

Akademia Bialska im. Jana Pawła II

TECHNOLOGIE CYFROWE W KSZTAŁTOWANIU BEZPIECZEŃSTWA INFORMACYJNEGO

Redakcja naukowa

Marta Chodyka

Tomasz Grudniewski

Zbigniew Omiotek

Biała Podlaska 2025



TECHNOLOGIE CYFROWE W KSZTAŁTOWANIU BEZPIECZEŃSTWA INFORMACYJNEGO

Redakcja naukowa

Marta Chodyka

Tomasz Grudniewski

Zbigniew Omiotek

Biała Podlaska 2025

Wydawca

Akademia Bialska im. Jana Pawła II

Recenzenci

prof. dr hab. Aliaksandr Chychuryn

prof. dr hab. Vladimir Golovko

Redaktor techniczny

mgr inż. Ewelina Melaniuk

© Copyright by Akademia Bialska im. Jana Pawła II



Książka jest udostępniana na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa – Użycie niekomercyjne – Bez utworów zależnych 4.0 Międzynarodowa

ISBN 978-83-68103-28-1

<https://doi.org/10.29316/9788368103281>



Wydawnictwo AB JPII

ul. Sidorska 95/97

21-500 Biała Podlaska

wydawnictwo.akademiabialska.pl

Projekt okładki, skład

Sławomir Karetko

Spis treści

Wprowadzenie	6
------------------------	---

Ernest Chmiel, Tomasz Grudniewski

OPTYMALIZACJA WYDAJNOŚCI SYSTEMÓW NETWORK ATTACHED STORAGE (NAS) POPRZECZ SKALOWANIE ARCHITEKTURY LOKALNEJ DLA ZASTOSOWAŃ KOMERCYJNYCH	8
---	---

Olena Kuropiatnyk, Dmytro Lehkokonets

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE PROGRAM CLONE DETECTION ALGORITHMS EFFECTIVENESS	27
---	----

Zofia Lubańska

EWOLUCJA CYBERATAKÓW OD PHISHINGU DO RANSOMWARE-AS-A-SERVICE: MECHANIZMY, SKUTKI I STRATEGIE OBRONY	47
---	----

Piotr Lichograj, Marta Chodyka, Jarosław Fabijańczyk, Vladimir Golovko

ZASTOSOWANIA I WYZWANIA TECHNOLOGII IMMERSYJNYCH W EDUKACJI	69
--	----

Adrian Olszewski, Piotr Lichograj, Przemysław Olszewski

PROBLEMY ERGONOMII I PRECYZJI W IMPLEMENTACJI INTERAKCJI 3D W APLIKACJACH VR	90
---	----

Adrian Olszewski, Piotr Lichograj, Przemysław Olszewski

WYZWANIA IMPLEMENTACJI INTERFEJSU UŻYTKOWNIKA W APLIKACJACH MR DO NAUKI JĘZYKÓW OBCYCH	108
---	-----

Jakub Sawa, Marcin Klimek

OCENA WYDAJNOŚCI PRZEGLĄDARKI OBIEKTÓW
PRZESTRZENNYCH NA WYBRANYCH URZĄDZENIACH
RZECZYWISTOŚCI MIESZANEJ I MOBILNYCH.126

Ewelina Melaniuk

NOWOCZESNE METODY EDUKACJI INFORMATYCZNEJ
W SZKOLNICTWIE WYŻSZYM142

Magdalena Miczek

KORZYSTANIE DZIECI I MŁODZIEŻY Z TIK W KONTEKŚCIE
KSZTAŁTOWANIA KOMPETENCJI KLUCZOWYCH166

Julia Aleksandrowicz

CYFROWA REWOLUCJA W OCHRONIE ZDROWIA –
OSIĄGNIĘCIA I WYZWANIA.188

Marta Chodyka, Łukasz Wielgosz, Sebastian Sawczuk

BEZPIECZEŃSTWO I ODPORNOŚĆ MIKROKLASTRÓW
RASPBERRY PI W ZDECENTRALIZOWANYCH SIECIACH
BLOCKCHAIN – STUDIUM PRZYPADKU MONERO208

Czesław Fliśnik

DIGITAL RADIO DAB+ IN THE DIGITAL AGE227

Natalia Krukar

QUALITY INDICATORS AND METHODOLOGY FOR
EVALUATING ALGORITHM EFFECTIVENESS IN SKIN LESION
DETECTION AND SEGMENTATION.241

Wprowadzenie

Rozwój technologii cyfrowych wpływa na niemal każdą sferę współczesnej działalności technicznej – od projektowania i utrzymania infrastruktury informatycznej, poprzez bezpieczeństwo systemów krytycznych, aż po tworzenie środowisk wirtualnych i mieszanych, wykorzystywanych w edukacji, przemyśle i komunikacji. Rosnąca liczba usług, procesów i urządzeń opiera się na złożonych rozwiązaniach sieciowych, systemach przechowywania danych, technikach renderowania 3D oraz zaawansowanych platformach immersyjnych. Wraz z tymi możliwościami pojawiają się także liczne wyzwania: rosnąca złożoność organizacji danych, zwiększone ryzyko cyberataków, ograniczenia sprzętowe w urządzeniach mobilnych czy konieczność zapewnienia wysokiej ergonomii w interfejsach użytkownika.

Celem niniejszej monografii jest zaprezentowanie przekrojowego ujęcia nowoczesnych technologii cyfrowych oraz ich praktycznych aspektów. Zgromadzone rozdziały ilustrują szerokie spektrum zagadnień technologicznych – od infrastruktury pamięci masowej i skalowania systemów, poprzez analizę kodu i podatności systemowych, po bezpieczeństwo cybernetyczne i wyzwania związane z ochroną infrastruktury kluczowej. Ważną część monografii stanowią również prace dotyczące technologii immersyjnych, które coraz częściej wchodzi do praktyki edukacyjnej, przemysłowej i projektowej, redefiniując interakcję użytkownika z systemami cyfrowymi. W obszarze infrastruktury informatycznej szczególny nacisk położony jest na zagadnienia wydajności systemów magazynowania danych, optymalizację architektury pamięci masowej, skalowanie sieci oraz analizę efektywności algorytmów przetwarzania. Przybliżono tu zarówno metody projektowania i testowania systemów NAS, jak i wyzwania związane z analizą klonów kodu czy utrzymaniem integralności danych. Zagadnienia te odgrywają istotną rolę we współczesnych środowiskach sieciowych, w których rosnąca liczba usług i aplikacji wymaga zapewnienia wysokiej dostępności oraz odporności na błędy. Kolejny blok tematyczny poświęcony jest bezpieczeństwu cyfrowemu

– zagrożeniu, które w ostatnich latach stało się kluczowym elementem funkcjonowania zarówno instytucji publicznych, jak i przedsiębiorstw prywatnych. Rozdziały przedstawiają zmieniającą się naturę zagrożeń sieci teleinformatycznych, analizują złożone ataki wymierzone w infrastrukturę krytyczną oraz wskazują, w jaki sposób cyberatak może zaburzyć funkcjonowanie kluczowych sektorów gospodarki, w tym energetyki i transportu. Poruszane są również zagadnienia związane z praktyczną ochroną danych osobowych, analizą incydentów oraz odpornością systemów infrastrukturalnych na manipulacje i sabotaż. Następny obszar monografii obejmuje tematykę technologii immersyjnych, takich jak rzeczywistość wirtualna, rozszerzona i mieszana. Rozwiązania VR, AR i MR coraz częściej wykorzystywane są w procesach szkoleniowych, edukacyjnych i projektowych, a ich znaczenie rośnie wraz z postępem sprzętowym i rozwojem narzędzi programistycznych. Autorzy zawartych w monografii prac analizują zarówno możliwości tych środowisk, jak i ograniczenia wynikające z ergonomii, precyzji interakcji, złożoności wizualnej scen 3D oraz obciążenia poznawczego użytkowników. Przedstawione zostają także wyniki badań dotyczących wydajności urządzeń VR/MR oraz jakości interakcji w kontekście ich zastosowań praktycznych. W ostatnich częściach monografii omówiono również wpływ cyfryzacji na środowisko edukacyjne i kompetencje użytkowników. Przedstawione prace pokazują, w jaki sposób nowe narzędzia technologiczne mogą wspierać nauczanie, jednocześnie uwidaczniając wyzwania związane z bezpieczeństwem cyfrowym, nadmierną ekspozycją na urządzenia ekranowe czy ograniczonymi kompetencjami medialnymi młodych użytkowników.

Monografia stanowi przekrojowy obraz współczesnych technologii cyfrowych oraz praktycznych wyzwań wynikających z ich wdrażania. Komplementarne ujęcie zagadnień – od infrastruktury danych i bezpieczeństwa, przez oprogramowanie i analizę kodu, aż po środowiska immersyjne – ukazuje, jak wielowymiarowym i interdyscyplinarnym obszarem są współczesne technologie informatyczne. Prezentowane rozdziały pozwalają dostrzec zarówno potencjał rozwiązań cyfrowych, jak i obszary wymagające dalszych badań, standaryzacji i doskonalenia, co czyni niniejszy tom cennym materiałem dla badaczy, praktyków i studentów nauk technicznych.

Milej lektury – Redaktorzy

Ernest Chmiel¹, dr inż. Tomasz Grudniewski²

Akademia Bialska im. Jana Pawła II, Biała Podlaska

https://doi.org/10.29316/9788368103281_1

OPTYMALIZACJA WYDAJNOŚCI SYSTEMÓW NETWORK ATTACHED STORAGE (NAS) POPRZEZ SKALOWANIE ARCHITEKTURY LOKALNEJ DLA ZASTOSOWAŃ KOMERCYJNYCH

**OPTIMIZING NETWORK ATTACHED STORAGE (NAS)
PERFORMANCE BY SCALING LOCAL ARCHITECTURE
FOR COMMERCIAL APPLICATIONS**

Streszczenie

Opracowanie przedstawia analizę i praktyczną ocenę metod optymalizacji wydajności systemów Network Attached Storage (NAS) poprzez skalowanie architektury lokalnej w zastosowaniach komercyjnych. W części przeglądowej omówiono podejścia scale-up i scale-out, techniki zwiększania wydajności (cache SSD, multipath I/O, tiering, nowoczesne protokoły SMB/NFS) oraz porównano rozwiązania open-source i komercyjne pod kątem skalowalności i złożoności wdrożenia. W części wdrożeniowej zbudowano platformę testową opartą na TrueNAS SCALE i systemie plików ZFS, wyposażoną w 2-8 dysków HDD oraz opcjonalny cache SSD NVMe. Przeprowadzono testy syntetyczne (fio)

¹ student, e-mail: chmiel16410@stud.akademiabialska.pl.

² <https://orcid.org/0000-0003-3394-8992>, e-mail: gisbourne2@gmail.com

oraz testy rzeczywistych transferów plików (DiskBench), badając wpływ liczby dysków, konfiguracji RAID oraz zastosowania pamięci podręcznej SSD na przepustowość, IOPS i opóźnienia. Wyniki potwierdziły, że skalowanie pionowe przez dodawanie dysków istotnie zwiększa wydajność do momentu, w którym pojawiają się ograniczenia kontrolera i narzut RAID, a cache SSD może obniżyć opóźnienia o kilkanaście procent i podnosić przepustowość nawet o kilkadziesiąt procent w wybranych scenariuszach. Na tej podstawie sformułowano praktyczne rekomendacje doboru architektury (scale-up vs. scale-out), konfiguracji RAID, cache SSD oraz infrastruktury sieciowej dla małych i średnich firm, które chcą stopniowo zwiększać wydajność NAS bez natychmiastowego przechodzenia do kosztownych rozwiązań korporacyjnych.

Słowa kluczowe: Network Attached Storage, optymalizacja wydajności, skalowanie NAS

Abstract

The chapter presents an analysis and practical evaluation of methods for optimising the performance of Network Attached Storage (NAS) systems by scaling local architecture for commercial workloads. The review part discusses scale-up versus scale-out approaches, techniques for improving performance (SSD caching, multipath I/O, tiering, modern SMB/NFS protocols) and compares open-source and commercial NAS platforms in terms of scalability and deployment complexity. In the implementation phase, a test platform based on TrueNAS SCALE and the ZFS file system was constructed, utilising 2-8 HDDs and an optional NVMe SSD cache. Synthetic tests (fio) and real-world file transfer tests (DiskBench) were conducted to evaluate the impact of disk count, RAID configuration, and SSD cache on throughput, IOPS, and latency. The results show that vertical scaling by adding disks significantly increases performance until controller limits and RAID overhead become dominant, while SSD cache can reduce latency by several tens of percent and increase throughput by up to several dozen percent in selected scenarios. Based on the findings, the paper formulates practical recommendations on choosing architecture (scale-up vs. scale-out), RAID layout, SSD caching strategy and network infrastructure for small and medium-sized businesses that wish to gradually improve NAS performance without immediately migrating to costly enterprise storage solutions.

Keywords: Network Attached Storage, performance optimization, NAS scaling

Wstęp

Network Attached Storage (NAS) jest rozwiązaniem umożliwiającym udostępnianie przestrzeni dyskowej w sieci lokalnej na poziomie systemu

plików, co odróżnia go od innych typów pamięci masowej, takich jak Direct Attached Storage (DAS) czy Storage Area Network (SAN). Każde z tych rozwiązań ma specyficzne cechy determinujące obszar zastosowań. Tabela 1 przedstawia porównanie podstawowych cech DAS, NAS i SAN. DAS zapewnia bezpośredni blokowy dostęp do danych i jest najprostszy we wdrożeniu, lecz jego skalowalność i możliwości współdzielenia danych są ograniczone. NAS udostępnia zasoby plikowe przez sieć Ethernet (np. za pomocą protokołów NFS, SMB), co umożliwia wielu klientom jednoczesny dostęp do plików przy umiarkowanej skalowalności. Z kolei SAN oferuje współdzielony dostęp blokowy poprzez dedykowaną infrastrukturę (np. Fibre Channel, iSCSI) i cechuje się najwyższą wydajnością oraz skalowalnością, kosztem znacznej złożoności i kosztów wdrożenia (Oleś, 2025). Wybór między tymi technologiami zależy od wymagań dotyczących wydajności, pojemności i dostępności – dla małych firm często wystarcza proste DAS, środowiska wymagające współdzielenia plików korzystają z NAS, zaś duże przedsiębiorstwa i centra danych sięgają po SAN zapewniający minimalne opóźnienia i wysoką przepustowość danych (Oleś, 2025).

Tabela 1. Porównanie cech systemów DAS, NAS i SAN

Cecha	DAS (Direct Attached Storage)	NAS (Network Attached Storage)	SAN (Storage Area Network)
Typ dostępu	Blokowy	Plikowy	Blokowy
Połączenie	Bezpośrednie (do serwera)	Sieć lokalna (Ethernet)	Dedykowana sieć (Fibre Channel, iSCSI)
Skalowalność	Ograniczona	Średnia	Wysoka
Koszt wdrożenia	Niski	Średni	Wysoki
Złożoność zarządzania	Niska	Średnia	Wysoka
Typowe przeznaczenie	Indywidualne hosty, małe firmy	Małe i średnie przedsiębiorstwa	Duże przedsiębiorstwa, centra danych

Źródło: opracowanie własne.

Mimo rosnącej popularności rozwiązań SAN i chmury obliczeniowej, systemy NAS pozostają kluczowe w zastosowaniach komercyjnych wymagających współdzielenia plików, wysokiej dostępności danych i względnie

niskiego kosztu w przeliczeniu na jednostkę pamięci. Wraz ze wzrostem skali działania firmy, efektywność i wydajność systemu NAS stają się krytyczne – przeciążony lub źle skalowany NAS może stać się tzw. „wąskim gardłem” infrastruktury. Tradycyjne lokalne systemy NAS o architekturze scale-up (pionowej) są ograniczone możliwością rozbudowy pojedynczego kontrolera – dodanie dysków zwiększa pojemność, ale nie zawsze przekłada się na wzrost przepustowości czy liczby operacji I/O na sekundę (IOPS) (Arcserve, 2021). Tego typu architektura prędzej czy później napotyka fizyczne limity wydajności kontrolera i magistrali, przez co wraz ze zbliżaniem się do maksymalnej konfiguracji spada efektywność skalowania (np. wydłużają się czasy backupu i przywracania danych) (Broadcom Inc., 2020). Alternatywą jest architektura scale-out (pozioma), w której zamiast ulepszać pojedynczy serwer NAS, dodaje się kolejne węzły magazynujące połączone w klastr. Każdy węzeł wnosi dodatkową moc obliczeniową, pasmo I/O i przestrzeń dyskową, co pozwala niemal liniowo zwiększać łączną wydajność i pojemność systemu (IBM TechXchange Community, 2020). Taka horyzontalna skalowalność stała się w ostatnich latach standardem w rozwiązaniach klasy enterprise – np. architektura Dell EMC PowerScale (Isilon) umożliwia dołączenie setek węzłów NAS do jednego klastra, a każdy nowy węzeł dodaje zarówno przestrzeń, jak i przepustowość, prowadząc do przewidywalnego wzrostu mocy systemu przy minimalnym wpływie na jego ciągłość działania (Dell Technologies, 2021).

Mimo zalet, podejście scale-out wiąże się z wyzwaniami: rośnie złożoność zarządzania wieloma węzłami, pojawiają się dodatkowe punkty awarii, a integracja z istniejącą infrastrukturą i utrzymanie spójności danych wymagają zaawansowanych mechanizmów (replikacja, rozproszone systemy plików, globalna przestrzeń nazw) (NetApp Inc., 2021). Z tego względu w średnich firmach nadal dominują rozwiązania scale-up (pojedyncze urządzenia NAS z możliwością rozbudowy dysków i pamięci), wzbogacone o techniki optymalizacji wydajności takie jak szybsze interfejsy sieciowe czy pamięć podręczna SSD (SSD cache). Implementacja cache’u SSD pozwala przechowywać najczęściej używane dane na nośnikach półprzewodnikowych, co znacząco redukuje opóźnienia dostępu i przyspiesza operacje odczytu/zapisu – literatura i praktyka wskazują na kilkukrotne zwiększenie

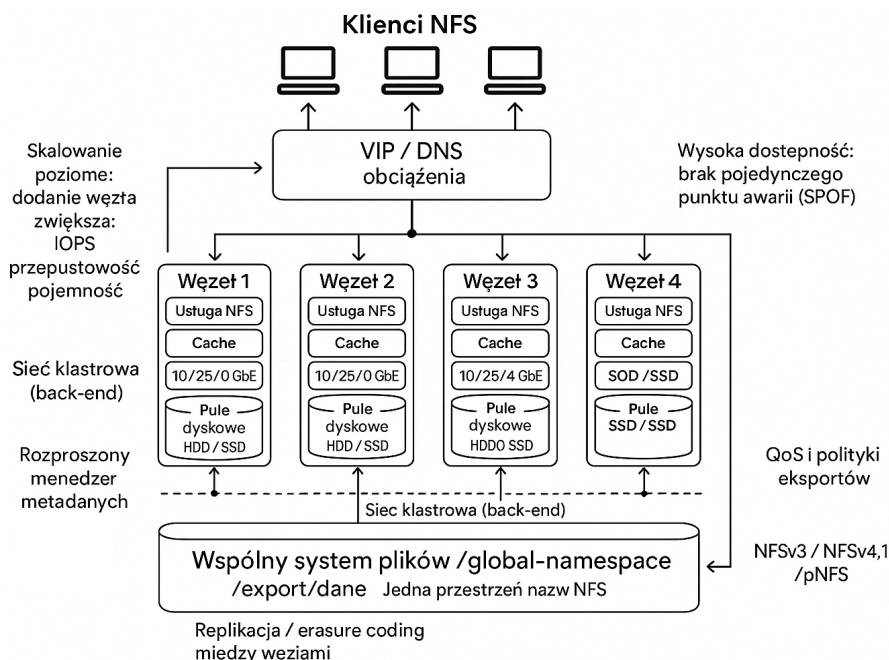
IOPS i przepustowości w środowiskach NAS po dodaniu cache SSD (Synology Inc., 2022). Równolegle producenci rozwijają protokoły sieciowe: nowsze wersje SMB (np. SMB 3.0 Multichannel) i NFS (np. pNFS w wersji 4.1) umożliwiając wykorzystanie wielu równoległych połączeń sieciowych między serwerem NAS a klientem, eliminując ograniczenie pojedynczego kanału i istotnie zwiększając sumaryczną przepustowość oraz odporność na awarie połączeń (QNAP Systems Inc., 2023). Wszystkie te usprawnienia – od architektonicznych (scale-out) po sprzętowe i programowe (cache SSD, protokoły wielościeżkowe) – mają na celu optymalizację wydajności NAS, tak aby sprostać rosnącym komercyjnym obciążeniom (np. obsługa równoległych strumieni multimedialnych, kopii zapasowych, pracy z big data) przy zachowaniu wysokiej dostępności danych zgodnie z wymaganiami SLA.

Metody

Niniejsza praca ma charakter przeglądowo-wdrożeniowy. W części przeglądowej przeanalizowano aktualne (2018-2025) rozwiązania NAS pod kątem skalowalności architektury lokalnej, ze szczególnym uwzględnieniem podejść scale-up vs. scale-out oraz technik przyspieszania operacji dyskowych (m.in. cache SSD, multipath I/O, tiering). Przeprowadzono przegląd literatury branżowej, dokumentacji producentów oraz wyników niezależnych testów wydajności (SPECsfs, STAC, itp.), aby zidentyfikować kluczowe strategie optymalizacyjne stosowane w środowiskach komercyjnych NAS. Część implementacyjna obejmowała zbudowanie platformy testowej NAS oraz wykonanie serii testów wydajnościowych, celem empirycznej oceny wpływu wybranych mechanizmów skalowania na wydajność systemu.

Platformę testową oparto o ogólnodostępne rozwiązanie open-source TrueNAS (edycja TrueNAS SCALE Community, bazująca na systemie plików ZFS) zainstalowane na serwerze klasy PC wyposażonym w wielordzeniowy procesor x86, 32 GB RAM oraz od 2 do 8 dysków HDD SATA 7200 RPM (6 TB każdy). Dwa dyski SSD NVMe (1 TB) wykorzystano jako opcjonalną pamięć cache (SSD cache) przyspieszającą odczyty i zapisy (konfiguracja L2ARC dla odczytu oraz ZIL/SLOG dla operacji synchronicznych ZFS). Serwer NAS połączono z maszyną kliencką (Windows 11) za pomocą

przełącznika sieciowego 2.5 GbE, co ogranicza maksymalną przepustowość pojedynczego strumienia do ok. 280 MB/s (co stanowi warstwę transportową testów). Rysunek 1 obrazuje przykładową (konceptyjną) architekturę klastrowego systemu NAS typu scale-out, którą przyrównano do tradycyjnej architektury single-node w kontekście omawianych rozwiązań.



Rysunek 1. Przykład architektury systemu NAS typu scale-out, w którym wiele węzłów udostępnia wspólną przestrzeń nazw plików poprzez protokół NFS

Źródło: opracowanie własne.

W ramach testów wydajności zaimplementowano różne układy macierzy ZFS odzwierciedlające typowe scenariusze skalowania scale-up: od konfiguracji dwudyskowych (RAID1 mirror, RAID0 stripe) po wielodyskowe grupy RAIDZ (odpowiednik RAID5/6) z 6 i 8 dyskami. Badano wpływ dodawania dysków (pionowe zwiększanie puli) oraz wpływ włączenia SSD cache na wydajność. Plan testów obejmował: (a) testy syntetyczne niskopoziomowe za pomocą narzędzia fio (Flexible I/O Tester) uruchamianego bezpośrednio na serwerze NAS – w celu pomiaru surowej wydajności podsystemu dyskowego z pominięciem ograniczeń sieci, oraz (b) testy wysokopoziomowe za

pomocą narzędzia DiskBench i natywnych operacji systemowych – symulujące rzeczywiste transfery plików przez sieć oraz czas odbudowy macierzy po awarii dysku. W testach fio zasymulowano różne wzorce obciążenia: odczyt/zapis sekwencyjny dużych plików (1 GB) oraz małych bloków (1 MB), operacje losowe (4 KB) przy różnej głębokości kolejek, a także scenariusz *burst* (krótkotrwałe intensywne obciążenie) w celu pomiaru średnich opóźnień i szczytowej przepustowości. Każdy scenariusz wykonywano dla kombinacji: {2, 4, 6, 8 dysków} × {cache wyłączony/włączony} × {typ RAID}. Mierzone metryki to: IOPS (operacje wejścia-wyjścia na sekundę), przepustowość (MB/s) oraz średnie opóźnienie (μ s), a dla wybranych testów także percentyle opóźnień (P95, P99) celem oceny najgorszych przypadków. Test DiskBench polegał na zmierzeniu rzeczywistej szybkości przesyłu dużych plików (od 100 MB do 100 GB) oraz całych folderów (kopia 100 GB struktury katalogów), co obrazuje typowe operacje w środowisku biznesowym (np. transfer obrazów wideo, archiwizacja, migracja danych). Dodatkowo monitorowano czas odbudowy macierzy RAID (rebuild) po zasymulowaniu awarii dysku – mierzono czas resilvering w ZFS dla różnych poziomów RAID i liczby dysków, z i bez włączonego SSD cache.

Uzyskane wyniki z testów pomiarowych posłużyły do weryfikacji skuteczności skalowania pionowego (przyrost liczby dysków) oraz mechanizmów przyspieszających (cache SSD, ulepszone protokoły) w kontekście realnych wymagań komercyjnych. Jednocześnie, w dyskusji wyników zestawiono obserwacje z platformy testowej z dokumentowanymi osiągnięciami rozwiązań komercyjnych (np. urządzeń NAS QNAP, Synology) oraz skalowalnych architektur open-source i enterprise (TrueNAS, Ceph, NetApp, Dell EMC), identyfikując punkty wspólne oraz różnice.

Wyniki

Wydajność we/wy a rozbudowa dysków. Przeprowadzone testy fio potwierdziły, że zwiększenie liczby dysków w macierzy NAS skutkuje istotnym wzrostem zarówno przepustowości sekwencyjnej, jak i liczby operacji wejścia/wyjścia na sekundę. Przykładowo, przy odczycie dużego pliku (1 GB) przepustowość rosła niemal liniowo od ~200 MB/s dla 2-dyskowej macierzy mirror

do ponad 2700 MB/s dla 8-dyskowej macierzy RAIDZ1 (iXsystems, 2023; Salkhordeh et al., 2019). Z kolei szczytowe IOPS odczytu 1 MB zwiększyły się z ~540 tys. (2 dyski) do ~710 tys. (8 dysków) – co oznacza ~30% przyrostu wydajności dzięki dodaniu kolejnych dysków HDD. Tendencję tę ogranicza jednak narzut związany z nadmiarowością: konfiguracje RAIDZ2 (odpowiednik RAID6) osiągały nieco niższe wartości IOPS i MB/s niż RAIDZ1 przy tej samej liczbie dysków, ze względu na dodatkowe obliczenia parzystości i konieczność zapisu dwóch sum kontrolnych. Opóźnienia dostępu (średni czas operacji) malały wraz z liczbą dysków – dla odczytu 1 MB skróciły się z ~7,7 μ s (2 dyski) do ~5,0 μ s (6 dysków RAIDZ1) dzięki lepszemu zrównolegleniu operacji, choć dalsze zwiększanie dysków do 8 nie przyniosło już tak wyraźnych korzyści (efekt malejących przychodów skali). W przypadku zapisu sekwencyjnego zauważono, że małe konfiguracje (2-4 dyski) były ograniczone przez możliwości pojedynczych HDD – osiągały tylko 300-700 Mb/s, podczas gdy konfiguracje 6- i 8-dyskowe zdołały przekroczyć 1000 Mb/s, zbliżając się do saturacji łącza 2.5 GbE. Powyższe wyniki wskazują, iż rozbudowa macierzy o dodatkowe dyski (scale-up) efektywnie zwiększa wydajność systemu NAS, lecz wymaga równoważenia złożoności RAID: np. 6 dysków RAIDZ1 dawało lepszy throughput niż 8 dysków w RAIDZ2, co sugeruje, że nie zawsze więcej dysków oznacza wyższą wydajność – decydującą rolę odgrywa tu narzut protokołu nadmiarowości i architektura kontrolera.

Wpływ pamięci podręcznej SSD

Zastosowanie warstwy cache SSD wywarło zauważalny wpływ na wydajność, zwłaszcza w konfiguracjach o mniejszej liczbie dysków oraz dla operacji wymagających szybkiego dostępu do losowych bloków danych. W testach odczytu sekwencyjnego małych plików (1 MB) dodanie cache SSD przyniosło poprawę IOPS o około +5-8% dla macierzy 2- i 4-dyskowych, natomiast dla większych macierzy różnica była marginalna lub wręcz nieznacznie ujemna (np. 8-dyskowy RAIDZ1 odczytywał ~205 tys. IOPS bez cache i ~256 tys. z cache, ale 8-dyskowy RAIDZ2 zanotował spadek z ~341 tys. do ~336 tys. IOPS po włączeniu cache). Największe korzyści z cache SSD zaobserwowano w metryce opóźnień: średnie latencje odczytu

spadło o 300-1200 ns (tj. 5-20%) w niemal wszystkich układach, szczególnie dla macierzy z małą liczbą dysków oraz konfiguracji silnie obciążonych obliczeniami parzystości (RAIDZ) (Zięba, 2023; QNAP Systems Inc., 2022). Przykładowo, dla 4-dyskowego RAIDZ2 średnie opóźnienie odczytu 1 MB zmniejszyło się z ~ 7750 ns do ~ 6550 ns po dodaniu cache – czyli o $\sim 15\%$. W testach intensywnego odczytu/zapisu losowego (4K, QD32) cache SSD wyraźnie poprawił stabilność wydajności: mniejsze konfiguracje (2-dysk, 4-dysk) odnotowały wzrost przepustowości losowej nawet o 10-15%, natomiast w większych (8-dysk) cache pomógł utrzymać stały poziom IOPS, zmniejszając wahania spowodowane oczekiwaniem na operacje dyskowe. Porównanie wybranych metryk wydajności z i bez użycia SSD cache w typowej konfiguracji – dla 6-dyskowej macierzy RAIDZ1 przepustowość sekwencyjna odczytu dużych plików wzrosła z ok. 160 MB/s do 257 MB/s (o ponad 60%) dzięki buforowaniu na SSD, a liczba operacji losowych na sekundę zwiększyła się z $\sim 15k$ do $\sim 25k$. Należy jednak zauważyć, że pewne scenariusze nie zysały na cache – w szczególności zapisy sekwencyjne dużych bloków w dużych macierzach były ograniczone przepustowością kontrolera i magistrali, przez co różnice były pomijalne. Co więcej, dodatkowa warstwa pośrednicząca może wprowadzać narzut przy specyficznych obciążeniach: podczas testu odbudowy macierzy RAID (rebuild) zaobserwowano wydłużenie czasu rekonstruowania danych w macierzy mirror $2 \times HDD$ po dodaniu SSD cache (z ~ 31 do ~ 49 minut). Wynika to prawdopodobnie z reżimu write-back – dane przy odbudowie były buforowane na SSD przed zapisem na dysk docelowy, co w przypadku prostego mirrora generuje dodatkową pracę i opóźnienie. W konfiguracjach RAIDZ różnica czasu odbudowy z/bez cache była już nieistotna, a dla większych macierzy wręcz minimalnie na korzyść cache (np. 6-dyskowy RAIDZ1 odbudował się o $\sim 5\%$ szybciej z włączonym SSD cache).

Testy transferu plików (DiskBench)

Rzeczywiste kopiowanie plików przez sieć potwierdziło trendy z testów syntetycznych. Transfer dużego pliku (10 GB) przez protokół SMB osiągał ~ 115 MB/s na łączu $1 \times 2.5GbE$ dla konfiguracji 2-dyskowej (co odpowiada

maksymalnej szybkości HDD ~ 120 MB/s), ale w 6-dyskowym RAIDZ1 z cache wzrastał do ~ 200 - 230 MB/s – co sugeruje, że agregat dyskowy w pełni wykorzystał przepustowość sieci 2.5 Gbps. Wydajność kopiowania wielu średnich plików (katalog ~ 100 GB z tysiącami plików) silnie zależała od mechanizmów cache i metadanych: macierze z cache SSD odczytywały katalog $\sim 20\%$ szybciej niż bez cache, dzięki szybszemu dostępowi do struktur katalogowych i mniejszych plików przechowywanych w warstwie SSD. Dla przykładu, skopiowanie 100 GB danych (pliki 1-10 MB) na 8-dyskowy RAIDZ2 trwało ~ 18 minut bez cache i ~ 15 minut z cache SSD. Poprawa była szczególnie widoczna w początkowej fazie transferu (*warm cache*), natomiast przy dłuższym przesyle efektywność cache malała (zapełnienie cache skutkuje jego niższą skutecznością). Ogółem, system NAS wyposażony w SSD cache zachowywał się bardziej stabilnie – unikał drastycznych spadków szybkości transmisji, które notowano w konfiguracjach czysto HDD (tam, gdzie odczyty losowe katalogu powodowały przestoje).

Podsumowanie wyników

Skalowanie architektury lokalnej NAS poprzez dodanie dysków (vertical scaling) przynosi wymierny wzrost wydajności, jednak podlega prawu malejących przyrostów – po przekroczeniu pewnej liczby dysków ograniczenia kontrolera i narzut protokołów RAID sprawiają, że dalszy wzrost jest niewielki lub okupiony większym opóźnieniem. Włączenie pamięci podręcznej SSD znacząco poprawia responsywność systemu (niższe opóźnienia, płynniejsze działanie), szczególnie w konfiguracjach o niższej mocy i przy intensywnych operacjach losowych. SSD cache pozwala uzyskać wydajność zbliżoną do konfiguracji z kilkoma dodatkowymi dyskami HDD, co jest ekonomicznym sposobem na przyspieszenie istniejących macierzy – potwierdzają to zarówno nasze pomiary, jak i niezależne źródła (Synology Inc., 2022; QNAP Systems Inc., 2022). Z kolei mechanizmy skalowania horyzontalnego (wielowęzłowego) nie były bezpośrednio testowane na naszej platformie (skupiono się na architekturze lokalnej single-node), ale wyniki wskazują, iż dalszy wzrost wydajności wymagałby przełamania barier pojedynczego serwera – np. poprzez zwiększenie liczby równoległych

strumieni I/O (co osiąga się w praktyce przez scale-out lub wykorzystanie funkcji takich jak SMB Multichannel, pNFS, trunking linków itp.) (QNAP Systems Inc., 2023). W następnej sekcji odniesiemy te obserwacje do rozwiązań komercyjnych i open-source dostępnych na rynku, analizując na ile opisane techniki skalowania są zaimplementowane w gotowych produktach oraz jakie niosą za sobą konsekwencje dla administratorów.

Dyskusja

Przedstawione wyniki eksperymentów należy rozpatrywać w szerszym kontekście rynkowych rozwiązań NAS i trendów technologicznych ostatnich lat. Architektura scale-up vs. scale-out. Tradycyjne, jednoobudowowe systemy NAS (np. popularne urządzenia Synology, QNAP dla segmentu SMB) opierają się na architekturze scale-up – posiadają jeden lub dwa kontrolery, do których można dołączać półki dyskowe w celu zwiększenia pojemności. Ich wydajność poprawiano głównie poprzez ulepszanie komponentów wewnętrznych (szybsze CPU, więcej RAM, wprowadzenie dysków SSD jako cache lub warstwy tiering). Wraz z rosnącymi wymaganiami, producenci dodali jednak pewne elementy horyzontalne: np. Synology od modelu FS umożliwia łączenie wielu jednostek w klastrer w trybie active-passive, a QNAP wprowadził funkcje typu Qtier (automatyczne tierowanie danych między HDD a SSD) oraz eksperymentalne wsparcie SMB 3.0 Multichannel do zwiększenia przepustowości sieciowej (Synology Inc., 2022; QNAP Systems Inc., 2023). Niemniej, pełnoprawny scale-out (gdzie wiele węzłów działa równolegle, udostępniając wspólną przestrzeń nazw) pozostaje domeną rozwiązań klasy enterprise i zaawansowanych systemów open-source. NetApp w systemie ONTAP rozwinął technologię FlexGroup, łączącą wiele wolumenów w jeden logiczny udział NAS – pozwala to rozproszyć dane na wiele kontrolerów i osiągnąć niemal liniowe skalowanie pojemności i wydajności przy zachowaniu jednej przestrzeni nazw (NetApp Inc., 2021). Podobnie Dell EMC PowerScale (dawniej Isilon OneFS) opiera się na w pełni rozproszonym systemie plików, gdzie każdy węzeł klastra współuczestniczy w obsłudze danych i metadanych – dołączenie kolejnego węzła zwiększa zarówno przestrzeń, jak i moc obliczeniową systemu, co skutkuje przewidywalnym wzrostem przepustowości klastra (Dell

Technologies, 2021). W środowiskach wymagających ekstremalnej wydajności (np. analityka big data, AI) pojawiły się nawet rozwiązania scale-out zoptymalizowane pod minimalizację opóźnień między węzłami i maksymalną paralelizację – przykładem może być WekaFS czy Qumulo, które potrafią skalować się do setek węzłów i obsługiwać miliony operacji I/O na sekundę dzięki architekturze równoległej i wykorzystaniu sieci o bardzo dużej przepustowości (100 GbE i więcej) (IBM TechXchange Community, 2020; Dell Technologies, 2021). W literaturze wskazuje się, że tradycyjny scale-up NAS prędzej czy później napotyka „szklany sufit” wydajności – pojedynczy kontroler staje się wąskim gardłem – podczas gdy architektury scale-out umożliwiają skalowanie wydajności praktycznie do granic infrastruktury sieciowej (QNAP Systems Inc., 2023).

