w zakresie kompetencji cyfrowych.
6. Interdyscyplinarna współpraca – fizjoterapeuty, lekarza, psychologa i opiekuna – jest niezbędna, aby stworzyć spójny plan terapeutyczny dla seniora.
7. Polityka zdrowotna powinna traktować fizjoterapię geriatryczną jako inwestycję w zdrowe starzenie się, a nie wyłącznie jako koszt dla systemu opieki zdrowotnej.

Starzenie się społeczeństwa jest procesem nieuniknionym, a jego konsekwencje wymagają od systemów opieki zdrowotnej elastycznych i wieloaspektowych działań. Fizjoterapia geriatryczna, łącząca rehabilitację z profilaktyką, stanowi jeden z najważniejszych elementów wsparcia osób starszych. Jej skuteczność wykracza poza poprawę parametrów fizycznych – obejmuje także zdrowie psychiczne, poczucie bezpieczeństwa i integrację społeczną seniorów.

Analiza dostępnej literatury oraz praktyki klinicznej wskazuje, że odpowiednio dobrane programy fizjoterapeutyczne mogą znacząco poprawić jakość życia osób w wieku podeszłym. Regularna aktywność fizyczna wspiera wydolność, zmniejsza ryzyko upadków, opóźnia postęp chorób przewlekłych i wzmacnia samodzielność. Fizjoterapia nie tylko łagodzi skutki starzenia, ale także pozwala nadać mu bardziej aktywny i godny wymiar.

Aby jednak w pełni wykorzystać jej potencjał, konieczne jest podejście interdyscyplinarne, większa dostępność usług rehabilitacyjnych oraz systematyczna edukacja pacjentów i ich rodzin. Niezbędne są również zmiany w polityce zdrowotnej, które uczynią z fizjoterapii geriatrycznej priorytet w obliczu rosnącej liczby seniorów.

Przyszłość fizjoterapii geriatrycznej będzie kształtowana zarówno przez rozwój technologii, jak i przez zdolność do personalizacji terapii. Tylko takie podejście pozwoli na skuteczne wspieranie seniorów w zachowaniu sprawności, niezależności i wysokiej jakości życia.

Bibliografia:

1. Kiwerski, J., Włodarczyk, J. (2019). *Rehabilitacja medyczna*. PZWL Wydawnictwo Lekarskie.
2. Kwolek, A. (red.) (2024). *Fizjoterapia w geriatrici*. PZWL Wydawnictwo Lekarskie.
3. Marciniak, W., Szulc, A. (2016). *Wielka interna. Geriatria*. Medical Tribune.
4. World Health Organization (2021). *Decade of Healthy Ageing: Baseline Report*. Geneva: WHO.
5. World Health Organization (2015). *World report on ageing and health*. Geneva: WHO.
6. Pizzolato, C., et al. (2020). Wearable sensor technology in geriatric rehabilitation: current applications and future directions. *Frontiers in Physiology*, 11, 1007.
7. Polski Instytut Ekonomiczny (2022). *Srebrna gospodarka w Polsce. Potencjał, wyzwania i rekomendacje*.
8. Główny Urząd Statystyczny (2023). *The situation of older people in Poland in 2023*. Warszawa: GUS.
9. Główny Urząd Statystyczny (2023). *Resident population projection for Poland 2023–2060*. Warszawa: GUS.

9. PANDEMIA PO PANDEMII - STAN ZDROWIA PSYCHICZNEGO PACJENTÓW PO PANDEMII SARS-COV-2 NA PRZYKŁADZIE DEPRESJI

Kacper Artykiewicz, Alicja Pluta, Maja Pluta, Wiktoria Skwierczyńska, Nikola Szyller
Collegium Medicum im. dr. W. Biegańskiego,
Uniwersytet Jana Długosza w Częstochowie

1. Wstęp

Pandemia SARS-CoV-2 w istotny sposób zmieniła funkcjonowanie współczesnego świata, oddziałując nie tylko na sferę społeczną i gospodarczą, lecz przede wszystkim na kondycję psychiczną jednostek. Wprowadzone restrykcje sanitarne, takie jak ograniczenia społeczne, lockdowny, zamykanie szkół i przedsiębiorstw, utrata źródeł utrzymania, spadek aktywności gospodarczej oraz przeorientowanie polityki zdrowotnej państw na walkę z COVID-19, stworzyły warunki sprzyjające pogorszeniu dobrostanu psychicznego populacji [1].

Warto podkreślić, że już przed wystąpieniem pandemii zaburzenia psychiczne stanowiły jedną z głównych przyczyn globalnego obciążenia systemów opieki zdrowotnej. Według raportu naukowego Światowej Organizacji Zdrowia (WHO), w pierwszym roku pandemii częstość występowania zaburzeń lękowych oraz depresyjnych na świecie wzrosła aż o 25% [3]. Zaobserwowane zjawisko bywa określane mianem „drugiej pandemii” – pandemii zdrowia psychicznego, podkreślając jego skalę oraz długofalowe konsekwencje [2].

Celem niniejszej pracy jest analiza stanu zdrowia psychicznego pacjentów po zakończeniu pandemii SARS-CoV-2 na przykładzie depresji, z uwzględnieniem zróżnicowania między populacją dorosłych a dziećmi oraz odniesieniem do sytuacji obserwowanej w Polsce.

2. Wpływ pandemii SARS-CoV-2 na zdrowie psychiczne – tło problemu

W kontekście pandemii COVID-19 oddziaływanie na zdrowie psychiczne pacjentów ujawnia się poprzez dwa główne mechanizmy: bezpośredni (wynikający z zakażenia wirusem) oraz pośredni (związany z konsekwencjami społecznymi i ekonomicznymi pandemii).

Mechanizmy bezpośrednie:

- Neuropsychiatryczne skutki zakażenia SARS-CoV-2: Wirus może wpływać na ośrodkowy układ nerwowy, co prowadzi m.in. do przewlekłego zmęczenia, zaburzeń funkcji poznawczych, nastroju depresyjnego, lęku, zaburzeń snu czy objawów stresu pourazowego. Mechanizm ten wiązany jest z neuroinwazją, burzą cytokinową oraz wtórną reakcją immunologiczną organizmu [4].
- Powikłania u ozdowieńców: U części pacjentów, którzy przeszli zakażenie, obserwuje się długotrwałe symptomy psychiatryczne, utrzymujące się nawet przez wiele miesięcy po zakończeniu infekcji [4,5].

Mechanizmy pośrednie:

- Izolacja społeczna i restrykcje: Ograniczenie kontaktów międzyludzkich, kwarantanna, zamknięcie szkół, uczelni i miejsc pracy prowadziły do nasilenia objawów depresyjnych, lękowych, stresowych oraz zaburzeń snu, zwłaszcza w okresach największych ograniczeń [6-9].
- Niepewność ekonomiczna i utrata pracy: Kryzys finansowy, bezrobocie, obniżenie dochodów oraz lęk przed przyszłością były istotnie skorelowane ze wzrostem nasilenia objawów lękowych i depresyjnych [6,8,10].
- Przeciążenie informacyjne: Nadmierna ekspozycja na informacje – często niespójne lub niezawierające – oraz dezinformacja nasilały poczucie zagrożenia, co skutkowało zwiększonym poziomem stresu i lęku [11].
- Wzrost przemocy domowej i nadużywania substancji psychoaktywnych: Długotrwałe przebywanie w zamknięciu sprzyjało wzrostowi przemocy domowej oraz zwiększonej konsumpcji alkoholu i innych substancji psychoaktywnych jako sposobu radzenia sobie z napięciem psychicznym [12].
- Ograniczony dostęp do opieki zdrowotnej: Utrudnienia w dostępie do świadczeń psychiatrycznych i psychologicznych przyczyniały się do pogorszenia stanu zdrowia osób z już istniejącymi zaburzeniami oraz utrudniały uzyskanie pomocy nowym pacjentom [2,4].

Wzajemne przenikanie się powyższych czynników doprowadziło do wyraźnego wzrostu częstości występowania depresji, zaburzeń lękowych, przewlekłego stresu oraz innych problemów psychicznych. Najbardziej narażone były grupy wrażliwe, w tym kobiety, osoby młode, pacjenci z wcześniejszą historią zaburzeń psychicznych oraz osoby o niższym statusie socjoekonomicznym [7,8].

3. Depresja jako kluczowe następstwo zdrowotne pandemii

Depresja to zaburzenie nastroju charakteryzujące się utrzymującym się obniżeniem nastroju, utratą zainteresowań, zaburzeniami snu, apetytem, spadkiem energii oraz trudnościami w koncentracji. Objawy te prowadzą do istotnego pogorszenia funkcjonowania społecznego i zawodowego [7].

Podczas pandemii SARS-CoV-2 zaobserwowano istotny wzrost częstości występowania depresji w populacji ogólnej. Przeglądy systematyczne i meta-analizy wykazały, że globalna częstość depresji wzrosła do 28–31% w populacji dorosłych, a w wybranych grupach (np. studenci medycyny, osoby z chorobami przewlekłymi) nawet do 40% [15][16][17]. Analiza danych z lat 2019–2021 potwierdza, że liczba nowych przypadków depresji oraz jej rozpowszechnienie rosły w tempie 6–8% rocznie, szczególnie w krajach o wysokim wskaźniku rozwoju społeczno-ekonomicznego [14]. Wzrost ten był najbardziej widoczny w okresach restrykcji społecznych i lockdownów [7][8].