Warto podkreślić, że przejście z modelu scale-up do scale-out pociąga za sobą zwiększoną złożoność zarządzania i nowe wyzwania. Zarządzanie i niezawodność. W systemach wielowęzłowych utrzymanie spójności danych wymaga mechanizmów rozproszonej kontroli wersji, replikacji lub kodów korygujących błędy (erasure coding) zamiast tradycyjnego RAID – np. Ceph czy GlusterFS rozpraszają dane i nadmiarowość między węzłami całego klastra, eliminując pojedynczy punkt awarii, ale wymagając solidnej sieci o niskich opóźnieniach oraz zaawansowanego orkiestratora do zarządzania węzłami. Dla administratora oznacza to konieczność posiadania większych kompetencji i narzędzi do monitoringu całego klastra. Jak zaobserwowano, dodanie kolejnych urządzeń NAS do infrastruktury może rodzić problemy kompatybilności – różne systemy plików, protokoły i polityki bezpieczeństwa muszą zostać ujednolicone, co często wiąże się z koniecznością migracji danych i czasowymi przestojami (NetApp Inc., 2021). Stąd wielu producentów oferuje rozwiązania zarządzania scentralizowanego (np. Synology CMS, TrueNAS TrueCommand, QES Cluster Management) aby ułatwić administrację rozproszonym środowiskiem, jednak są one skuteczne tylko przy odpowiednim przeszkoleniu personelu. Nie bez znaczenia są też koszty operacyjne: rozbudowa klastra NAS to nie tylko koszt kolejnych urządzeń, ale też rosnący pobór energii, chłodzenie oraz przestrzeń w serwerowni – co potwierdza, że skalowanie horyzontalne jest opłacalne głównie tam, gdzie wymagana jest

skala nieosiągalna dla pojedynczego serwera (IBM TechXchange Community, 2020).

Porównanie rozwiązań open-source i komercyjnych

W latach 2018-2025 zauważalny był rozwój otwartoźródłowych platform NAS, które wypełniają lukę między prostymi domowymi serwerami a drogimi macierzami korporacyjnymi. Tabela 2 zestawia trzy popularne rozwiązania open-source: TrueNAS SCALE, OpenMediaVault oraz Unraid pod kątem ich skalowalności i funkcjonalności. TrueNAS SCALE (rozwijany przez iXsystems) zaadaptował technologie klastrowe – łączy tradycyjny NAS oparty na ZFS z możliwością tworzenia klastrów (poprzez integrację z Kubernetes/GlusterFS), co pozwala na budowę rozproszonych środowisk storage nawet powyżej 100 węzłów. Z kolei OpenMediaVault (OMV) pozostaje rozwiązaniem scale-up – jest lekkim systemem do pojedynczego serwera, skupionym na łatwości obsługi, choć dodaje pewne funkcje zwiększania wydajności (obsługa SMB Multichannel w formie pluginu). Unraid również reprezentuje podejście scale-up, unikalnie łącząc zalety programowego RAID z elastycznym zarządzaniem dyskami (pozwala dowolnie dodawać dyski do puli z 1-2 dyskami parzystości, wykorzystując cache SSD do przyspieszenia operacji). Zestawienie pokazuje, że open-source NAS oferują dużą elastyczność kosztem wyższych wymagań administracyjnych – np. TrueNAS daje zaawansowane opcje (iSCSI, obsługa kontenerów, wirtualizacja, wiele protokołów) i może skalować do klastrów HPC, ale jego wdrożenie wymaga specjalistycznej wiedzy i ewentualnie komercyjnego wsparcia. OMV jest bardzo prosty we wdrożeniu i darmowy, jednak nie nadaje się do zastosowań HPC i dużej skali. Unraid z kolei celuje w segment prosumerów – za umiarkowaną opłatą licencyjną oferuje łatwe zarządzanie domowym storage o stosunkowo niewielkiej skali, bez opcji klastrowania. W porównaniu z tym, producenci komercyjni (NetApp, Dell, HPE) dostarczają rozwiązania zamknięte, które jednak integrują najlepsze praktyki: np. NetApp ONTAP z funkcją FlexCache potrafi automatycznie buforować tzw. gorące dane w węzłach brzegowych, redukując opóźnienia dostępu w rozproszonych lokalizacjach, a Dell OneFS zapewnia automatyczne balansowanie obciążenia między wszystkimi

węzłami klastra. Naturalnie wiąże się to z wysokimi kosztami zakupu i wsparcia, jednak dla dużych organizacji ważna jest gwarancja wydajności i możliwość uzyskania pomocy technicznej na poziomie SLA.

Tabela 2. Porównanie skalowalności i funkcji wybranych platform NAS open-source (2018-2025)

Kryterium	TrueNAS SCALE (iXsystems)	OpenMediaVault (OMV)	Unraid
Typ skalowania	Scale-out (klastr GlusterFS/Kubernetes); również scale-up lokalny	Głównie scale-up (rozbudowa dysków, pluginy); funkcje SMB Multichannel eksperymentalnie	Scale-up (dyski + parzystość); brak clusteringu
Mechanizmy skalowania	Klastrowanie NFS/SMB, obsługa S3, kontenery, integracja z Kubernetes	Pluginy (SMB, NFS), opcje sieciowe (Multichannel) dostępne poprzez wtyczki	Dysk parzystości (1-2), dynamiczne dodawanie dysków, cache SSD (write-cache)
Skala wdrożeń	Do >100 węzłów; petabajty danych; wysoka przepustowość (HPC-ready)	Instalacje domowe/SMB; pojedynczy serwer lub mały klastr (poprzez pluginy)	Domowe/półprofesjonalne; pojedynczy serwer (kilkanaście dysków)
Dopasowanie do HPC/AI	Tak – architektura HCI, duże klastry, akceleracja GPU	Nieoptymalne dla HPC/AI	Nieoptymalne dla HPC/AI
Obsługiwane protokoły	NFS, SMB, iSCSI, obiekty (S3), wsparcie VM (KVM), Docker/K8s	SMB, NFS (poprzez dodatkowe wtyczki)	SMB, NFS, obsługa Docker, maszyny wirtualne (KVM)
Złożoność wdrożenia	Wysoka – wymaga zaawansowanej wiedzy (opcjonalnie narzędzie TrueCommand do zarządzania)	Niska – przyjazny interfejs web, prosta instalacja	Średnia – prosty interfejs GUI, ale potrzeba podstaw wiedzy o RAID/ZFS
Koszt	Bezpłatny (open-source); opcjonalnie płatne wsparcie Enterprise	Bezpłatny; bardzo niskie wymagania sprzętowe	Płatna licencja (kilkadziesiąt \$); elastyczne wymagania sprzętowe

Źródło: opracowanie własne.

Jak wynika z powyższego zestawienia, kluczowe trendy w rozwoju NAS to dodawanie funkcji zwiększających wydajność bez konieczności zmiany całej platformy sprzętowej. Przykładem jest SSD caching i tiering

– zarówno w open-source (TrueNAS: funkcje ARC/L2ARC, Fusion Pools) jak i komercyjnych NAS (QNAP: Qtier, Synology: Automatic SSD Caching) stało się standardem buforowanie intensywnych operacji na szybkim nośniku SSD (QNAP Systems Inc., 2022). Inny ważny trend to usprawnienia protokołów sieciowych: implementacja SMB Direct (RDMA) i SMB Multichannel w nowoczesnych serwerach plików Windows i urządzeniach NAS umożliwia wykorzystanie równoległych ścieżek oraz sieci InfiniBand/RoCE, drastycznie zmniejszając narzut komunikacji przy transferach wielu małych plików lub strumieni wideo (Microsoft, 2022; QNAP Systems Inc., 2023). Wreszcie, jakość usług (QoS) zyskuje na znaczeniu – w środowiskach współdzielonych wprowadza się mechanizmy priorytetyzacji ruchu NAS (np. rezerwacja pasma dla protokołu iSCSI lub dla wybranych udziałów) w celu zagwarantowania stabilnej wydajności krytycznym aplikacjom (Microsoft, 2021). Te wszystkie elementy składają się na obraz nowoczesnego systemu NAS, który musi godzić wysoką wydajność, dostępność i skalowalność z rosnącą złożonością zarządzania.

Podsumowując, nasze badania i analiza pokazują, że optymalizacja wydajności NAS wymaga wielowymiarowego podejścia. Sama rozbudowa sprzętu (dyski, pamięci, interfejsy) daje korzyści, ale tylko do pewnego momentu – dalszy wzrost wymaga zmiany architektury na rozproszoną lub zastosowania sprytnych mechanizmów programowych. Wyniki testów odzwierciedlają te prawidłowości, a obserwowane przyspieszenia dzięki cache SSD czy wielodyskowym konfiguracjom znajdują potwierdzenie w dokumentowanych osiągnięciach rozwiązań komercyjnych (np. NVMe cache obniżający opóźnienia metadanych o 50-70% (Salkhordeh i in., 2019), czy pNFS zwiększający przepustowość skalowanych NAS praktycznie do granic sieci (QNAP Systems Inc., 2023)). W kolejnej sekcji przedstawiono wnioski i zalecenia wynikające z przeprowadzonej analizy.

Wnioski

Systemy NAS odgrywają kluczową rolę w infrastrukturach IT firm, gdzie konieczne jest współdzielenie dużych ilości plików przy zachowaniu

wysokiej wydajności i niezawodności. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu i testów można sformułować następujące wnioski:

1. Skalowanie pionowe (scale-up) vs. poziome (scale-out): Oba podejścia mają swoje miejsce w zależności od skali i potrzeb organizacji. Skalowanie pionowe – poprzez dodawanie zasobów do pojedynczego serwera NAS – jest skuteczne do pewnego poziomu obciążenia i charakteryzuje się prostszym wdrożeniem oraz niższym kosztem początkowym. Jednak wraz ze zbliżaniem się do fizycznych limitów urządzenia, dalszy wzrost pojemności często nie idzie w parze ze wzrostem wydajności (ograniczenia kontrolera, magistrali, rosnące opóźnienia) (Arcserve, 2021). Skalowanie horyzontalne, czyli klastrowanie wielu urządzeń NAS, pozwala przełamać te bariery – system może rosnąć praktycznie bez ograniczeń, a wydajność skaluje się blisko liniowo z każdym nowym węzłem (IBM TechXchange Community, 2020). Jego implementacja wiąże się jednak z większą złożonością (mechanizmy rozproszonego systemu plików, synchronizacji, replikacji) oraz wyższymi kosztami (wiele węzłów + sieć o wysokiej przepustowości). Dla średnich scenariuszy zaleca się hybrydowe podejście: maksymalne wykorzystanie potencjału scale-up (aż do progu opłacalności), a następnie przejście na scale-out, gdy wymagania przerastają możliwości pojedynczego serwera.
2. Znaczenie pamięci podręcznej SSD: Implementacja cache SSD jest relatywnie prostym i opłacalnym sposobem na poprawę wydajności istniejących systemów NAS. Nasze testy wykazały skrócenie opóźnień o 10-20% i wzrost IOPS/MB/s nawet o 60% w wybranych scenariuszach dzięki zastosowaniu cache na odczyty i zapisy. Potwierdza to, że dostrojenie hierarchii pamięci (dyski HDD + warstwa SSD) umożliwia uzyskanie zbliżonej responsywności jak w droższych rozwiązaniach all-flash, minimalizując przy tym inwestycje (Synology Inc., 2022). Należy jednak odpowiednio dobrać politykę cache (write-back vs. write-through) do obciążenia oraz monitorować stan zużycia dysków SSD – w środowiskach intensywnych zapisu zaleca się nośniki enterprise o wysokiej wytrzymałości (TBW) (QNAP Systems Inc., 2022). Cache SSD nie zastąpi oczywiście dodania fizycznych dysków przy niedostatku surowej przepustowości, ale stanowi istotny element optymalizacji wydajności,

zwłaszcza dla obciążeń o charakterze losowym i przy dużym udziale operacji odczytu.

3. Udoskonalenia protokołów i sieci: Wysoka wydajność NAS wymaga spojrzenia na cały stos I/O – od dysków, przez kontroler, po interfejs sieciowy i protokoły komunikacyjne. W zastosowaniach komercyjnych należy wykorzystywać najnowsze dostępne usprawnienia: SMB 3.1.1 Multichannel, SMB Direct (RDMA), NFS 4.1 pNFS, protokół iSCSI z wielościeżkowością (MPIO) itp. Nasza analiza wskazuje, że rozwiązania te pozwalają zniwelować tradycyjne bottlenecks, jak ograniczenie jednego połączenia TCP – np. SMB Multichannel automatycznie agreguje przepustowość wielu interfejsów sieciowych, co w testach niezależnych przełożyło się na kilkukrotny wzrost przepustowości w porównaniu z klasycznym SMB (Microsoft, 2022; QNAP Systems Inc., 2023). Również zapewnienie odpowiedniej infrastruktury sieciowej (przełączniki 10/25/40 GbE, niski jitter) jest krytyczne przy skalowaniu NAS – nawet najlepiej zoptymalizowany serwer nie osiągnie pełnej wydajności, jeśli sieć będzie wąskim gardłem. Dlatego planując rozbudowę NAS dla zastosowań komercyjnych warto równolegle inwestować w modernizację sieci (np. przejście z 1 GbE na 10 GbE lub więcej, segmentacja ruchu storage, QoS dla ruchu NAS).
4. Rozwiązania open-source vs. komercyjne: platformy open-source udowodniły, że nawet przy ograniczonym budżecie można zbudować wydajny i skalowalny system NAS. TrueNAS, Ceph, GlusterFS – oferują one funkcje klastrowania, zaawansowane systemy plików (ZFS, Btrfs), mechanizmy ochrony danych (snapshots, repliki) porównywalne z produktami komercyjnymi. Są one szczególnie atrakcyjne dla średnich firm i entuzjastów IT, bo eliminują koszty licencji. Niemniej, ich optymalne wykorzystanie wymaga wyspecjalizowanej wiedzy i czasem kompromisów wydajnościowych (np. dodatkowy narzut warstwy programowej). Z kolei komercyjne macierze NAS (NetApp, Dell EMC, HPE) gwarantują określony poziom wydajności i wsparcia – często zawierają unikalne optymalizacje sprzętowe (np. akceleratory ASIC do deduplikacji, NVRAM do przyspieszania transakcji) i oprogramowanie dopracowane pod kątem minimalizacji opóźnień. W zamian są kosztowne i mniej

elastyczne (vendor lock-in). Wybór pomiędzy tymi opcjami powinien być podyktowany analizą TCO i wymaganiami SLA: dla krytycznych zastosowań (np. streaming na żywo, transakcje finansowe) inwestycja w sprawdzone rozwiązanie enterprise może być konieczna, podczas gdy dla archiwizacji, kopii zapasowych czy środowisk testowych open-source NAS może w pełni wystarczyć. Wiele firm stosuje model mieszany – łącząc droższe macierze o najwyższej wydajności dla kluczowych danych z tańszymi serwerami NAS dla mniej wymagających zadań (tiering infrastrukturalny).

5. Budowa wydajnego NAS to proces ciągłego doskonalenia: optymalizacja wydajności nie jest jednorazowym działaniem, lecz cyklem: monitorowanie – identyfikacja wąskich gardeł – usprawnienia. Administratorzy powinni regularnie analizować metryki NAS (IOPS, throughput, opóźnienia, wykorzystanie CPU/RAM) oraz obserwować trendy wzrostu obciążenia. W miarę potrzeb należy dodawać kolejne dyski lub węzły, skalować stopniowo, testując wpływ na działanie systemu. Kluczowe jest także przygotowanie planów awaryjnych: wydajny system musi być odporny na awarie, stąd inwestycje w mechanizmy wysokiej dostępności (klastrowanie fail-over, zasilanie UPS, redundantne ścieżki sieci). Nasze wyniki dotyczące czasu odbudowy macierzy pokazują, że istnieje kompromis między wydajnością a odpornością – np. macierz RAIDZ2 jest nieco wolniejsza niż RAIDZ1, ale znacznie bezpieczniejsza. Dobór konfiguracji (RAID, cache, liczba węzłów) powinien więc uwzględniać zarówno wymaganą wydajność, jak i akceptowalny poziom ryzyka oraz czas odtwarzania danych po awarii.

Reasumując, optymalizacja wydajności NAS poprzez skalowanie architektury lokalnej wymaga zastosowania wielorakich strategii – od ulepszeń sprzętowych po zaawansowane mechanizmy rozproszone. W środowiskach komercyjnych najlepsze rezultaty daje łączenie podejścia pionowego i poziomego: najpierw maksymalne wykorzystanie potencjału pojedynczego urządzenia (szybkie dyski, cache SSD, łącza wielościeżkowe), a następnie skalowanie horyzontalne poprzez klasteryzację, gdy wymagania przekroczą możliwości pojedynczego węzła. Dzięki temu można uzyskać system NAS,

który rośnie razem z potrzebami biznesu, zapewniając wysoką wydajność, skalowalność i niezawodność wymaganą we współczesnych zastosowaniach komercyjnych.

Literatura

1. Arcserve. (2021). *Scale up vs. scale out architecture: How should you scale your storage system?* Arcserve Blog.
2. Broadcom Inc. (2020). *Multipath load balancing recommendations (Technical brief)*.
3. Dell Technologies. (2021). *PowerScale OneFS: Technical overview (White paper)*.
4. IBM TechXchange Community. (2020). *Significant difference between scaleout NAS and scaleout file system*.
5. iXsystems. (2023). *TrueNAS SCALE: Official documentation*.
6. Microsoft. (2021). *Storage QoS for file servers: Best practices*.
7. Microsoft. (2022). *SMB 3.1.1 multichannel and SMB direct (RDMA) overview*.
8. NetApp Inc. (2021). *ONTAP FlexGroup: Technical overview (Technical documentation)*.
9. Oleś, M. (2025). *SAN vs. NAS. Kiedy i gdzie?* Macierze NetApp.
10. QNAP Systems Inc. (2022). *Qtier AutoTiering (White paper)*.
11. QNAP Systems Inc. (2023). *SMB 3.0 multichannel (Solution brief)*.
12. Salkhordeh, R., Hadizadeh, M., Asadi, H. (2019). An efficient hybrid I/O caching architecture using heterogeneous SSDs. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 30(6), 1238-1250. <https://doi.org/10.1109/TPDS.2018.2883745>
13. Synology Inc. (2022). *Synology SSD cache white paper for DSM 7.1 (White paper)*.
14. Zięba, P. (2023). Porównanie systemów plików dla macierzy NAS: ext4, Btrfs, ZFS. *IT Professional*, 6, 45-49.

Olena Kuropiatnyk¹, Dmytro Lehkokonets²
Ukraiński Państwowy Uniwersytet Nauki i Technologii, Dniepr

https://doi.org/10.29316/9788368103281_2

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE PROGRAM CLONE DETECTION ALGORITHMS EFFECTIVENESS

EKSPERYMENTALNE BADANIE SKUTECZNOŚCI ALGORYTMÓW WYKRYWANIA KLONÓW PROGRAMÓW

Abstract

The paper reviews existing algorithms and methods for detecting program clones. The authors conducted a series of experiments on detecting clones in the texts of educational project programs written in C++. For this purpose, a software application was created - a program clone analyzer. It implements the Jaccard Similarity, Running-Karp-Rabin Greedy-String-Tiling (RKR-GST) Similarity and Winnow (Winnowing) Similarity algorithms and provides the ability to perform 1:1 and N:M program text comparisons. During the experiment, the application was used to measure the running time of the algorithms and evaluate the time efficiency based on SR-estimates. The results obtained allow for a reasonable choice of clone detection algorithms taking into account their time efficiency in a given software and hardware environment.

Keywords: algorithms effectiveness, program clone, information technology, software, software quality

¹ <https://orcid.org/0000-0003-2286-884X>, e-mail: olena.kuropiatnyk@ust.edu.ua

² <https://orcid.org/0009-0004-1411-3564>, e-mail: sulzlsosd@gmail.com

Streszczenie

W rozdziale dokonano przeglądu istniejących algorytmów i metod wykrywania klonów programowych. Autorzy przeprowadzili szereg eksperymentów nad wykrywaniem klonów w tekstach programów edukacyjnych napisanych w języku C++. W tym celu stworzono aplikację – analizator klonów programowych. Implementuje ona algorytmy podobieństwa Jaccarda, podobieństwa Running-Karp-Rabin Greedy-String-Tiling (RKR-GST) oraz podobieństwa Winnow (Winnowing) i umożliwia przeprowadzanie porównań tekstów programów w proporcjach 1:1 i N:M. W trakcie eksperymentu aplikacja została wykorzystana do pomiaru czasu działania algorytmów i oceny efektywności czasowej na podstawie estymacji SR. Uzyskane wyniki pozwalają na rozsądny wybór algorytmów wykrywania klonów, biorąc pod uwagę ich wydajność czasową w danym środowisku programowym i sprzętowym.

Słowa kluczowe: skuteczność algorytmów, klon programu, technologia informacyjna, oprogramowanie, jakość oprogramowania

Introduction

Program (code) clones are duplicates or similar fragments of code within a software project (Martinez-Gil, 2024). Similarity in fragments can manifest itself at different levels: semantic (identical or similar functionality) and syntactic (similarity in the text of programs by type and sequence of tokens).

The presence of clones can have a negative impact on maintain processes, as well as cause a number of problems directly during software development and operation. Clones increase the volume of software code and the time for its testing, complicate program debugging (errors must be localized and corrected in each clone separately). If their correct replacement with software entities (functions, modules) with reuse (call) without duplication does not change the functionality of the program, then such cases should be subject to refactoring. Clones can carry additional danger if they are vulnerable to attacks. The threat increases in proportion to the number of duplicate fragments that are vulnerable. This is the reason for the work to eliminate clones (Zhang, Sakurai, 2021). The presence of clones may indicate a violation of the principles of academic integrity when they are detected in the academic works of various students. In this case, the task of detecting clones can be considered as a separate task for detecting plagiarism. The problem of clones

increases with the growth of the volume of program code and the increase in branches in collective development, therefore, it is advisable to use automated means of their detection. Currently, there are a significant number of algorithms and methods for detecting clones (Shobha, Rana, Kansal Tanwar, 2020; Wang, Ye, Zhang, Xue, Liu, 2023). It is advisable to have selection criteria and substantiated evaluations of methods and algorithms which obtained based on them for use in different contexts.

This work is devoted to the experimental assessment of the effectiveness of algorithms for detecting program clones. The object of this research is the processes of detecting program clones. The research subject is algorithms for detecting program clones. The purpose of the work is to analyze the time efficiency of various known algorithms for detecting clones for their further justified choice in various tasks. To achieve this goal, the authors have developed special software – analyzer application.

Related works

Program clones can have different natures. In this regard, clones are divided into the following types (Walker, Cerny, Song, 2020; Shynkarenko, Kuropiatnyk, Demidovich, 2025; Jo, Lee, Yoo, 2021):

- 1) syntactically identical code fragments, except for non-printing symbols and comments,
- 2) syntactically identical code fragments and, in addition to the differences of type 1 clones, differences in identifiers and literal values are allowed,
- 3) syntactically similar code fragments that differ at the expression level and have restrictions of types 1 and 2. Expressions can be added to these fragments, changed and/or deleted relative to each other,
- 4) semantically similar, but syntactically dissimilar code fragments. These include different algorithms that solve the same problems. For example, sorting or linear and binary search algorithms,
- 5) syntactically similar fragments that have different functions. This type was discovered in (Shynkarenko et al., 2025) and called the inverted fourth type.

A common classification of clone detection methods is based on the approach to the presentation and transformation of the program text for similarity analysis. Here, the following categories of methods are distinguished: textual, token, syntactic (tree-based, metric-based), semantic, and machine learning-based (Walker et al., 2020; Pravorska, Barmac, Medzatiy, 2021). Machine learning-based methods require appropriate training bases, which further complicate their work.

Each of the above categories provides a number of methods suitable for detecting clones of a certain type (Shynkarenko et al., 2025). Most methods (except for text and some syntactic methods based on metrics) involve building a new representation of the program, which will then be used to compare texts to detect clones. Among them, the most common, but at the same time laborious and difficult to scale in the future, are representations based on graphs and trees, namely: Abstract Syntax Trees (ASTs) Similarity, Code Embeddings Similarity (based on ASTs and collections of paths in trees (Alon, Zilberstein, Levy, Yahav, 2018), Graph-based Similarity, Program Dependence Graph Similarity (Martinez-Gil, 2024). There are a number of similarity detecting methods (including methods of clones similarity detecting) (Martinez-Gil, 2024) that do not create program entities that directly reproduce the structure when processing the input text. There are Bag-of-Words Similarity, Jaccard Similarity, Levenshtein Similarity, N-grams Similarity, Rolling Hash Similarity, Running-Karp-Rabin Greedy-String-Tiling (RKR-GST) Similarity, TF-IDF Similarity, Winnow Similarity, and others.

Some of them are used to detect duplicates in both natural language texts and program texts, in particular for detecting plagiarism. They are the basis of software services. For example, Moss detects structural similarities between programs (Aiken, 2022). Moss uses a technique known as document fingerprinting (Zamrii, Kulakov, 2024), where a set of hashes (so-called “fingerprints”) is pre-calculated for each document, and only then comparison is made between these fingerprints, which dramatically reduces the amount of calculations. In practical implementation, MOSS uses an improved version of this technique – the Winnowing (Winnow Similarity) algorithm.

The source code plagiarism detector JPlag is one of the popular source code plagiarism detection systems (Wise, 1993). JPlag compares the structure

of programs by extracting a layer of abstraction from their parse trees. Thus, it is resistant to attempts to hide plagiarism. JPlag has open source code and can be executed locally, thus complying with GDPR.

Existing methods for detecting software clones are studied in theoretical and practical planes (Martinez-Gil, 2024; Zamrii, Kulakov, 2024; Ain et al., 2019). The first involves studying the general principles, the features of the necessary program text transformations, analyzing the complexity of the corresponding algorithms based on the generalization of already known results of research conducted by other scientists, etc. The second is experimental measurements of various performance indicators of the methods, the main of which are accuracy and the time required to measure similarity. On their basis, conclusions are drawn regarding the use of methods for detecting different types of clones.

In this paper, experimental investigations of the effectiveness of clone detection methods with high accuracy and low computational time (Martinez-Gil, 2024) and detecting clones of types 1-3 (Ain et al., 2019), namely Jaccard Similarity, Running-Karp-Rabin Greedy-String-Tiling (RKR-GST) Similarity and Winnow (Winnowing) Similarity. Investigations were conducted with the aim of making a reasonable choice of algorithms based on SR estimates, as well as identifying the influence of the software and hardware environment on their operation.

Methods

Program clone detection algorithms

Jaccard Similarity is used to calculate the similarity between two objects, in particular two text documents. This method can be used to find the similarity between two asymmetric binary vectors or to find the similarity between two sets (Fletcher, Zahidul Islam, 2018).

Jaccard Similarity can be calculated as the size of the intersection divided by the size of the union of the two sets:

$$J(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}, \quad (1)$$

where $|A \cap B|$ is number of common elements between sets A and B, $|A \cup B|$ is number of elements in the union of sets A and B.

The Jaccard similarity calculation algorithm has wide application. When working with texts (in particular, texts of programs for detecting clones) it can be reduced to the following:

- 1) break the text into tokens (words, symbols or code fragments),
- 2) calculate the intersection of tokens between two texts as the number of tokens found in both texts,
- 3) calculate the union of tokens – the number of unique tokens in both texts,
- 4) calculate the similarity using (1).

RKR-GST (Running Karp-Rabin Greedy String Tiling) is an algorithm for searching for repeated substrings in a text that uses heuristics to efficiently find maximum matches.

RKR-GST combines two approaches (Fletcher, Zahidul Islam, 2018):

- 1) Greedy String Tiling (GST) is a greedy algorithm that finds the longest matches between two non-overlapping strings (or documents),
- 2) Running Karp-Rabin Matching is an optimized version of matching using Karp-Rabin hashing, which allows you to quickly search for substrings by hashes.

Different measures (coefficients) can be used to estimate similarity in RKR-GST.

In this work, the average similarity measure calculated using the Dice coefficient was used to estimate the similarity of program texts by the RKR-GST algorithm:

$$\text{sim}(A, B) = \frac{2 \cdot \text{coverage}}{\text{size}(A) + \text{size}(B)}, \quad (2)$$

where coverage is total length of all matches found, $\text{size}()$ is length of one of the compared strings.

Formula (2) is a standard for calculating similarity between sets of tokens and takes into account all their differences. It is symmetric: regardless of which document is larger, the result is the same for comparing A with B and

B with A. This approach provides a balanced consideration of information from both files and is well suited for general similarity assessments, where the results should take into account both the additional unique material in one of the files and their common part. This measure is best used when all differences are equally important.

Winnowing is an algorithm used to create a document fingerprint. The document contains an input string, either the original source code or tokenized code. The algorithm preprocesses the input string, removing all whitespace. After that, n-grams are formed from the resulting string, which are hashed to create a sequence of hashes. This set of hashes is divided into a series of overlapping windows of a certain size. For each window, the hash with the lowest value is selected as its representative. This significantly reduces the number of hash values and allows for more efficient detection of similar substrings. Also, hash sets are precomputed for each input string separately and stored in memory instead of being recalculated for each pairwise comparison. This speeds up the similarity detection and measurement phase (Schleimer, Wilkerson, Aiken, 2003).

The formulas for polynomial and rolling hashing (Shrestha, Gautam, Sharma, Bhandari, 2023) are used to calculate the hash. Rolling hashing allows for efficient hash update when moving to the next substring, using a previously computed hash (Faisal et al., 2020).

Determination of time efficiency indicators for the implementation of clone detection algorithms

The investigation of the effectiveness of clone detection algorithms was carried out on the basis of determining the time efficiency indicators (Shynkarenko, 2009):

- the average advantage of one algorithm over another (S-score),
- the ratio of the areas of advantage of each of the algorithms (R-scores).

The determination of time efficiency indicators is carried out on the basis of a computer experiment. The experiment consists of a sequence of algorithm tests. Each test consists of processing program texts and performing the

operation of calculating the similarity of program texts by the corresponding algorithm with time measurement.

The calculation of the S-score is performed as follows

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{t_i'' - t_i'}{\max(t_i', t_i'')} \cdot 100\%, \quad (3)$$

where t_i', t_i'' are processing operation execution time for each of the algorithms in the i -th trial, N is number of trials.

If the obtained S-score is positive, this is an advantage of the first algorithm, if the score is negative, this is an advantage of the second.

The R-score is calculated as follows

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{sign}(t_i'' - t_i') \cdot 100\%, \quad \text{sign}(a) = \begin{cases} 1, & \text{if } a > 0 \\ 0, & \text{if } a \leq 0 \end{cases}, \quad (4)$$

If the R-score is more than 50%, then the first algorithm has an advantage, if less – than the second. If the R-score is equal to 50%, the areas of advantage are equal.

Performing a series of trials increases the statistical accuracy of the result.

To measure the operation execution time, a high-precision system timer is used – QueryPerformanceTimer (C++ language). Using the timer involves:

- obtaining the frequency of the timer frequency,
- obtaining the starting value of the timer time_start,
- obtaining the final value of the timer time_finish,
- calculating the time of running algorithms.

Results

Software application development

To investigate the time efficiency of clone detection algorithms, a software application was developed in C++. The main functionality of the application is specified using a use case diagram, which is shown in Figure 1. The

application has functionality for both conducting trial series and calculating SR scores, as well as searching for clones in 1:1 files.

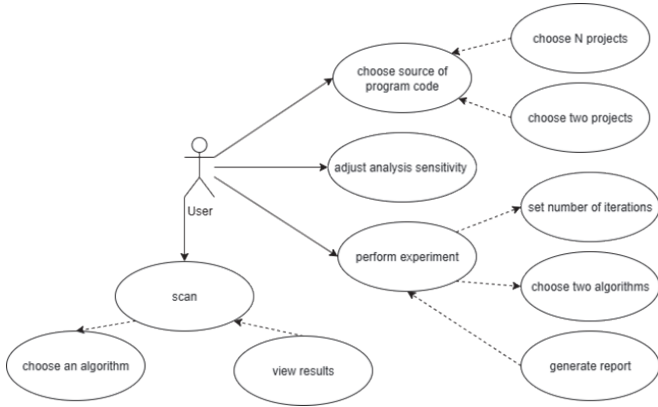


Figure 1. Use-case diagram

Source: own study.

The application is built and implemented using the principles of object-oriented design and programming. The application design, which is created according to UML principles, is shown in Figure 2. The above presentation omits the detailed class structure (attributes and methods) to simplify understanding of the basic structure of the application.

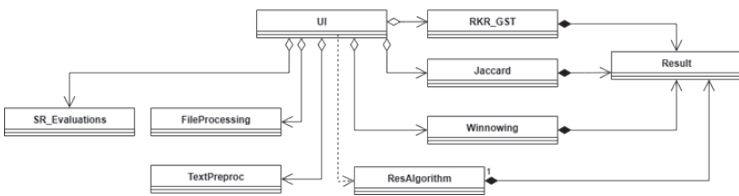


Figure 2. Object-oriented application model

Source: own study.

The classes have the following responsibilities:

- UI – implementation of user interaction with the program,
- RKR_GST, Jaccard, Winnowing – implementation of clone detection algorithms described in the previous section,
- Result – storage of results of comparison of a pair of program texts,

- SR_Evaluation – calculation and storage of SR-scores,
- FileProcessing – Reading and processing of C++ projects selected by the user,
- TextPreproc – preprocessing of the program text according to selected parameters, namely: ignoring absences, variable names, comments, case,
- ResAlgorithms – storage of results of a series of trials (scans) using a specific algorithm.

The application has a graphical user interface. A form is chosen as the structure of the dialog. A computer “mouse” is enough to interact with the form.

Experimental investigation of the effectiveness of algorithms

Experiment 1

The purpose of the experiment is to determine the influence of the software and hardware environment on the time efficiency of the Jaccard and RKR-GST algorithms and to compare their indicators.

The experimental base consists of educational projects in the discipline “General-purpose software” for the specialties Computer Engineering and Cyber Security of the Bachelor’s degree of the educational and scientific institute “Dnipro Institute of Infrastructure and Transport” of the of the Ukrainian State University of Science and Technology. The projects consist of program texts in the C++ language in the amount of:

- projects of the first type – 26 projects, the volume of one file, up to 150 lines of code,
- projects of the second type – 27 projects, the volume of 1-5 files, up to 200 lines of code.
- The following requirements were imposed on the programs of the first type of projects:
 - a program for processing a matrix, which is presented in the form of struct in C++,
- each fundamentally new action should be presented in the form of a function. The following set of functions is mandatory:

- main – the main function of the program,
- create – creating a matrix (specifying the dimension, allocating memory),
- delete – clearing the memory occupied by the matrix,
- processing – processing the matrix, which should not contain input and/or output operators,
- manualFilling, randomFilling – filling the matrix from the keyboard and using a random number generator, respectively,
- show – displaying the matrix on the screen,
- provide for the possibility of entering the dimension of the matrix, choosing the method of filling it from the keyboard and using a random number generator,
- comment on the matrix processing function(s), based on the logical subtasks into which the main task is divided,
- it is forbidden to use auxiliary arrays and matrices, including STL-containers.

The second type of projects involved a program that included the implementation of classes and functions according to the individual task variant, as well as the implementation of the main function of the program to demonstrate working with class objects and friendly entities (classes/functions). Each class must have:

- at least three attributes,
- a default constructor,
- a constructor with parameters,
- a copy constructor,
- a destructor,
- setters, getters,
- a toString method that returns a string containing the names and values of all attributes.

Table 1 provides a description of the hardware on which the experiment was conducted.

The experimental methodology involves the following steps:

- 1) select the number of projects N, algorithms 1 and 2 for clone detection,

- 2) compare the i -th project with all using algorithm 1, save the algorithm running time for each comparison,
- 3) based on the data in p. 2, find the arithmetic mean value of the algorithm running time and save it in the i -th element of the array of average values for the algorithm under study,
- 4) compare each subsequent $(i+1)$ project as described in p. 2-3,
- 5) repeat p. 2 – p. 4 for the second algorithm,
- 6) in the arrays obtained in p. 3, series of numbers are saved, which are the average values of the execution time of algorithms 1 and 2. Based on the values of the elements of these arrays, calculate SR-estimates according to (3), (4).

Table 1. Hardware

Component	Characteristics		
	Comp 1	Comp 2	Comp 3
CPU	12th Gen Intel(R) Core(TM) i5-1235U (1.30 GHz) Cores: 2P + 8E Cache: L1 Data 2*48KB+8*32KB L1 Inst. 2*32KB + 8*64KB L2 2*1.25MB + 2*2MB L3 12MB	Intel(R) Core(TM) i5- 10400F (2.90 GHz) Cores: 6 Cache: L1 Data 6*32KB L1 Inst. 6*32KB L2 6*256KB L3 12MB	Intel(R) Core(TM) i5- 9400F (2.90 GHz) Cores: 6 Cache: L1 Data 6*32KB L1 Inst. 6*32KB L2 6*256KB L3 9MB
RAM	DDR4 16 GB	DDR4 16 GB	DDR4 16 GB
Type storage device	SSD	SSD	SSD
GPU	Intel(R) Iris(R) Xe Graphics (128 MB)	NVIDIA GeForce GTX 1050Ti (4GB)	NVIDIA GeForce GTX 1650 (4GB)
Operating system	Windows 10 Home x64	Windows 11 Home x64	Windows 10 Home x64

Source: own study.

The experimental results were obtained with the following input parameters:

- algorithm 1 – „Jaccard”,

- algorithm 2 – “RKR-GST” with the minimum match length parameter 3.

The obtained estimates of the time efficiency of the algorithms:

- comp 1: $S \approx 57,48\%$, $R \approx 100\%$,
- comp 2: $S \approx 52,86\%$, $R \approx 100\%$,
- comp 3: $S \approx 53,37\%$, $R \approx 100\%$.

Experiment 2

The purpose of the experiment is to determine the influence of the software and hardware environment on the time efficiency of the Jaccard and Winkowing algorithms and to compare their indicators.

The experimental base coincides with the base of experiment 1.

The experimental methodology coincides with the methodology of experiment 1.

The results of the experiment with the value of the input parameters:

- algorithm 1 – „Jaccard”,
- algorithm 2 – “Winkowing” with the K-gram length parameter of 3, the minimum match length parameter of 3.

The obtained estimates of the time efficiency of the algorithms:

- comp 1: $S \approx 6,11\%$, $R \approx 88,68\%$,
- comp 2: $S \approx 7,7\%$, $R \approx 92,45\%$,
- comp 3: $S \approx 10,28\%$, $R \approx 100\%$.

Experiment 3

The purpose of the experiment is to determine the influence of the software and hardware environment on the time efficiency of the RKR-GST and Winkowing algorithms and to compare their indicators.

The experimental base coincides with the base of experiment 1.

The experimental methodology coincides with the methodology of experiment 1.

The results of the experiment with the value of the input parameters:

- algorithm 1 – “RKR-GST” with the minimum match length parameter 3,

- algorithm 2 – “Winnowing” with the K-gram length parameter 3, the minimum match length parameter 3.

The obtained estimates of the time efficiency of the algorithms:

- comp 1: $S \approx 55,35\%$, $R \approx 0\%$,
- comp 2: $S \approx 47,94\%$, $R \approx 0\%$,
- comp 3: $S \approx 48,07\%$, $R \approx 0\%$.

The following are the results of similar experiments for preprocessed data.

Experiment 4

This experiment is identical to experiment 1, except that preprocessing is applied to the text base, which allows ignoring indentations and comments. Clones detected by this approach can be attributed to the first type.

The obtained estimates of the time efficiency of the algorithms:

- comp 1: $S \approx 55,06\%$, $R \approx 100\%$,
- comp 2: $S \approx 53,28\%$, $R \approx 100\%$,
- comp 3: $S \approx 52,52\%$, $R \approx 100\%$.

Experiment 5

This experiment is identical to experiment 2, except that preprocessing is applied to the text base, which allows ignoring indentations and comments. Clones detected by this approach can be attributed to the first type.

The obtained estimates of the time efficiency of the algorithms:

- comp 1: $S \approx 27,37\%$, $R \approx 100\%$;
- comp 2: $S \approx 29,32\%$, $R \approx 100\%$;
- comp 3: $S \approx 30,21\%$, $R \approx 100\%$.

Experiment 6

This experiment is identical to experiment 3, except that preprocessing is applied to the text base, which allows ignoring indentations and comments. Clones detected by this approach can be attributed to the first type.

The obtained estimates of the time efficiency of the algorithms:

- comp 1: $S \approx 42,85\%$, $R \approx 0\%$,
- comp 2: $S \approx 41.59\%$, $R \approx 0\%$,

- comp 3: $S \approx 35,56\%$, $R \approx 1,89\%$.

Experiment 7

This experiment is identical to experiment 1, except for the application of pre-processing to the text database, which allows ignoring indentations and comments, character case, variable names. Clones detected by this approach can be attributed to the second type.

The obtained estimates of the time efficiency of the algorithms:

- comp 1: $S \approx 58,85\%$, $R \approx 100\%$,
- comp 2: $S \approx 54,51\%$, $R \approx 100\%$,
- comp 3: $S \approx 54,71\%$, $R \approx 100\%$.

Experiment 8

This experiment is identical to experiment 2, except for the application of pre-processing to the text database, which allows ignoring indentations and comments, character case, variable names. Clones detected by this approach can be attributed to the second type.

The obtained estimates of the time efficiency of the algorithms:

- comp 1: $S \approx 23,76\%$, $R \approx 100\%$,
- comp 2: $S \approx 27,91\%$, $R \approx 100\%$,
- comp 3: $S \approx 29,49\%$, $R \approx 100\%$.

Experiment 9

This experiment is identical to experiment 3, except for the application of pre-processing to the text database, which allows ignoring indentations and comments, character case, variable names. Clones detected by this approach can be attributed to the second type.

The obtained estimates of the time efficiency of the algorithms:

- comp 1: $S \approx 42,2\%$, $R \approx 0\%$,
- comp 2: $S \approx 36,97\%$, $R \approx 0\%$,
- comp 3: $S \approx 37,24\%$, $R \approx 0\%$.

Figures 3-5 show the visualization of the results by the C indicator. In the legend to the diagrams, ignore 1 indicates the case with preprocessing, which allowed the algorithms to ignore indents and comments, ignore 2 – in

addition to ignore 1, the case of characters and variable names. The bars of the chart show the S-score values. The R-score in the matched cases indicates the superiority of the same algorithm in each case. The same colors of the bars correspond to the same text bases with the same type of their preprocessing.

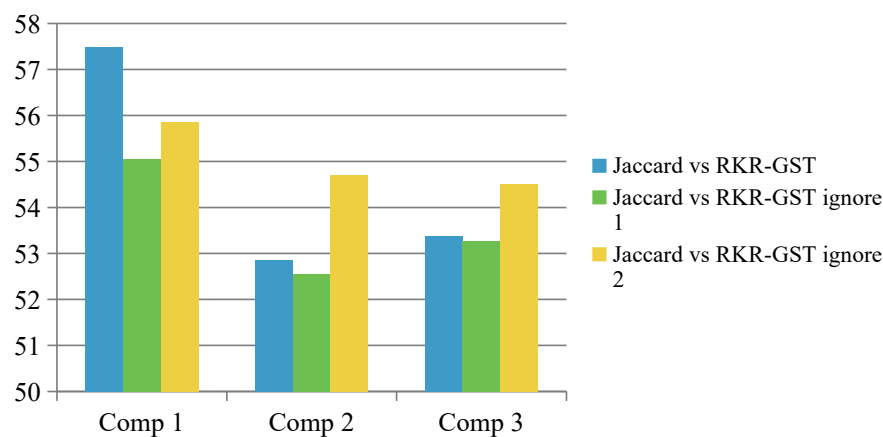


Figure 3. Changing of Jaccard and RKR-GST algorithms S-scores

Source: own study.

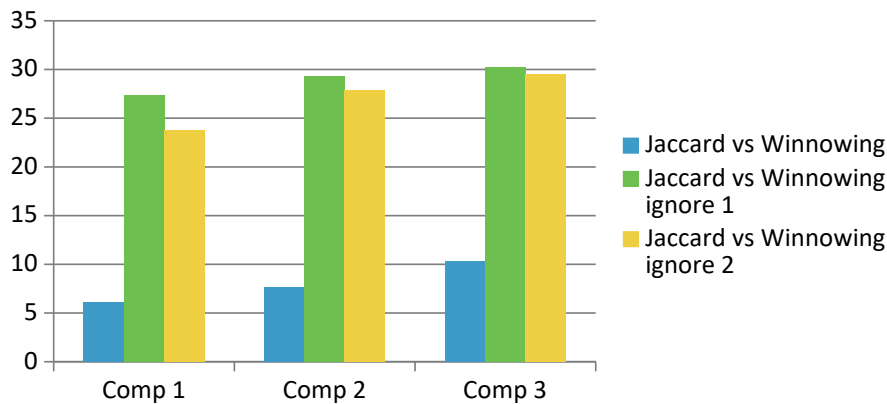


Figure 4. Changing of Jaccard and Winnowing algorithms S-scores

Source: own study.

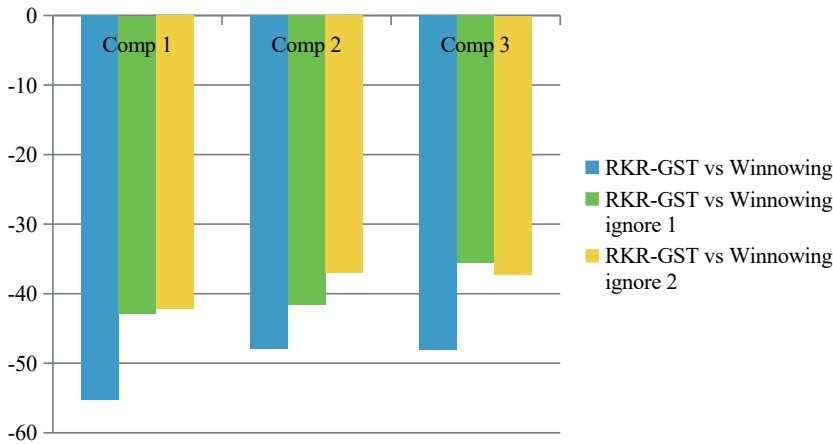


Figure 5. Changing of RKR-GST and Winnowing algorithms S-scores

Source: own study.

Discussion

Based on the results of the experimental investigation, objective estimates of the effectiveness of the Jaccard, RKR-GST, and Winnowing algorithms in a given software and hardware environment, with given input data, were obtained. The results confirm the suitability of these algorithms for use in analyzing the similarity of software projects for the purpose of detecting clones.

During the experiments, it was found that the Jaccard algorithm is the fastest, Winnowing is slightly slower (the difference ranges from 6-11 per cent), and RKR-GST turned out to be the least efficient in terms of time, which is due to the complexity of its implementation and multi-level processing. This relationship is present in all series of experiments, including those where there is additional pre-processing of the program text database.

The change in the characteristics of the processors, namely the increase in cache performance while reducing the total frequency of the cores, allowed to improve the time efficiency of the Jaccard and to decrease Winnowing efficiency.

In cases of text preprocessing, a significant change in the efficiency indicators of the Jaccard and RKR-GST algorithm pairs, and RKR-GST and Winnowing on all hardware platforms is observed. In the first case, the efficiency increase is in favor of the Jaccard algorithm, in the second – RKR-GST.

During the development of application possible areas of improvement were also identified. In particular, it is advisable to implement the ability to load the base code that is not taken into account in the analysis, which would improve the accuracy of the results.

For the Winnowing algorithm, support for assessing similarity by Jaccard, Dice, or Andberg measures can be introduced, which would provide flexibility in the relationship by increasing the number of settings available to the user. For the RKR-GST algorithm, it is also advisable to implement additional evaluation methods – in particular, not only the average, but also the maximum similarity between pairs of texts.

Another important direction for future improvement of the application for analyzing is to increase performance. In the process of working with a large volume of projects and increasing the number of repetitions, a noticeable decrease in performance was found in the experiment. In view of this, it is advisable to implement support for multithreading or asynchronous execution to optimize analysis time and reduce the load on the system.

Conclusion

In the course of the work, a study of the time efficiency of algorithms for detecting software clones in a given software and hardware environment was conducted. Thanks to the use of SR-evaluation, not only the absolute performance indicators of the algorithms were determined, but also their pairwise comparison was performed, which allows us to give a numerical assessment of the advantages of one algorithm over another. The obtained estimates can be used as additional criteria when choosing algorithms for detecting clones in refactoring tasks, detecting code vulnerabilities or borrowings in the academic environment.

A software application was created for conducting experiments – the program clone analyzer. Its use in various software and hardware environments will further allow us to more accurately assess the impact of the environment on the efficiency of the algorithms and to formulate recommendations for the use of algorithms in specific conditions.

References

1. Ain, Q. U., Butt, W. H., Anwar, M. W., Azam, F., Maqbool, B. (2019). A systematic review on code clone detection. *IEEE Access*, 7, 86121-86144.
2. Alon, U., Zilberstein, M., Levy, O., Yahav, E. (2018). *Code2vec: Learning distributed representations of code*.
3. Faisal, M., Nugroho, F., El Sulthan, M., Amini, F., Hariyadi, M. A., Sedayu, A. (2020). Plagiarism detection using manber and winnowing algorithm. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29(6), 2130-2136.
4. Fletcher, S., Zahidul Islam, I. (2018). Comparing sets of patterns with the Jaccard index. *Australasian Journal of Information Systems*, 22. <https://doi.org/10.3127/ajis.v22i0.1538>
5. Jo, Y.-B., Lee, J., Yoo, C.-J. (2021). Two-Pass technique for clone detection and type classification using tree-based convolution neural network. *Applied Sciences*, 11(14), 6613. <https://doi.org/10.3390/app11146613>
6. Martinez-Gil, J. (2024). Source Code Clone Detection Using Unsupervised Similarity Measures. In P. Bludau, R. Ramler, D. Winkler, J. Bergsmann (ed.), *Software Quality as a Foundation for Security*. SWQD 2024. Lecture Notes in Business Information Processing, vol 505. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-56281-5_2
7. Pravorska, N. I., Barmac, O. B., Medzatiy, D. M. (2021). The process of detecting blocks with repetitions and excess building using a language-independent increase detector. *Bulletin of Khmelnytskyi National University*, 3, 39-45.
8. Schleimer, S., Wilkerson, D. S., Aiken, A. (2003). *Winnowing: Local algorithms for document fingerprinting*. In I. Zachary, *SIGMOD '03: Proceedings of the 2003 ACM SIGMOD international conference on Management of data* (pp. 76-85). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/872757.872770>
9. Shobha, G., Rana, A., Kansal, V., Tanwar, S. (2020). Code clone detection – A systematic review. In A. E. Hassanien, S. Bhattacharyya, S. Chakrabati, A. Bhattacharya, S. Dutta, (ed.), *Emerging Technologies in Data Mining and Information Security* (pp. 645-655). Springer.
10. Shrestha, S., Gautam, S., Sharma, K., Bhandari, A. (2023). Winnowing algorithm: A powerful tool for identifying plagiarism in assignments. *Journal of Trends in Computer Science and Smart Technology*, 5(2), 168-189. <https://doi.org/10.36548/jtcsst.2023.2.006>

11. Shynkarenko, V. (2009). *Experimental researches of algorithms in software and hardware environments*. Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after V. Lazaian.
12. Shynkarenko, V., Kuropiatnyk, O., Demidovich, I. (2025). Program clones detection as natural language texts fragments based on constructive-synthesizing modeling. In *CLW-2025: Computational Linguistics Workshop at 9th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (CoLInS-2025), May 15-16, 2025, Kharkiv, Ukraine*. <https://doi.org/10.31110/COLINS/2025-1/002>
13. Walker, A., Cerny, T., Song, E. (2020). Open-source tools and benchmarks for code-clone detection: past, present, and future trends. *ACM SIGAPP Applied Computing Review*, 19(4), 28-39. <https://doi.org/10.1145/3381307.3381310>
14. Wang, Y., Ye, Y., Zhang, W., Xue, Y., Liu, Y. (2023). Comparison and evaluation of clone detection techniques with different code representations. In *2023 IEEE/ACM 45th International Conference on Software Engineering (ICSE), Melbourne, Australia*. <https://doi.org/10.1109/ICSE48619.2023.00039>
15. Wise, M. (1993). *String similarity via greedy string tiling and running karp-rabin matching*. Department of Computer Science Technical Report, Sydney University.
16. Zamrii, I., Kulakov, O. (2024). Overview of ways to automate the refactoring of code clones. *Connectivity*, 5. <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2024.050575>
17. Zhang, H., Sakurai, K. (2021). A survey of software clone detection from security perspective. *IEEE Access*, 9, 48157-48173.

Netography

1. Aiken, A. (2022). *A system for detecting software similarity*. Retrieved from: <https://theory.stanford.edu/~aiken/moss/> (access date: 10.09.2025).
2. Saglam, T. (1996). *JPlag – plagiarism detection tool*. Retrieved from: <https://helmholtz.software/software/jplag> (access date: 10.09.2025).
3. Yang, D. (2019). *Blog about MOSS*. Retrieved from: <https://yangdanny97.github.io/blog/2019/05/03/MOSS> (access date: 10.09.2025).

mgr inż. Zofia Lubańska¹

Akademia Bialska im. Jana Pawła II, Biała Podlaska

https://doi.org/10.29316/9788368103281_3

EWOLUCJA CYBERATAKÓW OD PHISHINGU DO RANSOMWARE-AS-A-SERVICE: MECHANIZMY, SKUTKI I STRATEGIE OBRONY

**THE EVOLUTION OF CYBERATTACKS FROM PHISHING TO
RANSOMWARE-AS-A-SERVICE: MECHANISMS, EFFECTS,
AND DEFENSE STRATEGIES**

Streszczenie

W niniejszym rozdziale dokonano przeglądu współczesnych cyberataków typu phishing i ransomware, ze szczególnym uwzględnieniem modelu Ransomware-as-a-Service (RaaS). Omówiono mechanizmy działania phishingu jako formy socjotechniki oraz ransomware – złośliwego oprogramowania szyfrującego dane i wymuszającego okup – a także ich ewolucję na przestrzeni ostatnich dekad. Przeanalizowano skalę zjawiska (częstość ataków i straty finansowe) oraz skutki społeczne i gospodarcze tych zagrożeń, w tym incydenty wpływające na infrastrukturę krytyczną i bezpieczeństwo ludzi. Rozdział przedstawia również rozwój modelu RaaS, który obniżył próg wejścia dla cyberprzestępców i przyczynił się do profesjonalizacji ataków ransomware. W części dyskusyjnej omówiono strategie obrony i środki zapobiegania tym atakom – od edukacji użytkowników po zaawansowane rozwiązania techniczne – oraz zarysowano przyszłe trendy, takie jak wykorzystanie sztucznej inteligencji zarówno przez atakujących (np. generowanie

¹ e-mail: z.lubanska@dyd.akademiabialska.pl.

przekonujących phishingów), jak i obrońców. Całość stanowi przegląd aktualnej wiedzy poparty literaturą przedmiotu, mający na celu wsparcie dalszych badań oraz praktycznych działań w zakresie cyberbezpieczeństwa.

Słowa kluczowe: phishing, ransomware, Ransomware-as-a-Service, cyberbezpieczeństwo, socjotechnika, cyberatak, obrona przed cyberatakami

Abstract

This article reviews contemporary phishing and ransomware cyberattacks, with particular emphasis on the Ransomware-as-a-Service (RaaS) model. It discusses the mechanisms of phishing as a form of social engineering and ransomware – malicious software that encrypts data and demands a ransom – as well as their evolution over the last few decades. The scale of the phenomenon (frequency of attacks and financial losses) and the social and economic impact of these threats, including incidents affecting critical infrastructure and human safety, are analysed. The chapter also presents the development of the RaaS model, which has lowered the entry threshold for cybercriminals and contributed to the professionalisation of ransomware attacks. The discussion section covers defence strategies and measures to prevent these attacks – from user education to advanced technical solutions – and outlines future trends, such as the use of artificial intelligence by both attackers (e.g., generating convincing phishing emails) and defenders. The work provides an overview of current knowledge, supported by literature on the subject, aimed at informing further research and practical activities in the field of cybersecurity.

Keywords: phishing, ransomware, Ransomware-as-a-Service, cybersecurity, social engineering, cyberattack, cyberattack defence

Wstęp

W dobie powszechnej cyfryzacji działalności prywatnej i zawodowej cyberzagrożenia stały się palącym problemem globalnym. Incydenty takie jak kradzieże danych, oszustwa internetowe czy ataki z użyciem złośliwego oprogramowania odnotowują lawinowy wzrost. Według raportów FBI Internet Crime Complaint Center w 2022 roku zgłoszono w USA ponad 800 tysięcy cyberprzestępstw, które spowodowały łączne straty przekraczające 10,2 mld USD (Lopez-Aguilar i in., 2025). Rok później liczba zgłoszeń osiągnęła rekordowe 880 tysięcy, a szkody finansowe oszacowano na ponad 12,5 mld USD (Lopez-Aguilar i in., 2025). Są to wartości dramatycznie wyższe niż jeszcze kilka lat temu, co pokazuje, że skala cyberzagrożeń dynamicznie rośnie.

Wśród rozmaitych form ataków, szczególną powszechnością odznacza się phishing. Szacuje się, że ataki phishingowe stanowią najczęstszy wektor naruszeń bezpieczeństwa – np. w 2023 roku aż 36% wszystkich wycieków danych było zapoczątkowanych atakiem phishingowym (Lopez-Aguilar i in., 2025). Ten typ ataku wykorzystuje czynnik ludzki: podatność użytkowników na manipulację i błędy. Nic dziwnego, skoro około 85% wszystkich incydentów naruszenia bezpieczeństwa wynika w pewnym stopniu z błędów człowieka (Lopez-Aguilar i in., 2025). Cyberprzestępcy celują więc w najsłabsze ogniwo systemu, stosując socjotechnikę zamiast łamania zabezpieczeń technicznych. Phishing – w najbardziej klasycznej formie – polega na wysyłaniu spreparowanych wiadomości (np. e-maili) imitujących zaufane instytucje, celem nakłonienia ofiary do podania danych wrażliwych lub zainfekowania jej urządzenia. Rozmiary tego zjawiska są ogromne: według Anti-Phishing Working Group w pierwszej połowie 2023 r. odnotowano 1,2 miliona ataków phishingowych na świecie, co stanowi wzrost o 40% względem roku poprzedniego (Lopez-Aguilar i in., 2025). Jednocześnie coraz częstsze są ataki złośliwym oprogramowaniem ransomware, które przynoszą wyjątkowo dotkliwe straty finansowe i operacyjne dla zaatakowanych firm czy instytucji. Ransomware polega na zaszyfrowaniu danych ofiary i żądaniu okupu za ich odszyfrowanie – jest to zatem cyfrowa forma wymuszenia (cybernetyczny odpowiednik „porwania” danych). Choć samych incydentów ransomware jest liczbowo mniej niż phishingów, to konsekwencje pojedynczego ataku ransomware bywają katastrofalne. W 2020 r. globalne szkody wyrządzone przez ransomware szacowano na 20 mld USD, podczas gdy jeszcze w 2019 r. było to ok. 11,5 mld (Meland i in., 2020). Prognozy wskazują dalszy gwałtowny wzrost – według analityków do 2025 r. roczne straty spowodowane atakami ransomware mogą sięgnąć 57 mld USD, a do 2031 r. nawet ćwierć biliona USD (Meland i in., 2020).

Phishing i ransomware często są ze sobą powiązane: phishing stał się głównym wektorem wprowadzającym ataki ransomware. Innymi słowy, wiele kampanii ransomware rozpoczyna się od pozornie niewinnej wiadomości phishingowej, zawierającej złośliwy załącznik lub link (Meland i in., 2020). Brak ostrożności użytkownika – jedno nieuważne kliknięcie – może zainicjować łańcuch zdarzeń prowadzących do szyfrowania całej sieci firmowej

przez ransomware. Takie wieloetapowe ataki pokazały swoją skuteczność m.in. podczas globalnej kampanii ransomware WannaCry w 2017 r., kiedy to wykorzystano prosty błąd użytkownika i zaniedbania aktualizacji systemu do infekcji setek tysięcy komputerów na świecie.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie w układzie przeglądowym ewolucji oraz charakterystyki dwóch wspomnianych klas ataków – phishingu i ransomware – a także modelu Ransomware-as-a-Service, który stanowi stosunkowo nowe zjawisko polegające na udostępnianiu ransomware w formie usługi. Zaprezentowano mechanizmy działania tych ataków, ich społeczne i ekonomiczne konsekwencje, oraz omówiono dostępne strategie obrony. Rozdział opiera się na aktualnej literaturze naukowej (analizie kilkunastu najnowszych prac z lat 2020-2025) oraz udokumentowanych przypadkach incydentów.

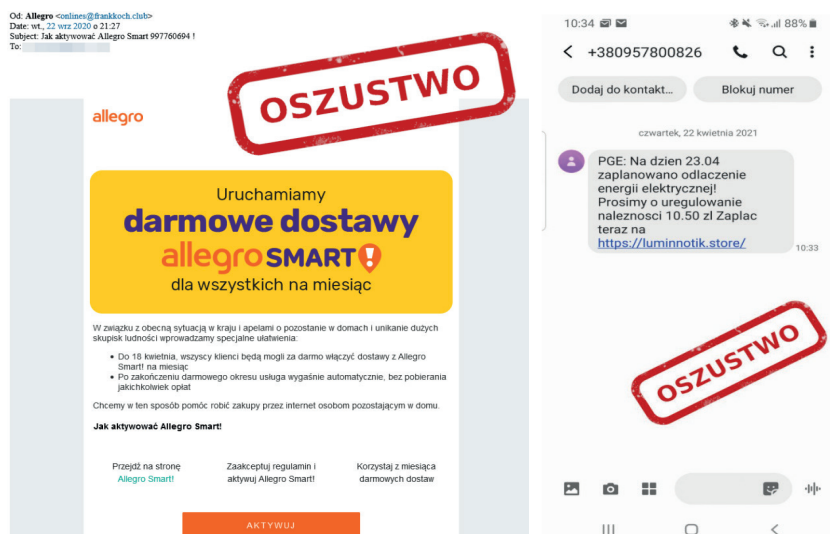
Metody

Praca ma charakter przeglądu literatury (narrative review). W celu zebrania informacji przeanalizowano publikacje naukowe dotyczące phishingu i ransomware, ze szczególnym uwzględnieniem danych o skali zjawiska, technik ataków, trendów ewolucyjnych oraz metod przeciwdziałania. Materiał źródłowy obejmował 10 wyselekcjonowanych publikacji z lat 2020-2025 o tematyce zgodnej z zakresem (m.in. przeglądy systematyczne, analizy trendów, badania nad RaaS), a także raporty instytucji branżowych (np. Verizon DBIR, raporty FBI IC3) oraz studia przypadków głośnych cyberataków. Kryteriami doboru literatury była aktualność (priorytet dla badań z ostatnich ~5 lat) oraz wysoka relewancja (publikacje skupione na phishingu, ransomware lub aspektach socjotechniki i RaaS). Przegląd obejmował zarówno prace o charakterze empirycznym (np. analizy danych incydentów), jak i artykuły przeglądowe oraz komentarze eksperckie, co pozwoliło na wieloaspektowe ujęcie tematu. Zebrane informacje usystematyzowano według schematu IMRaD – w części wynikowej przedstawiono kluczowe ustalenia dotyczące mechanizmów ataku, ich skutków oraz ewolucji, zaś w dyskusji omówiono implikacje praktyczne, środki zaradcze i kierunki dalszego rozwoju sytuacji.

Wyniki

Ataki phishingowe – mechanizmy i charakterystyka

Termin phishing wywodzi się od angielskiego *fishing* (wędkowanie) i trafnie oddaje istotę ataku: oszust „zarzuca przynętę” w postaci wiarygodnie wyglądającej wiadomości (e-mail, SMS itp.) i liczy, że ofiara „złapie haczyk”. Phishing (rysunek 1) jest klasycznym przykładem ataku socjotechnicznego – wykorzystuje manipulację użytkownikiem zamiast zaawansowanych metod technicznych. Typowy scenariusz wygląda następująco: ofiara otrzymuje wiadomość pozornie pochodzącą od zaufanej instytucji (np. banku, operatora płatności, serwisu społecznościowego). Wiadomość często zawiera prośbę o pilne podjęcie działania – np. „*Twoje konto zostanie zablokowane, jeśli nie zweryfikujesz danych*” – i link prowadzący do strony imitującej prawdziwą witrynę. Nieświadoma podstępowi ofiara wprowadza tam swoje hasło lub inne dane, które trafiają prosto do przestępców. Inną odmianą jest skłonienie do pobrania załącznika (np. rzekomej faktury), który zawiera złośliwy kod infekujący system ofiary.



Rysunek 1. Przykłady phishingu

Źródło: CERT Polska.

Phishing bazuje na wykorzystaniu ludzkich emocji i odruchów. Atakujący często stosują język wzbudzający strach lub presję czasu, aby uniemożliwić racjonalną ocenę sytuacji (Lopez-Aguilar i in., 2025). Przykładowo, e-mail grożący natychmiastowym zamknięciem konta bankowego wywołuje panikę i skłania do pochopnego kliknięcia w link. Inną techniką jest obiecywanie korzyści (np. wygranej w konkursie) – żądza zysku lub ciekawość mogą uśpić czujność ofiary. Ważną cechą phishingu jest także wiarygodność pozorów: wiadomości bywają dopracowane graficznie i językowo, zawierają autentycznie wyglądające logotypy i dane instytucji. Mimo to często można dostrzec pewne sygnały ostrzegawcze. Należą do nich np. drobne błędy w tekście czy adresie nadawcy – oszuści rejestrują domeny internetowe łudząco podobne do prawdziwych (np. paypal.com vs paypal.com z cyfrą „1” zamiast litery „l”), licząc, że użytkownik nie zauważy różnicy (Lopez-Aguilar i in., 2025). Uwagę powinny zwrócić także nietypowe prośby w wiadomości: żaden prawdziwy bank lub urzędnik nie wymaga podania całego hasła czy kodu PIN przez e-mail. Phisherzy chętnie wykorzystują również nowe kanały komunikacji – poza e-mailami spotyka się SMS-phishing (smishing), a nawet próby telefoniczne, czyli voice phishing (vishing), gdzie oszust podszycia się pod pracownika instytucji.

Pomimo istnienia tych potencjalnych sygnałów ostrzegawczych phishing pozostaje niezwykle skuteczny. Dzieje się tak z kilku powodów związanych z czynnikiem ludzkim. Po pierwsze, braki świadomości i wiedzy – wiele osób nigdy nie przeszło szkolenia z cyberbezpieczeństwa i nie potrafi rozpoznać nawet podstawowych oznak oszustwa. Po drugie, rutyna i pośpiech – w natłoku codziennej korespondencji użytkownicy często działają mechanicznie, nie weryfikując nadawców ani treści komunikatów. Przestępcy świadomie tworzą sytuację presji czasu lub wyjątkowości („ostateczne ostrzeżenie”, „niepowtarzalna okazja”), by skłonić ofiarę do działania przed myśleniem. Po trzecie, aspekt psychologiczny – nawet osoby ostrożne mogą ulec dobrze zaprojektowanej manipulacji, zwłaszcza gdy wiadomość budzi silne emocje (strach, ciekawość, chęć pomocy bliskiemu w potrzebie itp.). Statystyki wskazują, że czynnik ludzki odgrywa rolę w ogromnej większości naruszeń bezpieczeństwa – jak wspomniano, aż ~85% incydentów jest wynikiem błędów po stronie użytkowników (Lopez-Aguilar i in., 2025). To

tłumaczy, dlaczego phishing tak bardzo upodobał sobie atakowanie ludzkiej podatności, zamiast prób obejścia technicznych zabezpieczeń.

Co ważne, phishing często nie jest celem samym w sobie, lecz środkiem do osiągnięcia kolejnych etapów ataku. Uzyskanie danych uwierzytelniających ofiary może posłużyć np. do zalogowania się na jej konto pocztowe lub firmowe, skąd atakujący rozszerzy dostęp do kolejnych zasobów. W kontekście niniejszego rozdziału kluczowe jest, że phishing stał się główną metodą dostarczania złośliwego oprogramowania ransomware do sieci ofiar (Meland i in., 2020). Przykładowy scenariusz: pracownik firmy otrzymuje e-mail podszywający się pod dział IT z prośbą o pilną „aktualizację hasła” – po kliknięciu w link i wprowadzeniu danych napastnik zdobywa jego poświadczenia. Następnie wykorzystuje je, by zalogować się do sieci firmowej i tam umieszcza ransomware, który po pewnym czasie szyfruje dane całej organizacji. W ten sposób jedno nieostrożne kliknięcie uruchamia lawinę skutków.

Skala zagrożenia phishingiem jest ogromna. Badania i statystyki zgodnie wskazują phishing jako najczęstszą formę ataku cybernetycznego na świecie. Przykładowo, w reprezentatywnym badaniu firm brytyjskich w 2025 r. aż 37% wszystkich przedsiębiorstw doświadczyło w minionym roku choćby jednej udanej próby phishingu, co czyniło go najpowszechniejszym typem incydentu (wśród firm dotkniętych jakimkolwiek naruszeniem bezpieczeństwa phishing stanowił 85% przypadków) (GOV.UK, 2025). Dla porównania, znacznie rzadsze były inne rodzaje ataków – np. bezpośrednie infekcje ransomware zgłosiło tylko ~3% firm (co odpowiada 7% przypadków wśród firm dotkniętych cyberprzestępczością) (GOV.UK, 2025). Dane te pokazują, że phishing jest wszechobecny i stanowi podstawowe narzędzie w arsenale cyberprzestępców.

Ataki ransomware – działanie i ewolucja zagrożenia

Ransomware uznawany jest za jedno z najgroźniejszych współczesnych zagrożeń cybernetycznych. Działanie ransomware można przyrównać do sytuacji, gdy ktoś zakłada kłódkę na drzwi naszego domu i żąda okupu za klucz. Po udanym ataku ransomware pliki na zaatakowanym komputerze lub sieci zostają zaszyfrowane za pomocą silnej kryptografii (np. algorytmów

AES/RSA) – stają się nieczytelne bez unikalnego klucza deszyfrującego, który posiadają napastnicy. Ofiara otrzymuje informację (notatkę okupu), że aby odzyskać dostęp do swoich danych, musi zapłacić określoną sumę – zazwyczaj w kryptowalucie, najczęściej Bitcoinach, co zapewnia przestępcom anonimowość transakcji (Meland i in., 2020). Staje wobec dramatycznego dylematu: zapłacić okup (licząc na obietnicę odszyfrowania, choć gwarancji nie ma) czy pogodzić się z utratą danych. Coraz częściej atakujący stosują tzw. podwójne wymuszenie: przed zaszyfrowaniem kradną część danych i grożą ich publikacją, jeśli okup nie zostanie wpłacony (Meland i in., 2020). Ma to dodatkowo zmotywować ofiarę (zwłaszcza firmę) do zapłaty z obawy przed wyciekami wrażliwych informacji.