Grupy szczególnie narażone to kobiety, osoby młode, osoby z niższym statusem socjoekonomicznym, osoby z chorobami przewlekłymi, osoby z wcześniejszymi zaburzeniami psychicznymi, pracownicy ochrony zdrowia oraz studenci [13-19]. Wysokie ryzyko dotyczyło także osób poddanych kwarantannie oraz pacjentów po przebytym COVID-19 [4][17].

Psychospołeczne mechanizmy wpływu pandemii na rozwój depresji obejmują izolację społeczną, ograniczenie kontaktów międzyludzkich, lęk przed chorobą, utratę pracy,

niepewność ekonomiczną, wzrost poczucia samotności oraz nasilenie przemocy domowej [8,9] [19] [20]. Dodatkowo, przewlekły stres związany z pandemią, obniżenie poczucia bezpieczeństwa oraz zaburzenia rytmu życia codziennego sprzyjały rozwojowi objawów depresyjnych [7][9].

Wyzwania w dostępie do pomocy po pandemii obejmują przeciążenie systemu opieki zdrowotnej, opóźnienia w diagnostyce i leczeniu, ograniczenie dostępności stacjonarnej opieki psychiatrycznej oraz szybki rozwój teleporad. Chociaż telemedycyna umożliwiła kontynuację leczenia, pojawiły się bariery technologiczne, ograniczona dostępność dla osób starszych i z niskim poziomem wykształcenia oraz obniżenie jakości relacji terapeutycznej[8]. W wielu krajach systemy opieki zdrowotnej nie były przygotowane na gwałtowny wzrost zapotrzebowania na pomoc psychiatryczną, co pogłębiło problem nierówności w dostępie do leczenia[16][8][19].

Podsumowując, depresja stała się jednym z najważniejszych następstw zdrowotnych pandemii SARS-CoV-2, a jej narastająca częstość, szczególnie wśród grup ryzyka, wymaga wdrożenia systemowych działań profilaktycznych i terapeutycznych oraz poprawy dostępności do opieki psychiatrycznej [14][8][18].

4. Sytuacja pacjentów po pandemii – analiza i omówienie aktualnych badań

Aktualne badania epidemiologiczne wskazują, że częstość występowania depresji po pandemii SARS-CoV-2 pozostaje istotnie wyższa niż przed pandemią. W USA, według danych NHANES, prevalencja depresji po pandemii wynosi 12,4% (95% CI: 10,6–14,1%), podczas gdy przed pandemią wartości te były niższe (np. 8,7% w 2017–2018); wzrost ten jest statystycznie istotny (OR=1,58, 95% CI: 1,28–1,94) [25]. W badaniu populacyjnym w Hiszpanii odsetek epizodów depresyjnych wzrósł z 6,5% przed pandemią do 8,8% w pierwszym roku pandemii [27]. Globalne metaanalizy wykazują, że średnia częstość depresji w populacji ogólnej podczas pandemii sięgała 30% (95% CI: 29–32), a w wybranych grupach (np. studenci medycyny, osoby z chorobami przewlekłymi) nawet do 40% [18].

W okresie „post-pandemicznym” obserwuje się stopniowy spadek częstości objawów depresyjnych, jednak nie powraca ona do poziomów sprzed pandemii; w USA w 2023–2024 odsetek osób z objawami depresji lub lęku wynosił 29,5%, wobec 10,8% przed pandemią[26]. Najwyższe ryzyko utrzymuje się wśród osób młodych (18–29 lat), kobiet oraz osób z niższym statusem socjoekonomicznym [25][26][28].

Długofalowe konsekwencje obejmują przewlekły stres (26%), utrzymujące się objawy depresji i lęku u osób z long COVID (depresja: 25%, lęk: 23%, stres: 26%), a także wypalenie społeczne i zawodowe, szczególnie wśród pracowników ochrony zdrowia [24][28][29][30]. Objawy te utrzymują się nawet dwa lata po infekcji, z tendencją do powolnego spadku [24][28]. U osób z long COVID częstość zaburzeń depresyjnych, lękowych i stresowych jest istotnie wyższa niż w populacji ogólnej [24][31][32].

W badaniach prospektywnych wykazano, że objawy depresji nasiliły się w pierwszych miesiącach pandemii (SMD dla depresji: 0,12–0,24), a następnie ich poziom stabilizował się lub nieznacznie malał, choć pozostawał wyższy niż przed pandemią [7][9][21][22][23]. Wykresy populacyjne jednoznacznie pokazują skokowy wzrost częstości depresji w 2020 roku, z utrzymaniem podwyższonych wartości w kolejnych latach [25][26].

Główne wnioski i trendy:

- Częstość depresji po pandemii SARS-CoV-2 pozostaje wyższa niż przed pandemią, szczególnie wśród osób młodych, kobiet i pacjentów z long COVID [24][25][26][28].
- Objawy depresji i lęku wykazują tendencję do stopniowego zmniejszania się, lecz nie powracają do poziomów sprzed pandemii [22][26].
- Długofalowe skutki obejmują przewlekły stres, zaburzenia adaptacyjne, wypalenie społeczne oraz wzrost ryzyka samobójstw [24][27][17][33].
- Konieczne są systemowe działania w zakresie profilaktyki, wczesnej interwencji i wsparcia psychologicznego, zwłaszcza dla osób z long COVID oraz pracowników ochrony zdrowia [4][29][31][17].

Wnioski te potwierdzają potrzebę regularnego monitorowania zdrowia psychicznego oraz wdrażania programów wsparcia dla grup wysokiego ryzyka [4][24][18][17].

5. Podsumowanie

Pandemia SARS-CoV-2 stała się jednym z najważniejszych wydarzeń zdrowotnych ostatnich dekad, a jej konsekwencje wykraczają daleko poza sferę zakaźną. Wraz z ustąpieniem bezpośredniego zagrożenia epidemiologicznego coraz wyraźniej ujawniają się skutki psychologiczne, które dotknęły osoby w różnym wieku i o zróżnicowanej sytuacji życiowej. Zgromadzone badania jednoznacznie wskazują, że szczególnie istotnym następstwem pandemii jest wzrost częstości występowania depresji oraz nasilenie jej objawów w populacji ogólnej. Mechanizmy wpływu pandemii na zdrowie psychiczne miały charakter zarówno bezpośredni, jak i pośredni. Zakażenie SARS-CoV-2 wiązało się u części pacjentów z zaburzeniami neuropsychiatrycznymi utrzymującymi się miesiącami po przebytej infekcji, natomiast restrykcje społeczne, izolacja, niepewność ekonomiczna i przeciążenie informacyjne przyczyniały się do przewlekłego stresu i zwiększonego ryzyka zaburzeń nastroju. W efekcie depresja stała się jednym z najbardziej rozpoznawalnych problemów zdrowotnych okresu pandemicznego i postpandemicznego, a jej wzrost dotyczył zarówno dorosłych, jak i dzieci oraz młodzieży.

Analiza aktualnych badań epidemiologicznych pokazuje, że choć wraz z upływem czasu obserwuje się stopniowe zmniejszanie nasilenia objawów depresyjnych, poziomy te nadal pozostają wyższe niż przed 2020 rokiem. Najbardziej narażone są osoby młode, kobiety, osoby o niższym statusie materialnym oraz pacjenci z long COVID, u których objawy depresji i lęku utrzymują się dłużej i mają większe nasilenie. Z kolei pracownicy ochrony zdrowia mierzą się z długotrwałym obciążeniem psychicznym i znacznym ryzykiem wypalenia zawodowego.

Pandemia uwidoczniła również słabości systemów opieki zdrowotnej, w tym ograniczony dostęp do świadczeń psychiatrycznych. Choć rozwój telemedycyny umożliwił kontynuację leczenia, nie zastąpił on w pełni tradycyjnych form wsparcia, zwłaszcza dla osób wymagających intensywnej opieki lub z ograniczonym dostępem do technologii.

W świetle przedstawionych danych konieczne jest dalsze monitorowanie zdrowia psychicznego populacji oraz prowadzenie działań nakierowanych na wczesne wykrywanie i leczenie depresji. Szczególnego znaczenia nabierają programy profilaktyczne skierowane do grup ryzyka, a także wzmocnienie systemu opieki psychiatrycznej, aby był on w stanie sprostać zwiększonemu zapotrzebowaniu. Pandemia COVID-19 pokazała, że zdrowie psychiczne jest

integralną częścią zdrowia publicznego, a konsekwencje jej zaniedbania mogą być równie dotkliwe jak skutki chorób somatycznych.