Typowy przebieg ataku ransomware obejmuje kilka faz. Faza infekcji: przestępcy muszą znaleźć sposób na uruchomienie złośliwego programu (ransomware) w środowisku ofiary. Najczęściej odbywa się to poprzez socjotechnikę – np. otwarcie przez ofiarę zainfekowanego załącznika (dokumentu MS Office z makrem, pliku PDF, fałszywej aplikacji) lub kliknięcie linku pobierającego malware. Inną metodą jest wykorzystanie luki w oprogramowaniu (tzw. exploit) – np. nierzadko ransomware rozprzestrzenia się automatycznie poprzez znane podatności systemu operacyjnego, co było przypadkiem wspomnianego WannaCry w 2017 r. Po zainstalowaniu w systemie, złośliwe oprogramowanie często rozprzestrzenia się dalej – jeśli atak dotyczy sieci firmowej, ransomware stara się zainfekować jak najwięcej urządzeń (komputerów, serwerów) w celu zmaksymalizowania szkód (Meland i in., 2020). Następnie następuje faza szyfrowania danych: malware aktywuje moduł szyfrujący, który przekształca pliki (dokumenty, bazy danych, zdjęcia itp.) w zaszyfrowaną postać. Często rozszerzenia plików zostają zmienione na specyficzne (np. locked, crypt), by ofiara zauważyła, że coś jest nie tak (Meland i in., 2020). Gdy proces szyfrowania się zakończy, ransomware wyświetla komunikat z żądaniem okupu – np. w postaci pliku tekstowego umieszczonego na pulpicie lub okna aplikacji. W notatce napastnicy informują, co się stało (zaszyfrowanie danych) oraz podają instrukcje zapłaty okupu (np. adres portfela Bitcoin i termin płatności, po którym cena wzrośnie lub klucz zostanie zniszczony) (Meland i in., 2020). Często grożą też, że próby samodzielnego usunięcia wirusa lub odszyfrowania danych spowodują trwałe uszkodzenie plików. W ten sposób

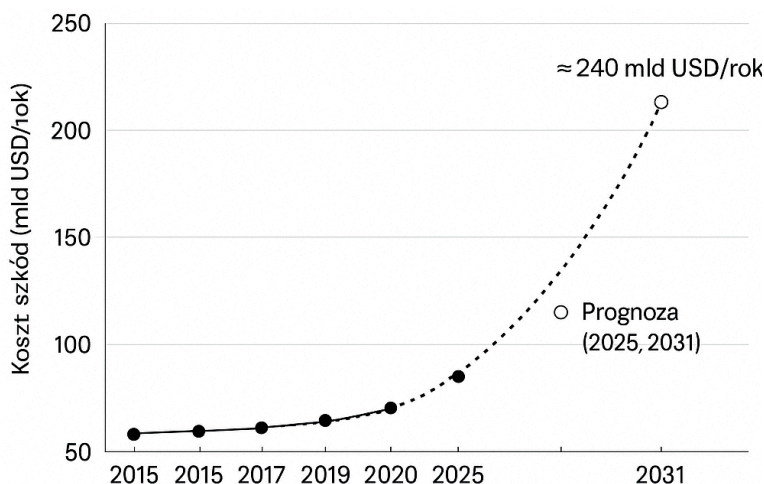
ofiara jest poddana maksymalnej presji psychologicznej. Wielu ekspertów bezpieczeństwa stanowczo odradza płacenie okupu – po pierwsze dlatego, że finansuje to dalszą działalność przestępców, po drugie zaś nie daje gwarancji odzyskania danych (napastnicy mogą nie dostarczyć klucza lub zażądać kolejnej zapłaty). Niemniej w sytuacji kryzysowej, zwłaszcza gdy stawką są krytyczne dane firmowe lub ludzkie życie (np. gdy celem jest szpital), presja na zapłacenie bywa ogromna (Meland i in., 2020).

Choć mogłoby się wydawać, że ransomware to nowy wynalazek XXI wieku, jego geneza sięga końca lat 80. XX w. Za pierwszy udokumentowany przypadek ataku ransomware uznaje się tzw. AIDS Trojan (PC Cyborg) z 1989 roku. W ramach tego incydentu rozesłano pocztą tradycyjną dyskietki z pozornie naukowym programem dotyczącym AIDS; po kilkudziesięciu uruchomieniach program szyfrował nazwy plików na komputerze i żądał okupu w wysokości 189 dolarów, wysyłanych przekazem pocztowym na wskazany adres w Panamie (Meland i in., 2020). Atak ten, choć ciekawy z historycznego punktu widzenia, był odosobniony i relatywnie prymitywny – szyfrowanie danych dało się dość łatwo odwrócić przez specjalistów, a technika nie znalazła naśladowców przez kolejne lata. Dopiero po ponad dwóch dekadach nastąpił prawdziwy rozkwit ransomware. Około roku 2013-2014 zauważalna jest eksplozja liczby nowych rodzin ransomware (np. CryptoLocker, który pojawił się w 2013 r., jest często wskazywany jako punkt zwrotny) (Meland i in., 2020). Zbiegło się to w czasie z upowszechnieniem kryptowaluty Bitcoin, która ułatwiła atakującym anonimowe pobieranie okupów, oraz ogólnym wzrostem cyfryzacji danych w społeczeństwie (co uczyniło wymuszanie okupów bardziej opłacalnym). W połowie lat 2010. mieliśmy do czynienia z „boomem” ransomware – powstały dziesiątki nowych odmian i odnotowywano tysiące infekcji na całym świecie. Początkowo ofiarami byli głównie użytkownicy indywidualni, lecz z czasem przestępcy zorientowali się, że znacznie większe zyski osiągną, atakując przedsiębiorstwa i instytucje publiczne.

Przełomowym zjawiskiem okazało się pojawienie modelu Ransomware-as-a-Service (RaaS). Około 2015 roku cyberprzestępcze podziemie zaczęło oferować gotowe pakiety ransomware na sprzedaż lub wynajem – czyli ransomware w modelu usługowym (Meland i in., 2020). Twórcy złośliwego oprogramowania zaczęli działać niczym dostawcy usług: przygotowują oni

kompletny „produkt” (kod ransomware, panel sterujący, instrukcje obsługi), który następnie udostępniają odpłatnie innym osobom (tzw. afiliantom). Afilianci płacą prowizję lub dzielą się zyskami z twórcami w zamian za możliwość wykorzystania ransomware na własnych celach. Model ten radykalnie obniżył barierę wejścia do świata ransomware – do przeprowadzania ataków nie jest już wymagana wysoka wiedza programistyczna ani zaplecze techniczne; wystarczy zakupić usługę na darknecie (Meland i in., 2020). RaaS zdemokratyzował więc cyberprzestępczość: nawet mniej zaawansowani technicznie przestępcy mogą obecnie wywołać poważne incydenty bezpieczeństwa (Meland i in., 2020). W efekcie nastąpił gwałtowny wzrost liczby grup ransomware operujących globalnie. Szacuje się, że większość aktywnych w ostatnich latach grup (takich jak REvil, DarkSide, LockBit i wiele innych) działa w modelu RaaS lub zbliżonym. Zjawisku temu towarzyszy profesjonalizacja działalności przestępczej – gangi ransomware funkcjonują coraz bardziej jak przedsiębiorstwa (posiadają strukturę podziału zadań, „działy wsparcia klienta”, systemy reputacyjne na forach, a nawet programy partnerskie) (Fisher i in., 2025; Botchkovar i in., 2025). Niestety, implikuje to również coraz większą skuteczność i zuchwałość ataków ransomware. O ile dawniej typowy okup wynosił równowartość kilkuset dolarów (atakujący celowali w przeciętnych użytkowników), o tyle obecnie standardem stają się żądania rzędu setek tysięcy lub milionów dolarów od zaatakowanych przedsiębiorstw. Odnotowano przypadki, gdy przestępcy początkowo żądali od ofiary okupu 50-60 mln USD, by ostatecznie „zgodzić się” na negocjacjach na nieco niższą kwotę – np. w ataku na amerykańską firmę ubezpieczeniową CNA Financial w 2021 r. okup zredukowano z 60 mln do 40 mln USD (Zhang, Luo, 2025). Równie wysokich sum (rzędu kilkudziesięciu milionów dolarów) domagały się gangi w innych głośnych incydentach, co jeszcze kilka lat temu wydawało się nieprawdopodobne. Obecnie jednak okupy liczone w dziesiątkach milionów USD nie należą do rzadkości.

Powyższe czynniki sprawiły, że ransomware przeobraziło się w ostatnich latach w globalny multimilionowy biznes przestępczy. Szacuje się, że w 2021 r. światowe koszty spowodowane atakami ransomware wyniosły ok. 20 mld USD, a do 2031 r. mogą wzrosnąć nawet do 240 mld USD rocznie (Meland i in., 2020). Poniższy wykres ilustruje tę dynamikę wzrostu.



Rysunek 2. Wzrost globalnych kosztów szkód wyrządzanych przez ransomware w latach 2015-2031

Źródło: Meland i in., 2020.

Punkty oznaczają wartości szacowane historyczne (2015-2021) oraz prognozy analityków na 2025 i 2031 rok. Zauważalny jest wykładniczy trend wzrostowy – prognoza na 2031 r. (ok. 240 mld USD rocznie) oznacza, że koszty te byłyby ponad 20-krotnie większe niż w roku 2021.

Skutki społeczne i gospodarcze cyberataków

Rosnąca skala ataków phishingowych i ransomware przekłada się na wymierne konsekwencje dla społeczeństwa i gospodarki. W odróżnieniu od wielu tradycyjnych przestępstw, cyberataki uderzają nie tylko w systemy komputerowe, ale pośrednio w realne procesy życiowe ludzi i funkcjonowanie instytucji.

Ataki ransomware na infrastrukturę krytyczną stanowią szczególne zagrożenie. Głośnym przykładem był incydent z maja 2021 r., gdy ransomware zaatakował sieć firmową operatora rurociągu paliwowego Colonial Pipeline w USA. W obliczu paraliżu systemów, firma prewencyjnie wstrzymała działanie rurociągu zaopatrującego w benzynę całe wschodnie wybrzeże USA, co spowodowało kilkudniowe braki paliwa na stacjach i panikę wśród kierowców (Botchkovar i in., 2025). Operator zdecydował się ostatecznie zapłacić

okup (4,4 mln USD w Bitcoin) dla przywrócenia działania, co unaocznilo, że skutki ataku cyfrowego mogą rozlać się szeroko na gospodarkę kraju. Innym drastycznym przykładem jest atak ransomware na szpital uniwersytecki w Düsseldorfie we wrześniu 2020 r. – wskutek zaszyfrowania systemów szpital musiał przekierować karetkę z ciężko chorą pacjentką do odleglejszej placówki, co opóźniło zabieg o godzinę; pacjentka niestety zmarła, a prokuratura niemiecka wszczęła postępowanie, uznając, że atak mógł przyczynić się do tej śmierci (Alder, 2020). Są to prawdopodobnie pierwsze udokumentowane sytuacje, gdzie cyberatak ransomware doprowadził pośrednio do zagrożenia życia lub utraty życia ludzkiego.

Nawet jeśli nie dochodzi do tak tragicznych skutków, straty finansowe i operacyjne spowodowane ransomware dla zaatakowanych organizacji są ogromne. Poza kosztem ewentualnego okupu (który nierzadko sięga milionów), firmy ponoszą wydatki na przywracanie systemów do działania, wymianę sprzętu, audyty bezpieczeństwa, poprawę zabezpieczeń po incydencie, a często również muszą wypłacać odszkodowania lub pokrywać kary (np. za wyciek danych osobowych klientów, co podlega karom na mocy przepisów o ochronie danych, takich jak RODO). Do tego dochodzą straty mniej policzalne: przestoje w działalności (np. fabryki czy porty tracące produkcję przez paraliż systemów IT), utrata zaufania klientów i reputacji marki, której dane zostały naruszone, a w skrajnych przypadkach utrata przewagi konkurencyjnej (gdy wyciekają poufne projekty, patenty itp.). Dla dużych korporacji atak ransomware to koszt liczony często w dziesiątkach milionów dolarów i zakłócenia ciągnące się miesiącami. Dla małych i średnich firm może to być cios śmiertelny – szacunki wskazują, że znaczący odsetek MŚP, które padły ofiarą poważnego ataku ransomware, nie wraca już do działalności i w ciągu roku ogłasza upadłość z powodu strat (GOV.UK, 2025).

Konsekwencje ataków phishingowych mają nieco inny charakter, choć również są dotkliwe. Phishing często uderza w osoby prywatne, które tracą oszczędności życia przelane na konta oszustów podszywających się np. pod policję czy bank (np. popularny w Polsce scam „na policjanta CBŚP”). Poza wymierną stratą finansową ofiary przeżywają traumę psychologiczną – wstyd, złość na siebie, poczucie krzywdy. Badania dokumentują przypadki osób, które po padnięciu ofiarą oszustwa internetowego popadły w głęboką

depresję, a nawet targnęły się na swoje życie (Lopez-Aguilar i in., 2025). Utrata zaufania do bankowości elektronicznej czy generalnie do usług cyfrowych jest również istotnym społecznie skutkiem – każda głośna kampania phishingowa nadszarpuje pewność użytkowników co do bezpieczeństwa korzystania z sieci. W skali makro powtarzające się ataki podważają wiarygodność systemów cyfrowych i mogą hamować tempo transformacji cyfrowej w społeczeństwie (skoro ludzie boją się korzystać z e-administracji czy bankowości online, państwo i firmy ponoszą koszty alternatywne braku zaufania).

Podsumowując, zarówno phishing, jak i ransomware generują wielowymiarowe szkody: finansowe (utrata pieniędzy, koszty odtworzenia danych), operacyjne (przerwy w działaniu infrastruktury, konieczność reorganizacji pracy), prawne (odpowiedzialność za wycieki danych) oraz społeczne (poczucie zagrożenia, stres, utrata zaufania do cyfrowych usług). Co gorsza, te rodzaje ataków często się ze sobą łączą – udany phishing może prowadzić do infekcji ransomware, a skuteczny atak ransomware często poprzedzony jest rozpoznaniem socjotechnicznym.

Poniższa tabela syntetycznie porównuje kluczowe cechy ataków phishingowych i ransomware, a także modelu Ransomware-as-a-Service.

Tabela 1. Porównanie ataków phishingowych, ransomware oraz modelu Ransomware-as-a-Service pod kątem ich charakterystyki, wymagań i skutków

Cecha	Phishing (socjotechnika)	Ransomware (atak malware)	Ransomware-as- -a-Service (model usługowy)
Wektor ataku	Fałszywe komunikaty (e-mail, SMS, telefon) skłaniające ofiarę do podania danych lub instalacji złośliwego pliku (Lopez-Aguilar i in., 2025).	Złośliwe oprogramowanie dostarczane zazwyczaj poprzez załącznik phishingowy lub exploit w systemie ofiary (Meland i in., 2020).	Udostępnianie ransomware na darknetowych forach i marketach; przestępcy kupują gotowy „produkt” do wykorzystania (Meland i in., 2020).

Cecha	Phishing (socjotechnika)	Ransomware (atak malware)	Ransomware-as- a-Service (model usługowy)
Wymagana wiedza atakującego	Niska – ataki może przeprowadzić pojedyncza osoba przy minimalnych umiejętnościach technicznych (ważniejsza jest znajomość socjotechniki).	Średnia/Wysoka – napisanie lub zmodyfikowanie ransomware wymaga zaawansowanych umiejętności programistycznych, choć użycie gotowego ransomware (np. Emotet, CobaltStrike) jest łatwiejsze.	Niska po stronie afilianta – twórcy RaaS zapewniają pełne zaplecze techniczne. RaaS obniża barierę wejścia: osoby o ograniczonej wiedzy mogą wywołać poważny atak, korzystając z narzędzi stworzonych przez innych (Meland i in., 2020).
Cel i skutek bezpośredni	Kradzież danych uwierzytelniających, numerów kart, wyłudzenie przelewu itp. Skutek: utrata informacji lub pieniędzy przez ofiarę, często otwarcie drogi do dalszych ataków (np. przejęcia konta).	Zaszyfrowanie danych ofiary i sparaliżowanie systemów. Skutek: wymuszenie – ofiara traci dostęp do swoich zasobów, działalność zostaje przerwana do czasu odszyfrowania (czyli zapłacenia okupu lub przywrócenia danych z kopii).	Model biznesowy ransomware: zwiększenie skali ataków i zysków. Skutek: profesjonalizacja cyberprzestępczości – więcej ataków ransomware na świecie, także wymierzonych w większe cele (organizacje), wskutek łatwiejszej dostępności narzędzi (Fisher i in., 2025; Botchkovar i in., 2025).
Typowe ofiary	Szerokie spektrum: od użytkowników indywidualnych po pracowników firm (phishing masowy) oraz osoby na stanowiskach (spear phishing, whaling). Często punkt wyjścia do ataku na organizację.	Coraz częściej duże organizacje: przedsiębiorstwa, szpitale, szkoły, urzędy, infrastruktury krytyczne. Zdarzają się też ataki na osoby prywatne, ale okup i szkody są wtedy mniejsze.	Ofiary końcowe jak w kolumnie obok (firmy, instytucje), jednak model RaaS potęguje zagrożenie – pozwala atakować wielu różnym grupom celom globalnie. RaaS sprawia, że nawet sektor MŚP czy administracja lokalna może stać się celem (afilianci wybierają cele dowolnie).

Cecha	Phishing (socjotechnika)	Ransomware (atak malware)	Ransomware-as- -a-Service (model usługowy)
Często- tliwość/ incydenty	Bardzo wysokie – miliony prób dziennie globalnie. Phishing odpowiada za większość prób ataków cyber (np. ~90% naruszeń bezpieczeństwa inicjowanych jest phishingiem lub pokrewną socjotechniką) (Lopez-Aguilar i in., 2025).	Relatywnie niższa liczba incydentów, ale rośnie z każdym rokiem. Ransomware stanowi kilka-kilkanaście procent wszystkich cyberataków zgłaszanych oficjalnie, ale powoduje nieproporcjonalnie duże szkody finansowe (GOV.UK, 2025).	Trudna do oszacowania – oferta RaaS jest obecna na darknet (setki ogłoszeń), ale nie każde przeradza się w atak. Trend wskazuje na wzrost: co roku pojawiają się nowe grupy RaaS i ataki przez nie przeprowadzane. Model RaaS jest rosnącym segmentem „rynku” cyberprzestępczości (Meland i in., 2020).
Przykładowe głośne incydenty	2016: atak phishingowy na pracownika firmy wydobywczej Leoni – utrata €40 mln wskutek fałszywego e-maila od rzekomego dyrektora finansowego (tzw. scam BEC).		

Źródło: opracowanie własne.

Dyskusja

Strategie obrony i mechanizmy przeciwdziałania

Analizowane zagrożenia są poważne, jednak wiele incydentów można skutecznie powstrzymać poprzez zastosowanie podstawowych zasad bezpieczeństwa oraz dobrych praktyk zarówno technicznych, jak i organizacyjnych. Wyniki przeglądu literatury oraz rekomendacje ekspertów wskazują na potrzebę wieloaspektowej strategii obrony, łączącej działania technologiczne z edukacją użytkowników.

Po pierwsze, podniesienie świadomości i szkolenia użytkowników stanowią fundamentalną linię obrony przed phishingiem. Skoro czynnik ludzki

jest najsłabszym ogniwem (85% incydentów spowodowanych błędem człowieka (Lopez-Aguilar i in., 2025)), inwestycja w ludzi jest kluczowa. Organizacje powinny regularnie szkolić pracowników z rozpoznawania prób phishingu, np. poprzez organizowanie kampanii symulowanych ataków (kontrolowany phishing testowy). Badania pokazują, że nawet proste szkolenia potrafią znacząco zmniejszyć odsetek osób klikających w podejrzaną linki (Lopez-Aguilar i in., 2025). Ważne jest również kształtowanie „kultury bezpieczeństwa” – zachęcanie do zgłaszania podejrzanych wiadomości, otwarta komunikacja o incydentach, przypominanie w organizacji, że czujność każdego pracownika przekłada się na bezpieczeństwo całości.

Po drugie, od strony technicznej istnieje szereg narzędzi wspierających ochronę. Filtry antyphishingowe w systemach pocztowych (wykorzystujące m.in. mechanizmy sztucznej inteligencji do analizy wiadomości) potrafią automatycznie odrzucić dużą część phishingowych e-maili zanim trafią one do skrzynek użytkowników (Malik i in., 2025; CECOM CIO G6 Cybersecurity, 2024). Nowoczesne systemy potrafią wykrywać charakterystyczne cechy ataków (np. masowe wysyłki z nowych domen, nietypowe wzorce językowe generowane przez AI itp.). Oprogramowanie antywirusowe i antymalware z aktualnymi bazami zagrożeń jest kolejną warstwą obrony – może zablokować znane złośliwe załączniki lub linki prowadzące do exploitów. Niezmiernie ważne są aktualizacje oprogramowania i łatanie podatności: wiele ataków ransomware (jak WannaCry) powiodło się tylko dlatego, że ofiary nie zainstalowały w porę poprawek bezpieczeństwa, mimo że istniały one na długo przed atakiem (CECOM CIO G6 Cybersecurity, 2024). Stosowanie zasady regularnych aktualizacji systemu operacyjnego, przeglądarek, pakietów biurowych itp. znacznie ogranicza ryzyko zainfekowania poprzez exploit.

Kluczowym mechanizmem ochrony przed skutkami ewentualnego ataku ransomware są kopie zapasowe (backupy). Utrzymywanie regularnych backupów krytycznych danych – i przechowywanie ich w odizolowany sposób (offline lub w bezpiecznej chmurze) – pozwala odtworzyć zasoby bez płacenia okupu w razie ich zaszyfrowania (CECOM CIO G6 Cybersecurity, 2024). Złotym standardem stała się zasada 3-2-1 (trzy kopie danych, na dwóch różnych nośnikach, z czego jedna przechowywana offline). Oczywiście, same kopie muszą być również zabezpieczone przed atakiem (np. odłączone od

sieci, by ransomware nie mógł ich zaszyfrować). Organizacje, które wdrożyły solidne strategie backupu i plan odtwarzania awaryjnego (disaster recovery), są w stanie względnie szybko podnieść się po ataku, unikając płacenia okupu.

Dodatkowe środki techniczne obejmują m.in.: uwierzytelnianie dwuskładnikowe (2FA) – nawet jeśli hasło użytkownika wycieknie w phishingu, to dodatkowy token (SMS, aplikacja) może powstrzymać napastnika przed zalogowaniem (CECOM CIO G6 Cybersecurity, 2024). Segmentacja sieci i ograniczanie uprawnień – dzięki podziałowi sieci firmowej na segmenty (strefy) ransomware nie rozprzestrzeni się automatycznie na wszystkie zasoby, a konta użytkowników z ograniczonymi uprawnieniami nie pozwolą mu od razu przejąć kontroli nad serwerami. Monitorowanie i detekcja anomalii – systemy klasy IDS/IPS oraz narzędzia SIEM z mechanizmami analizy behawioralnej mogą wykryć nietypowe działania wskazujące na atak (np. masowe szyfrowanie plików w sieci) i automatycznie zaalarmować administratorów lub nawet zablokować ruch. Coraz większe nadzieje wiąże się z zastosowaniem sztucznej inteligencji w obronie – algorytmy uczące się normalnego zachowania sieci mogą szybciej i skuteczniej identyfikować subtelne oznaki włamania lub phishingu, zanim człowiek zwróci na nie uwagę.

Mimo postępu technologicznego, w obronie przed phishingiem i ransomware wciąż niezastąpiony jest zdrowy rozsądek oraz czujność ludzka. To użytkownik na końcu podejmuje decyzję o kliknięciu linku czy otwarciu załącznika. Dlatego eksperci podkreślają, że skuteczna strategia musi być wielowarstwowa – łączenie świadomości i edukacji z narzędziami technicznymi daje najlepsze rezultaty (Malik i in., 2025; CECOM CIO G6 Cybersecurity, 2024). Przykładowo, szkolenia z phishingu są dużo bardziej efektywne, jeśli pracownicy wiedzą, że firmowa poczta i tak odfiltrowuje większość podejrzanych wiadomości – dzięki temu w skrzynce zostaje tylko niewielka liczba potencjalnie groźnych e-maili, którym mogą poświęcić więcej uwagi. Z kolei najlepszy system backupowy na nic się nie zda, jeśli personel zapomni go skonfigurować lub regularnie testować odtwarzania danych.

Nowe trendy i przyszłe wyzwania

Krajobraz zagrożeń cybernetycznych nieustannie ewoluuje – można go porównać do wyścigu zbrojeń między atakującymi a obrońcami. Na horyzoncie najbliższych lat wyłania się kilka istotnych trendów, które mogą wpłynąć na zarówno metody ataków, jak i strategie obronne.

Pierwszym trendem jest rosnąca rola sztucznej inteligencji (AI) w cyberatakach. Już dziś dostępne są generatywne modele językowe (jak ChatGPT), które napastnicy mogą wykorzystać do tworzenia bardzo przekonujących i spersonalizowanych wiadomości phishingowych na masową skalę. AI potrafi wygenerować e-mail pozbawiony literówek, idealnie dostosowany stylem do ofiary, co utrudnia odróżnienie go od prawdziwej korespondencji (Jabir i in., 2025). Odnotowano przypadki użycia narzędzi AI do obchodzenia filtrów antyspamowych i antyphishingowych, a nawet do tworzenia fałszywych głosów i nagrań wideo (tzw. deepfake), które mogą posłużyć w atakach typu vishing. Np. przestępcy mogą dzięki syntezie mowy podszyć się przez telefon pod dyrektora firmy i polecić wykonanie przelewu – a głos w słuchawce brzmi niemal nie do odróżnienia od prawdziwego. Takie incydenty już się zdarzają i niewątpliwie ich liczba wzrośnie wraz z doskonaleniem algorytmów generatywnych.

Z drugiej strony, AI staje się także bronią obrońców. Rozwijane są zaawansowane systemy wykrywające phishing z wykorzystaniem uczenia maszynowego, analizujące setki cech wiadomości (lingwistycznych, technicznych) w ułamku sekundy. Sztuczna inteligencja może również pomagać w identyfikacji nietypowych zachowań w sieci (anomaly detection), wspierając analityków bezpieczeństwa w szybszym namierzaniu incydentów. W przyszłości modele AI mogą w czasie rzeczywistym oceniać ryzyko każdego przychodzącego e-maila i ostrzegać użytkownika, np. komunikatem „Uwaga: ta wiadomość jest bardzo podobna do znanego ataku phishingowego”. Niemniej, należy pamiętać, że AI to broń obosieczna – będzie wykorzystywana przez obie strony konfliktu, więc prawdopodobnie zobaczymy jednocześnie wzrost wyrafinowania ataków i poprawę narzędzi obronnych.

Kolejnym trendem jest dalsza profesjonalizacja i komercjalizacja cyberprzestępczości. Omówiony wcześniej model Ransomware-as-a-Service jest

częścią szerszego zjawiska Crime-as-a-Service, gdzie usługi do przeprowadzania ataków (nie tylko ransomware, ale też phishing, DDoS, botnety) są sprzedawane jak zwykle usługi IT (Meland i in., 2020). To oznacza, że próg wejścia dla nowych cyberprzestępców obniża się – mogą kupić potrzebne narzędzia zamiast tworzyć je od zera. Możemy spodziewać się pojawiania kolejnych wyspecjalizowanych „pod-rynunków”, np. usług oferujących gotowe kampanie phishingowe na zlecenie, kompletnych pakietów do kradzieży tożsamości itd. Dla obrońców oznacza to konieczność szerszego spojrzenia – zwalczanie poszczególnych grup przestępczych może nie wystarczyć, jeśli na ich miejsce wejdą nowi gracze korzystający z tych samych usług podziemnych.

Ewoluuje również charakter celów ataków. Jeszcze niedawno dominującymi ofiarami ransomware były pojedyncze firmy czy instytucje, atakowane indywidualnie. Teraz coraz częściej przestępcy biorą na celownik łańcuchy dostaw (supply chain) – atakują dostawcę oprogramowania lub usługę chmurową, której awaria implikuje jednoczesny atak na dziesiątki czy setki powiązanych z nią organizacji. Przykładem był wspomniany atak na firmę Kaseya w 2021 r., gdzie poprzez producenta oprogramowania do zarządzania IT zainfekowano setki jego klientów naraz, żądając okupu zbiorczego (Meland i in., 2020). Ten model ataku maksymalizuje zasięg szkód i potencjalny zysk z jednego włamania. Jest wyzwaniem dla obrońców, gdyż wymaga zabezpieczania nie tylko własnej infrastruktury, ale i kontroli bezpieczeństwa u dostawców (co bywa trudne).

Wreszcie, w odpowiedzi na narastającą plagę ataków, władze państwowe i organy ścigania nasilają działania. Coraz częściej słyszymy o międzynarodowych operacjach wymierzonych w grupy ransomware – współpraca policji różnych krajów doprowadziła już do aresztowań członków kilku znanych gangów (np. REvil czy NetWalker). Pojawiają się także inicjatywy prawne: rozważane jest wprowadzenie regulacji zakazujących ofiarom płacenia okupu. Taki zakaz – choć kontrowersyjny – miałby pozbawić przestępców motywacji finansowej (skoro nikt nie zapłaci, ataki stracą sens). Jednak krytycy wskazują, że w praktyce mógłby on karać ofiary i skłaniać firmy do ukrywania ataków zamiast ich zgłaszania. Innym trendem jest rozwój rynku ubezpieczeń cybernetycznych – przedsiębiorstwa wykupują polisy pokrywające

straty związane z atakiem ransomware, włącznie z kwotą okupu. Niestety, pojawiły się obawy, że ubezpieczenia te paradoksalnie napędzają przestępczość (ubezpieczyciel i tak zapłaci okup, więc atakujący chętniej atakują dobrze ubezpieczone podmioty). W odpowiedzi część ubezpieczycieli wprowadza klauzule wyłączające odpowiedzialność za szkody spowodowane np. atakami sponsorowanymi przez państwa (których nie da się przewidzieć ani im zapobiec standardowymi środkami).

Patrząc w przyszłość, należy założyć, że zagrożenia cybernetyczne będą nadal ewoluować i nasilać się. Cyberprzestępcy będą eksplorować nowe wektory ataku (np. urządzenia IoT – wyobraźmy sobie ransomware blokujący inteligentny dom czy samochód), nowe techniki wymuszeń (np. kombinacje ataków fizycznych i cyfrowych), a także będą starali się obchodzić istniejące zabezpieczenia (np. stosując AI do uniknięcia detekcji). Z kolei społeczność zajmująca się bezpieczeństwem będzie rozwijać coraz lepsze narzędzia obrony, standardy i regulacje. Walka będzie toczyć się dalej na zasadzie „kroku naprzód i kroku w tył” po każdej ze stron.

Wnioski

Przegląd najgroźniejszych obecnie cyberataków – phishingu i ransomware (wraz z modelem RaaS) – prowadzi do kilku kluczowych wniosków. Po pierwsze, nawet pozornie mało znaczące incydenty (jak pojedynczy phishingowy e-mail) mogą uruchomić kaskadę zdarzeń skutkujących poważnym kryzysem bezpieczeństwa. Cyberprzestępcy umiejętnie łączą techniki socjotechniczne z malware, aby osiągać swoje cele. Po drugie, skala i profesjonalizacja tych ataków jest obecnie bezprecedensowa – phishing stał się codziennością dla internautów na całym świecie, a ransomware przerodziło się w dochodowy biznes przestępczy o globalnym zasięgu. Po trzecie, konsekwencje ataków wykraczają daleko poza straty cyfrowe: realnie wpływają na życie ludzi, ciągłość działania organizacji i zaufanie do technologii.

Na szczęście zrozumienie metod działania atakujących pozwala na skuteczniejszą obronę. Najważniejsze elementy ochrony to: świadomość i czujność użytkowników (edukacja, szkolenia, kultura bezpieczeństwa), warstwowe zabezpieczenia techniczne (filtry, antywirusy, aktualizacje, backupy, 2FA,

segmentacja) oraz koordynacja działań na poziomie instytucji i państwa (wymiana informacji o zagrożeniach, wspólne ściganie cyberprzestępców, standardy postępowania). Nie ma jednego cudownego rozwiązania – potrzebne jest podejście systemowe, łączące ludzi, procedury i technologie.

Rozwój nowych technologii, takich jak sztuczna inteligencja, przynosi zarówno szanse, jak i zagrożenia w kontekście cyberbezpieczeństwa. Będziemy świadkami coraz bardziej wyrafinowanych ataków (np. phishing wspierany AI, ransomware na IoT) i musimy się na nie przygotować, rozwijając równie zaawansowane metody obrony. Walka z cyberprzestępczością przypomina wyścig – aby go nie przegrać, musimy biec szybciej niż atakujący lub przynajmniej skutecznie reagować na ich ruchy.

Podsumowując, bezpieczeństwo w cyberświecie zależy od wspólnej odpowiedzialności: każdy użytkownik (poprzez ostrożne zachowanie), każda organizacja (poprzez inwestycje w zabezpieczenia i szkolenia) oraz system na poziomie społecznym (prawo, organy ścigania, współpraca międzynarodowa) mają rolę do odegrania. Tylko synergiczne działania mogą istotnie ograniczyć skalę zagrożeń. Mamy nadzieję, że niniejsze opracowanie przyczyni się do zwiększenia świadomości o naturze ataków phishingowych i ransomware oraz podkreśla znaczenie proaktywnej postawy – tak, aby nie dać się złapać na przynętę w cyfrowym oceanie pełnym zagrożeń.

Literatura

1. Alder, S. (2020). *Hospital ransomware attack results in patient death*. HIPAA Journal.
2. Botchkovar, E., Cui, K., Antonaccio, O., Perkins, R., Maimon, D. (2025). The organized activities of ransomware groups: A social network approach. *Technology in Society*, 82, 102873. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2025.102873>
3. Fisher, T., Pieri, Z., Howell, C. J., O'Malley, R., Tremblay, L., Dawoud, M. (2025). Vendor communication themes in darknet Ransomware-as-a-Service (RaaS) advertisements. *Computers in Human Behavior*, 165, 108571. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2025.108571>
4. Jabir, R., Le, J., Nguyen, C. (2025). Phishing attacks in the age of generative artificial intelligence: A systematic review of human factors. *AI*, 6(8), 174. <https://doi.org/10.3390/ai6080174>

5. López-Aguilar, P., Urruela, C., Batista, E., Machin, J., Solanas, A. (2025). Phishing vulnerability and personality traits: Insights from a systematic review. *Computers in Human Behavior Reports*, 20, 100784. <https://doi.org/10.1016/j.chbr.2025.100784>
6. Malik, A., Khan, B., Qaisar, S. M., Krichen, M. (2025). AntiPhishX: An AI-driven service-oriented ensemble framework for detecting phishing and ai-powered phishing attacks. *Information and Software Technology*, 188, 107877. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2025.107877>
7. Meland, P. H., Bayoumy, Y. F. F., Sindre, G. (2020). The ransomware-as-a-service economy within the darknet. *Computers Security*, 92, 101762. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2020.101762>
8. Zhang, C., Luo, F. (2025). Bargaining game theoretical analysis framework for ransomware attacks. *Journal of Information Security and Applications*, 93, 104115. <https://doi.org/10.1016/j.jisa.2025.104115>

Netografia

1. CECOM CIO G6 Cybersecurity (2024). *Secure our world – CECOM raises awareness about phishing*. Army.mil. Pobrane z: https://www.army.mil/article/280696/secure_our_world_cecom_raises_awareness_about_phishing (data dostępu: 10.09.2025).
2. GOV.UK. (2025). *Cyber Security Breaches Survey 2025: Technical report*. Gov.uk. Pobrane z: <https://www.gov.uk/government/statistics/cyber-security-breaches-survey-2025/cyber-security-breaches-survey-2025-technical-report> (data dostępu: 10.09.2025).

mgr inż. Piotr Lichograj¹, dr inż. Marta Chodyka²,
Jarosław Fabijańczuk³, prof. dr hab. Vladimir Golovko⁴
Akademia Bialska im. Jana Pawła II, Biała Podlaska

https://doi.org/10.29316/9788368103281_4

ZASTOSOWANIA I WYZWANIA TECHNOLOGII IMMERSYJNYCH W EDUKACJI

APPLICATIONS AND CHALLENGES OF IMMERSIVE TECHNOLOGIES IN EDUCATION

Streszczenie

Rozdział analizuje możliwości i ograniczenia wykorzystania technologii immersyjnych – rzeczywistości wirtualnej (VR), rozszerzonej (AR) i mieszanej (MR) – w edukacji formalnej. Celem opracowania jest zbadanie, w jaki sposób VR/AR/MR wpływają na zaangażowanie uczniów, przyswajanie trudnych i abstrakcyjnych treści oraz postrzeganą skuteczność procesu nauczania, a także jakie bariery utrudniają ich wdrażanie w szkołach i na uczelniach. Problem badawczy dotyczy zatem realnej wartości dodanej technologii immersyjnych w porównaniu z metodami tradycyjnymi przy jednoczesnym uwzględnieniu kosztów, dostępności infrastruktury oraz przygotowania kadry dydaktycznej. Zastosowano badanie ankietowe na próbie 50 uczniów i nauczycieli z różnych poziomów kształcenia, wykorzystując kwestionariusz z 12 pytaniami zamkniętymi i otwartymi. Dane przeanalizowano z użyciem miar statystyki opisowej (średnia, odchylenie standardowe) oraz testów statystycznych (test t-Studenta, korelacja rang Spearmana, jednoczynnikowa

¹ <https://orcid.org/0000-0002-1351-4874>, e-mail: p.lichograj@dyd.akademiabialska.pl

² <https://orcid.org/0000-0002-8819-2451>, e-mail: m.chodyka@dyd.akademiabialska.pl

³ student, e-mail: fabijanczuk16419@stud.akademiabialska.pl

⁴ <https://orcid.org/0000-0003-2615-289X>, e-mail: v.golovko@dyd.akademiabialska.pl

analiza wariancji ANOVA), uzupełnionych analizą jakościową komentarzy respondentów. Uzyskane wyniki wskazują na wysoką ocenę edukacyjnego potencjału VR/AR/MR (średnia skuteczności 4,1/5), brak istotnych różnic w ocenach między uczniami i nauczycielami oraz między kobietami i mężczyznami, a także słabą, lecz istotną odwrotną zależność między wiekiem a akceptacją tych technologii. Respondenci z wyższym poziomem doświadczenia technologicznego silniej doceniają wartość edukacyjną rozwiązań immersyjnych, podczas gdy główne bariery wdrożeniowe to koszty sprzętu, ograniczona infrastruktura oraz potrzeba systematycznych szkoleń nauczycieli. W części aplikacyjnej rozdział formułuje rekomendacje dla praktyki edukacyjnej, dotyczące etapowego wdrażania VR/AR/MR, projektowania scenariuszy zajęć oraz budowania kompetencji cyfrowych kadry, wskazując technologie immersyjne jako ważny kierunek rozwoju nowoczesnej dydaktyki.