Bibliografia:

1. Kola, Lola et al. "COVID-19 mental health impact and responses in low-income and middle-income countries: reimagining global mental health." *The lancet. Psychiatry* vol. 8,6 (2021): 535-550. doi:10.1016/S2215-0366(21)00025-0
2. Lillehei, Angie. "The second pandemic: Mental health." *Explore (New York, N.Y.)* vol. 18,3 (2022): 257-258. doi:10.1016/j.explore.2022.03.007
3. Vindegaard N, Benros ME. COVID-19 pandemic and mental health consequences: Systematic review of the current evidence. *Brain Behav Immun.* 2020 Oct;89:531-542. doi: 10.1016/j.bbi.2020.05.048. Epub 2020 May 30. PMID: 32485289; PMCID: PMC7260522.
4. Penninx BWJH, Benros ME, Klein RS, Vinkers CH. How COVID-19 shaped mental health: from infection to pandemic effects. *Nat Med.* 2022 Oct;28(10):2027-2037. doi: 10.1038/s41591-022-02028-2. Epub 2022 Oct 3. PMID: 36192553; PMCID: PMC9711928.
5. Dragioti E, Li H, Tsitsas G, Lee KH, Choi J, Kim J, Choi YJ, Tsamakidis K, Estradé A, Agorastos A, Vancampfort D, Tsiptsios D, Thompson T, Mosina A, Vakadaris G, Fusar-Poli P, Carvalho AF, Correll CU, Han YJ, Park S, Il Shin J, Solmi M. A large-scale meta-analytic atlas of mental health problems prevalence during the COVID-19 early pandemic. *J Med Virol.* 2022 May;94(5):1935-1949. doi: 10.1002/jmv.27549. Epub 2022 Jan 9. PMID: 34958144; PMCID: PMC9015528.
6. Kraut RE, Li H, Zhu H. Mental health during the COVID-19 pandemic: Impacts of disease, social isolation, and financial stressors. *PLoS One.* 2022 Nov 23;17(11):e0277562. doi: 10.1371/journal.pone.0277562. PMID: 36417414; PMCID: PMC9683625.
7. Witteveen AB, Young SY, Cuijpers P, Ayuso-Mateos JL, Barbui C, Bertolini F, Cabello M, Cadorin C, Downes N, Franzoi D, Gasior M, Gray B, Melchior M, van Ommeren M, Palantza C, Purgato M, van der Waerden J, Wang S, Sijbrandij M. COVID-19 and common mental health symptoms in the early phase of the pandemic: An umbrella review of the evidence. *PLoS Med.* 2023 Apr 25;20(4):e1004206. doi: 10.1371/journal.pmed.1004206. PMID: 37098048; PMCID: PMC10129001.
8. COVID-19 Mental Disorders Collaborators. Global prevalence and burden of depressive and anxiety disorders in 204 countries and territories in 2020 due to the COVID-19 pandemic. *Lancet.* 2021 Nov 6;398(10312):1700-1712. doi: 10.1016/S0140-6736(21)02143-7. Epub 2021 Oct 8. PMID: 34634250; PMCID: PMC8500697.
9. Salanti G, Peter N, Tonia T, et al. The Impact of the COVID-19 Pandemic and Associated Control Measures on the Mental Health of the General Population : A Systematic Review and Dose-Response Meta-analysis. *Ann Intern Med.* 2022;175(11):1560-1571. doi:10.7326/M22-1507
10. Zavlis O, Butter S, Bennett K, et al. How does the COVID-19 pandemic impact on population mental health? A network analysis of COVID influences on depression, anxiety and traumatic stress in the UK population. *Psychol Med.* Published online March 16, 2021. doi:10.1017/S0033291721000635

11. Wang C, Chudzicka-Czupała A, Tee ML, et al. A chain mediation model on COVID-19 symptoms and mental health outcomes in Americans, Asians and Europeans. *Sci Rep.* 2021;11(1):6481. Published 2021 Mar 19. doi:10.1038/s41598-021-85943-7
12. Dos Santos CF, Picó-Pérez M, Morgado P. COVID-19 and Mental Health-What Do We Know So Far?. *Front Psychiatry.* 2020;11:565698. Published 2020 Oct 26. doi:10.3389/fpsyt.2020.565698
13. Yuan K, Zheng YB, Wang YJ, et al. A systematic review and meta-analysis on prevalence of and risk factors associated with depression, anxiety and insomnia in infectious diseases, including COVID-19: a call to action. *Mol Psychiatry.* 2022;27(8):3214-3222. doi:10.1038/s41380-022-01638-z
14. Zhou J, Zhang Y, He S, et al. Accelerated global burden of depressive disorders during the COVID-19 pandemic from 2019 to 2021. *Sci Rep.* 2025;15(1):9529. Published 2025 Mar 19. doi:10.1038/s41598-025-93923-4
15. Wu T, Jia X, Shi H, et al. Prevalence of mental health problems during the COVID-19 pandemic: A systematic review and meta-analysis. *J Affect Disord.* 2021;281:91-98. doi:10.1016/j.jad.2020.11.117
16. Nochaiwong S, Ruengorn C, Thavorn K, et al. Global prevalence of mental health issues among the general population during the coronavirus disease-2019 pandemic: a systematic review and meta-analysis. *Sci Rep.* 2021;11(1):10173. Published 2021 May 13. doi:10.1038/s41598-021-89700-8
17. Fisicaro F, Lanza G, Concerto C, et al. COVID-19 and Mental Health: A "Pandemic Within a Pandemic". *Adv Exp Med Biol.* 2024;1458:1-18. doi:10.1007/978-3-031-61943-4_1
18. Mohseni M, Azami-Aghdash S, Bashzar S, Mousavi Isfahani H, Parnian E, Amini-Rarani M. An umbrella review of the prevalence of depression during the COVID-19 pandemic: Call to action for post-COVID-19 at the global level. *BMC Public Health.* 2024;24(1):3562. Published 2024 Dec 23. doi:10.1186/s12889-024-21085-5
19. Hou J, Duan W, Wang Y, et al. A systematic review of impacts of COVID-19 on depression and anxiety among general populations around the world. *Front Public Health.* 2025;13:1659671. Published 2025 Oct 23. doi:10.3389/fpubh.2025.1659671
20. Holland KM, Jones C, Vivolo-Kantor AM, et al. Trends in US Emergency Department Visits for Mental Health, Overdose, and Violence Outcomes Before and During the COVID-19 Pandemic. *JAMA Psychiatry.* 2021; 78(4): 372-379. doi:10.1001/jamapsychiatry.2020.4402
21. Sun Y, Wu Y, Fan S, et al. Comparison of mental health symptoms before and during the covid-19 pandemic: evidence from a systematic review and meta-analysis of 134 cohorts. *BMJ.* 2023;380:e074224. Published 2023 Mar 8. doi:10.1136/bmj-2022-074224
22. Cénat JM, Farahi SMMM, Dalexis RD, et al. The global evolution of mental health problems during the COVID-19 pandemic: A systematic review and meta-analysis of longitudinal studies. *J Affect Disord.* 2022;315:70-95. doi:10.1016/j.jad.2022.07.011
23. Blendermann M, Ebalu TI, Obisie-Orlu IC, Fried EI, Hallion LS. A narrative systematic review of changes in mental health symptoms from before to during the COVID-19 pandemic. *Psychol Med.* 2024;54(1):43-66. doi:10.1017/S0033291723002295

24. Bidhendi-Yarandi R, Biglarian A, Karlstad JL, et al. Prevalence of depression, anxiety, stress, and suicide tendency among individual with long-COVID and determinants: A systematic review and meta-analysis. *PLoS One*. 2025;20(1):e0312351. Published 2025 Jan 28. doi:10.1371/journal.pone.0312351
25. Jiang Y, Deng W, Zhao M. Influence of the COVID-19 pandemic on the prevalence of depression in U.S. adults: evidence from NHANES. *Sci Rep*. 2025;15(1):3107. Published 2025 Jan 24. doi:10.1038/s41598-025-87593-5
26. Shah AD, Laternser C, Tatachar P, Duong P. The COVID-19 Pandemic and Its Effects on Mental Health-A before, during, and after Comparison Using the U.S. Census Bureau's Household Pulse Survey. *Int J Environ Res Public Health*. 2024;21(10):1306. Published 2024 Sep 30. doi:10.3390/ijerph21101306
27. Castellvi Obiols P, Miranda-Mendizabal A, Recoder S, et al. Physical and mental health impact of the COVID-19 pandemic at first year in a Spanish adult cohort. *Sci Rep*. 2023;13(1):4547. Published 2023 Mar 20. doi:10.1038/s41598-023-28336-2
28. Rudenstine S, Schulder T, Bhatt KJ, McNeal K, Ettman CK, Galea S. Long-COVID and comorbid depression and anxiety two years into the COVID-19 pandemic. *Psychiatry Res*. 2022;317:114924. doi:10.1016/j.psychres.2022.114924
29. Martínez-López JÁ, Lázaro-Pérez C, Gómez-Galán J. Predictors of Burnout in Social Workers: The COVID-19 Pandemic as a Scenario for Analysis. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(10):5416. Published 2021 May 19. doi:10.3390/ijerph18105416
30. Meseguer de Pedro M, Fernández-Valera MM, García-Izquierdo M, Soler Sánchez MI. Burnout, Psychological Capital and Health during COVID-19 Social Isolation: A Longitudinal Analysis. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(3):1064. Published 2021 Jan 25. doi:10.3390/ijerph18031064
31. Marchi M, Grenzi P, Serafini V, et al. Psychiatric symptoms in Long-COVID patients: a systematic review. *Front Psychiatry*. 2023;14:1138389. Published 2023 Jun 21. doi:10.3389/fpsyt.2023.113838
32. Frontera JA, Simon NM. Bridging Knowledge Gaps in the Diagnosis and Management of Neuropsychiatric Sequelae of COVID-19. *JAMA Psychiatry*. 2022;79(8):811–817. doi:10.1001/jamapsychiatry.2022.161.
33. Glinianowicz M, Ciura D, Burnatowska E, Olszanecka-Glinianowicz M. Psychological effects of the COVID-19 pandemic - what do we know about them?. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*. 2023;27(13):6445-6458. doi:10.26355/eurrev_202307_33006

10. FIZJOTERAPIA JAKO INTEGRALNY ELEMENT KOMPLEKSOWEJ OPIEKI PALIATYWNEJ U PACJENTÓW Z CHOROBAŁĄ NOWOTWOROWAŁĄ

Maciej Andruczyk

Akademia Łomżyńska

Wydział Nauk o Zdrowiu

Studenckie Koło Naukowe przy Zakładzie Fizjoterapii

ul. Akademicka 14, 18-400 Łomża

E-mail: maciej.andruczyk@wp.pl

1. Wstęp

Rozszerzająca się skala zachorowań na nowotwory złośliwe stanowi istotne wyzwanie w sferze zdrowia, ekonomii i życia społecznego. Dzięki postępowi w dziedzinie medycyny, który umożliwia wydłużanie życia i oddalanie momentu śmierci, obserwuje się obecnie coraz większą populację osób żyjących z rozpoznaniem choroby onkologicznej. Cierpienie, jakiego doświadczają ci pacjenci oraz obniżenie ich jakości życia, generują ciągłą i pilną potrzebę rozbudowywania specjalistycznej opieki paliatywnej i hospicyjnej[1].

Choroba nowotworowa oraz metody jej leczenia są często przyczyną charakterystycznego syndromu przewlekłego zmęczenia, który dotyka ponad sześćdziesiąt procent chorych. To subiektywne poczucie osłabienia i wyczerpania u pacjentów z rakiem jest nieproporcjonalne do faktycznie podejmowanej aktywności, nie ustępuje po standardowym odpoczynku i uniemożliwia im codzienne, normalne funkcjonowanie.

Zmęczenie połączone z przygnębieniem, jakie towarzyszy chorobie, skutkuje apatią i zmusza pacjentów do pozostawania w łóżku[3]. Ponadto, częste pobyty w placówkach medycznych przyczyniają się do spadku aktywności fizycznej i ogólnej wydolności organizmu. Bezruch i ograniczenie ruchu w bardzo krótkim czasie prowadzą do poważnych komplikacji, takich jak odleżyny, obrzęki i zapalenie płuc. Aby zapobiegać postępującej utracie sprawności, konieczne jest wdrożenie fizjoterapii, która musi być indywidualnie dopasowana do aktualnego stanu klinicznego każdego pacjenta[4].

Opieka paliatywna to kompleks działań skoncentrowanych na podniesieniu jakości życia chorych i ich rodzin, zmagających się z trudnościami wynikającymi z zaawansowanych stadiów chorób. Działania te obejmują zapobieganie cierpieniu i niesienie ulgi poprzez szybkie rozpoznawanie, właściwą ocenę oraz efektywne leczenie uciążliwych objawów fizycznych, a także rozwiązywanie problemów dotyczących sfery psychiki, życia społecznego i duchowego. W tym szerokim kontekście, fizjoterapia pełni kluczową funkcję, stając się integralnym elementem opieki paliatywnej. Jej cel to wspieranie pacjentów w osiągnięciu najwyższego możliwego poziomu sprawności i niezależności oraz uwolnienie ich od dokuczliwych symptomów. Jest to dziedzina, która dynamicznie się rozwija, naturalnie włączając w swój zakres fizjoterapię[2].

Aktualnie obserwuje się wzrost liczby publikacji naukowych poświęconych wykorzystaniu technik fizjoterapeutycznych w opiece paliatywnej. Istnieją dowody potwierdzające, że leczenie usprawniające poprawia sprawność pacjentów objętych tą opieką. Celem przedstawionej pracy jest określenie i podkreślenie kluczowej roli fizjoterapii jako integralnego elementu kompleksowej opieki paliatywnej u pacjentów z chorobą nowotworową. Praca dąży do osiągnięcia następujących celów szczegółowych: uzasadnienie potrzeby wdrażania fizjoterapii w opiece paliatywnej w obliczu rosnącej populacji pacjentów onkologicznych i powikłań związanych z chorobą i leczeniem; wskazanie konkretnych interwencji fizjoterapeutycznych (np. ćwiczenia aerobowe, pionizacja, drenaż limfatyczny, rehabilitacja oddechowa) oraz ich zastosowania w łagodzeniu uciążliwych objawów, takich jak przewlekłe zmęczenie i duszność; podkreślenie znaczenia poprawy jakości życia pacjentów, samodzielności i niezależności jako nadrzędnego celu rehabilitacji w kontekście opieki u schyłku życia; przedstawienie wyników badań potwierdzających pozytywny wpływ fizjoterapii na stan psychofizyczny pacjentów paliatywnych; zwrócenie uwagi na konieczność rozwoju kształcenia zawodowego i literatury w zakresie specyfiki fizjoterapii paliatywnej.

2. Materiały i metody

Na podstawie przeglądu aktualnego piśmiennictwa opartego o paradygmat EBM (EvidenceBased Medicine) przedstawiony został temat fizjoterapii jako integralnego elementu kompleksowej opieki paliatywnej u pacjentów z chorobą nowotworową. W trakcie zbierania danych wykorzystywano wyszukiwarkę PubMed, obsługującą bazę MEDLINE oraz wyszukiwarkę Google Scholar. Wszystkie włączone do przeglądu artykuły zarchiwizowane zostały w formie elektronicznej – w postaci plików PDF. Kryterium, które zastosowano przy wyszukiwaniu artykułów to prace opublikowane od 2015 roku dostępne w języku polskim lub angielskim. Wykorzystano następujące słowa kluczowe: opieka paliatywna, fizjoterapia onkologiczna, nowotwory złośliwe, choroba nowotworowa, jakość życia, syndrom przewlekłego zmęczenia, powikłania unieruchomienia, obrzęk limfatyczny.

3. Wyniki

Fizjoterapia w kontekście opieki paliatywnej jest procesem ukierunkowanym na maksymalną poprawę funkcjonowania chorego i ograniczenie powikłań wynikających z postępu choroby, tak długo, jak jest to możliwe. Opracowanie skutecznych strategii fizjoterapeutycznych wymaga jasnego określenia zarówno celów bliskich, jak i dalekosiężnych. Plan usprawniania musi obowiązkowo uwzględniać wiek chorego, stopień zaawansowania nowotworu, dotychczasowe leczenie oraz ogólną sprawność pacjenta.

Wybór konkretnych procedur terapeutycznych jest dokonywany po przeprowadzeniu szczegółowego badania funkcjonalnego i musi być zgodny z potrzebami zgłaszanymi przez pacjenta. Intensywność zajęć, ich łączny czas trwania i częstotliwość są ściśle uzależnione od samopoczucia chorego. Ponieważ na początku terapii pacjenci często obawiają się nasilenia objawów zmęczenia i dysfunkcji, niezbędne jest wypracowanie pozytywnego podejścia i zmotywowanie ich do ćwiczeń poprzez odpowiednią edukację[1, 2].

Usprawnianie pacjentów onkologicznych koncentruje się przede wszystkim na zwiększeniu ich aktywności fizycznej poprzez różnego rodzaju ćwiczenia wytrzymałościowe (aerobowe). W zależności od stanu klinicznego i aktualnej siły mięśniowej, zalecane są

ćwiczenia prowadzone lub czynne o umiarkowanej intensywności, które mają na celu utrzymanie właściwego zakresu ruchu w stawach, zwiększenie siły mięśniowej i aktywowanie pompy mięśniowej. U pacjentów skrajnie osłabionych, gdzie samodzielne ruchy są niemożliwe, stosuje się ćwiczenia bierne oraz czynno-bierne. Metody te zapobiegają niekorzystnym zmianom wynikającym z ograniczenia ruchu (hipokinezy), utrzymują elastyczność tkanek i przyczyniają się do zmniejszenia dolegliwości bólowych. Warto podkreślić, że aktywność fizyczna wywiera również korzystny wpływ na łagodzenie uczucia zmęczenia związanego z chorobą nowotworową.

Szczególne znaczenie w procesie usprawniania osób objętych opieką paliatywną ma rehabilitacja oddechowa. Zsynchronizowanie ruchu ciała ze wzorcem oddechowym umożliwia lepsze dotlenienie organizmu i sprzyja rozluźnieniu. Techniki takie jak oklepywanie klatki piersiowej oraz nauka efektywnego kaszlu pomagają w usunięciu zalegającej wydzieliny z dróg oddechowych. Systematyczne wykonywanie gimnastyki oddechowej okazuje się skuteczne w zapobieganiu oraz leczeniu duszności.