Słowa kluczowe: technologie immersyjne, rzeczywistość wirtualna (VR), rzeczywistość rozszerzona (AR), rzeczywistość mieszana (MR), edukacja, zaangażowanie uczniów, analiza statystyczna, wdrażanie technologii

Abstract

The chapter analyses the possibilities and limitations of using immersive technologies – virtual reality (VR), augmented reality (AR) and mixed reality (MR) – in formal education. The aim of the study is to examine how VR/AR/MR influence student engagement, the acquisition of difficult and abstract content, and the perceived effectiveness of the teaching – learning process, as well as to identify the main barriers to their implementation in schools and higher education institutions. The research problem therefore concerns the actual added value of immersive technologies compared to traditional methods, while simultaneously accounting for costs, infrastructure availability and the level of teacher preparedness. A survey was conducted on a sample of 50 students and teachers representing different stages of education, using a questionnaire consisting of 12 closed and open-ended questions. The data were analysed using descriptive statistics (mean, standard deviation) and statistical tests (Student's t-test, Spearman's rank correlation, one-way ANOVA), supplemented by a qualitative analysis of respondents' comments. The findings indicate a high assessment of the educational potential of VR/AR/MR (mean effectiveness rating of 4.1/5), no statistically significant differences in evaluations between students and teachers or between women and men, and a weak yet significant negative relationship between age and acceptance of these technologies. Respondents with a higher level of technological experience more strongly recognise the educational value of immersive solutions, whereas the main implementation barriers include equipment costs, limited infrastructure and the need for systematic teacher training. In its applied section, the chapter formulates recommendations for educational practice regarding the phased implementation of VR/AR/MR, the design of learning scenarios and the development of

teachers' digital competences, indicating immersive technologies as an important direction for the development of contemporary didactics.

Keywords: immersive technologies, virtual reality (VR), augmented reality (AR), mixed reality (MR), education, student engagement, statistical analysis, technology implementation

Wstęp

W ostatnich latach technologie immersyjne, takie jak rzeczywistość wirtualna (ang. Virtual Reality, VR), rozszerzona (ang. Augmented Reality, AR) oraz mieszana (ang. Mixed Reality, MR), stają się coraz bardziej obecne w różnych dziedzinach życia, w tym w edukacji. Ich potencjał do transformacji procesu nauczania i uczenia się jest ogromny, co sprawia, że są one uznawane za narzędzia przyszłości. VR pozwala na pełne zanurzenie użytkownika w cyfrowo wykreowanym świecie, AR wzbogaca otaczającą nas rzeczywistość o elementy generowane komputerowo, a MR łączy oba te światy, umożliwiając interakcję między obiektami fizycznymi i wirtualnymi w czasie rzeczywistym. Dzięki temu technologie te oferują nowe, angażujące formy nauczania, które mogą zwiększyć efektywność przyswajania wiedzy i umiejętności.

Wprowadzenie tych technologii do edukacji może stanowić odpowiedź na wyzwania współczesnego systemu kształcenia, który musi sprostać zmieniającym się potrzebom uczniów w erze cyfrowej. VR, AR i MR umożliwiają tworzenie dynamicznych, interaktywnych środowisk nauczania, które mogą lepiej dostosować się do indywidualnych potrzeb uczących się oraz angażować ich w bardziej aktywny sposób. Poprzez realistyczne symulacje i wirtualne eksperymenty, uczniowie mogą zdobywać wiedzę w sposób bardziej intuicyjny i praktyczny, co ma szczególne znaczenie w naukach ścisłych, medycynie, inżynierii czy sztuce. Mimo ogromnego potencjału, wdrożenie technologii immersyjnych w edukacji wiąże się z szeregiem wyzwań. Wysokie koszty sprzętu, ograniczona dostępność oraz potrzeba odpowiedniego szkolenia nauczycieli to główne bariery, które utrudniają powszechne zastosowanie tych narzędzi w szkołach i uczelniach. Ponadto, istnieją obawy

dotyczące bezpieczeństwa użytkowania oraz skuteczności tych technologii w długoterminowej perspektywie.

Celem niniejszego rozdziału jest kompleksowa analiza potencjału, wyzwań oraz ograniczeń związanych z wdrożeniem technologii immersyjnych (VR, AR, MR) w edukacji. Opracowanie bada, w jaki sposób technologie te mogą wpłynąć na zaangażowanie uczniów, efektywność przyswajania wiedzy oraz innowacyjność metod nauczania, szczególnie w kontekście trudnych i abstrakcyjnych zagadnień. Analiza opiera się na badaniach przeprowadzonych wśród uczniów i nauczycieli, uwzględniając ich opinie na temat skuteczności oraz praktycznych aspektów stosowania tych rozwiązań. Rozdział stawia sobie również za cel wskazanie perspektyw rozwoju technologii immersyjnych oraz sformułowanie rekomendacji, które mogą ułatwić ich skuteczne wdrożenie i szerokie wykorzystanie w różnych obszarach edukacji.

Technologie immersyjne w edukacji

Technologie immersyjne, takie jak rzeczywistość wirtualna (ang. Virtual Reality, VR), rzeczywistość rozszerzona (ang. Augmented Reality, AR) oraz rzeczywistość mieszana (ang. Mixed Reality, MR), zyskały na znaczeniu jako innowacyjne narzędzia w procesie edukacyjnym (Bacca i in., 2014). Integrując cyfrowe środowiska z fizycznym otoczeniem, umożliwiają nowe formy interakcji, co wzbogaca tradycyjne metody nauczania. Każda z tych technologii oferuje inne podejście do wprowadzania treści cyfrowych, wspierając efektywność procesu uczenia się i zwiększając zaangażowanie uczniów. Wirtualna rzeczywistość (VR) oferuje użytkownikowi pełne zanurzenie w cyfrowym środowisku, które jest całkowicie odizolowane od rzeczywistego świata. Za pomocą specjalistycznego sprzętu, takiego jak gogle VR i kontrolery, uczniowie mogą wchodzić w interakcje z wirtualnym otoczeniem, które może symulować zarówno miejsca, jak i sytuacje niedostępne w rzeczywistości. Badania pokazują, że VR jest szczególnie skuteczne w dziedzinach nauk ścisłych, takich jak chemia, fizyka czy biologia, gdzie można odtworzyć niebezpieczne lub kosztowne eksperymenty w kontrolowanym, wirtualnym środowisku (Bozgeyikli i Bozgeyikli, 2019). Dodatkowo, VR znalazło zastosowanie w szkoleniu medycznym, gdzie studenci mogą praktykować

procedury chirurgiczne w symulowanym środowisku bez ryzyka popełnienia błędów, które w rzeczywistości mogłyby mieć poważne konsekwencje (Seymour i in., 2002). Wirtualne symulacje z wykorzystaniem VR poprawiają przyswajanie wiedzy, pozwalając uczniom na eksperymentowanie w bezpiecznym środowisku, co znacznie podnosi efektywność nauczania (Radianti i in., 2020). Rzeczywistość rozszerzona różni się od VR tym, że nie odcina użytkownika od rzeczywistego świata, lecz nakłada na niego elementy cyfrowe, które wzbogacają jego percepcję. W edukacji AR umożliwia interakcję z rzeczywistymi obiektami wzbogaconymi o cyfrowe informacje, co znajduje zastosowanie w takich dziedzinach jak nauki przyrodnicze i techniczne. Uczniowie mogą korzystać z aplikacji AR, które wyświetlają dodatkowe informacje o otaczających ich przedmiotach, np. podczas nauki anatomii, gdzie AR pozwala na nałożenie cyfrowego modelu ludzkiego ciała na rzeczywiste obiekty (Chytas i in., 2020). Dzięki temu nauka staje się bardziej angażująca, a uczniowie zyskują możliwość lepszego zrozumienia złożonych zagadnień poprzez wizualizację. AR wspiera także naukę języków, historii czy geografii, gdzie aplikacje mobilne wykorzystujące rzeczywistość rozszerzoną mogą wzbogacić tradycyjne metody nauczania, umożliwiając np. wirtualne zwiedzanie miejsc historycznych (Daniela, 2020). Rzeczywistość mieszana zaś, będąca połączeniem VR i AR, umożliwia interakcję z wirtualnymi obiektami w czasie rzeczywistym w rzeczywistym otoczeniu. Ta technologia zyskuje na znaczeniu zwłaszcza w dziedzinach takich jak inżynieria, gdzie studenci mogą manipulować wirtualnymi modelami urządzeń w rzeczywistych środowiskach. MR pozwala na tworzenie wirtualnych laboratoriów, w których uczniowie mogą badać interakcje między rzeczywistymi i cyfrowymi obiektami. Dzięki temu możliwe jest przeprowadzanie bardziej złożonych badań i symulacji, które w rzeczywistości mogłyby być niemożliwe do zrealizowania ze względu na koszty lub ograniczenia technologiczne (Bimber i Raskar, 2005). Zastosowanie MR w edukacji medycznej pozwala na ćwiczenie procedur w złożonych, symulowanych środowiskach, co przyczynia się do poprawy jakości kształcenia przyszłych lekarzy (Barrie i in., 2019).

Technologie immersyjne, takie jak VR, AR i MR, coraz bardziej znajdują zastosowanie w edukacji, zwłaszcza w naukach ścisłych i humanistycznych. Wirtualna rzeczywistość pozwala uczniom na bezpieczne przeprowadzanie

symulacji naukowych, co eliminuje ryzyko związane z rzeczywistymi eksperymentami. Badania wykazują, że takie rozwiązania poprawiają zarówno zrozumienie, jak i zaangażowanie uczniów. Przykłady obejmują symulacje w laboratoriach chemicznych oraz operacje chirurgiczne w środowiskach VR (Radianti i in., 2020). Dzięki AR możliwe jest również wzbogacenie tradycyjnych lekcji, np. poprzez wizualizację modeli anatomicznych czy geograficznych w czasie rzeczywistym, co ułatwia naukę skomplikowanych pojęć (Chytas i in., 2020). Rzeczywistość mieszana natomiast, łącząc elementy VR i AR, pozwala na interakcję z cyfrowymi obiektami w fizycznym środowisku, co znajduje szczególne zastosowanie w dziedzinach takich jak inżynieria i medycyna, gdzie uczniowie mogą manipulować wirtualnymi modelami w rzeczywistości. Wprowadzenie tych technologii wymaga jednak inwestycji w odpowiedni sprzęt i infrastrukturę, jak również przeszkolenia kadry nauczycielskiej (Meta, 2024).

Technologie immersyjne wykorzystywane są nie tylko w naukach ścisłych, ale także w edukacji humanistycznej. Dzięki wirtualnym wycieczkom, uczniowie mogą odwiedzać trudno dostępne miejsca, takie jak muzea czy stanowiska archeologiczne, co zwiększa ich zaangażowanie i umożliwia głębsze zrozumienie kontekstu kulturowego (Chang i in., 2023). Aplikacje AR znalazły również zastosowanie w nauce języków obcych, gdzie uczniowie mogą wizualizować i rozpoznawać obiekty w języku docelowym, co wspomaga ich interakcję z materiałem dydaktycznym. Ponadto, w lekcjach historii cyfrowe symulacje pozwalają na interaktywną naukę wydarzeń historycznych, co pogłębia zrozumienie ich kontekstu i wpływu na współczesność (Al-Ansi i in., 2023). Integracja tych technologii w edukacji wymaga jednak odpowiedniego sprzętu i oprogramowania, a także kompetencji nauczycieli do ich efektywnego wdrożenia (Freese i in., 2023).

Pomimo wyzwań związanych z wprowadzeniem VR, AR i MR, ich potencjał w edukacji jest ogromny. Badania potwierdzają, że technologie te znacząco zwiększają motywację i efektywność nauki, szczególnie w kontekście praktycznych zajęć, gdzie uczniowie mogą ćwiczyć w bezpiecznych środowiskach symulacyjnych. Przyszłe badania powinny skupić się na personalizacji i dostosowaniu tych technologii do indywidualnych potrzeb uczniów, co pozwoli na ich jeszcze szersze zastosowanie w różnych dziedzinach edukacji

(Radianti i in., 2020). Technologie immersyjne, takie jak VR, AR i MR, oferują nowe, innowacyjne rozwiązania w procesie edukacyjnym. Ich pełne wykorzystanie zależy jednak od dostępności odpowiedniego sprzętu, inwestycji w infrastrukturę oraz przeszkolenia kadry nauczycielskiej. Przyszłość edukacji z pewnością będzie związana z dalszym rozwojem tych technologii, które mogą znacząco podnieść efektywność nauczania i zaangażowanie uczniów, szczególnie w dziedzinach, które wymagają interaktywnego i praktycznego podejścia (Radianti i in., 2020).

Metodologia badań

W celu przeanalizowania percepcji technologii immersyjnych (VR, AR, MR) w edukacji przeprowadzono badanie ankietowe, którego głównym celem było zrozumienie, jak te technologie są postrzegane przez uczniów i nauczycieli z różnych poziomów edukacji. Badanie umożliwiło zebranie przekrojowych danych na temat doświadczeń, preferencji i wyzwań związanych z wdrażaniem tych technologii w procesie nauczania. Dzięki temu możliwe było uzyskanie pogłębionego wglądu w to, jak technologie immersyjne wpływają na proces edukacyjny, zarówno z perspektywy użytkowników, którzy mieli już styczność z tymi narzędziami, jak i tych, którzy dopiero zaczynają je wykorzystywać.

Badanie zostało przeprowadzone na próbie liczącej 50 respondentów, obejmującej uczniów i nauczycieli z różnych szczebli edukacji: od szkół podstawowych, przez szkoły średnie, aż po uczelnie wyższe. Dobór próby został przeprowadzony losowo, aby zapewnić zróżnicowanie demograficzne oraz szerokie spektrum doświadczeń związanych z technologiami immersyjnymi. Dzięki temu możliwe było uzyskanie pełniejszego obrazu dotyczącego postrzegania technologii VR, AR i MR przez osoby o różnych poziomach wiedzy technologicznej, co pozwoliło na lepsze zrozumienie potencjalnych korzyści i barier w ich implementacji w edukacji.

W badaniu zastosowano kwestionariusz ankietowy, który składał się z 12 pytań. Kwestionariusz został podzielony na kilka sekcji:

1. Dane demograficzne: Pytania dotyczące wieku, płci oraz poziomu edukacji respondentów miały na celu określenie wpływu demograficznych

czynników na percepcję i doświadczenia związane z technologiami immersyjnymi.

2. Doświadczenia związane z technologiami immersyjnymi: Pytania dotyczące wcześniejszych doświadczeń użytkowników z technologiami VR, AR oraz MR w edukacji. Badano, czy i w jakim zakresie respondenci mieli styczność z tymi technologiami oraz jakie były ich ogólne wrażenia.
3. Ocena skuteczności technologii immersyjnych: Respondenci oceniali skuteczność VR, AR i MR na 5-punktowej skali Likerta, biorąc pod uwagę takie aspekty jak zwiększenie zaangażowania uczniów, ułatwienie przyswajania trudnych zagadnień oraz wzrost efektywności nauczania.
4. Preferencje dotyczące metod nauczania: Ta sekcja skupiała się na preferencjach respondentów w zakresie metod nauczania i gotowości do wykorzystania nowych technologii immersyjnych w procesie edukacyjnym.
5. Obawy i wyzwania związane z wdrożeniem technologii immersyjnych: Pytania w tej części dotyczyły głównych barier, takich jak wysokie koszty sprzętu, ograniczona dostępność technologii w szkołach oraz kwestie bezpieczeństwa użytkowników.

Kwestionariusz został zaprojektowany tak, aby umożliwić analizę zarówno ilościową (przez pytania zamknięte), jak i jakościową (dzięki otwartym komentarzom respondentów). Ankieta została przeprowadzona w formie online, co zapewniło respondentom elastyczność czasową oraz ułatwiło udział w badaniu. Kwestionariusz ten został przeprowadzony wśród uczniów i nauczycieli z różnych poziomów edukacji, w okresie od 18 do 30 marca 2024 roku.

Metody analizy danych

Zebrane dane zostały poddane dogłębnej analizie statystycznej i jakościowej, co umożliwiło wyciągnięcie szczegółowych wniosków. W analizie ilościowej skoncentrowano się na obliczeniu procentowego rozkładu odpowiedzi, który ukazał kluczowe tendencje, przedstawione za pomocą wykresów. Takie podejście pozwoliło na identyfikację zależności między zmiennymi, takimi jak wiek, płeć, doświadczenie z technologiami immersyjnymi oraz

preferencje edukacyjne. Dzięki temu zrozumiano, jak różne grupy demograficzne postrzegają te technologie, co ułatwiło analizę ich efektywności i potencjalnych barier wdrożenia. Zastosowane narzędzia do analizy statystycznej zapewniły precyzję w wyciąganiu wniosków z dużego zbioru danych, co jest szczególnie ważne w badaniach dotyczących edukacji, gdzie wyniki mogą mieć bezpośredni wpływ na projektowanie przyszłych metod nauczania. Dzięki tym narzędziom możliwe było wykrycie korelacji, np. między wiekiem a otwartością na nowe technologie, czy między płcią a stopniem zaufania do technologii immersyjnych. Tego rodzaju analiza dostarczyła danych, które pozwalają na lepsze zrozumienie potrzeb i oczekiwań różnych grup użytkowników. Równocześnie przeprowadzono analizę jakościową, która koncentrowała się na pogłębionym badaniu komentarzy respondentów. Odpowiedzi otwarte dostarczyły bardziej subiektywnych informacji, które trudno byłoby ująć w formie ilościowej, ale stanowią istotne uzupełnienie wyników. Na przykład wielu respondentów zgłaszało obawy dotyczące technicznych wyzwań związanych z użytkowaniem technologii immersyjnych, takich jak trudności w ich obsłudze oraz ograniczona dostępność sprzętu. Inni wskazywali na kwestie związane z kosztami, zwłaszcza w kontekście wdrożenia tych technologii na szeroką skalę w szkołach. Dzięki analizie jakościowej można było lepiej zrozumieć, jakie konkretne wyzwania stoją przed nauczycielami i uczniami w kontekście wdrażania VR, AR i MR do edukacji.

Na podstawie uzyskanych danych zidentyfikowano także kluczowe bariery, z jakimi mogą się spotkać instytucje edukacyjne przy wprowadzaniu technologii immersyjnych. Wysokie koszty zakupu i utrzymania sprzętu, trudności techniczne oraz obawy dotyczące ochrony danych osobowych to tylko niektóre z problemów, które zostały wskazane przez respondentów. W komentarzach pojawiały się także sugestie dotyczące potrzeby lepszego przeszkolenia nauczycieli oraz dostosowania programów nauczania do wymagań technologii immersyjnych. Wyniki te mogą służyć jako cenny wkład do przyszłych badań i debat na temat skutecznego wdrożenia nowoczesnych technologii w systemie edukacji.

Kluczowe obszary analizy

Analiza danych została przeprowadzona w czterech głównych obszarach: wiek i płeć respondentów, doświadczenia w korzystaniu z technologii immersyjnych, preferencje dotyczące metod nauczania oraz obawy związane z technologiami immersyjnymi. Analiza wieku i płci miała na celu zidentyfikowanie, czy istnieją różnice w postrzeganiu tych technologii w zależności od demografii respondentów. Wyniki badania wskazują, że młodsze osoby częściej wykazują entuzjazm wobec nowoczesnych technologii, co może wynikać z większej otwartości na innowacje oraz łatwiejszego przyswajania nowych narzędzi cyfrowych. Doświadczenia respondentów z technologiami VR, AR i MR były kolejnym istotnym obszarem analizy. Wyniki wykazały, że osoby, które miały już styczność z tymi technologiami, zazwyczaj oceniają je pozytywnie, podkreślając ich efektywność w nauczaniu trudnych zagadnień. Z kolei osoby, które dopiero zaczynają korzystać z tych narzędzi, wyraziły pewne obawy związane z ich skomplikowaną obsługą oraz dostępnością sprzętu. Preferencje dotyczące metod nauczania pokazały, że choć technologie immersyjne są postrzegane jako przyszłościowe narzędzia edukacyjne, tradycyjne metody nadal cieszą się zaufaniem, zwłaszcza wśród nauczycieli, którzy obawiają się, że nowoczesne technologie mogą zastąpić bezpośredni kontakt z uczniem.

Obawy i wyzwania związane z technologiami immersyjnymi były szczególnie widoczne w komentarzach respondentów. Główne bariery, na jakie wskazywano, to koszty związane z zakupem sprzętu, trudności techniczne oraz brak odpowiedniego przeszkolenia nauczycieli. Wielu respondentów zwróciło również uwagę na kwestie bezpieczeństwa danych i ochrony prywatności, co staje się coraz bardziej istotnym tematem w kontekście użytkowania technologii cyfrowych w edukacji.

Procedura badawcza i ograniczenia

Procedura badawcza opierała się na pełnej anonimowości i poufności wyników, co miało na celu zapewnienie respondentom komfortu oraz zachęcenie do szczerych odpowiedzi. Respondenci byli informowani o celach badania i wyrazili zgodę na udział, a wszystkie wyniki zostały przeanalizowane

zbiorczo, co dodatkowo zabezpieczało prywatność uczestników. Głównym ograniczeniem badania była stosunkowo mała liczebność próby, co mogło wpłynąć na reprezentatywność wyników. Ponadto, badanie zostało przeprowadzone w określonych placówkach edukacyjnych, co oznacza, że wyniki mogą być specyficzne dla tych instytucji i ich infrastruktury technologicznej. Subiektywność ocen respondentów, związana z ich osobistymi doświadczeniami z technologiami immersyjnymi, również mogła wpłynąć na interpretację wyników. Niemniej jednak, zebrane dane dostarczyły cennych wniosków dotyczących postrzegania technologii immersyjnych w edukacji. Metodologia zastosowana w badaniu stanowi solidną podstawę do analizy percepcji technologii immersyjnych w edukacji. Wyniki pozwalają na lepsze zrozumienie potencjalnych korzyści oraz barier związanych z wdrażaniem tych technologii, co zostanie szczegółowo omówione w kolejnych rozdziałach.

Wyniki

W badaniu wzięło udział 50 respondentów – uczniów i nauczycieli na różnych poziomach edukacji – którzy ocenili skuteczność i wyzwania związane z wykorzystaniem tych technologii w nauczaniu. Zebrane dane poddano szczegółowej analizie statystycznej, w tym obliczeniom średnich, testowi t-Studenta, korelacji rang Spearmana oraz analizie wariancji (ANOVA), co pozwoliło na pełne zrozumienie zależności między zmiennymi.

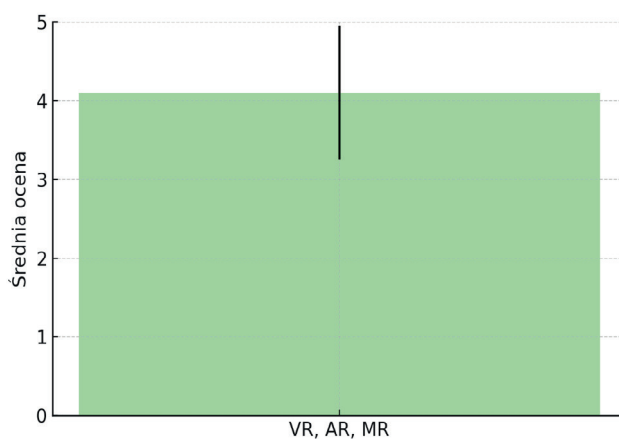
Pierwszym krokiem w analizie wyników była kalkulacja średniej arytmetycznej oraz odchylenia standardowego dla ocen skuteczności technologii immersyjnych. Średnia arytmetyczna (ang. mean) pozwala określić ogólny poziom oceny skuteczności technologii, podczas gdy odchylenie standardowe (ang. Standard deviation) informuje o rozproszeniu wyników wokół średniej, co umożliwia ocenę zmienności odpowiedzi. Tabela 1 prezentuje podstawowe statystyki dotyczące oceny skuteczności technologii immersyjnych na 5-punktowej skali Likerta, gdzie 1 oznaczało brak zgody na efektywność, a 5 pełną zgodę. Średnia ocen wyniosła 4,1, co sugeruje, że większość respondentów postrzega te technologie jako skuteczne narzędzie w edukacji. Odchylenie standardowe wynosiło 0,85 co oznacza, że oceny respondentów były stosunkowo spójne, choć pojawiły się pewne różnice w opiniach.

Tabela 1. Średnia ocena skuteczności technologii immersyjnych oraz odchylenie standardowe

Ocena skuteczności	Średnia	Odchylenie standardowe
VR, AR, MR	4,1	0,85

Źródło: opracowanie własne.

Wyniki przedstawiono graficznie na rysunku 1.

**Rysunek 1.** Średnia ocen technologii immersyjnych z odchyleniem standardowym

Źródło: opracowanie własne.

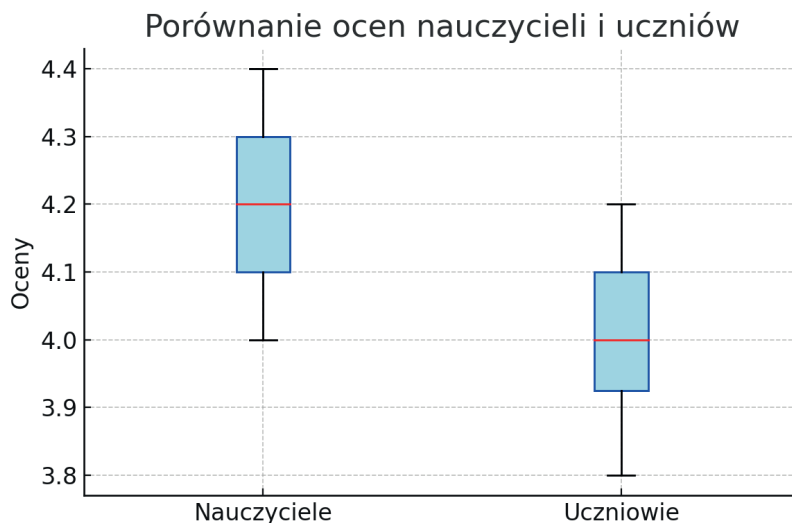
W celu zbadania, czy istnieją istotne różnice między grupami respondentów (np. nauczyciele vs uczniowie, mężczyźni vs kobiety) w ocenie technologii immersyjnych, zastosowano test t-Studenta dla prób niezależnych. Test ten pozwala porównać średnie dwóch niezależnych grup w celu ustalenia czy różnice między nimi są statystycznie istotne. Hipoteza zerowa zakładała, że różnic między grupami nie ma, a wynik testu t oraz wartość p decydują o odrzuceniu tej hipotezy. Wyniki dla grupy nauczycieli ($M = 4,2$, $SD = 0,78$) i uczniów ($M = 4,0$, $SD = 0,91$) wykazały, że różnice w ocenach były niewielkie i nie były statystycznie istotne ($t(48) = 1,1$, $p > 0,05$), co sugeruje, że obie grupy podobnie postrzegają skuteczność technologii immersyjnych, co zostało przedstawione w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki testu t-Studenta dla porównania ocen nauczycieli i uczniów

Grupa	Średnia	Odchylenie standardowe	t	p
Nauczyciele	4,2	0,78	1,1	> 0,05
Uczniowie	4	0,91		

Źródło: opracowanie własne.

Graficzne przedstawienie wyników przedstawiono na rysunku 2.

**Rysunek 2.** Porównanie ocen nauczycieli i uczniów

Źródło: opracowanie własne.

Podobnie, analiza wyników dla mężczyzn ($M = 4,1$, $SD = 0,83$) i kobiet ($M = 4,0$, $SD = 0,87$) również nie wykazała istotnych różnic między tymi grupami ($t(48) = 0,65$, $p > 0,05$), co oznacza, że płeć nie wpływa na percepcję skuteczności tych technologii.

Aby zbadać zależność między wiekiem respondentów a ich oceną technologii immersyjnych, zastosowano korelację rang Spearmana. Jest to nieparametryczna metoda badania siły i kierunku zależności między dwiema zmiennymi. Zastosowanie tej metody było konieczne, ponieważ dane dotyczące wieku mogą nie mieć rozkładu normalnego. Wynik korelacji wynosił $r_s = -0,25$ ($p < 0,05$), co wskazuje na słabą, ale statystycznie istotną odwrotną korelację między wiekiem a oceną skuteczności technologii. Oznacza to, że starsi respondenci byli nieco bardziej sceptyczni wobec technologii

immersyjnych, co może wynikać z mniejszego doświadczenia technologicznego lub trudności z adaptacją do nowych narzędzi.

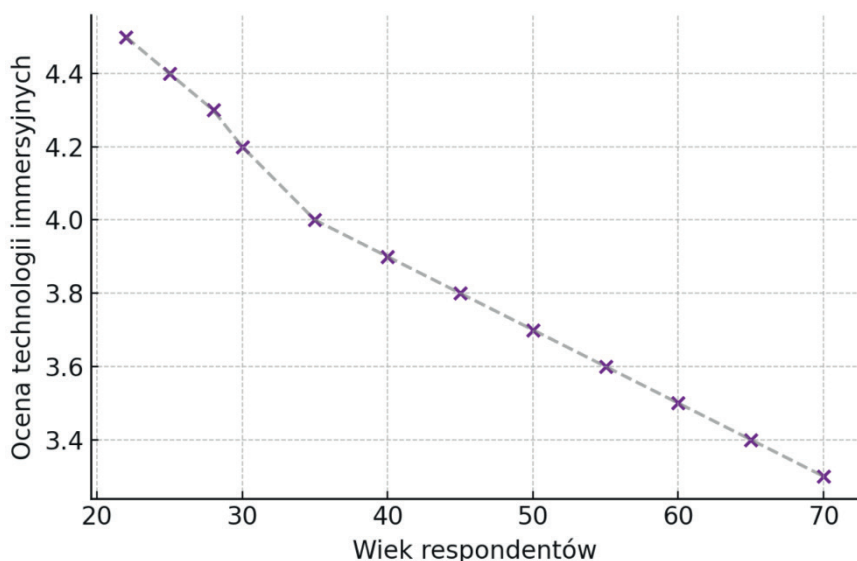
Aby sprawdzić, czy poziom doświadczenia technologicznego wpływa na ocenę skuteczności VR, AR i MR, zastosowano jednoczynnikową analizę wariancji (ANOVA). Analiza ta pozwala na porównanie średnich ocen w więcej niż dwóch grupach i określenie czy różnice między nimi są istotne statystycznie. Respondenci zostali podzieleni na trzy grupy w zależności od samooceny swojego poziomu doświadczenia technologicznego: niski, średni i wysoki. Wyniki ANOVA przedstawione w tabeli 3 wykazały istotne różnice między grupami ($F(2, 47) = 4,23, p < 0,05$). Grupa z wysokim poziomem doświadczenia technologicznego oceniła skuteczność technologii immersyjnych wyżej ($M = 4,5, SD = 0,65$) niż grupa z niskim poziomem doświadczenia ($M = 3,8, SD = 0,92$). Test post-hoc Tukeya wskazał, że różnica między grupami niskiego i wysokiego doświadczenia była statystycznie istotna ($p < 0,05$).

Tabela 3. Wyniki analizy wariancji (ANOVA) dla poziomu doświadczenia technologicznego

Poziom doświadczenia	Średnia	Odchylenie standardowe	F	p
Niski	3,8	0,92	4,23	< 0,05
Średni	4	0,81		
Wysoki	4,5	0,65		

Źródło: opracowanie własne.

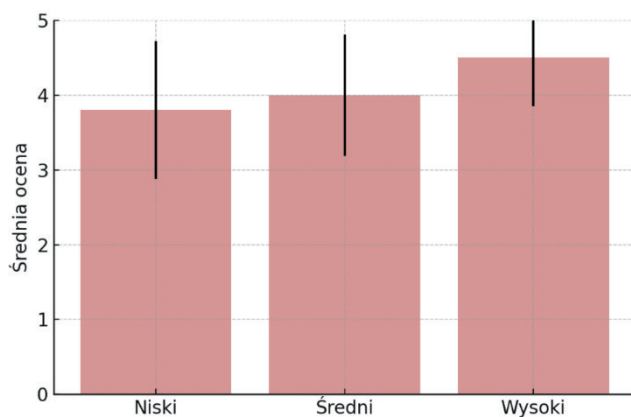
Na wykresie rozrzutu, na rysunku 3 można zauważyć słabą, ale statystycznie istotną, odwrotną zależność między wiekiem respondentów a ich oceną skuteczności technologii immersyjnych. W miarę wzrostu wieku respondentów, ocena technologii stopniowo maleje, co może wskazywać na większy sceptycyzm wobec tych narzędzi wśród starszych użytkowników.



Rysunek 3. Zależność między wiekiem a oceną technologii immersyjnych

Źródło: opracowanie własne.

Wyniki przeprowadzonej analizy statystycznej wykazały, że technologie immersyjne, takie jak VR, AR i MR, są pozytywnie oceniane przez większość respondentów. Średnia ocena skuteczności na poziomie 4,1 wskazuje na ogólną akceptację tych technologii jako skutecznego narzędzia edukacyjnego. Analiza wariancji (ANOVA) pokazała, że doświadczenie technologiczne ma istotny wpływ na ocenę skuteczności tych narzędzi, co sugeruje, że im większe doświadczenie użytkowników, tym bardziej doceniają oni wartość edukacyjną tych technologii. Wyniki analizy ANOVA dla różnych poziomów doświadczenia technologicznego pokazano na wykresie słupkowym na rysunku 4. Respondenci z wyższym poziomem doświadczenia technologicznego oceniali technologie immersyjne znacznie wyżej niż osoby z niższym doświadczeniem. Rozbieżności te zostały dodatkowo zilustrowane odchyleniami standardowymi, co podkreśla zmienność w ocenach między grupami.



Rysunek 4. Wyniki analizy ANOVA dla poziomu doświadczenia technologicznego
Źródło: opracowanie własne.

Brak statystycznie istotnych różnic między nauczycielami i uczniami, a także między mężczyznami i kobietami, wskazuje, że technologie te mogą być stosowane szeroko, niezależnie od grupy demograficznej. Niemniej jednak starsze osoby wykazały pewną rezerwę wobec nowych technologii, co sugeruje, że starsze pokolenia mogą wymagać dodatkowego wsparcia w procesie adaptacji.

Przeprowadzona analiza statystyczna potwierdza, że technologie immersyjne mają duży potencjał w edukacji. Wyzwania związane z kosztami sprzętu oraz technicznymi trudnościami wymagają dalszych inwestycji, jednakże odpowiednie szkolenie i infrastruktura mogą znacząco podnieść efektywność wdrożenia tych technologii w procesie nauczania.

Wnioski

Technologie immersyjne, takie jak rzeczywistość wirtualna, rozszerzona oraz mieszana, odgrywają coraz większą rolę w edukacji, oferując unikalne możliwości poprawy jakości nauczania oraz zaangażowania uczniów. Na podstawie przeprowadzonego badania, które poddano szczegółowej analizie statystycznej, można wyciągnąć kilka istotnych wniosków na temat ich potencjału, wyzwań związanych z ich wdrażaniem oraz kierunków dalszego rozwoju.

Analizując efektywność technologii immersyjnych w edukacji, badanie wykazało, że technologie immersyjne są wysoko oceniane przez respondentów pod kątem ich skuteczności w nauczaniu. Średnia ocena skuteczności wyniosła 4,1 w skali 5-punktowej, co wskazuje na silne przekonanie o pozytywnym wpływie tych technologii na proces edukacyjny. Analiza wyników potwierdza, że technologie te umożliwiają bardziej interaktywne i angażujące nauczanie, co w szczególności sprzyja przyswajaniu trudnych zagadnień naukowych. Zastosowanie VR, AR i MR pozwala na wizualizację abstrakcyjnych pojęć oraz przeprowadzanie symulacji, które są nieosiągalne w tradycyjnych metodach edukacji, co znacząco podnosi efektywność nauczania. Badając wpływ doświadczenia technologicznego na postrzeganie technologii immersyjnych, z przeprowadzonej analizy wariancji wynika, że poziom doświadczenia technologicznego respondentów ma istotny wpływ na ocenę skuteczności technologii immersyjnych. Respondenci z wyższym poziomem doświadczenia technologicznego wyżej oceniali VR, AR i MR, co wskazuje na konieczność dalszego szkolenia zarówno nauczycieli, jak i uczniów w zakresie ich stosowania. Wskazuje to, że im lepiej respondenci są zaznajomieni z technologią, tym większe dostrzegają korzyści z jej stosowania. Ta zależność podkreśla potrzebę odpowiednich szkoleń i programów edukacyjnych, które umożliwią pełne wykorzystanie potencjału technologii immersyjnych. Kolejnym czynnikiem jest równowaga w postrzeganiu technologii przez różne grupy demograficzne. Brak statystycznie istotnych różnic w ocenie skuteczności technologii immersyjnych pomiędzy nauczycielami i uczniami, a także pomiędzy mężczyznami i kobietami, wskazuje na uniwersalność tych technologii. Można zatem stwierdzić, że VR, AR i MR mogą być z powodzeniem stosowane na różnych poziomach edukacji i w różnych grupach demograficznych. Niemniej jednak, wyniki korelacji rang Spearmana sugerują, że starsi respondenci są bardziej sceptyczni wobec tych technologii, co może wynikać z trudności adaptacyjnych. Należy zatem rozważyć dedykowane wsparcie i szkolenia dla starszych nauczycieli, aby ułatwić im wdrożenie nowych technologii do procesu nauczania.