Kolejnym kluczowym elementem usprawniania, rekomendowanym pacjentom stale przebywającym w pozycji leżącej, jest pionizacja, czyli przyjmowanie pozycji stojącej. Zapobiega ona zaburzeniom ciśnienia krwi związanym ze zmianą pozycji (ortostatycznym) i przeciwdziała powikłaniom wynikającym z unieruchomienia. Proces stawiania pacjenta powinien być przeprowadzany stopniowo i obejmować sekwencyjną zmianę pozycji. Przebywanie w pozycji stojącej ma fundamentalne znaczenie dla prawidłowej pracy wielu układów organizmu, umożliwia lepsze odbieranie bodźców z otoczenia i pozytywnie oddziałuje na sferę psychiczną pacjentów. Następne etapy pionizacji torują drogę do wykonywania ćwiczeń równoważnych. Osiągnięcie stabilnej pozycji stojącej jest warunkiem wstępnym do nauki chodzenia. Rozpoczęcie samodzielnego poruszania się często wiąże się z koniecznością dobrania odpowiedniego sprzętu ortopedycznego. Codzienne i systematyczne ćwiczenia lokomocji skutkują poprawą ogólnej wydolności i umożliwiają pacjentom wydłużenie dystansu, jaki są w stanie pokonać.

Obrzęk limfatyczny jest jednym z częstych powikłań obserwowanych u pacjentów w zaawansowanym stadium choroby nowotworowej. Powstaje on w wyniku upośledzenia odpływu chłonki w naczyniach limfatycznych, najczęściej z powodu naciekania lub ucisku tych naczyń albo węzłów chłonnych przez proces chorobowy. Często jest również niepożądanym skutkiem ubocznym leczenia przeciwnowotworowego, na przykład po usunięciu węzłów chłonnych czy radioterapii. Pacjenci dotknięci obrzękiem limfatycznym zgłaszają ból, nieprzyjemne uczucie rozpierania, ciężkości, a czasem nawet drętwienia kończyn. Terapia ukierunkowana na redukcję obrzęków polega na zastosowaniu ułożeniowej terapii, ręcznego drenażu limfatycznego, kompresjoterapii, ćwiczeń mających na celu pobudzenie pompy mięśniowej oraz kinesiotapingu. Najlepsze rezultaty terapeutyczne osiąga się dzięki zastosowaniu kompleksowej terapii udrażniającej.

Ważnym uzupełnieniem procesu rehabilitacji u pacjentów leczonych paliatywnie są ćwiczenia ukierunkowane na czynności dnia codziennego. Odzyskanie możliwości samodzielnego spożywania posiłków, korzystania z toalety czy ubierania się pomaga chorym odzyskać poczucie niezależności, kontroli nad własną sytuacją i osobistej godności. Wszystkie interwencje stosowane w ramach fizjoterapii mają za zadanie jak najdłużej podtrzymać sprawność i samodzielność pacjentów w końcowym okresie ich życia. Niestety, postępy

w terapii są zazwyczaj minimalne ze względu na ciężki i ciągle pogarszający się stan zdrowia chorych. W badaniach, które analizowały wpływ fizjoterapii na stan pacjentów z nowotworami objętych opieką paliatywną, odnotowano statystycznie istotny wzrost odsetka osób, które były w stanie przyjąć pionową pozycję ciała. Zaobserwowano, że fizjoterapia wpłynęła na poprawę zdolności poruszania się (lokomocji) i umiejętności samoobsługi, choć ten konkretny wpływ nie osiągnął istotności statystycznej. Stwierdzono natomiast znaczące statystycznie zmniejszenie intensywności duszności, a także obniżenie poziomu lęku i przygnębienia związanego z chorobą. Główny wniosek płynący z badań nad znaczeniem fizjoterapii dla pacjentów onkologicznych w opiece paliatywnej jest taki, że przyczynia się ona do poprawy ich ogólnego stanu psychofizycznego.

Wiele badań koncentrowało się na ocenie skuteczności takich metod jak masaże lecznicze, ćwiczenia aktywne, terapia oddechowa oraz drenaż limfatyczny wykonywany manualnie. Autorzy tych prac zgodnie konkludują, że zastosowanie fizjoterapii wspomaga osiągnięcie maksymalnej sprawności. Co więcej, odnotowano wysoki poziom zadowolenia chorych z uczestnictwa w programach usprawniających.

W przeszłości rehabilitację postrzegano wyłącznie jako terapię prowadzącą do całkowitego powrotu do zdrowia. Zatem taka jej koncepcja, w kontekście zastosowania jako formy terapii objawowej w opiece paliatywnej, mogła wydawać się wewnętrznie sprzeczna. Jednak definicja rehabilitacji z biegiem lat uległa zmianie. Obecnie jej głównym celem jest przede wszystkim poprawa jakości życia. Leczenie usprawniające ma na celu osiągnięcie przez pacjenta maksymalnej możliwej samodzielności i niezależności, niezależnie od przewidywanego czasu przeżycia. Rehabilitacja odgrywa zatem istotną rolę w opiece paliatywnej, ponieważ jej ostatecznym założeniem jest doprowadzenie chorego do optymalnego poziomu funkcjonowania. Jednocześnie uwzględnia ona złożone powiązania pomiędzy różnymi aspektami życia pacjenta: fizycznym, psychicznym, społecznym i zawodowym [1, 2].

W artykule autorstwa Anny Pyszory, Michała Graczyka i Małgorzaty Krajnik, dotyczącym roli fizjoterapeuty w opiece paliatywnej, przedstawiono przebieg leczenia trzech pacjentów w zaawansowanym stadium nowotworu, u których uciążliwe objawy fizyczne skutecznie łagodzone przy użyciu fizjoterapii. Opis tych indywidualnie dopasowanych programów terapeutycznych wyraźnie uwidacznia rolę fizjoterapeuty w całym procesie opieki. W przypadku pacjentów objętych opieką paliatywną, cele fizjoterapii muszą być realistyczne i osiągalne w stosunkowo krótkim czasie. Konieczna jest umiejętność elastycznego dostosowywania formy leczenia, czasu jego trwania i intensywności do zmieniającego się stanu ogólnego chorego [1].

Niestety, programy kształcenia zawodowego w niewielkim stopniu skupiają się na problematyce związanej ze śmiercią i umieraniem. Brakuje także literatury poświęconej specyfice fizjoterapii w opiece paliatywnej, która mogłaby pełnić rolę przewodnika, wsparcia oraz edukacji dla terapeutów pracujących z pacjentami u schyłku życia. Na szczęście, obecnie obserwuje się pojawianie coraz większej liczby badań, opisów przypadków klinicznych i artykułów poglądowych na ten temat.

4. Podsumowanie

Fizjoterapia stanowi kluczowy element opieki paliatywnej nad pacjentami z chorobą nowotworową, wspierając ich w utrzymaniu sprawności, samodzielności i jak najlepszej jakości życia. Indywidualnie dobrane metody, takie jak ćwiczenia aerobowe, rehabilitacja oddechowa, pionizacja czy drenaż limfatyczny, łagodzą objawy choroby – m.in. zmęczenie, duszność i obrzęki – oraz poprawiają stan psychofizyczny chorych. Badania potwierdzają, że fizjoterapia skutecznie ogranicza dolegliwości somatyczne i psychiczne, przyczyniając się do większego komfortu i poczucia godności pacjentów. Wciąż jednak istnieje potrzeba dalszego rozwoju edukacji i badań nad specyfiką fizjoterapii paliatywnej, aby w pełni wykorzystać jej potencjał w opiece u schyłku życia.

Bibliografia:

1. Pyszora A., Wójcik A., Fizjoterapia w opiece paliatywnej. *Medycyna Paliatywna w Praktyce* 2010; 4(4):159-167.
2. Przedborska A., Misztal M., Wroński M., Gruziel D., Świąteczak M., Ciałkowska-Rysz A., Raczkowski J. W. Wpływ fizjoterapii na stan pacjentów z chorobą nowotworową objętych opieką paliatywną. *Medycyna Paliatywna*, 2016; 8(2):68-74.
3. Stone P., Candelmi DE., Kandola K., Montero L., Smetham D., Suleman S., Fernando A., Roji R. Management of Fatigue in Patients with Advanced Cancer. *Curr Treat Options Oncol.*, 2023 Feb.; 24(2):93-107.
4. Pyszora A., Budzyński J., Wójcik A., Prokop A., Krajnik M. Physiotherapy programme reduces fatigue in patients with advanced cancer receiving palliative care: randomized controlled trial. *Support Care Cancer*. 2017 Sep; 25(9):2899-2908.
5. Lichosik D., Opieka i leczenie onkologiczne pacjentów dobie sztucznej inteligencji (AI). [w:] *Doskonała nauka – wsparcie konferencji naukowych*. Dostępne online: https://haochn.anstar.edu.pl/wp-content/uploads/2023/09/haochn_streszczenie_pl.pdf [dostęp dn.24.11.2025].

11. SZTUCZNA INTELIGENCJA W DIAGNOSTYCE ZMIAN SKÓRNYCH

Maja Pluta, Nikola Szyller, Alicja Pluta, Kacper Artykiewicz

Uniwersytet Jana Długosza

Collegium Medicum im. Dr. W. Biegańskiego

Al. Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa

E-mail: mejkapluta@gmail.com

Abstrakt: Diagnostyka nowotworów skóry, zwłaszcza czerniaka, pozostaje kluczowym wyzwaniem klinicznym, obciążonym subiektywizmem oceny dermoskopowej. Sztuczna inteligencja (AI), a w szczególności konwolucyjne sieci neuronowe (CNN), rewolucjonizuje tę dziedzinę, oferując obiektywne wsparcie. Algorytmy te, trenowane na wielkoskalowych, walidowanych histopatologicznie zbiorach danych (np. ISIC, HAM10000), uczą się rozpoznawać złożone wzorce morfologiczne. Kluczowe etapy techniczne obejmują preprocessing, augmentację oraz precyzyjną segmentację zmian (np. z użyciem architektury U-Net), a także transfer learning w procesie klasyfikacji. Badania retrospektywne wykazują, że topowe modele osiągają skuteczność (mierzoną metrykami AUC, czułością i swoistością) porównywalną, a niekiedy przewyższającą, trafność oceny ekspertów-dermatologów. Przekłada się to na realny potencjał wdrożeniowy jako zintegrowane systemy wspomagania decyzji klinicznych (CDSS), narzędzia do wstępnego triażu w teledermatologii oraz platformy do automatycznego monitorowania progresji znamion. Implementacja napotyka jednak na fundamentalne bariery. Najpoważniejszą jest systemowa stronniczość (bias) algorytmów, wynikająca z drastycznej niedoreprezentowania w zbiorach treningowych pacjentów o ciemnych fototypach skóry, co rodzi ryzyko pogłębiania nierówności zdrowotnych. Równie istotnym wyzwaniem jest problem „czarnej skrzynki” (brak interpretowalności modeli), który podważa zaufanie kliniczne. W odpowiedzi rozwijane są techniki Explainable AI (XAI), jak Grad-CAM, wizualizujące proces decyzyjny sieci. Właściwa walidacja zewnętrzna i perspektywiczna pozostaje kluczowa dla bezpiecznego wdrożenia. AI w dermatologii nie jest postrzegana jako zastępstwo lekarza, lecz jako potężne narzędzie augmentacyjne w modelu "Centaury", gdzie synergia człowiek-maszyna maksymalizuje trafność diagnostyczną.

Słowa kluczowe: Sztuczna inteligencja, Dermatologia, Głębokie uczenie, Konwolucyjne sieci neuronowe (CNN), Czerniak, Diagnostyka obrazowa, Dermoskopia, Explainable AI (XAI), Stronniczość (Bias)

1. Wstęp

Choroby nowotworowe skóry, ze szczególnym uwzględnieniem czerniaka złośliwego, stanowią jeden z najpoważniejszych i najszybciej rosnących problemów współczesnej onkologii. Wskaźniki zapadalności systematycznie rosną na całym świecie, a kluczowym czynnikiem warunkującym przeżycie pacjenta pozostaje wczesne wykrycie i interwencja chirurgiczna [Rasheed et al., 2022]. Diagnostyka zmian skórnych opiera się na kaskadzie oceny: od badania wizualnego, przez badanie dermoskopowe (epiluminescencyjne), aż po ostateczne potwierdzenie w badaniu histopatologicznym. Mimo istnienia ustrukturyzowanych algorytmów oceny dermoskopowej (jak reguła ABCD, 7-punktowa skala Glasgow czy analiza

wzorców), proces diagnostyczny pozostaje obciążony istotną dozą subiektywizmu [Goyal et al., 2020]. Trafność rozpoznania jest bezpośrednio skorelowana z doświadczeniem klinicysty. W obliczu rosnącej liczby pacjentów i jednoczesnych niedoborów kadrowych w specjalistycznej opiece zdrowotnej, pojawia się pilna potrzeba wdrożenia narzędzi obiektywizujących i wspomagających proces diagnostyczny. Sztuczna inteligencja (AI), a w szczególności modele głębokiego uczenia (Deep Learning, DL), reprezentują technologiczną rewolucję w analizie danych obrazowych [Al-masni et al., 2018]. Ich zdolność do ekstrakcji i analizy złożonych, wielopoziomowych cech z obrazów cyfrowych przewyższa tradycyjne metody programowania i w wielu aspektach dorównuje ludzkiej percepcji. W dermatologii, algorytmy te oferują potencjał nie tylko zwiększenia trafności diagnostycznej, ale także poprawy dostępności opieki poprzez narzędzia teledermatologiczne i systemy wstępnej selekcji (triażu) [Kittler et al., 2002]. Niniejsza praca stanowi przegląd podstaw technicznych, oceny skuteczności klinicznej oraz kluczowych wyzwań związanych z implementacją AI w codziennej praktyce dermatologicznej.

2. Podstawy Techniczne

Zrozumienie potencjału AI wymaga przyswojenia fundamentalnych zasad jej działania, które w kontekście dermatologii obejmują cztery kluczowe etapy: akwizycję danych, preprocessing, segmentację oraz klasyfikację.

2.1. Źródła Danych i Zbiory Treningowe

Podstawą każdej formy uczenia maszynowego są dane. W dermato-onkologii, "paliwem" dla algorytmów są duże, skrupulatnie anotowane zbiory obrazów. Obrazy te pochodzą z dwóch głównych źródeł: fotografii klinicznej (makroskopowej) oraz obrazowania dermoskopowego. O ile zdjęcia kliniczne pozwalają na ocenę kontekstu (np. lokalizacji, reguły "brzydkiego kaczątka"), o tyle obrazy dermoskopowe, dzięki powiększeniu i specjalnemu oświetleniu (często spolaryzowanemu), ujawniają sub-epidermalne struktury kluczowe dla diagnostyki (np. siateczkę barwnikową, kropki, globule, obszary regresji) [Alam et al., 2022].

Fundamentem dla badań porównawczych stały się publiczne archiwa, takie jak ISIC (International Skin Imaging Collaboration) czy HAM10000 ("Human Against Machine"). Zawierają one dziesiątki tysięcy obrazów dermoskopowych, z których każdy posiada "złoty standard" diagnostyczny – w najlepszym przypadku jest to weryfikacja histopatologiczna, a w przypadku zmian łagodnych, konsensus ekspertów lub długoterminowa obserwacja. Jakość, różnorodność i precyzja anotacji tych zbiorów bezpośrednio determinują późniejszą skuteczność modelu [Ghosh et al., 2022].

2.2. Preprocessing i Segmentacja Zmian

Obraz "surowy" rzadko jest optymalny dla modelu. Pierwszym krokiem jest preprocessing, czyli przygotowanie danych. Obejmuje ono szereg technik: normalizację balansu bieli i korekcję kolorów (by zniwelować różnice między urządzeniami), usuwanie artefaktów (takich jak włosy, pęcherzyki powietrza w żelu immersyjnym czy oznaczenia chirurgiczne) oraz augmentację danych [Azeem et al., 2024]. Augmentacja to proces sztucznego powielania zbioru treningowego poprzez modyfikacje obrazów (np. obroty, odbicia lustrzane, zmiany kontrastu), co zapobiega nadmiernemu dopasowaniu (overfitting) i uczy

model niezmienności (inwariancji) na te przekształcenia [Cheng et al., 2023]. Następnym krokiem, kluczowym dla precyzji, jest segmentacja. Polega ona na precyzyjnym wydzieleniu obszaru zainteresowania (Region of Interest, ROI), czyli samej zmiany skórnej, od otaczającej ją zdrowej skóry. Wczesne modele klasyfikacyjne analizowały cały obraz, co prowadziło do błędów, gdy model "uczył się" cech tła zamiast samej zmiany [Wei et al., 2024]. Obecnie dominują architektury sieci neuronowych typu U-Net i jej pochodne (np. Attention U-Net). U-Net charakteryzuje się architekturą typu koder-dekoder z tzw. "skip connections" (połączeniami przeskakującymi), które łączą warstwy o tej samej rozdzielczości. Pozwala to sieci na jednoczesne analizowanie cech niskopoziomowych (gdzie jest krawędź?) i wysokopoziomowych (co to za obiekt?), co skutkuje niezwykle precyzyjnym wyznaczaniem granic zmiany [Jeong et al., 2023].

2.3. Klasyfikacja: Konwolucyjne Sieci Neuronowe (CNN)

Sercem dermatologicznej AI są Konwolucyjne Sieci Neuronowe (CNN). To klasa modeli głębokiego uczenia zaprojektowana specjalnie do analizy danych wizualnych. Ich architektura naśladuje sposób przetwarzania informacji przez ludzką korę wzrokową [Naqvi et al., 2023]. Sieć składa się z wielu warstw, które uczą się rozpoznawać cechy o rosnącym stopniu złożoności:

1. Warstwy wczesne (blisko wejścia) uczą się wykrywać proste elementy: krawędzie, rogi, gradienty kolorów.
2. Warstwy środkowe składają te elementy w bardziej złożone tekstury i kształty (np. kropki, globule).
3. Warstwy głębokie (blisko wyjścia) rozpoznają całe wzorce dermoskopowe (np. nieregularna siateczka barwnikowa, biało-błękitny welon) i na ich podstawie dokonują finalnej klasyfikacji (np. "czerniak", "zamię łagodne", "rak podstawnokomórkowy") [Melarkode et al., 2023].

W praktyce rzadko trenuje się tak złożone sieci "od zera". Wymagałoby to milionów obrazów medycznych, którymi nie dysponujemy. Zamiast tego, powszechnie stosuje się transfer learning (transfer wiedzy). Polega on na wykorzystaniu sieci (tzw. "backbone", np. ResNet, Inception, VGG) wstępnie wytrenowanej na gigantycznych, ogólnych zbiorach danych (jak ImageNet, zawierający miliony zdjęć codziennych obiektów) [Dildar et al., 2021]. Taka sieć potrafi już "widzieć" – rozpoznawać krawędzie, tekstury i kształty. Następnie sieć ta jest "dostrajana" (fine-tuning) na specyficznym zbiorze danych medycznych (np. obrazach dermoskopowych), "przeuczając" jedynie swoje ostatnie warstwy do rozpoznawania cech istotnych dla dermatologii [Anand et al., 2022].