Zastosowanie technologii immersyjnych wiąże się również z pewnymi wyzwaniami. Pomimo licznych korzyści wynikających z ich stosowania w edukacji, istnieją istotne bariery, które mogą utrudniać ich powszechne

wdrożenie. Najważniejszym z nich są wysokie koszty zakupu i utrzymania sprzętu VR, AR i MR, co było jednym z najczęściej wskazywanych problemów przez respondentów. Dodatkowo, trudności techniczne oraz brak odpowiedniej infrastruktury stanowią poważne wyzwania dla wielu instytucji edukacyjnych, szczególnie tych o ograniczonych zasobach finansowych. Również brak odpowiednich szkoleń dla nauczycieli może ograniczać efektywność wdrożenia tych technologii. Wyniki badania pokazują, że osoby z niższym poziomem doświadczenia technologicznego wykazywały mniejszy entuzjazm wobec VR, AR i MR, co sugeruje, że odpowiednie przygotowanie kadry nauczycielskiej będzie kluczowe dla sukcesu tych technologii w edukacji.

Rekomendacje na przyszłość obejmują potrzebę dalszych badań nad efektywnością technologii immersyjnych w różnych dziedzinach edukacji oraz na różnych poziomach nauczania. Kluczowe będzie także opracowanie dedykowanych programów szkoleniowych dla nauczycieli oraz inwestycje w infrastrukturę technologiczną, co umożliwi szersze wdrożenie VR, AR i MR w szkołach i na uczelniach. Warto również rozważyć formy wsparcia finansowego dla instytucji edukacyjnych, takie jak leasing sprzętu czy współpraca z firmami technologicznymi, które mogą pomóc w pokonaniu barier kosztowych.

Technologie immersyjne, takie jak VR, AR i MR, stanowią innowacyjne narzędzia o ogromnym potencjale transformacyjnym w edukacji, umożliwiając tworzenie bardziej angażujących i interaktywnych środowisk nauczania. Wyniki badań wyraźnie wskazują na pozytywny wpływ tych technologii na proces edukacyjny, zwłaszcza w kontekście trudnych i abstrakcyjnych zagadnień, które dzięki immersji stają się bardziej przystępne dla uczniów. Efektywne wykorzystanie VR, AR i MR sprzyja głębszemu zrozumieniu materiału i podnosi motywację do nauki, co bezpośrednio wpływa na jakość kształcenia. Jednak pełne wdrożenie tych technologii wymaga starannie zaplanowanych działań, obejmujących nie tylko inwestycje w sprzęt i infrastrukturę, ale także stworzenie systematycznych programów szkoleniowych dla nauczycieli, które pozwolą na optymalne wykorzystanie ich potencjału. Jak pokazują wyniki analizy, poziom doświadczenia technologicznego ma istotne znaczenie dla postrzegania skuteczności technologii immersyjnych, co potwierdza,

że bez odpowiedniego przygotowania kadry dydaktycznej, pełne wdrożenie tych narzędzi może być utrudnione. Dodatkowo, bariery takie jak koszty sprzętu i problemy techniczne stanowią poważne wyzwania, które muszą zostać pokonane, aby technologie immersyjne mogły na stałe zagościć w systemie edukacyjnym. Konieczne są dalsze badania nad ich efektywnością w różnych dziedzinach i poziomach nauczania, aby dokładniej zrozumieć ich długoterminowy wpływ na wyniki edukacyjne oraz dostosować strategie ich wdrażania do specyficznych potrzeb poszczególnych instytucji. Reasumując, technologie immersyjne mają potencjał do przekształcenia edukacji, ale ich efektywne wdrożenie wymaga nie tylko nakładów finansowych, ale również dostosowania struktury organizacyjnej oraz szkoleń, aby umożliwić nauczycielom i uczniom pełne korzystanie z ich możliwości. Wprowadzenie tych technologii na szeroką skalę może w dłuższej perspektywie przynieść znaczące korzyści, takie jak wzrost zaangażowania, lepsze wyniki nauczania oraz rozwój nowych kompetencji, kluczowych w nowoczesnym świecie.

Podsumowanie

Technologie immersyjne, takie jak rzeczywistość wirtualna, rozszerzona oraz mieszana, mają ogromny potencjał do transformacji współczesnej edukacji. Badania potwierdzają, że ich zastosowanie w procesie nauczania znacząco zwiększa zaangażowanie uczniów oraz efektywność przyswajania wiedzy, szczególnie w trudnych i abstrakcyjnych dziedzinach, takich jak nauki ścisłe, medycyna czy inżynieria.

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że technologie immersyjne są wysoko oceniane przez nauczycieli i uczniów pod kątem skuteczności w nauczaniu. Średnia ocena na poziomie 4,1 potwierdza ich pozytywny odbiór, chociaż barierą w ich powszechnym wdrożeniu są wysokie koszty oraz ograniczenia techniczne. Analiza ANOVA wykazała, że osoby z wyższym poziomem doświadczenia technologicznego oceniały technologie wyżej, co podkreśla konieczność odpowiednich szkoleń. Jednocześnie badanie ujawniło istotne wyzwania, takie jak brak odpowiedniej infrastruktury, koszty sprzętu oraz potrzeba dodatkowego wsparcia dla starszych nauczycieli, którzy wykazują pewien sceptycyzm wobec nowych technologii. Zastosowanie

VR, AR i MR wymaga odpowiednich nakładów finansowych i przemyślanej strategii wdrożenia. Pełne wykorzystanie potencjału technologii immersyjnych w edukacji wymaga dalszych badań nad ich efektywnością oraz inwestycji w infrastrukturę i szkolenia. Konieczne jest także dostosowanie programów nauczania, aby technologie te mogły być skutecznie wykorzystywane na różnych poziomach edukacyjnych. W dłuższej perspektywie mogą one przyczynić się do znaczącej poprawy wyników nauczania i zwiększenia zaangażowania uczniów w proces edukacyjny.

Literatura

1. Al-Ansi, A. M., Jaboob, M., Garad, A., Al-Ansi, A. (2023). Analyzing augmented reality (AR) and virtual reality (VR) recent development in education. *Social Sciences & Humanities Open*, 8(1), 100532.
2. Bacca, J., Baldiris, S., Fabregat, R., Graf, S., Kinshuk. (2014). Augmented Reality Trends in Education: A Systematic Review of Research and Applications. *Educational Technology Society*, 17(4), s. 133-149.
3. Barrie, M., Socha, J. J., Mansour, L., Patterson, E. S. (2019). Mixed Reality in Medical Education: A Narrative Literature Review. *Proceedings of the International Symposium on Human Factors and Ergonomics in Health Care*, 8(1), 28-32. <https://doi.org/10.1177/2327857919081006>
4. Bimber, O., Raskar, R. (2005). *Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds*. A K Peters/CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10624>
5. Bozgeyikli, L., Bozgeyikli, R. (2019). *Virtual Reality: Recent Advancements, Applications and Challenges*. W: L. Bozgeyikli, R. Bozgeyikli (red.), *Virtual Reality*. River Publishers.
6. Chang, C.-Y., Kuo, H.-C., Du, Z. (2023). The role of digital literacy in augmented, virtual, and mixed reality in popular science education: a review study and an educational framework development. *Virtual Reality*, 27(3), 2461-2479. <https://doi.org/10.1007/s10055-023-00817-9>
7. Chytas, D., Johnson, E. O., Piagkou, M., Mazarakis, A., Babis, G. C., Chronopoulos, E., Nikolaou, V. S., Lazaridis, N., Natsis, K. (2020). The role of augmented reality in anatomical education: An overview. *Annals of Anatomy*, 229, 151463. <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2020.151463>
8. Daniela, L. (red.). (2020). *New Perspectives on Virtual and Augmented Reality: Finding New Ways to Teach in a Transformed Learning Environment*. Routledge.

9. Freese, M., Vanderplank, R., Miller, A. (2023). Measuring teachers' competencies for a purposeful use of augmented-reality experiments in physics lessons. *Frontiers in Education*, 8, 1180266.
10. Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda. *Computers & Education*, 147, 103778.
11. Seymour, N. E., Gallagher, A. G., Roman, S. A., O'Brien, M. K., Bansal, V. K., Andersen, D. K., Satava, R. M. (2002). Virtual Reality Training Improves Operating Room Performance: Results of a Randomized, Double-Blinded Study. *Annals of Surgery*, 236(4), 458-464.

Netografia

1. Meta. (2024). *Meta Quest 2 – product page*. Pobrane z: <https://www.meta.com/pl/quest/products/quest2/overview> (data dostępu: 12.12.2025).

Adrian Olszewski¹, mgr inż. Piotr Lichograj², Przemysław Olszewski³
Akademia Bialska im. Jana Pawła II, Biała Podlaska

https://doi.org/10.29316/9788368103281_5

PROBLEMY ERGONOMII I PRECYZJI W IMPLEMENTACJI INTERAKCJI 3D W APLIKACJACH VR

ERGONOMICS AND PRECISION ISSUES IN IMPLEMENTING 3D INTERACTIONS IN VR APPLICATIONS

Streszczenie

Rzeczywistość wirtualna (VR) oraz mieszana (MR) umożliwiają przeniesienie użytkownika w interaktywną przestrzeń trójwymiarową, w której ciało staje się naturalnym interfejsem sterującym. Choć technologia ta otwiera ogromne możliwości, jej skuteczne wdrożenie wiąże się z licznymi problemami natury technicznej, ergonomicznej i poznawczej. Rozdział przedstawia analizę problemów ergonomii, precyzji i potoku przetwarzania w implementacji interakcji 3D w środowisku Unity z użyciem urządzeń HoloLens 2 oraz Meta Quest 3. Szczególną uwagę poświęcono zagadnieniom naturalności gestów, precyzji manipulacji, kolizji i przenikania, sprzężenia zwrotnego oraz ergonomii długotrwałego użytkownika. W pracy zaprezentowano także propozycję rozwiązania problemów importu modeli 3D poprzez implementację wewnętrznego konwertera osi i punktu odniesienia w Unity. Rozdział ma charakter aplikacyjno-badawczy, łączący analizę sprzętu, środowiska programistycznego oraz czynników wpływających na komfort użytkownika.

Słowa kluczowe: wirtualna rzeczywistość, komunikacja człowiek-komputer, interakcja 3D, naturalny interfejs użytkownika

¹ student, e-mail: olszewski22900@stud.akademiabialska.pl

² <https://orcid.org/0000-0002-1351-4874>, e-mail: p.lichograj@dyd.akademiabialska.pl

³ student, e-mail: olszewski18321@stud.akademiabialska.pl

Abstract

Virtual Reality (VR) and Mixed Reality (MR) enable the user to be transported into an interactive three-dimensional space, where their body becomes a natural control interface. While this technology offers immense possibilities, its effective implementation involves numerous technical, ergonomic, and cognitive challenges. This chapter presents an analysis of issues related to ergonomics, precision, and the processing pipeline in the implementation of 3D interaction within the Unity environment using HoloLens 2 and Meta Quest 3 devices. Particular attention is paid to the naturalness of gestures, precision of manipulation, collisions and clipping, feedback mechanisms, and the ergonomics of prolonged use. The work also presents a proposed solution to 3D model import problems through the implementation of an internal axis and pivot point converter in Unity. The chapter is of an applied and research nature, combining an analysis of the hardware, the development environment, and factors influencing user comfort.

Keywords: virtual reality, human-computer interaction, 3D interaction, natural user interface

Wstęp

Wirtualna i mieszana rzeczywistość są jednymi z najbardziej dynamicznie rozwijających się dziedzin technologii interakcji człowiek-komputer (Souchet i in., 2022; Chen, 2023). W przeciwieństwie do klasycznych interfejsów opartych na ekranie i klawiaturze, VR oraz MR umożliwiają pełne zanurzenie w środowisku cyfrowym i manipulowanie obiektami w sposób zbliżony do rzeczywistego, co obejmuje zaawansowane techniki takie jak chwytywanie obiektów w czasie rzeczywistym (Tian i in., 2018; Tian i in., 2019) czy interakcje bimodalne (Kim, Park, 2014). W tym kontekście ciało użytkownika staje się integralnym elementem interfejsu – dłonie, wzrok i głos pełnią funkcje sterujące, a doświadczenie odbioru nabiera charakteru multisensorycznego, w tym interakcje oparte na śledzeniu wzroku (Wang i in., 2024; Han i in., 2019) oraz multimodalne manipulacje z agentami wirtualnymi (Bazargani, Choi, 2025).

Jakość doświadczenia zależy jednak nie tylko od jakości grafiki i wydajności sprzętu, lecz przede wszystkim od naturalności i wygody interakcji, co podkreślają badania porównujące różne paradygmaty interakcji, takie jak gesty siłowe czy manipulacje pośrednie (Yu, Bowman, 2018; Pakkanen i in., 2017; Miller i in., 2018). Jeśli użytkownik zmuszony jest do wykonywania

nienaturalnych gestów lub system reaguje z opóźnieniem, immersja zostaje przerwana, co może prowadzić do efektu „gorilla arm” związanego z zmęczeniem fizycznym (Purdue University, 2017; Sanders i in., 2023). Kluczową rolę odgrywają więc ergonomia i precyzja implementacji – dwa czynniki, które warunkują odbiór całego środowiska, w tym w scenariuszach medycznych czy szkoleniowych (Ferrari i in., 2023; Tütüncü i in., 2025).

Jednym z najważniejszych parametrów technicznych wpływających na komfort jest liczba klatek na sekundę. Przyjmuje się, że aby uniknąć dyskomfortu i choroby symulatorowej, obraz powinien być renderowany z częstotliwością nie mniejszą niż 72 Hz, przy optymalnym zakresie 90-120 Hz (Pohl i in., 2018; Lysenko i in., 2023). Dodatkowo istotna jest latencja, czyli opóźnienie między ruchem użytkownika a reakcją systemu, co porównywano w kontekście śledzenia dłoni versus kontrolerów (Steed i in., 2025; Wired, 2013). Suma opóźnień wynosi:

$$t_{\text{opóźnienia}} = t_{\text{renderowania}} + t_{\text{transmisji}} + t_{\text{wyświetlania}} \quad (1)$$

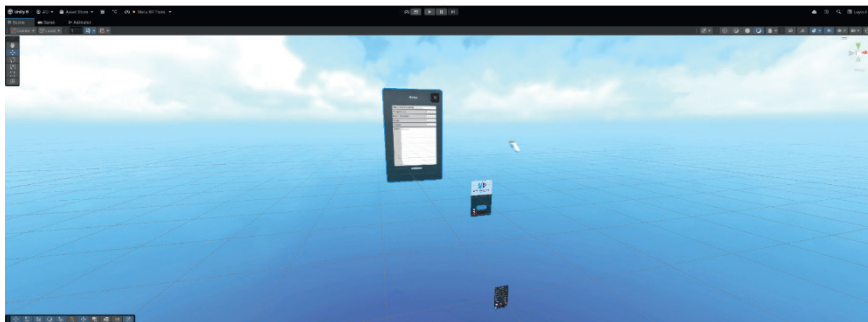
gdzie poszczególne składniki odpowiadają za czas renderowania, transmisji i wyświetlania. Nawet niewielkie wartości rzędu kilkudziesięciu milisekund mogą skutkować utratą wrażenia immersji.

Metodologia

Badania i analizę zagadnień ergonomii oraz precyzji przeprowadzono na grupie 46 respondentów z wykorzystaniem urządzenia Meta Quest 3 w pełni immersyjnym systemem VR z możliwością włączenia trybu podglądu świata rzeczywistego w rzeczywistości mieszanej (passthrough MR).

Meta Quest 3 to urządzenie VR, wyposażone w procesor Snapdragon XR2 Gen 2, wyświetlacz o rozdzielczości 2064×2208 pikseli na każde oko oraz częstotliwość odświeżania 120 Hz. Urządzenie wykorzystuje cztery kamery RGB do śledzenia położenia i ruchów dłoni oraz kontrolery Touch Plus z zaawansowaną haptką. Quest 3 umożliwia również korzystanie z trybu mieszanej rzeczywistości, dzięki czemu użytkownik może zobaczyć otoczenie przez kamery i wykonywać interakcje w przestrzeni półrzeczywistej.

Oprogramowanie i środowisko testowe



Rysunek 1. Scena testowa wykorzystywana do tworzenia aplikacji na urządzenia VR/MR

Źródło: opracowanie własne.

Badania przeprowadzono w środowisku Unity 6 z wykorzystaniem pakietów XR Interaction Toolkit, Oculus Integration, OpenXR Plugin oraz MRTK (Mixed Reality Toolkit). Opracowano autorskie aplikacje testowe pozwalające na interakcje takie jak chwytanie, przesuwanie, obsługę menu 3D oraz kalibrację pozycji użytkownika. W obu środowiskach skonfigurowano moduł XR Rig, zapewniający spójną strukturę kamery, kontrolerów i przestrzeni interakcji. Unity odgrywa kluczową rolę w tworzeniu interakcji 3D, szczególnie w środowiskach VR/MR, gdzie wymagane jest realistyczne odwzorowanie fizyki, kolizji i sprzężenia zwrotnego. Pipeline XR Interaction Toolkit obsługuje interakcje bezpośrednie (Direct Interactor) oraz pośrednie (Ray Interactor), pozwalając użytkownikowi na manipulację obiektami przez dotyk lub wskazanie. W Meta Quest 3 integracja z Oculus SDK umożliwia haptkę i śledzenie dłoni np. funkcja `OVRInput.SetControllerVibration` wywołuje wibracje kontrolera przy kontakcie z obiektem, wzmacniając realizm. W HoloLens 2 interakcje opierają się na gestach i śledzeniu spojrzenia za pomocą MRTK, co zwiększa naturalność, lecz wymaga dużej precyzji ruchu. Stabilność śledzenia dłoni poprawia interpolacja pozycji według równania wygładzania z parametrem $\alpha=0.2$, redukująca drgania bez zauważalnych opóźnień.

Problemy ergonomii i precyzji interakcji

Jednym z głównych problemów jest nienaturalność gestów, zmuszająca użytkownika do długiego unoszenia rąk, co prowadzi do zmęczenia mięśni („gorilla arm problem”). Aby temu zapobiec, strefa interakcji powinna obejmować przestrzeń od klatki piersiowej do oczu, w odległości około jednego metra. W Unity można to uzyskać poprzez kalibrację modułu XR Rig i dopasowanie wysokości interfejsu do wzrostu użytkownika. Realizm zwiększają wielopunktowe uchwyt (grab points) oraz mechanizm przyciągania dłoni, który automatycznie dopasowuje jej pozycję i rotację do kształtu obiektu.



Rysunek 2. Błędnie skonfigurowane punkty uchwytu

Źródło: opracowanie własne.

Drugim istotnym problemem jest precyzja interakcji (rysunek 2). W słabym oświetleniu śledzenie dłoni może być niestabilne, a szybkie ruchy kontrolerów powodują błędy pozycji. Aby zwiększyć dokładność, stosuje się powiększone obiekty hitbox – niewidzialne bryły kolizyjne większe od obiektu wizualnego – oraz promień (raycast) wychodzący z kontrolera, działający jak laserowy wskaźnik. Dzięki temu nie jest wymagane precyzyjne celowanie dłonią, a interakcja staje się płynniejsza. Minimalny rozmiar elementu interaktywnego powinien wynosić 1,5-2 cm, co odpowiada możliwościom percepcji przestrzennej w VR.



Rysunek 3. Przenikanie przez obiekt bez sprzężenia wstecznego

Źródło: opracowanie własne.

Jednym z czynników zaburzających immersję jest efekt przenikania obiektów (rysunek 3). Jeśli ręka użytkownika przechodzi przez ścianę lub obiekt, cała iluzja rzeczywistości natychmiast znika. W Unity problem ten rozwiązuje się poprzez poprawne konfigurowanie detektorów kolizji oraz warstw fizyki. Detektory typu Box lub Mesh muszą dokładnie odpowiadać kształtom modeli, a Rigidbody nadaje im właściwości fizyczne. Dodatkowo warto zastosować sprzężenie haptyczne – nawet jeśli fizyczna kolizja nie zostanie wymuszona, wibracja kontrolera w chwili kontaktu pozwala użytkownikowi poczuć dotknięcie powierzchni. Dzięki temu zmysł dotyku zostaje zintegrowany z obrazem, co znacząco zwiększa realizm doświadczenia.

Problem braku sprzężenia zwrotnego

Brak informacji zwrotnej po wykonanej akcji jest jednym z najczęstszych błędów projektowych w aplikacjach VR. W interakcji dotykowej użytkownik oczekuje reakcji – kliknięcia, błysku lub dźwięku. Jeśli ich zabraknie, pojawia się niepewność czy system zarejestrował akcję. Dlatego interfejsy VR projektuje się w oparciu o trzy typy feedbacku: wizualny (np. podświetlenie

obiektu przy najechaniu), dźwiękowy (krótki ton potwierdzający kliknięcie) oraz haptyczny (impuls wibracji). Każdy z tych kanałów wzmacnia immersję i redukuje błędy użytkownika.

Problem ergonomii długotrwałej

Długotrwałe użytkowanie środowisk VR może prowadzić do przeciążenia fizycznego i poznawczego. Użytkownicy odczuwają zmęczenie ramion, karku i wzroku, a w skrajnych przypadkach – dezorientację przestrzenną. Aby temu przeciwdziałać, interfejsy powinny być rozmieszczone w ergonomicznej odległości, z wykorzystaniem przycisków typu toggle zamiast hold, które nie wymagają ciągłego naciskania. Dodatkowo należy wprowadzić kalibrację postawy użytkownika poprzez dynamiczne dostosowanie wysokości kamery w module XR Rig. Takie rozwiązanie pozwala każdemu użytkownikowi na dopasowanie interfejsu do jego wzrostu i pozycji, co zwiększa wygodę i naturalność interakcji.

Propozycje rozwiązań problemów ergonomii i precyzji w aplikacjach VR/MR

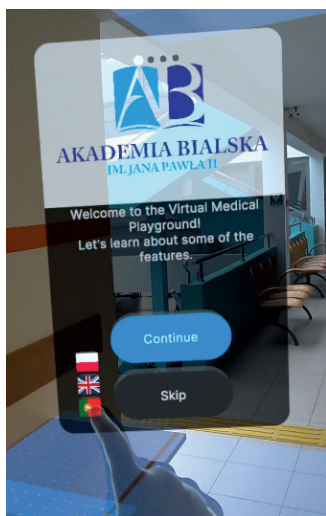
Najczęstszym źródłem dyskomfortu w VR/MR są gesty wymuszające nienaturalną postawę lub nadmierne unoszenie rąk. Aby temu zapobiec, interfejs należy projektować w zgodzie z fizjologicznym zakresem ruchu – strefa interakcji powinna znajdować się 0,5-1,2 m od ciała, między klatką piersiową a oczami. W Unity można zastosować kalibrację wzrostu użytkownika, która automatycznie dostosowuje wysokość interfejsu do jego pozycji. Komfort zwiększa także mechanizm tolerancji chwytu i wielopunktowe obszary grab points, dzięki którym system sam dopasowuje pozycję dłoni do obiektu, zapewniając większy realizm i naturalność interakcji.

Precyzja interakcji w VR zależy od jakości śledzenia ruchu dłoni i kontrolerów. Aby ją zwiększyć, stosuje się filtry wygładzające eliminujące drgania, powiększone detektory kolizji oraz mechanizm przyciągania (snap), który automatycznie ustawia obiekt w dłoni. W interfejsach 3D skutecznie sprawdza się moduł XR Ray Interactor, pozwalający wybierać elementy

z dystansu bez konieczności dokładnego dotykania przycisków. W aplikacjach wymagających dużej precyzji można dodatkowo zastosować skalowanie przestrzeni interakcji, co umożliwi bardziej dokładne manipulacje.

Jednym z głównych problemów obniżających immersję w VR jest przenikanie dłoni i obiektów przez elementy sceny. Aby temu zapobiec, w Unity stosuje się filtrowanie warstw fizycznych (Physics Layers) i przypisywanie obiektom odpowiednich kategorii kolizji, dzięki czemu ręce użytkownika wchodzi w interakcję tylko z elementami aktywnymi. Realizm zwiększa także system haptyki – krótkie vibracje kontrolera informują o kontakcie z obiektem, a w połączeniu z efektami wizualnymi i dźwiękowymi tworzą pełne wrażenie dotyku. Dodatkowo można zastosować symulację oporu ruchu, spowalniając animację dłoni przy kolizji, co daje złudzenie fizycznej bariery.

Długotrwałe korzystanie z gogli VR wymaga minimalizowania obciążenia mięśniowego i poznawczego. Aby to osiągnąć, należy projektować interfejsy w sposób dostosowany do fizjologii człowieka. Elementy UI powinny być rozmieszczone na poziomie wzroku, w odległości około 1 metra od użytkownika, co pokazano na rysunku 4. Wysokość i kąt nachylenia menu można ustawić automatycznie na podstawie kalibracji XR Rig.



Rysunek 4. Interfejs na odpowiedniej wysokości i w zasięgu ramion

Źródło: opracowanie własne.

Ważnym elementem jest również zmiana sposobu aktywacji przycisków. Długotrwałe trzymanie przycisków („hold”) prowadzi do przeciążenia dłoni, dlatego lepiej stosować przyciski typu toggle, które reagują jednym kliknięciem.

Aby dodatkowo zwiększyć komfort, warto wprowadzić tryb adaptacyjny – system analizuje pozycję użytkownika w czasie i przesuwają elementy interfejsu, jeśli wykryje zmianę postawy (np. siedzenie zamiast stania). Takie podejście minimalizuje konieczność podnoszenia rąk i pozwala zachować naturalny rytm pracy w VR.

Zaprezentowane rozwiązania stanowią uniwersalne zasady projektowania interakcji XR. Naturalność gestów zapewnia kalibracja postawy i wielopunktowy chwyt, precyzję – mechanizmy przyciągania i promienie interakcji, kolizje – odpowiednia konfiguracja warstw fizyki, sprzężenie zwrotne – sygnały wizualne, dźwiękowe i haptyczne, a ergonomię – adaptacyjny układ interfejsu ograniczający ruchy ramion. Połączenie tych elementów tworzy intuicyjny system, w którym użytkownik działa naturalnie, a środowisko VR/MR reaguje zgodnie z jego oczekiwaniami, stanowiąc solidną podstawę dla przyszłych zastosowań w nauce i przemyśle.

Problemy przetwarzania 3D i importu modeli

W tworzeniu aplikacji XR kluczowa jest nie tylko ergonomia, lecz także poprawność techniczna potoku 3D. Modele z programów takich jak Blender, 3ds Max czy Maya muszą być prawidłowo importowane do Unity. Częstym problemem jest niezgodność układów współrzędnych – Blender używa Z-up, a Unity Y-up, co wymaga konwersji według wzoru (2):

$$(x, y, z)_{Blender} \rightarrow (x, z, -y)_{Unity} \quad (2)$$

Błędy dotyczą także osi obrotu i punktów pivot, które przy złym ustawieniu powodują nienaturalne ruchy obiektów. Różnice w skali jednostek sprawiają, że modele pojawiają się z nieprawidłowym rozmiarem, zaburzając poczucie przestrzeni. Ważna jest również poprawność normalnych i materiałów – błędny eksport skutkuje nieprawidłowym oświetleniem i deformacją cieni, co pogarsza wizualny realizm sceny.

Propozycja rozwiązania – wewnętrzny konwerter osi

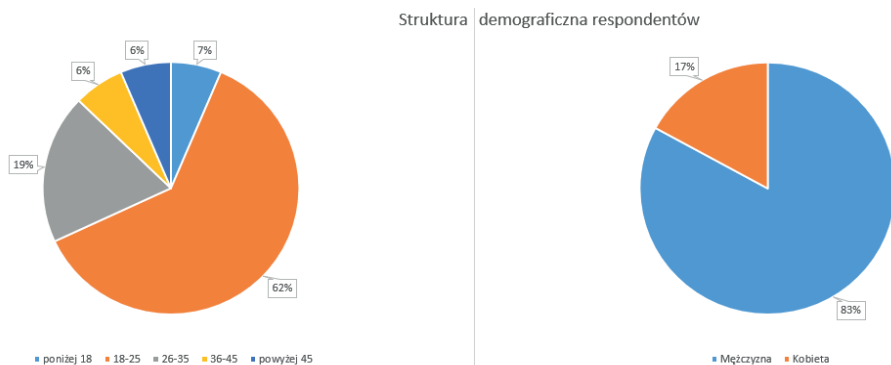
Aby wyeliminować błędy przy imporcie modeli 3D, opracowano koncepcję wewnętrznego konwertera osi w Unity. Narzędzie analizuje model po imporcie, automatycznie korygując jego rotację, skalę i położenie środka ciężkości. Dzięki temu obiekty z Blendera czy 3ds Max są od razu zgodne z układem współrzędnych Unity, a ich orientacja i punkt obrotu są poprawne, co zapewnia naturalne zachowanie podczas interakcji. Konwerter może także automatycznie dopasowywać skalę modeli i przeliczać jednostki, by zachować właściwe proporcje w środowisku XR. Dodatkowe funkcje, takie jak korekta normalnych, przypisywanie materiałów PBR oraz optymalizacja liczby wierzchołków i poziomów szczegółowości (LOD), usprawniają proces produkcji i gwarantują płynne renderowanie, co przekłada się na wyższy komfort użytkownika.

Wyniki badań ankietowych

Badanie ankietowe przeprowadzono wśród 46 uczestników (studentów i pracowników Akademii Białskiej), których celem było określenie subiektywnego poziomu komfortu, precyzji oraz ergonomii interakcji 3D w środowiskach VR. Respondenci oceniali m.in. swoje doświadczenie z technologią VR, poziom komfortu fizycznego, występowanie objawów choroby symulatorowej oraz ogólną ocenę jakości interakcji.

Charakterystyka respondentów

Większość uczestników stanowiły osoby w wieku 18-25 lat (62%), a kolejna znacząca grupa to użytkownicy w wieku 26-35 lat (19%). Nieliczni respondenci znajdowali się w przedziale 36-45 lat (6%) oraz powyżej 45 lat (6%). Struktura płci wskazuje na przewagę mężczyzn (83%) przy 17% kobiet (rysunek 5).

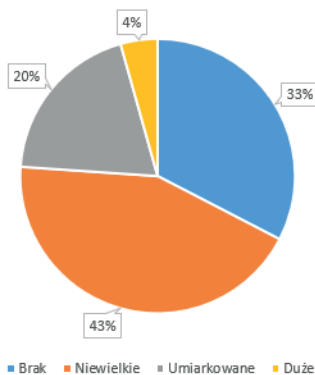


Rysunek 5. Struktura wieku i płci uczestników badania

Źródło: opracowanie własne.

Pod względem doświadczenia w korzystaniu z technologii VR, 43% badanych zadeklarowało niewielkie doświadczenie, 33% – brak wcześniejszego kontaktu z VR, a tylko 4% określiło swoje doświadczenie jako duże. Wskazuje to, że większość uczestników reprezentowała grupę początkujących użytkowników (rysunek 6).

Doświadczenie w korzystaniu z technologii VR

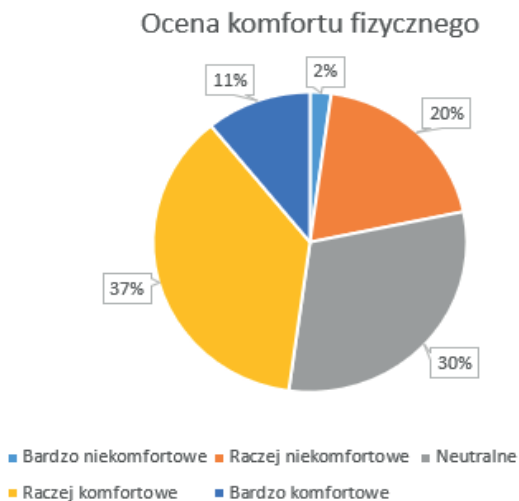


Rysunek 6. Poziom doświadczenia użytkowników w technologii VR

Źródło: opracowanie własne.

Komfort fizyczny i choroba symulatorowa

W ocenie komfortu fizycznego podczas dłuższego korzystania z aplikacji VR, 37% respondentów uznało środowisko za raczej komfortowe, a 11% – za bardzo komfortowe. 30% określiło swoje odczucia jako neutralne, natomiast 20% wskazało na raczej niekomfortowe doświadczenie (rysunek 7).

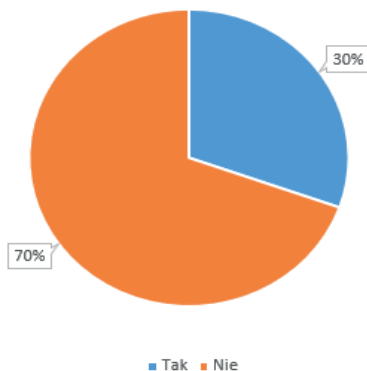


Rysunek 7. Ocena komfortu fizycznego użytkowników podczas korzystania z aplikacji VR

Źródło: opracowanie własne.

Objawy choroby symulatorowej (takie jak zawroty głowy, dezorientacja czy mdłości) zadeklarowało 30% uczestników, podczas gdy 70% nie doświadczyło tego typu problemów (rysunek 8). Wynik ten potwierdza, że współczesne urządzenia, takie jak Meta Quest 3 i HoloLens 2, znacząco redukują efekt motion sickness, choć nie eliminują go całkowicie.

Występowanie choroby symulatorowej



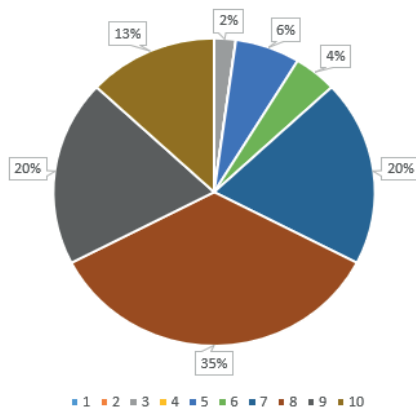
Rysunek 8. Odsetek użytkowników doświadczających objawów choroby symulatorowej

Źródło: opracowanie własne.

Precyzja i ergonomia interakcji

Średnia ocena precyzji i ergonomii interakcji 3D wyniosła 7,9/10, przy odchyleniu standardowym 1,5. Wynik ten wskazuje na wysoki poziom satysfakcji użytkowników, przy czym 50% respondentów oceniło interakcje na poziomie 8 punktów lub wyżej, a maksymalna ocena wyniosła 10 (rysunek 9).

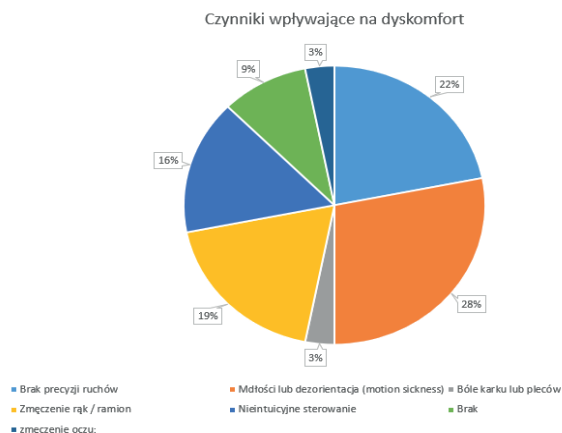
Ocena precyzji i ergonomii interakcji



Rysunek 9. Rozkład ocen precyzji i ergonomii interakcji 3D

Źródło: opracowanie własne.