3. Skuteczność Kliniczna i Zastosowania AI

Wdrożenie AI ma sens tylko wtedy, gdy przynosi wymierną korzyść kliniczną. Ocena skuteczności i potencjalne zastosowania można podzielić na kilka obszarów.

3.1. Walidacja i Metryki Oceny

Aby obiektywnie ocenić, "jak dobry" jest algorytm, stosuje się ustandaryzowane metryki statystyczne. Najważniejsze z nich to:

- **Czułość (Sensitivity):** Odsetek zmian złośliwych poprawnie zidentyfikowanych przez AI. Jest to kluczowy parametr bezpieczeństwa – wysoka czułość oznacza minimalizację ryzyka przeoczenia nowotworu (minimalizacja wyników fałszywie negatywnych).
- **Swoistość (Specificity):** Odsetek zmian łagodnych poprawnie zidentyfikowanych przez AI. Wysoka swoistość jest kluczowa dla efektywności systemu – pozwala uniknąć nadmiernej liczby niepotrzebnych biopsji (minimalizacja wyników fałszywie pozytywnych).
- **AUC (Area Under the Curve):** Pole pod krzywą charakterystyki operacyjnej odbiornika (ROC). Jest to zagregowana miara ogólnej zdolności modelu do rozróżniania między dwiema klasami (np. łagodną a złośliwą) w całym zakresie progów decyzyjnych. AUC równe 1.0 oznacza klasyfikator idealny, a 0.5 – klasyfikator losowy [Seeja & Suresh, 2019]. Liczne badania retrospektywne, w tym przełomowe publikacje, wykazały, że algorytmy CNN, trenowane na dużych, wyselekcjonowanych zbiorach danych, osiągają skuteczność w klasyfikacji czerniaka porównywalną lub nawet przewyższającą średnią skuteczność certyfikowanych dermatologów [Jain et al., 2021].

3.2. Praktyczne Zastosowania Kliniczne

Potencjał AI wykracza poza abstrakcyjne testy porównawcze i znajduje odzwierciedlenie w konkretnych modelach wdrożeniowych:

1. **Systemy Wspomagania Decyzji Klinicznych (CDSS):** Najbardziej prawdopodobny scenariusz implementacji. Lekarz wykonuje badanie dermoskopowe, a oprogramowanie (zintegrowane z dermoskopem lub systemem archiwizacji) w czasie rzeczywistym analizuje obraz, dostarczając "drugą opinię". System może podświetlić niepokojące cechy, zaproponować prawdopodobne rozpoznanie lub podać procentowe ryzyko złośliwości. Nie zastępuje to lekarza, ale wzmacnia jego pewność diagnostyczną i może być cennym wsparciem, zwłaszcza dla mniej doświadczonych klinicystów [Wu et al., 2022].

2. **Triaż w Teledermatologii:** W systemach "store-and-forward", gdzie pacjent lub lekarz POZ przesyła zdjęcie zmiany do oceny specjalistycznej, AI może dokonać wstępnej selekcji. Algorytm może automatycznie oznaczyć zmiany jako: a) prawdopodobnie łagodne (nie wymagające interwencji), b) o niskim ryzyku (do obserwacji lub rutynowej kontroli), c) o wysokim ryzyku (wymagające pilnej konsultacji stacjonarnej i biopsji). Optymalizuje to czas specjalisty i znacząco skraca kolejkę do diagnozy dla pacjentów o wysokim priorytecie [Walker et al., 2019].

3. **Monitorowanie Znamion (Total Body Photography):** Pacjenci z wysokim ryzykiem (np. z zespołem znamion atypowych lub dodatnim wywiadem rodzinnym) wymagają regularnego mapowania całego ciała. Ręczne porównywanie setek znamion między kolejnymi wizytami jest czasochłonne i obarczone ryzykiem błędu. Systemy AI mogą automatycznie zmapować, zidentyfikować i porównać każdą zmianę, flagując jedynie te, które uległy istotnej modyfikacji (nowopowstałe lub zmieniające się w czasie – "ugly duckling sign") [Han et al., 2018].

4. Kluczowe Wyzwania i Ograniczenia Implementacyjne

Droga od imponujących wyników w badaniach naukowych do bezpiecznego i skutecznego wdrożenia w codziennej praktyce klinicznej jest długa i pełna wyzwań.

4.1. Reprezentatywność Danych i Stronniczość (Bias) Algorytmów

To obecnie największy problem etyczny i kliniczny AI w medycynie. Większość publicznie dostępnych, wielkoskalowych zbiorów danych (w tym HAM10000) jest drastycznie niezrównoważona – opiera się niemal wyłącznie na obrazach pozyskanych od pacjentów o jasnym fototypie skóry (typy I-III wg Fitzpatricka) [Li & Shen, 2018]. Skutkiem tego, modele trenowane na tych danych wykazują dramatyczny spadek skuteczności, gdy są testowane na populacjach o ciemniejszej karnacji. Morfologia zmian skórnych (w tym czerniaka, np. czerniaka akralnego) może różnić się w zależności od fototypu [Korotkov & Garcia, 2012]. Model, który nie "widział" wystarczającej liczby przykładów zmian na ciemnej skórze podczas treningu, nie będzie w stanie ich poprawnie zdiagnozować w praktyce. Grozi to realnym pogłębianiem nierówności w dostępie do opieki zdrowotnej i stwarza bezpośrednie zagrożenie dla bezpieczeństwa pacjentów [Litjens et al., 2017].

4.2. Problem "Czarnej Skrzynki" (Black Box)

Większość modeli głębokiego uczenia to tzw. "czarne skrzynki". Oznacza to, że choć potrafią one z wysoką dokładnością udzielić odpowiedzi (np. "czerniak, 95% pewności"), nie są w stanie w zrozumiały dla człowieka sposób wytłumaczyć, dlaczego podjęły taką decyzję [Reza Tizhoosh & Pantanowitz, 2018]. Dla klinicysty, który ponosi ostateczną odpowiedzialność medyczną i prawną, taka sytuacja jest nieakceptowalna. Lekarz musi wiedzieć, czy algorytm oparł swoją decyzję na trafnych cechach dermoskopowych (np. nieregularnej siateczce), czy może "oszukiwał", skupiając się na artefakcie (np. znamię po biopsji, linijka na zdjęciu, czy nawet refleks światła na żelu) [Gouda et al., 2022].

4.3. Rozwiązanie: Interpretowalność i Explainable AI (XAI)

W odpowiedzi na problem "czarnej skrzynki" narodziła się dziedzina Explainable AI (XAI), czyli "wyjaśnialnej" sztucznej inteligencji [Rigel & Carucci, 2000]. Jej celem jest tworzenie modeli, których proces decyzyjny jest transparentny. W diagnostyce obrazowej najpopularniejszą techniką XAI jest Grad-CAM (Gradient-weighted Class Activation Mapping) [Rahman & Bhattacharya, 2010]. Metoda ta generuje "mapę ciepłą" (heatmap) nakładaną na oryginalny obraz, która wizualizuje, na które piksele i regiony obrazu sieć "patrzyła" najintensywniej, podejmując finalną decyzję. Pozwala to klinicyście na szybką weryfikację, czy "logika" maszyny jest zgodna z wiedzą medyczną [Yu et al., 2025].

4.4. Walidacja Zewnętrzna i Generalizacja

Model, który osiąga 99% skuteczności na danych testowych pochodzących z tego samego zbioru, na którym był trenowany, jest bezwartościowy klinicznie. Kluczowa jest generalizacja, czyli zdolność modelu do utrzymania skuteczności w zetknięciu z nowymi, nieznanymi danymi [Dong et al., 2023]. Oznacza to konieczność przeprowadzania rygorystycznej walidacji zewnętrznej – testowania algorytmu na danych pochodzących z innych placówek, pozyskanych za pomocą innych dermoskopów i obejmujących inne populacje pacjentów. Dopiero badania prospektywne, prowadzone w warunkach rzeczywistej praktyki klinicznej (Real-World Evidence), mogą ostatecznie potwierdzić użyteczność danego narzędzia [Sanghvi et al., 2023].

4.5. Aspekty Regulacyjne i Etyczne

Oprogramowanie stawiające diagnozę lub sugerujące leczenie jest traktowane jako wyrób medyczny (Software as a Medical Device, SaMD). Wymaga to przejścia skomplikowanej ścieżki certyfikacji (np. przez FDA w USA lub w ramach regulacji MDR w Europie) [Khan et al., 2021]. Konieczne jest również zapewnienie pełnej zgodności z przepisami o ochronie danych osobowych (RODO/GDPR) oraz jasne zdefiniowanie odpowiedzialności prawnej w przypadku błędu algorytmu [Masood & Al-Jumaily, 2013].