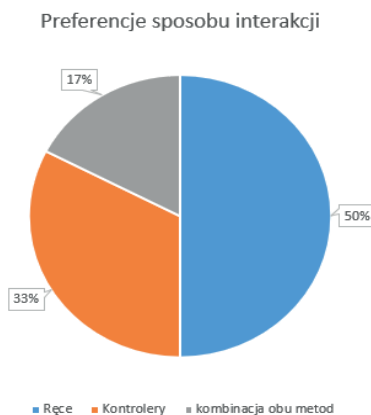
Najczęściej zgłaszanym problemem podczas korzystania z VR były mdłości i dezorientacja (28%), co potwierdza nadal występujący efekt choroby symulatorowej. Brak precyzji ruchów (22%) oraz zmęczenie rąk i ramion (19%) wskazują na ograniczenia ergonomii oraz dokładności śledzenia dłoni (rysunek 10). Nieintuicyjne sterowanie zgłosiło 16% użytkowników, natomiast bóle karku i pleców pojawiły się u 9% badanych. Tylko 3% osób nie odczuło żadnych problemów.



Rysunek 10. Czynniki najczęściej powodujące dyskomfort w środowisku VR

Źródło: opracowanie własne.

Większość użytkowników preferowała interakcję przy użyciu rąk (hand tracking) zamiast kontrolerów (rysunek 11), co potwierdza potrzebę dalszej optymalizacji algorytmów śledzenia dłoni w środowisku Unity oraz lepszego dopasowania interfejsu do fizjologicznego zasięgu ruchu użytkownika.



Rysunek 11. Preferowany sposób interakcji w środowisku VR

Źródło: opracowanie własne.

Dyskusja

Analiza z wykorzystaniem Meta Quest 3 wykazała, że efektywność interakcji 3D zależy od połączenia ergonomii gestów, precyzji śledzenia i jakości potoku technicznego. Nawet drobne zaniedbania w tych obszarach prowadzą do utraty immersji lub dyskomfortu użytkownika. Z punktu widzenia ergonomii kluczowe jest utrzymanie naturalnej postawy – ręce powinny spoczywać w neutralnej pozycji, a mechanizmy wielopunktowego chwytu i automatycznego przyciągania dłoni zmniejszają zmęczenie. Precyzję interakcji determinują stabilność śledzenia i jakość algorytmów predykcyjnych; kontrolery z sensorami inercyjnymi są dokładniejsze niż systemy oparte na kamerach, które wciąż mają problemy przy szybkim ruchu i zmiennym oświetleniu. Od strony technicznej wydajność potoku 3D ma duże znaczenie – błędne osie obrotu lub zbyt złożone modele obniżają liczbę klatek i realizm sceny. Automatyczny konwerter osi i skali w Unity zapewnia spójność modeli między środowiskami, usprawniając integrację i poprawiając jakość doświadczenia XR.

Wnioski

Badania ankietowe i analiza porównawcza interakcji w HoloLens 2 oraz Meta Quest 3 potwierdziły, że ergonomia i precyzja są kluczowe dla jakości doświadczenia immersyjnego. Użytkownicy wysoko ocenili komfort i naturalność interakcji (średnio 7,9/10), choć część z nich wskazała na zmęczenie przy dłuższym użytkowaniu. Około 30% badanych doświadczyło objawów choroby symulatorowej, co pokazuje, że latencja i stabilność obrazu nadal mają duży wpływ na komfort.

Najbardziej preferowaną metodą sterowania okazał się *hand tracking*, uznawany za naturalny, lecz mniej precyzyjny przy manipulacji małymi obiektami, co wskazuje na potrzebę dalszego rozwoju algorytmów predykcyjnych i filtrów ruchu. Z ergonomicznego punktu widzenia kluczowa pozostaje kalibracja postawy i dynamiczne dopasowanie strefy interakcji do wzrostu, a także wykorzystanie wielokanałowego sprzężenia zwrotnego – wizualnego, dźwiękowego i haptycznego.

Badania wykazały również znaczenie poprawnego potoku 3D – błędna orientacja modeli, skala czy punkty obrotu mogą zaburzać realizm interakcji. Wewnętrzny konwerter osi w Unity skutecznie eliminuje te błędy, zapewniając spójność modeli między środowiskami.

Podsumowując, wysoka jakość interakcji XR wymaga równoczesnej optymalizacji aspektów ergonomicznych i technicznych. Dalszy rozwój powinien koncentrować się na redukcji opóźnień, ulepszeniu śledzenia dłoni i wprowadzeniu adaptacyjnych mechanizmów dostosowujących interfejs do użytkownika, co pozwoli uczynić VR i MR środowiskami w pełni naturalnymi i komfortowymi.

Niniejsza praca stanowi empirycznie ugruntowaną podstawę do opracowania kompleksowej metodologii projektowania aplikacji XR o wysokiej ergonomii i precyzji, umożliwiając w przyszłości standaryzację procesu tworzenia naturalnych, transparentnych interfejsów użytkownika w środowiskach wirtualnej i mieszanej rzeczywistości.

Literatura

1. Bazargani, J. S., Choi, S.-M. (2025). *Multi-modal Interaction with Virtual Agents: A Pick-up and Placement Case Study*. IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces. <https://doi.org/10.1109/VRW66409.2025.00336>
2. Chen, Y., Wu, Z. (2022). A review on ergonomics evaluations of virtual reality. *WORK: A Journal of Prevention, Assessment & Rehabilitation*, 74(3), 831-841. <https://doi.org/10.3233/WOR-205232>
3. Ferrari, V., Condino, S., Nocera, A. (2023). *Proof of Concept of Using HoloLens 2 for AR Immersive Training in Complex Medical Scenarios*. IEEE International Conference on Metrology for eXtended Reality, Artificial Intelligence and Neural Engineering.
4. Han, S. Y., Kim, Y., Lee, S. H., Cho, N. I. (2019). *Pupil Center Detection Based on the UNet for the User Interaction in VR and AR Environments*. IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces.
5. Kim, H., Park, J.-H. (2014). *DuplicateSpace: Enhancing Operability of Virtual 3D Objects by Asymmetric Bimanual Interaction*. IEEE International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence.
6. Lysenko, S., Kachur, K. (2023). *Challenges Towards VR Technology: VR Architecture Optimization*. IEEE VR.
7. Miller, N., Willemsen, P., Feyen, R. G. (2018). *Comparing Interface Affordances for Controlling a Push Broom in VR*. IEEE VR.
8. Pakkanen, T., Hakulinen, J., Jokela, T., Rakkolainen, I. (2017). *Interaction with WebVR 360 Video Player: Comparing Three Interaction Paradigms*. IEEE Virtual Reality.
9. Pohl, D., Choudhury, N., Achtelik, M. (2018) *Concept for Rendering Optimizations for Full Human Field of View HMDs*. IEEE VR.
10. Sanders, N., Sener, E., Chen, K. B. (2023). Eliciting Ergonomic User-Defined Gestures for Virtual Reality: A Pilot Study. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 67(1), 1510-1515. <https://doi.org/10.1177/21695067231192530>
11. Souchet, A. D., Lourdeaux, D., Pagani, A., Rebenitsch, L. (2022). A narrative review of immersive virtual reality's ergonomics and risks at the workplace: cybersickness, visual fatigue, muscular fatigue, acute stress, and mental overload. *Virtual Reality*, 27(1). <https://doi.org/10.1007/s10055-022-00672-0>

12. Steed, A., Lai, J. (2025). Comparison of hand tracking-based and controller-based interaction in a consumer virtual reality game. *Virtual Reality*, 29(3). <https://doi.org/10.1007/s10055-025-01190-5>
13. Tian, H., Chanabo, W., Zhana, X. (2018). *A Realtime Virtual Grasping System for Manipulating Complex Objects*. IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, Reutlingen, Germany.
14. Tian, H., Wang, C., Manocha, D., Zhang, X. (2019). Realtime Hand-Object Interaction Using Learned Grasp Space for Virtual Environments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 25(8), 2623-2635. <https://doi.org/10.1109/tvcg.2018.2849381>
15. Tütüncü, E. K., Gonzalez-Franco, M., Gonzalez, E. J. (2025). *HandOver: Enabling Precise Selection & Manipulation of 3D Objects with Mouse and Hand Tracking*. Proceedings of the 38th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 1-11. <https://doi.org/10.1145/3746059.3747757>
16. Wang, K., Gao, Y., Song, W., Li, Y., Hao, A. (2024). *Gaze Pattern Genius: Gaze-Driven VR Interaction Using Unsupervised Domain Adaptation*. IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces.
17. Yu, R., Bowman, D. A. (2018). Force Push: Exploring Expressive Gesture-to-Force Mappings for Indirect 3D Object Manipulation. 2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), 733-734. <https://doi.org/10.1109/vr.2018.8446453>

Netografia

1. Purdue University. (2017). *Study on "gorilla arm"*. Pobrane z: <https://www.purdue.edu/newsroom/archive/releases/2017/Q2/study-researches-gorilla-arm-fatigue-in-mid-air-computer-usage.html> (data dostępu: 10.11.2025).
2. Wired. (2013). *John Carmack on latency*. Pobrane z: <https://www.wired.com/2013/02/john-carmacks-latency-mitigation-strategies/> (data dostępu: 10.11.2025).

Adrian Olszewski¹, mgr inż. Piotr Lichograj², Przemysław Olszewski³
Akademia Bialska im. Jana Pawła II, Biała Podlaska

https://doi.org/10.29316/9788368103281_6

WYZWANIA IMPLEMENTACJI INTERFEJSU UŻYTKOWNIKA W APLIKACJACH MR DO NAUKI JĘZYKÓW OBCYCH

CHALLENGES OF IMPLEMENTING A USER INTERFACE IN MR APPLICATIONS FOR FOREIGN LANGUAGE LEARNING

Streszczenie

Rozdział analizuje kluczowe wyzwania projektowe, ergonomiczne i technologiczne związane z implementacją interfejsów użytkownika (UI) w aplikacjach mieszanej rzeczywistości (MR) przeznaczonych do nauki języków obcych. Opracowanie łączy dane empiryczne z badania ankietowego przeprowadzonego na 41 respondentach z aktualnymi wynikami badań nad interakcją człowiek-komputer (HCI), percepcją przestrzeni 3D i skutecznością rzeczywistości rozszerzonej i mieszanej (XR) w edukacji językowej. W pracy przedstawiono szczegółowe omówienie problemów precyzji gestów, obciążenia poznawczego, płynności interakcji oraz komfortu użytkownika. Zaproponowano zestaw praktycznych wytycznych projektowych i metod ewaluacji zgodnych z zaleceniami ergonomii poznawczej oraz standardami IEEE w zakresie projektowania zorientowanego na człowieka (human-centered design).

Słowa kluczowe: rzeczywistość mieszana, interfejs użytkownika, ergonomia poznawcza, edukacja językowa

¹ student, e-mail: olszewski22900@stud.akademiabialska.pl

² <https://orcid.org/0000-0002-1351-4874>, e-mail: p.lichograj@dyd.akademiabialska.pl

³ student, e-mail: olszewski18321@stud.akademiabialska.pl

Abstract

This chapter examines the key design, ergonomic, and technological challenges involved in implementing user interfaces (UI) for mixed reality (MR) applications aimed at supporting foreign language learning. The study integrates empirical data from a survey of 41 participants with current research on human-computer interaction (HCI), 3D spatial perception, and the pedagogical effectiveness of augmented and mixed reality (XR) in language education. The paper provides an in-depth analysis of gesture precision, cognitive load, interaction fluidity, and user comfort. Furthermore, it proposes a set of practical design guidelines and evaluation methods grounded in cognitive ergonomics and aligned with IEEE standards for human-centred design. These insights offer a foundation for developing more intuitive, effective, and user-friendly MR learning environments.

Keywords: mixed reality, user interface, cognitive ergonomics, language learning

Wstęp

Mieszana rzeczywistość (MR), stanowiąca integrację technologii rzeczywistości wirtualnej (VR) i rozszerzonej (AR), staje się obiecującym narzędziem w dydaktyce języków obcych. MR umożliwia symulowane sytuacje komunikacyjne, kontekstowe oznaczanie obiektów, immersyjne ćwiczenia fonetyczne oraz praktykę w środowiskach półrealistycznych (Radianti i in., 2020; Parong, Mayer, 2018). Badania wskazują, że immersyjność zwiększa motywację, a przestrzenne osadzenie materiału językowego sprzyja utrwalaniu słownictwa (Chen, 2022).

Jednocześnie efektywność tych rozwiązań zależy w znacznej mierze od jakości interfejsu użytkownika – jego intuicyjności, ergonomii, precyzji gestów i spójności modalnej.

Metaanalizy wskazują na pozytywny wpływ XR na uczenie się języków. Chen (2022) raportuje duży efekt (Hedges' $g = 0.825$), potwierdzony przez niezależne analizy dotyczące VR-assisted learning ($g = 0.662$ dla wyników językowych i $g = 0.57$ dla motywacji; B. Chen, 2022). Wang i in. (2020) odnotowali efekt $g = 0.832$ dla środowisk typu 3D virtual worlds, co potwierdza istotność immersji w nauce języków. Jednakże wyniki są heterogeniczne – szersze metaanalizy edukacyjne wskazują na mniejszą wartość efektu ($g \approx 0.38$; Coban i in., 2022). Zróżnicowanie to sugeruje, że kluczową rolę odgrywa jakość projektu interfejsu.

Ramy teoretyczne i powiązane prace

Projektowanie interfejsów użytkownika w środowiskach rzeczywistości mieszanej opiera się na kilku komplementarnych perspektywach teoretycznych obejmujących obciążenie poznawcze, ucieleśnione poznanie, ograniczenia percepcyjne, zasady interakcji HCI oraz wyniki badań empirycznych nad gestami, złożonością wizualną i skutecznością XR w edukacji językowej.

Obciążenie poznawcze i multimodalność

Zgodnie z teorią obciążenia poznawczego Swellera (1988), efektywność interfejsu MR zależy od kontroli obciążenia wewnętrznego, zewnętrznego oraz właściwe procesy poznawcze (germane load), wspierającego procesy uczenia. W środowiskach MR obciążenie zewnętrzne może wzrastać wskutek nadmiernej złożoności sceny, zasłaniania obiektów, skomplikowanych menu czy nieczytelnych etykiet, co potwierdzają analizy dotyczące wpływu złożoności wizualnej i obszaru pola widzenia na czas selekcji i orientację przestrzenną (Ragan i in., 2015; Shuai i in., 2023). Jednocześnie odpowiednio zaprojektowana multimodalność może wspierać uczenie, o ile modalności nie konkurują o te same zasoby poznawcze, zgodnie z zasadami przetwarzania multimedialnego opisanymi przez Mayera (2001). Oznacza to konieczność eliminowania sygnałów redundantnych i stosowania mikroinformacji zwrotnych.

Ucieleśnione poznanie i uczenie osadzone

Ucieleśnione podejście do poznania zakłada nierozzerwalny związek percepcji, działania i procesów kognitywnych (Wilson, 2002). W kontekście nauki języków obcych oznacza to, że manipulacja obiektami 3D, ruch ciała oraz kontekstowe osadzanie słownictwa sprzyjają lepszemu kodowaniu i przypominaniu treści. Badania nad XR w edukacji językowej wskazują, że środowiska trójwymiarowe zwiększają motywację i wspierają transfer wiedzy (Chen, 2022; Wang i in., 2020; Panagiotidis, 2021). Jednocześnie literatura podkreśla, że podejścia oparte na działaniach motorycznych mogą generować dodatkowe obciążenie poznawcze, jeśli gesty wymagają wysokiej precyzji lub nie są jednoznacznie zinterpretowane pod względem możliwości działania, co wykazali Yu i Bowman (2018).

Percepcja przestrzenna i ograniczenia sensoryczne

Projektowanie MR musi uwzględniać ograniczenia percepcji wzrokowej, takie jak pole widzenia, stereopsja, ostrość obrazu oraz wrażliwość na zasłanianie obiektów. Ragan i in. (2015) wykazali, że redukcja pola widzenia (Field of View - FOV) oraz zwiększona złożoność wizualna pogarszają zdolność lokalizacji i zapamiętywania obiektów, co ma bezpośrednie implikacje dla zadań leksykalnych w MR. Z kolei Saredakis i in. (2020) wskazują, że niespójność wizualno-kinestetyczna oraz nadmierna dynamika ruchów kamery zwiększają ryzyko choroby symulatorowej (cybersickness), ograniczając akceptowalny czas trwania sesji edukacyjnych. Z praktycznego punktu widzenia wymaga to projektowania scen z wyraźnymi punktami odniesienia, stosowania narzędzi zarządzania zasłanianiem (np. panele kontrastowe, podświetlanie konturowe) oraz unikania manipulacji drobnymi obiektami w dalekim planie.

Zasady HCI w manipulacji i sterowaniu 3D

Klasyczne prawa HCI, takie jak prawo Fittsa (Fitts, 1954), są przydatne do modelowania czasu selekcji, lecz wymagają adaptacji do przestrzeni 3D, gdzie znaczenie mają także trajektorie ruchu i głębia. Steering Law (Accot, Zhai, 2002) wskazuje, że ścieżki prowadzące i ograniczenia przestrzenne determinują dokładność i szybkość manipulacji, co należy uwzględnić w projektowaniu „korytarzy ruchu” w MR. Taksonomie mapowań gestów podkreślają kompromis między naturalnością a precyzją – im bardziej ekspresyjne i otwarte mapowanie, tym trudniej o dokładną selekcję obiektów (Yu, Bowman, 2018). Wymusza to stosowanie mechanizmów kompensujących, takich jak filtracja drgań, predykcja trajektorii oraz tryby uproszczone przy niskiej jakości śledzenia.

Wyniki empiryczne: gesty, złożoność i skuteczność XR

Badania empiryczne wskazują trzy obszary szczególnie istotne dla projektowania UI:

- precyzja gestów – gesty naturalne zwiększają immersję, lecz są mniej precyzyjne niż interakcje pośrednie (Yu, Bowman, 2018). Oznacza to, że gesty sprawdzają się głównie w zadaniach komunikacyjnych, natomiast zadania testowe wymagają narzędzi precyzyjnych,
- złożoność wizualna – wysoki poziom detalu i zasłanianie obiektów wydłużają czas identyfikacji i podnoszą obciążenie poznawcze, co potwierdzają badania (Ragan i in., 2015; Shuai i in., 2023). Uproszczony rendering jest korzystniejszy w zadaniach leksykalnych,
- skuteczność XR w dydaktyce językowej – metaanalizy wykazują umiarkowane do dużych efekty przyrostu kompetencji językowych (Chen, 2022; Wang i in., 2020; B. Chen, 2022), choć ich wielkość zależy od jakości projektu dydaktycznego i interfejsu użytkownika, co pokazują także szerzej zakrojone analizy edukacyjne (Coban i in., 2022).

Modele integrujące – CAMIL i projektowanie oparte na dowodach

Model CAMIL (Makransky, Petersen, 2021) integruje wcześniej opisane perspektywy, wskazując, że efektywność uczenia w technologiach immersyjnych wynika z interakcji między kontrolą poznawczą, afektem i poczuciem immersji. Zgodnie z tym podejściem interfejs MR powinien minimalizować obciążenie zewnętrzne i wzmacniać procesy sprzyjające uczeniu poprzez adaptację poziomu szczegółowości, rodzaju interakcji oraz intensywności informacji zwrotnej. Kluczowe znaczenie ma także monitorowanie metryk technicznych, takich jak FPS, opóźnienia czy błędy śledzenia, co umożliwia projektowanie oparte na dowodach i pozwala identyfikować czynniki modelujące efektywność uczenia się (Slater, Wilbur, 1997).

Metodyka badań własnych

Celem badania było zidentyfikowanie kluczowych problemów projektowych i ergonomicznych w interfejsach MR wykorzystywanych w nauce języków obcych oraz ocena intuicyjności, precyzji, komfortu i użyteczności aplikacji edukacyjnej.

W ramach przygotowania środowiska badawczego opracowano prototypowy symulator poruszania się w przestrzeni rzeczywistości mieszanej (MR), przedstawiający wnętrze domu jednorodzinnego z podziałem na odrębne pomieszczenia pełniące funkcję scen dydaktycznych. Użytkownik mógł przemieszczać się pomiędzy pomieszczeniami, takimi jak kuchnia, pokój dzienny, łazienka czy sypialnia, eksplorując otoczenie w sposób zbliżony do rzeczywistego. Aplikacja została uruchomiona na urządzeniu HoloLens 2, wykorzystując wbudowany moduł śledzenia wzroku (eye-tracking) jako główny mechanizm interakcji (rysunek 1).



Rysunek 1. Scena widziana z poziomu użytkownika aplikacji. Aplikacja opisuje wskazany wzrokiem obiekt

Źródło: opracowanie własne.

Celem edukacyjnym aplikacji było poznawanie słownictwa z zakresu gospodarstwa domowego poprzez obserwowanie obiektów znajdujących się w poszczególnych pomieszczeniach. W momencie skierowania wzroku na wybrany element otoczenia system automatycznie wyświetlał jego nazwę w języku polskim i angielskim, a także odtwarzał nagranie wymowy, angażując równocześnie kanał wzrokowy i słuchowy. Rozwiązanie to umożliwiało kontekstowe uczenie się osadzone w realistycznej przestrzeni mieszkalnej.

Dodatkowo użytkownik mógł wchodzić w bezpośrednią interakcję z wirtualnymi przedmiotami – chwytać je, przenosić, obracać oraz manipulować prostymi mechanizmami. Interakcje te oparto na gestach rozpoznawanych przez HoloLens 2, co pozwalało badać zarówno intuicyjność

manipulacji obiektami, jak i ergonomię ruchową w środowisku MR. Dzięki temu symulator pełnił funkcję kompleksowej platformy do analizy poznawczej, motorycznej i językowej aktywności użytkownika.

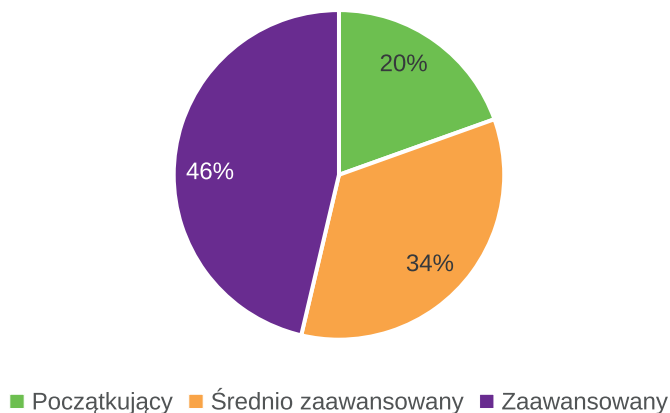
Badanie miało charakter eksploracyjny i obejmowało test interfejsu stworzonego w Unity 3D i uruchamianego na zestawie HoloLens 2 (rysunek 2). W pracy wykorzystano podejście mieszane: ankietę ilościową i analizę jakościową odpowiedzi otwartych.



Rysunek 2. Scena wykorzystana w badaniu

Źródło: opracowanie własne.

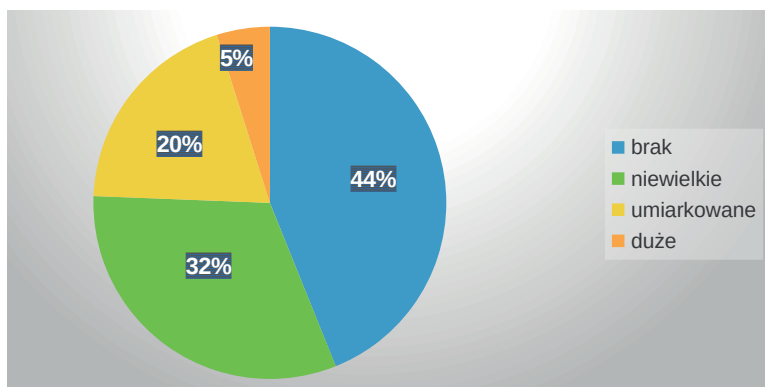
W badaniu uczestniczyło 41 osób (23 kobiety, 18 mężczyzn), głównie w wieku 18-25 lat (65%), co odpowiada typowej grupie użytkowników wykazującej wysoką gotowość adaptacyjną do MR. Kolejne 25% stanowiły osoby w wieku 26-35 lat, a 10% uczestników było starszych niż 35 lat. Poziom znajomości języków obcych był zróżnicowany: 46% określiło się jako średniozaawansowani, 34% jako zaawansowani, a 20% jako początkujący (rysunek 3).



Rysunek 3. Poziom znajomości języka obcego

Źródło: opracowanie własne.

Doświadczenie z MR okazało się niewielkie: 76% miało brak lub bardzo małe obycie z tą technologią, 19% umiarkowane, a 5% duże (rysunek 4).



Rysunek 4. Doświadczenie z technologią MR

Źródło: opracowanie własne.

Zastosowany kwestionariusz, oparty na literaturze z zakresu HCI i edukacji immersyjnej, składał się z trzech części:

- danych demograficznych i informacji o doświadczeniu technologicznym,

- dwunastu stwierdzeń ocenianych na pięciostopniowej skali Likerta dotyczących m.in. intuicyjności obsługi, czytelności ikon, estetyki, płynności przejść i komfortu fizycznego,
- pytań otwartych dotyczących elementów ułatwiających i utrudniających naukę oraz czynników dyskomfortu. Dodatkowo uczestnicy oceniali ogólne wrażenia z aplikacji w skali 1-10 oraz deklarowali gotowość do ponownego korzystania z MR.

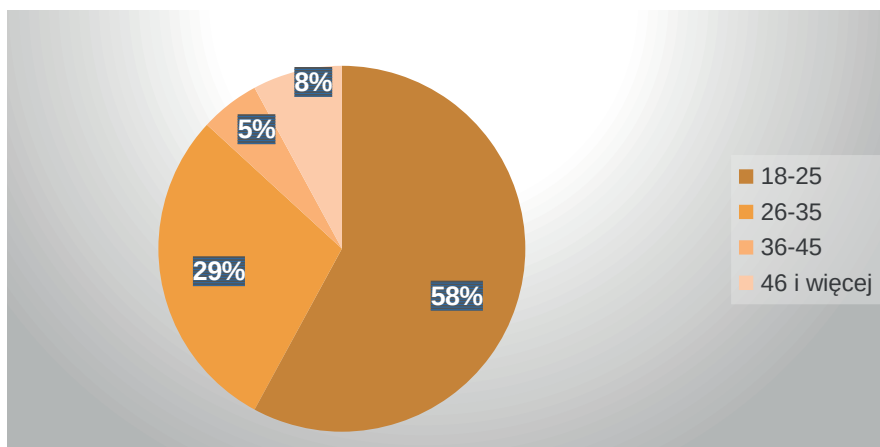
Choć próba była ograniczona liczebnie i obejmowała głównie osoby młode, zebrane dane pozwoliły uchwycić rzeczywiste trudności użytkowników. Ograniczeniem pozostaje zastosowanie jednego prototypu, co utrudnia pełne uogólnienia. Mimo to przyjęto metodologię, zgodną ze standardami badań HCI (ISO 9241-210:2019) oraz praktykami ewaluacji środowisk immersyjnych (VRUSE; Usoh i in., 1999), pozwalającą jednak na porównanie uzyskanych wyników z wcześniejszymi badaniami nad interfejsami edukacyjnymi XR (Makransky, Petersen, 2021; Panagiotidis, 2021). W ten sposób badanie stanowi wiarygodny punkt wyjścia do dalszych analiz ilościowych i eksperymentalnych, ukierunkowanych na optymalizację projektowania interfejsów MR w dydaktyce językowej.

Wyniki badań ankietowych

Badanie ankietowe dostarczyło danych dotyczących sposobu, w jaki użytkownicy postrzegali interfejs MR, napotykanych trudności oraz czynników wpływających na komfort i efektywność nauki języka obcego. Dane ilościowe połączono z obserwacjami i analizą wypowiedzi otwartych, co pozwoliło uzyskać pełniejszy obraz doświadczeń użytkowników.

Charakterystyka respondentów

Respondenci różnili się doświadczeniem językowym i technologicznym, a dominującą grupę stanowili młodzi dorośli (18-25 lat) bez wcześniejszego kontaktu z MR (rysunek 3). Taki profil redukuje efekt eksperta i pozwala analizować interakcję z interfejsem z perspektywy użytkownika początkującego. Zróżnicowany poziom znajomości języka umożliwił obserwację, jak kompetencje językowe wpływają na percepcję trudności poznawczych w środowisku MR.

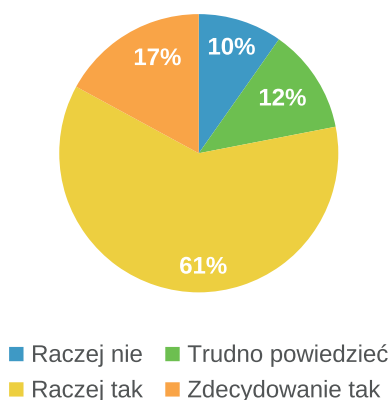


Rysunek 5. Struktura wieku uczestników

Źródło: opracowanie własne.

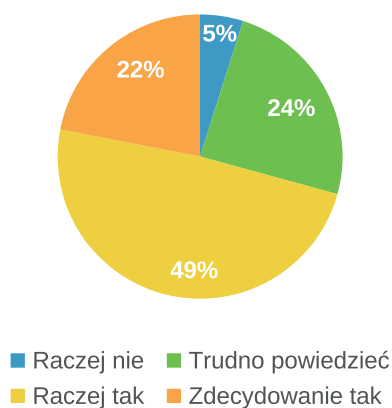
Ogólna ocena interfejsu

Większość uczestników oceniła interfejs pozytywnie: 78% uznało go za intuicyjny, 71% wskazało na sprzyjającą nauce kolorystykę, a 60% potwierdziło, że zadania i etykiety wspierały proces uczenia się (rysunek 6).



Rysunek 6. Ocena interfejsu aplikacji pod kątem intuicyjności i łatwości w obsłudze

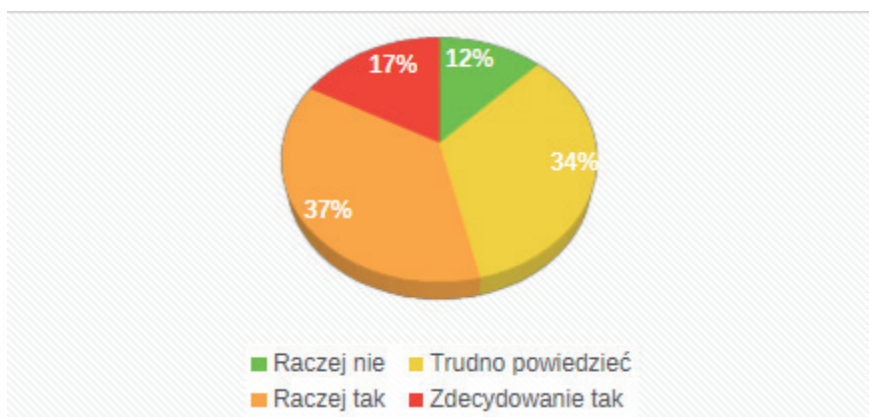
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 7. Ocena kolorystyki i kontrastu pod kątem zrozumienia treści

Źródło: opracowanie własne.

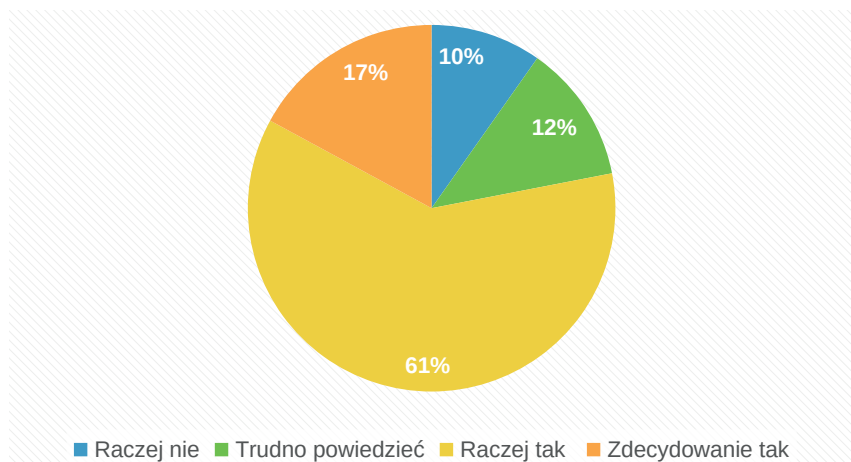
Niżej oceniono płynność przejść między zadaniami, co wiązało się z opóźnieniami reakcji systemu i brakiem natychmiastowego sprzężenia zwrotnego (rysunek 8).



Rysunek 8. Ocena płynności przejść między etapami lekcji

Źródło: opracowanie własne.

Jednocześnie 78% respondentów uznało rozmieszczenie elementów w przestrzeni za logiczne, zgodne z zasadami percepcji trójwymiarowej (rysunek 9).



Rysunek 9. Jakość logiki, rozmieszczenia elementów i płynność aplikacji

Źródło: opracowanie własne.

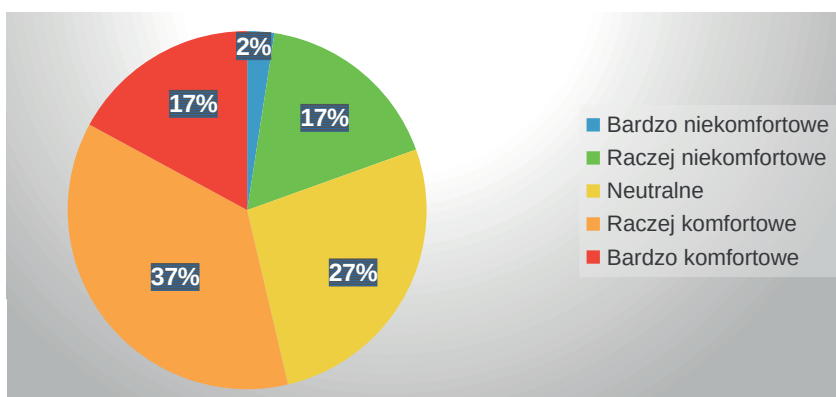
Ogólna ocena aplikacji wyniosła 7,48 (przy odchyleniu standardowym równym 1,1), a 95% badanych zadeklarowało gotowość dalszego korzystania z MR, co pozostaje zbieżne z obserwowaną w literaturze wysoką akceptacją technologii XR w edukacji (Chen, 2022; Wang i in., 2020).

Elementy problematyczne i bariery ergonomiczne

Najczęściej zgłaszanym problemem była niska precyzja rozpoznawania gestów (37%). Trudności te korespondują z wynikami badań nad gestami „hipernaturalnymi”, które zwiększają immersję, ale obniżają dokładność manipulacji (Yu, Bowman, 2018). Kolejne problemy obejmowały opóźnienia animacji, niejednoznaczne sygnały zakończenia zadań oraz błędne interpretowanie braku reakcji systemu jako błędu użytkownika, co wskazuje na niewystarczającą informacja zwrotna – kluczowy element skutecznej prezentacji informacji (Mayer, 2001). Problemy z czytelnością ikon, kontrastem i zagęszczeniem obiektów zwiększały obciążenie poznawcze zewnętrzne, zgodnie z założeniami teorii obciążenia poznawczego (Sweller, 1988).

Komfort fizyczny

Komfort użytkowania oceniono na 7,48/10, przy czym 64% uznało doświadczenie za komfortowe, a 19% za niekomfortowe. Najczęściej wymieniano zmęczenie oczu, konieczność długotrwałego unoszenia dłoni, opóźnienia śledzenia ruchu oraz dezorientację przestrzenną przy gwałtownych zmianach sceny. Zjawiska te odpowiadają mechanizmom choroby symulatorowej opisywanym w literaturze (Saredakis i in., 2020) oraz czynnikom takim jak liczba klatek na sekundę, pole widzenia czy złożoność sceny (Ragan i in., 2015). Uczestnicy podkreślali również potrzebę personalizacji – regulacji wielkości etykiet, poziomu szczegółowości sceny czy czułości gestów, co pozostaje zgodne z założeniami adaptacyjnych interfejsów MR (Makransky, Petersen, 2021; Panagiotidis, 2021).



Rysunek 10. Subiektywny komfort użytkowania MR

Źródło: opracowanie własne.

Syntetyczna interpretacja

Wyniki potwierdzają, że odpowiednio zaprojektowany interfejs MR zwiększa motywację i zaangażowanie uczniów. Największe wyzwania dotyczą jednak precyzji gestów, opóźnień reakcji i braku mikroinformacji zwrotnych, co może zwiększać obciążenie poznawcze (Sweller, 1988; Mayer, 2001). Pozytywne oceny dotyczące warstwy wizualnej sugerują zgodność z zasadami ergonomii percepcyjnej, jednak kluczowe trudności koncentrują się wokół interakcji i dynamiki informacji zwrotnej. Zgodnie z literaturą

skuteczność XR zależy przede wszystkim od jakości projektu dydaktycznego i interfejsu, a nie samej technologii (Chen, 2022; Coban i in., 2022).