5. Wnioski i Perspektywy na Przyszłość

Sztuczna inteligencja bez wątpienia zrewolucjonizuje diagnostykę dermatologiczną. Już teraz jej zdolności analityczne w kontrolowanych warunkach dorównują ludzkim ekspertom. Należy jednak z całą mocą podkreślić, że AI nie ma na celu zastąpienia dermatologa. Celem jest augmentacja, czyli wzmocnienie zdolności diagnostycznych lekarza. Model "Centaura" (współpraca człowiek-maszyna), gdzie klinicysta wspierany przez obiektywną, szybką i nieustraszoną analizę AI, osiąga wyniki lepsze niż każdy z nich osobno, wydaje się najbardziej prawdopodobnym scenariuszem przyszłości. AI przejmie zadania żmudne i powtarzalne (wstępny triaż, monitorowanie), pozwalając lekarzowi skupić się na przypadkach granicznych, złożonych i na bezpośredniej interakcji z pacjentem. Aby ten potencjał mógł zostać bezpiecznie zrealizowany, środowisko naukowe i medyczne musi skupić wysiłki na tworzeniu bardziej zróżnicowanych etnicznie i reprezentatywnych zbiorów danych, rozwijaniu transparentnych i wyjaśnialnych algorytmów (XAI) oraz opracowaniu jednolitych, globalnych standardów walidacji i raportowania wyników badań nad AI w medycynie.

Bibliografia:

1. Wei ML, Tada M, So A, Torres R. Artificial intelligence and skin cancer. *Front Med* (Lausanne). 2024 Mar 19;11:1331895.
2. Naqvi M, Gilani SQ, Syed T, Marques O, Kim HC. Skin Cancer Detection Using Deep Learning-A Review. *Diagnostics* (Basel). 2023 May 30;13(11):1911.
3. Jeong HK, Park C, Henao R, Kheterpal M. Deep Learning in Dermatology: A Systematic Review of Current Approaches, Outcomes, and Limitations. *JID Innov*. 2022 Aug 23;3(1):100150.
4. Melarkode N, Srinivasan K, Qaisar SM, Plawiak P. AI-Powered Diagnosis of Skin Cancer: A Contemporary Review, Open Challenges and Future Research Directions. *Cancers* (Basel). 2023 Feb 13;15(4):1183.
5. Jain S, Singhania U, Tripathy B, Nasr EA, Aboudaif MK, Kamrani AK. Deep Learning-Based Transfer Learning for Classification of Skin Cancer. *Sensors* (Basel). 2021 Dec 6;21(23):8142.
6. R D S, A S. Deep Learning Based Skin Lesion Segmentation and Classification of Melanoma Using Support Vector Machine (SVM). *Asian Pac J Cancer Prev*. 2019 May 25;20(5):1555-1561.
7. Anand V, Gupta S, Koundal D, Nayak SR, Barsocchi P, Bhoi AK. Modified U-NET Architecture for Segmentation of Skin Lesion. *Sensors* (Basel). 2022 Jan 24;22(3):867.

8. Cheng D, Gai J, Mao Y, Gao X, Zhang B, Jing W, Deng J, Zhao F, Mao N. EA-Net: Research on skin lesion segmentation method based on U-Net. *Heliyon*. 2023 Nov 22;9(12):e22663.
9. Dildar M, Akram S, Irfan M, Khan HU, Ramzan M, Mahmood AR, Alsaiari SA, Saeed AHM, Alraddadi MO, Mahnashi MH. Skin Cancer Detection: A Review Using Deep Learning Techniques. *Int J Environ Res Public Health*. 2021 May 20;18(10):5479.
10. Azeem M, Kiani K, Mansouri T, Topping N. SkinLesNet: Classification of Skin Lesions and Detection of Melanoma Cancer Using a Novel Multi-Layer Deep Convolutional Neural Network. *Cancers (Basel)*. 2023 Dec 24;16(1):108.
11. Wu Y, Chen B, Zeng A, Pan D, Wang R, Zhao S. Skin Cancer Classification With Deep Learning: A Systematic Review. *Front Oncol*. 2022 Jul 13;12:893972.
12. Kittler H, Pehamberger H, Wolff K, Binder M. Diagnostic accuracy of dermoscopy. *Lancet Oncol*. 2002 Mar;3(3):159-65.
13. Ghosh P, Azam S, Quadir R, Karim A, Shamrat FMJM, Bhowmik SK, Jonkman M, Hasib KM, Ahmed K. SkinNet-16: A deep learning approach to identify benign and malignant skin lesions. *Front Oncol*. 2022 Aug 8;12:931141.
14. Alam TM, Shaukat K, Khan WA, Hameed IA, Almuqren LA, Raza MA, Aslam M, Luo S. An Efficient Deep Learning-Based Skin Cancer Classifier for an Imbalanced Dataset. *Diagnostics (Basel)*. 2022 Aug 31;12(9):2115.
15. Walker BN, Rehg JM, Kalra A, Winters RM, Drews P, Dascalu J, David EO, Dascalu A. Dermoscopy diagnosis of cancerous lesions utilizing dual deep learning algorithms via visual and audio (sonification) outputs: Laboratory and prospective observational studies. *EBioMedicine*. 2019 Feb;40:176-183.
16. Han SS, Kim MS, Lim W, Park GH, Park I, Chang SE. Classification of the Clinical Images for Benign and Malignant Cutaneous Tumors Using a Deep Learning Algorithm. *J Invest Dermatol*. 2018 Jul;138(7):1529-1538.
17. Li Y, Shen L. Skin Lesion Analysis towards Melanoma Detection Using Deep Learning Network. *Sensors (Basel)*. 2018 Feb 11;18(2):556.
18. Litjens G, Kooi T, Bejnordi BE, Setio AAA, Ciompi F, Ghafoorian M, van der Laak JAWM, van Ginneken B, Sánchez CI. A survey on deep learning in medical image analysis. *Med Image Anal*. 2017 Dec;42:60-88.
19. Tizhoosh HR, Pantanowitz L. Artificial Intelligence and Digital Pathology: Challenges and Opportunities. *J Pathol Inform*. 2018 Nov 14;9:38.
20. Gouda W, Sama NU, Al-Waakid G, Humayun M, Jhanjhi NZ. Detection of Skin Cancer Based on Skin Lesion Images Using Deep Learning. *Healthcare (Basel)*. 2022 Jun 24;10(7):1183.
21. Rahman MM, Bhattacharya P. An integrated and interactive decision support system for automated melanoma recognition of dermoscopic images. *Comput Med Imaging Graph*. 2010 Sep;34(6):479-86.
22. Yu Y, Jia H, Zhang L, Xu S, Zhu X, Wang J, Wang F, Han L, Jiang H, Zhou Q, Xin C. Deep Multi-Modal Skin-Imaging-Based Information-Switching Network for Skin Lesion Recognition. *Bioengineering (Basel)*. 2025 Mar 12;12(3):282.

23. Al-Masni MA, Al-Antari MA, Choi MT, Han SM, Kim TS. Skin lesion segmentation in dermoscopy images via deep full resolution convolutional networks. *Comput Methods Programs Biomed.* 2018 Aug;162:221-231.
24. Dong C, Dai D, Zhang Y, Zhang C, Li Z, Xu S. Learning from dermoscopic images in association with clinical metadata for skin lesion segmentation and classification. *Comput Biol Med.* 2023 Jan;152:106321.
25. Sanghvi HA, Patel RH, Agarwal A, Gupta S, Sawhney V, Pandya AS. A deep learning approach for classification of COVID and pneumonia using DenseNet-201. *Int J Imaging Syst Technol.* 2022 Sep 29;10.1002/ima.22812.
26. Khan MA, Sharif M, Akram T, Damaševičius R, Maskeliūnas R. Segmentacija zmian skórnych i klasyfikacja wieloklasowa z wykorzystaniem funkcji głębokiego uczenia i ulepszonej optymalizacji Moth Flame. *Diagnostics (Bazylea).* 29 kwietnia 2021;11(5):811.
27. Masood A, Al-Jumaily AA. Computer aided diagnostic support system for skin cancer: a review of techniques and algorithms. *Int J Biomed Imaging.* 2013;2013:323268.
28. Korotkov K, Garcia R. Computerized analysis of pigmented skin lesions: a review. *Artif Intell Med.* 2012 Oct;56(2):69-90.
29. Goyal M, Knackstedt T, Yan S, Hassanpour S. Artificial intelligence-based image classification methods for diagnosis of skin cancer: Challenges and opportunities. *Comput Biol Med.* 2020 Dec;127:104065.
30. Rigel DS, Carucci JA. Malignant melanoma: prevention, early detection, and treatment in the 21st century. *CA Cancer J Clin.* 2000 Jul-Aug;50(4):215-36; quiz 237-40.
31. Rasheed A, Umar AI, Shirazi SH, Khan Z, Nawaz S, Shahzad M. Automatic eczema classification in clinical images based on hybrid deep neural network. *Comput Biol Med.* 2022 Aug;147:105807.



Jesteś studentem, doktorantem, młodym naukowcem? Chcesz publikować w profesjonalnym piśmie naukowym, brać udział w konferencjach? Firma Konferencje Naukowe Piotr Rachwał umożliwi Ci start w świecie nauki za przystępną cenę. Organizujemy konferencje interdyscyplinarne, jak i specjalistyczne. Wydajemy monografie pokonferencyjne oraz współpracujemy z czasopismami z listy ministerialnej. Pomagamy w publikacji artykułów.

Piotr Rachwał

Konferencje Naukowe

ul. Gen Leopolda Okulickiego 51D/20

31-637 Kraków

NIP: 573-272-51-36

REGON: 365643034

E-mail: rachwal.konferencjenaukowe@gmail.com

www.konferencjenaukowe.com.pl