Dyskusja wyników i implikacje dla projektowania interfejsów MR

Analiza wyników badania, zestawiona z literaturą dotyczącą HCI i edukacji immersyjnej, pozwala wskazać cztery kluczowe obszary wpływające na jakość interakcji w aplikacjach MR: naturalność interakcji, jakość informacji zwrotnej, złożoność wizualną oraz ergonomię fizyczną i dostępność.

Naturalność interakcji a precyzja sterowania

Użytkownicy wysoko oceniali immersyjny charakter interakcji gestowych, jednak zgłaszali trudności z precyzją wykonywania poleceń. Nadmierne „hipernaturalne” gesty mogą zwiększać wysiłek motoryczny i prowadzić do spadku efektywności uczenia się, co jest zgodne z założeniami ucieleśnionego poznania, które podkreśla konieczność równowagi między aktywnością ruchową a procesami poznawczymi (Wilson, 2002).

Zjawisko zmęczenia gestowego jest naturalnym skutkiem nadmiernego obciążenia układu ruchowego, co potwierdzają wcześniejsze modele immersji i obecności (Slater, Wilbur, 1997). W efekcie projektowanie interfejsów MR powinno łączyć intuicyjność gestów z mechanizmami zapewniającymi wysoką precyzję, np. dynamicznym przełączaniem metod interakcji.

Informacja zwrotna i kontrola poznawcza

Respondenci podkreślali znaczenie natychmiastowej i jednoznacznej informacji zwrotnej, której brak powodował dezorientację oraz obniżał płynność interakcji. Badania pokazują, że brak spójnego sprzężenia zwrotnego w środowisku 3D zwiększa obciążenie poznawcze i wydłuża czas reakcji (Ragan i in., 2015). Zgodnie z modelem CAMIL skuteczność środowisk immersyjnych zależy od równowagi między kontrolą poznawczą, afektem i immersją; mikroinformacja zwrotna pełni tu rolę kluczowego regulatora, podtrzymującego poczucie sprawstwa i orientację użytkownika (Makransky, Petersen, 2021). W badanym prototypie niedostateczna jakość mikroinformacji była jednym z głównych źródeł utraty kontroli poznawczej.

Złożoność wizualna i obciążenie poznawcze

Użytkownicy zgłaszali trudności wynikające z nadmiernego zagęszczenia elementów wizualnych, niskiego kontrastu lub zasłaniania. Zgodnie z teorią obciążenia poznawczego nadmiar bodźców zwiększa obciążenie zewnętrzne, utrudniając koncentrację na zadaniu dydaktycznym (Sweller, 1988). Wyniki badań potwierdzają, że wysoka złożoność sceny 3D wydłuża czas reakcji i obniża precyzję lokalizacji obiektów (Ragan i in., 2015).

W kontekście dydaktycznym oznacza to konieczność projektowania interfejsów MR umożliwiających redukcję złożoności wizualnej, np. poprzez wygaszanie elementów tła czy upraszczanie tekstur podczas zadań wymagających zwiększonej koncentracji.

Ergonomia fizyczna i dostępność

Mimo ogólnie dobrej oceny komfortu użytkowania część badanych doświadczała zmęczenia oczu, ramion i szyi, zwłaszcza podczas zadań wymagających utrzymywania rąk w polu widzenia czujników. Objawy dezorientacji przestrzennej potwierdzają znaczenie ergonomii fizycznej i właściwej adaptacji sceny do możliwości użytkownika i warunków otoczenia (rysunek 11).



Rysunek 11. Przykład sceny niedopasowanej do przestrzeni fizycznej

Źródło: opracowanie własne.

Z perspektywy dostępności zgłaszane trudności z małą skalą ikon czy brakiem personalizacji potwierdzają konieczność stosowania zasad projektowania uniwersalnego – w tym regulacji wielkości czcionek, kontrastu oraz alternatywnych metod interakcji (np. gaze-based interaction). Rozwiązania te sprzyjają równowadze między immersją a komfortem użytkownika, co jest kluczowe dla długotrwałego wykorzystania MR w edukacji.

Wnioski

Przeprowadzone badania potwierdzają, że kluczowym czynnikiem determinującym skuteczność aplikacji mieszanej rzeczywistości w nauce języków obcych jest jakość interfejsu użytkownika, a nie sam poziom zanurzenia technologicznego. O efektywności dydaktycznej decyduje przede wszystkim precyzja i płynność interakcji, niskie obciążenie poznawcze oraz komfort fizyczny użytkownika. Uczestnicy wysoko ocenili intuicyjność i przejrzystość interfejsu, jednak największe trudności sprawiały im problemy z dokładnością gestów i szybkością reakcji systemu. Wyniki te wskazują na konieczność stosowania hybrydowych modeli interakcji, które łączą naturalność gestów z precyzją tradycyjnych metod sterowania. Istotnym elementem skutecznego interfejsu jest natychmiastowa i jednoznaczna informacja zwrotna – wzrokowa, dźwiękowa i dotykowa – ponieważ brak reakcji systemu wywołuje frustrację i dezorientację. Z perspektywy ergonomii poznawczej fundamentalne znaczenie ma ograniczenie złożoności wizualnej środowiska i stosowanie zasad prostoty, które redukują zbędne obciążenie poznawcze i ułatwiają koncentrację na treściach edukacyjnych. Badanie potwierdziło również, że sesje edukacyjne w mieszanej rzeczywistości powinny być krótkie i modułowe, trwające maksymalnie 20-25 minut, ze względu na ryzyko zmęczenia wzroku i dezorientacji.

Ponadto użytkownicy oczekują wysokiej dostępności i możliwości dostosowania interfejsu, obejmującej regulację skali elementów, kontrastu czy czułości gestów, co jest zgodne z założeniami projektowania uniwersalnego oraz normami technicznymi dotyczącymi dostępności w technologiach rozszerzonej rzeczywistości. W wymiarze dydaktycznym mieszana rzeczywistość sprzyja zapamiętywaniu i motywacji, o ile interfejs jest ergonomicznie

i poznawczo zoptymalizowany. Łączenie inteligentnego dostosowywania, wielomodalnej informacji zwrotnej oraz wizualnej prostoty stanowi fundament projektowania skutecznych środowisk edukacyjnych w mieszanej rzeczywistości. Jednocześnie dalsze badania powinny obejmować kontrolowane eksperymenty nad wpływem różnych sposobów interakcji oraz integrację danych edukacyjnych z parametrami technicznymi systemu, co pozwoli opracować bardziej precyzyjne modele skuteczności interfejsów rozszerzonej i mieszanej rzeczywistości. Podsumowując, mieszana rzeczywistość ma wysoki potencjał dydaktyczny, jednak jego pełne wykorzystanie wymaga świadomego, ergonomicznego projektowania interfejsu użytkownika zgodnie z zasadami ergonomii poznawczej i ucieleśnionego uczenia się.

Literatura

1. Accot, J., Zhai, S. (1997). *Beyond Fitts' law: models for trajectory-based HCI tasks*. Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (s. 295-302). <https://doi.org/10.1145/258549.258760>
2. Chen, B., Wang, Y., Wang, L. (2022). The Effects of Virtual Reality-Assisted Language Learning: A Meta-Analysis. *Sustainability*, 14(6), 3147. <https://doi.org/10.3390/su14063147>
3. Chen, J., Dai, J., Zhu, K., Xu, L. (2022). Effects of extended reality on language learning: A meta-analysis. *Frontiers in Psychology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.1016519>
4. Coban, M., Bolat, Y. I., Goksu, I. (2022). The potential of immersive virtual reality to enhance learning: A meta-analysis. *Educational Research Review*, 36, 100452. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2022.100452>
5. Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47(6), 381-391. <https://doi.org/10.1037/h0055392>
6. Makransky, G., Petersen, G. B. (2021). The Cognitive Affective Model of Immersive Learning (CAMIL): a Theoretical Research-Based Model of Learning in Immersive Virtual Reality. *Educational Psychology Review*, 33, 937-958. <https://doi.org/10.1007/s10648-020-09586-2>
7. Mayer, R. E. (2001). *Multimedia Learning*. Cambridge University Press.
8. Panagiotidis, P. (2021). Augmented and Mixed Reality in Language Learning. *European Journal of Education*, 4(2), 28. <https://doi.org/10.26417/501ibq23c>

9. Parong, J., Mayer, R. E. (2018). Learning science in immersive virtual reality. *Journal of Educational Psychology*, 110(6), 785-797. <https://doi.org/10.1037/edu0000241>
10. Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda. *Computers & Education*, 147, 103778. Sciencedirect. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103778>
11. Ragan, E. D., Bowman, D. A., Kopper, R., Stinson, C., Scerbo, S., McMahan, R. P. (2015). Effects of Field of View and Visual Complexity on Virtual Reality Training Effectiveness for a Visual Scanning Task. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 21(7), 794-807. <https://doi.org/10.1109/tvcg.2015.2403312>
12. Saredakis, D., Szpak, A., Birkhead, B., Keage, H. A. D., Rizzo, A., Loetscher, T. (2020). Factors Associated With Virtual Reality Sickness in Head-Mounted Displays: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14(96). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00096>
13. Shuai, K., Li, Y., Liang, H.-N. (2023). *Effects of Object Complexity in Occlusion, Structure, and Texture on 3D Virtual Object Observation in Virtual Reality*. 2023 Asia Conference on Cognitive Engineering and Intelligent Interaction (CEII), 24-28. <https://doi.org/10.1109/ceii60565.2023.00013>
14. Slater, M., Wilbur, S. (1997). A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE): Speculations on the Role of Presence in Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(6), 603-616. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.6.603>
15. Sweller, J. (1988). Cognitive Load during Problem Solving: Effects on Learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257-285. https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4
16. Wang, C. pang, Lan, Y. J., Tseng, W. T., Lin, Y. T. R., Gupta, K. C. L. (2020). On the effects of 3D virtual worlds in language learning – a meta-analysis. *Computer Assisted Language Learning*, 33(8), 891-915. <https://doi.org/10.1080/09588221.2019.1598444>
17. Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(4), 625-636. <https://doi.org/10.3758/bf03196322>
18. Yu, R., Bowman, D. A. (2018). *Force Push: Exploring Expressive Gesture-to-Force Mappings for Indirect 3D Object Manipulation*. 2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), 733-734. <https://doi.org/10.1109/vr.2018.8446453>

Jakub Sawa¹, dr inż. Marcin Klimek²

Akademia Bialska im. Jana Pawła II, Biała Podlaska

https://doi.org/10.29316/9788368103281_7

OCENA WYDAJNOŚCI PRZEGLĄDARKI OBIEKTÓW PRZESTRZENNYCH NA WYBRANYCH URZĄDZENIACH RZECZYWISTOŚCI MIESZANEJ I MOBILNYCH

EVALUATION OF SPATIAL OBJECT BROWSER PERFORMANCE ON SELECTED MIXED REALITY AND MOBILE DEVICES

Streszczenie

Rozdział przedstawia analizę wydajności przeglądarki obiektów przestrzennych uruchamianej na urządzeniach mobilnych oraz platformie rzeczywistości mieszanej. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem autorskiej aplikacji testowej stworzonej w silniku Unity 2022.3 LTS, Celem analizy było określenie efektywności renderowania modeli trójwymiarowych o zróżnicowanej złożoności pod kątem utrzymania płynności animacji, obciążenia systemowego i stabilności termicznej urządzeń. Testy objęły urządzenia Meta Quest 3, Samsung Galaxy S20 FE, Samsung Galaxy Z Flip 3 oraz Xiaomi POCO F6. Zastosowano zestaw dziewięciu modeli 3D obejmujących zakres od 12 do 1 349 052 trójkątów, co umożliwiło identyfikację progów wydajnościowych dla poszczególnych

¹ student, e-mail: sawa23891@student.akademiabialska.pl

² e-mail: m.klimek@dyd.akademiabialska.pl

platform. Wyniki badań wskazują na różnice pomiędzy urządzeniami – najwydajniejszym okazał się POCO F6, który utrzymywał średnio 30.0 FPS obsługując wszystkie modele testowe. Meta Quest 3 wykazał systemowe ograniczenie do 24.0 FPS. Zidentyfikowano progi krytyczne wydajności przy 277 644 trójkątów dla urządzeń Samsung oraz przy 869 942 trójkątów dla POCO F6.

Słowa kluczowe: przeglądarka obiektów przestrzennych, renderowanie, urządzenia mobilne, rzeczywistość mieszana, Unity

Abstract

This chapter presents an analysis of the performance of a spatial object browser running on mobile devices and a mixed reality platform. The research was conducted using a proprietary test application created in Unity 2022.3 LTS. The aim of the analysis was to determine the rendering efficiency of three-dimensional models of varying complexity in terms of maintaining animation fluidity, system load and thermal stability of devices. The tests covered Meta Quest 3, Samsung Galaxy S20 FE, Samsung Galaxy Z Flip 3 and Xiaomi POCO F6 devices. A set of nine 3D models ranging from 12 to 1,349,052 triangles were used, which made it possible to identify performance thresholds for individual platforms. The results of the tests show differences between the devices – the POCO F6 proved to be the most efficient, maintaining an average of 30.0 FPS while running all test models. Meta Quest 3 showed a system limitation of 24.0 FPS. Critical performance thresholds were identified at 277,644 triangles for Samsung devices and 869,942 triangles for the POCO F6.

Keywords: spatial object browser, rendering, mobile devices, mixed reality, Unity

Wstęp

Technologie rzeczywistości rozszerzonej i mieszanej nabrały znaczenia w ciągu ostatnich lat dzięki rosnącej dostępności urządzeń o wysokiej wydajności obliczeniowej. Integracja technik renderowania 3D w urządzeniach mobilnych oraz autonomicznych headsetach umożliwiła tworzenie aplikacji, które dawniej wymagały komputerów stacjonarnych. Zwiększona moc procesorów i układów graficznych, m.in. serii Qualcomm Snapdragon, pozwala na płynne wizualizacje modeli o wysokiej szczegółowości.

Przeglądarki obiektów przestrzennych stanowią kluczowe narzędzie w wielu sektorach, w tym medycynie, architekturze, edukacji i przemyśle. Ich funkcje obejmują m.in. ładowanie modeli 3D, manipulację obiektami, analizę konstrukcji czy obsługę wizualizacji interaktywnych. W miarę wzrostu

oczekiwań użytkowników i wzrostu złożoności danych przestrzennych, coraz większą rolę odgrywa wydajność systemu oraz responsywność interfejsu.

Analiza dostępnej literatury wskazuje, że istniejące opracowania koncentrują się na pojedynczych platformach sprzętowych lub wykorzystują ograniczone zestawy modeli testowych. Analizowana jest wydajność aplikacji mobilnych (Nowak, Wiśniewski, 2021), ale bez uwzględnienia platform rzeczywistości mieszanej. Deweloperzy aplikacji XR potrzebują obiektywnych danych o wydajności różnych platform sprzętowych przy renderowaniu modeli o zróżnicowanej złożoności geometrycznej.

Kluczowym wyzwaniem metodologicznym stanowi porównanie wydajności między różnymi architekturami aplikacji. Pierwotnie planowana implementacja dual architecture natywne aplikacje VR dla urządzeń MR oraz osobne aplikacje mobilne dla smartfonów – wprowadza nieścisłości pomiarowe wynikające z różnic implementacyjnych. W dokumentacji Unity Technologies (Unity Technologies, 2022) znajduje się stwierdzenie, że porównywanie wyników wydajnościowych między różnymi architekturami aplikacji prowadzi do zniekształcenia wniosków badawczych.

Rozwiązaniem metodologicznym jest opracowanie jednolitej aplikacji testowej działającej w trybie 2D na systemie Android dla wszystkich platform docelowych. Takie podejście eliminuje zmienne związane z różnicami architektonicznymi i umożliwia bezpośrednie porównanie wpływu możliwości sprzętowych urządzeń na wydajność identycznej aplikacji. Meta Quest 3 testowane w trybie kompatybilności Android zachowuje porównywalność z urządzeniami mobilnymi przy wykorzystaniu zaawansowanych możliwości sprzętowych dedykowanego procesora Snapdragon XR2 Gen 2.

Celem pracy jest opracowanie aplikacji testowej do oceny wydajności przeglądarki obiektów przestrzennych oraz przeprowadzenie analizy porównawczej na wybranych urządzeniach mobilnych i rzeczywistości mieszanej. W ramach prac zaimplementowano system monitorowania parametrów wydajnościowych, przygotowano zestaw modeli testowych o zróżnicowanej złożoności geometrycznej oraz przeprowadzono pomiary na urządzeniach reprezentujących różne kategorie sprzętowe na urządzeniach z systemem Android: Xiaomi POCO F6 (Snapdragon 8s Gen 3, Adreno 735), Samsung Galaxy Z Flip 3 (Snapdragon 888, Adreno 660), Samsung Galaxy S20 FE

(Snapdragon 865, Adreno 650) oraz Meta Quest 3 (Snapdragon XR2 Gen 2, Adreno 740) w trybie kompatybilności Android.

Aby dokonać obiektywnej oceny wydajności przeglądarki obiektów przestrzennych na różnych platformach sprzętowych stworzono jedno środowisko operacyjne eliminując różnice wynikające ze specyfiki interfejsów XR. Jako metryki użyto: liczby klatek na sekundę FPS (ang. Frames Per Second, statystyka pozwalająca określić, ile nowych klatek jest wyświetlane w ciągu jednej sekundy), wykorzystanie CPU i GPU, zużycie RAM oraz temperatury urządzeń podczas renderowania modeli o zróżnicowanej złożoności geometrycznej.

Przegląd badań

Współczesne przeglądarki modeli 3D umożliwiają interaktywną prezentację obiektów, ich manipulację i analizę w czasie rzeczywistym. Są stosowane w wielu dziedzinach przemysłu, szczególnie tam, gdzie kluczowe jest przedstawienie struktury przestrzennej obiektu. Rozwój technologii mobilnych i XR umożliwił wykorzystanie przeglądarek poza tradycyjnymi systemami desktopowymi.

Przeglądarki te wymagają bardzo efektywnego zarządzania zasobami, ponieważ operują na modelach o złożonej geometrii, często wyposażonych w szczegółowe tekstury i zaawansowane materiały. Największym wyzwaniem podczas renderowania jest utrzymanie stabilnej liczby klatek na sekundę, co bezpośrednio wpływa na komfort użytkownika.

Potok grafiki 3D obejmuje szereg etapów przetwarzania – od transformacji wierzchołków, poprzez rasteryzację, aż po obliczenia shaderów i finalne wyświetlenie. Każdy etap obciąża układ graficzny, a czas jego wykonania rośnie wraz ze złożonością modelu. Liczba trójkątów oraz złożoność shaderów uchodzą za główne determinanty wydajności.

W praktyce użytkownicy oczekują renderowania w przedziale 30-60 FPS. Spadki poniżej 30 FPS zauważalnie obniżają jakość odbioru, a w przypadku headsetów XR mogą prowadzić do dyskomfortu fizycznego.

Współczesne przeglądarki obiektów przestrzennych stanowią złożone systemy renderowania czasu rzeczywistego, działające na urządzeniach

o znacznie różniących się parametrach sprzętowych. Urządzenia mobilne, smartfony oraz autonomiczne zestawy rzeczywistości mieszanej (XR) oferują odmienne możliwości obliczeniowe, architekturę podsystemów graficznych oraz strategie zarządzania energią. Ocena wydajności takich aplikacji wymaga zrozumienia kluczowych czynników wpływających na płynność renderowania, zużycie zasobów oraz ogólny komfort użytkownika. Najważniejsze czynniki determinujące działanie przeglądarek 3D obejmują złożoność geometryczną modeli, strukturę materiałów i tekstur, architekturę GPU i CPU, techniki optymalizacyjne oraz metody pomiaru oraz profilowania (Akenine-Möller, Haines, Hoffman, 2018).

Z punktu widzenia technologii renderowania czasu rzeczywistego, złożoność geometryczna stanowi najważniejszy czynnik wpływający na wydajność przeglądarek obiektów przestrzennych. Modele 3D składają się z trójkątów oraz wierzchołków, które muszą zostać każdorazowo przetworzone podczas wyświetlania sceny. W praktyce to właśnie liczba elementów siatki, ich rozmieszczenie oraz konstrukcja materiałowa wpływają na obciążenie poszczególnych etapów potoku renderowania.

W fazie przetwarzania wierzchołków GPU wykonuje transformacje przestrzenne, obliczenia macierzy oraz przygotowanie danych do etapu rasteryzacji. Każdy dodatkowy wierzchołek zwiększa czas obliczeń w sposób liniowy (Shreiner, Woo, Neider, Davis, 2013). W praktyce oznacza to, że modele zawierające kilkaset tysięcy wierzchołków mogą znacząco wydłużać czas renderowania klatek szczególnie na urządzeniach o ograniczonej mocy GPU, takich jak średniej klasy smartfony.

Rasteryzacja trójkątów jest obciążająca zwłaszcza dla modeli zawierających dużą liczbę niewielkich, gęsto upakowanych elementów siatki. Badania wykazują, że już przekroczenie progu około 100 tysięcy trójkątów zauważalnie obniża płynność renderowania na urządzeniach mobilnych (Azuma i in., 2001; Smith, Brown, 2020). Platformy XR charakteryzują się co prawda większą przepustowością GPU, lecz obciążenie jest dodatkowo zwiększane przez renderowanie stereoskopowe.

Po rasteryzacji każdy fragment (piksel) wymaga obliczeń shaderów odpowiedzialnych za oświetlenie, tekstury oraz efekty materiałowe. Ten etap potoku renderowania jest szczególnie kosztowny w przypadku modeli

z wieloma materiałami oraz złożonymi shaderami PBR (ang. Physically Based Rendering). Na GPU urządzeń mobilnych obliczenia cieniowania mogą odpowiadać nawet za 60% całkowitego czasu renderowania (Akenine-Möller, Haines, Hoffman, 2018).

Liczba elementów geometrycznych nie jest jedynym istotnym parametrem. Znaczącą rolę odgrywa liczba submesh i materiałów przypisanych do jednego modelu. Każdy submesh generuje odrębne wywołanie rysowania (draw call), co tworzy dodatkowy narzut na CPU. Narzut ten wynosi około 0,3-0,7 ms na jedno wywołanie (Kowalski, 2022), co sprawia, że liczba draw calls jest często bardziej ograniczająca niż liczba trójkątów. Dla urządzeń mobilnych zaleca się nieprzekraczanie progu 100-150 wywołań na klatkę (Akenine-Möller, Haines, Hoffman, 2018).

Urządzenia mobilne oraz zestawy XR (np. Meta Quest 3) znacząco różnią się architekturą sprzętową, co wpływa na ich możliwości renderowania modeli 3D. W praktyce prowadzi to do odmiennych profili wydajnościowych nawet przy identycznych aplikacjach i tych samych modelach testowych.

Najnowsze urządzenia XR korzystają z układów projektowanych specjalnie z myślą o aplikacjach przestrzennych. Meta Quest 3, bazujący na Snapdragon XR2 Gen 2, oferuje szereg optymalizacji sprzętowych i programowych ukierunkowanych na renderowanie stereoskopowe i obliczenia graficzne (Wang, Sun, 2018). W praktyce przekłada się to na 2540% wyższą wydajność w renderowaniu modeli 3D w porównaniu ze smartfonami o podobnej mocy obliczeniowej.

Z drugiej strony smartfony mogą przeznaczyć całość zasobów GPU na renderowanie modeli 3D, ponieważ nie wykonują kosztownych obliczeń związanych z mapowaniem i śledzeniem przestrzennym. Dzięki temu osiągają korzystne wyniki w scenariuszach krótkotrwałego obciążenia. Jednakże architektura systemów chłodzenia – w smartfonach znacznie uboższa niż w zestawach XR – sprawia, że ich wydajność podlega szybkiemu throttlingowi. Procesy te absorbują łącznie nawet 25-30% zasobów GPU i CPU, co obniża efektywnie dostępny budżet obliczeniowy dla samego renderowania modeli 3D. Mimo przewagi sprzętowej XR, to dodatkowe obciążenie może prowadzić do sytuacji, w której smartfon osiąga wyższą liczbę FPS przy

prostych modelach, podczas gdy XR zachowuje przewagę przy geometrii bardziej złożonej.

Zgodnie z analizą (Jerald, 2015), modele liczące ponad 250 tysięcy trójkątów zwiększają zużycie energii o 40-60%, co prowadzi do szybkiego podgrzewania układu SoC (ang. System on a Chip). Smartfony zazwyczaj aktywują mechanizmy redukcji taktowania po 5-10 minutach intensywnego renderowania (Buchwald, 2020). Zestawy XR posiadają wydajniejsze systemy odprowadzania ciepła, dzięki czemu mogą utrzymywać stabilną wydajność przez dłuższy czas.

Drugą najważniejszą grupą czynników wpływających na wydajność przeglądarek obiektów przestrzennych są tekstury i materiały. Modele wykorzystywane w nowoczesnych aplikacjach często bazują na materiałach PBR, korzystających z wielu map tekstur.

Tekstury o rozdzielczości 4096×4096 pikseli mogą zajmować znaczną część pamięci dostępnej dla GPU. Przekroczenie pojemności pamięci operacyjnej lub pamięci podręcznej GPU prowadzi do transferów pomiędzy RAM a VRAM, co skutkuje drastycznym spadkiem płynności (Colborne, 2011).

Urządzenia mobilne, dysponujące ograniczoną ilością pamięci i znacznie mniejszą przepustowością magistrali pamięci niż komputery stacjonarne, są szczególnie wrażliwe na duże tekstury i częste zmiany materiałów.

Materiał PBR wymaga intensywnych obliczeń związanych z odbiciami światła, rozproszeniem, mapami normalnych i prawidłową transformacją przestrzeni. Na urządzeniach mobilnych przeciętny model PBR może zużywać nawet ponad połowę czasu renderowania klatki (Akenine-Möller, Haines, Hoffman, 2018).

W obliczu ograniczeń sprzętowych urządzeń mobilnych i XR kluczowe znaczenie mają techniki optymalizacji stosowane w przeglądarkach obiektów przestrzennych. Wskazywane jest kilka metod szczególnie skutecznych w tym kontekście.

- Level of Detail (LOD) – mechanizm LOD polega na przełączaniu pomiędzy różnymi wariantami siatki w zależności od odległości obiektu od kamery. Badania wykazują możliwość redukcji kosztów renderowania nawet o 40-70% przy minimalnej utracie jakości (Akenine-Möller, Haines, Hoffman, 2018).

- Occlusion curling – technika ta pomija renderowanie obiektów przesłoniętych. Jest szczególnie skuteczna w scenach z dużą liczbą modeli 3D, gdzie typowa redukcja przetwarzanej geometrii wynosi 30-50% (Marrs, Shirley, Wald, 2021).
- GPU instancing i batching – łączenie obiektów wykorzystujących ten sam materiał oraz renderowanie wielu kopii tego samego modelu jednocześnie znacząco redukuje narzut CPU, można uzyskać nawet 90% redukcję draw calls oraz wzrost FPS o 30-45% (Cignoni i in., 2008).
- Adaptacyjne renderowanie – nowoczesne przeglądarki 3D monitorują wydajność w czasie rzeczywistym. Algorytmy adaptacyjne zmieniają rozdzielczość renderowania, poziomy LOD oraz intensywność post-processingu 5-10 razy na sekundę, utrzymując stabilną liczbę klatek (Nowak, Wiśniewski, 2021). Rozwiązania tego typu są szczególnie istotne na urządzeniach mobilnych, gdzie obciążenie potrafi gwałtownie wzrosnąć w zależności od modelu 3D.
- Foveated rendering – technika ta, charakterystyczna dla urządzeń XR, redukuje dokładność renderowania w obszarach nieobjętych bezpośrednim skupieniem wzroku użytkownika. W trakcie manipulacji modelami obniżenie jakości w peryferiach może redukować obciążenie GPU nawet o 50-70% (Cummings, Bailenson, 2016).

Ocena wydajności przeglądarek obiektów przestrzennych wymaga stosowania różnorodnych metod łączących monitorowanie czasu rzeczywistego, profilowanie oraz analizę danych po zakończeniu sesji testowej. Do szybkiej diagnozy problemów wykorzystuje się m.in.: nakładki diagnostyczne wyświetlające FPS i obciążenie GPU, znaczniki czasowe mierzące czas wybranych etapów renderowania. Profilery CPU i GPU dostarczają szczegółowych informacji o transformacjach geometrycznych, czasie wykonania shaderów, wykorzystaniu pamięci przez siatki i tekstury, liczbie wywołań rysowania (Colborne, 2011; Kowalski, 2022). Specjalistyczne narzędzia, takie jak Snapdragon Profiler czy Unity GPU Profiler, pozwalają wyodrębnić wąskie gardła renderowania modeli 3D. zależności pomiędzy złożonością modeli a spadkami wydajności (Garcia, Lopez, 2019). Łączenie różnych metod pozwala na kompleksowe zrozumienie zachowania przeglądarki 3D na różnych platformach sprzętowych.

Przeglądarki obiektów przestrzennych działające na urządzeniach mobilnych i XR podlegają złożonym uwarunkowaniom wydajnościowym wynikającym zarówno z parametrów modeli 3D, jak i charakterystyki sprzętu. Najważniejszym czynnikiem determinującym wydajność jest złożoność geometryczna modeli, podczas gdy draw calls, tekstury oraz złożone materiały PBR stanowią dodatkowe istotne obciążenia.

Urządzenia XR dysponują większą mocą obliczeniową, lecz część zasobów przeznaczają na procesy śledzenia przestrzennego, co zmienia ich profil wydajnościowy. Z kolei smartfony osiągają wysoką chwilową wydajność, lecz są podatne na przegrzewanie i throttling. Optymalizacja aplikacji wymaga stosowania technik takich jak LOD, occlusion culling, batching, instancing oraz adaptacyjne renderowanie. Rzetelna ocena wydajności wymaga natomiast połączenia profilowania CPU i GPU, monitorowania czasu rzeczywistego oraz analizy logów po zakończeniu testów. Zestawienie tych czynników tworzy solidną podstawę metodologiczną do badań porównawczych przeglądarek obiektów przestrzennych w środowisku urządzeń mobilnych oraz XR.

Metodyka badań

Celem badań była ocena wydajności przeglądarki modeli 3D działającej na różnych urządzeniach bez zmieniania architektury aplikacyjnej. W tym celu stworzono program testowy w Unity 2022.3 LTS działający w trybie Android 2D, co umożliwiło uruchomienie identycznego kodu na wszystkich platformach. Meta Quest 3 został przetestowany w trybie kompatybilności Android, nie w natywnym VR. To podejście eliminuje różnice implementacyjne między platformami i zapewnia identyczną architekturę aplikacji na każdym urządzeniu testowym.

Testy przeprowadzono na urządzeniach reprezentujących różne generacje wydajności mobilnej, dzięki czemu możliwe było porównanie ich w szerokim zakresie zastosowań (tabela 1). Teoretyczny ranking wydajności GPU według specyfikacji producentów to Adreno 740 > 735 > 660 > 650. Meta Quest 3 posiada najnowszy dedykowany układ XR, POCO F6 wykorzystuje najnowszą mobilną architekturę z 2024 roku, Samsung Galaxy Z Flip 3

reprezentuje wysoką klasę z 2021 roku, a Samsung Galaxy S20 FE stanowi średnią klasę z 2020 roku.

Tabela 1. Specyfikacja techniczna urządzeń testowych

Urządzenie	Model systemowy	Procesor	GPU	RAM
Samsung Galaxy S20 FE	SM-G780G	Snapdragon 865	Adreno 650	6GB
Samsung Galaxy Z Flip 3	SM-F711B	Snapdragon 888	Adreno 660	8GB
Xiaomi POCO F6	24069PC21G	Snapdragon 8s Gen 3	Adreno 735	12GB
Meta Quest 3	Oculus Quest	Snapdragon XR2 Gen 2	Adreno 740	8GB

Źródło: opracowanie własne.

Do testów wykorzystano dziewięć modeli 3D, których złożoność mieściła się w zakresie 12-1349052 trójkątów. Każdy model reprezentował inny poziom szczegółowości, od prostych prymitywów po skomplikowane konstrukcje mechaniczne (tabela 2). Wykorzystano m.in. gotowe modele Stanford oraz Utah Teapot zapewniając porównywalność wyników z istniejącą literaturą naukową w obszarze grafiki komputerowej. Stanford Bunny i Stanford Dragon stanowią uznane benchmarki wydajnościowe stosowane od lat 90 (Turk, Levoy, 1995; Curless, Levoy, 1996).

Tabela 2. Parametry modeli testowych

Model	Trójkąty	Wierzchołki	Kategoria złożoności
Cube	12	24	Bardzo niska
Sphere	768	515	Niska
Cylinder	5 292	10,71	Niska-średnia
Utah_Teapot	17 382	8 706	Średnia
Stanford_Bunny	69 451	34 838	Średnia-wysoka
Wkład_u-rurowy	74 766	36 125	Średnia-wysoka
Zbiornik	277 644	138 106	Wysoka
Stanford_Dragon	869,942	1 384 338	Bardzo wysoka
System_rurowy	1 349 052	666 626	Ultrawysoka

Źródło: opracowanie własne.

Monitorowano następujące metryki: FPS (średni), wykorzystanie CPU, wykorzystanie GPU, zużycie RAM, temperatura urządzenia.

Wyniki eksperymentów

Wydajność FPS

Meta Quest 3 utrzymywał stałe 24 FPS, co wskazuje na systemowy limit odświeżania w trybie Android. Wyniki pomiarów liczby klatek na sekundę (FPS), zestawione w tabeli 3, ukazały różnice pomiędzy badanymi urządzeniami. Meta Quest 3 utrzymywał stały poziom 24,0 FPS, co odpowiada czasowi renderowania pojedynczej klatki wynoszącemu 41,7 ms. Jest to konsekwencja ograniczeń podczas działania w środowisku kompatybilności Android. Smartfony biorące udział w badaniu uzyskiwały średnio około 30 FPS, z czasem renderowania bliskim 33,3 ms. Najwyższą wydajność uzyskał POCO F6, który utrzymywał średnio 30 FPS dla wszystkich modeli. Urządzenia Samsung notowały spadki wydajności po przekroczeniu progu ok. 277 644 trójkątów.

Tabela 3. FPS średnie/min/max dla trzech pomiarów dla różnych urządzeń i modeli

Model	Samsung Galaxy S20 FE	Samsung Galaxy Z Flip 3	Xiaomi POCO F6	Meta Quest 3
Cube	29.9 / 29.9 / 29.9	30.0 / 28.4 / 30.0	29.5 / 28.4 / 30.1	24.0 / 24.0 / 24.0
Sphere	29.9 / 29.9 / 29.9	30.0 / 28.4 / 30.0	30.1 / 30.1 / 30.1	24.0 / 24.0 / 24.0
Cylinder	29.9 / 29.9 / 29.9	30.0 / 28.4 / 30.0	30.1 / 30.1 / 30.1	24.0 / 24.0 / 24.0
Utah_Teapot	29.9 / 29.9 / 29.9	30.0 / 28.4 / 30.0	30.1 / 30.1 / 30.1	24.0 / 24.0 / 24.0
Stanford_Bunny	29.9 / 29.9 / 30.0	30.0 / 28.4 / 30.0	20.2 / 30.1* / 30.1	24.0 / 24.0 / 24.0
Wklad_u-rurowy	29.9 / 29.9 / 29.9	30.6 / 28.4 / 32.6	30.1 / 29.8 / 30.1	24.0 / 24.0 / 24.0
Zbiornik	29.9 / 29.9 / 29.9	30.6 / 28.4 / 32.6	30.1 / 30.0 / 30.1	24.0 / 24.0 / 24.0
Stanford_Dragon	29.7 / 29.0 / 29.9	30.6 / 28.4 / 32.6	29.8 / 28.5 / 30.1	24.0 / 24.0 / 24.0
System_rurowy	29.6 / 29.0 / 30.0	30.6 / 28.4 / 32.6	29.9 / 29.3 / 30.1	23.9 / 23.5 / 24.0

Źródło: opracowanie własne.

Temperatura

Różnice temperatur pomiędzy urządzeniami były znaczące. Meta Quest 3 podczas testów pracował w zakresie 48-58°C, co pokazuje, że dedykowane chłodzenie zoptymalizowane dla aplikacji VR nie zapobiega wzrostowi temperatur w trybie Android. Smartfony natomiast pozostawały znacznie chłodniejsze – POCO F6 osiągał temperatury 31-32°C (jedynie dla modelu

Satnford_Dragon 29,8°C), Galaxy Z Flip 3 około 32°C, a Galaxy S20 FE od 27 do 33°C. W praktyce oznacza to, że zestaw VR był średnio o 50-75% cieplejszy niż urządzenia mobilne. Podwyższona temperatura Meta Quest 3 wynikała przede wszystkim z większego obciążenia procesora w trybie zgodności, podczas gdy smartfony wykazywały wyższą efektywność energetyczną w aplikacjach działających w 2D. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Temperatura urządzeń [°C] dla różnych modeli testowych

Model	Samsung Galaxy S20 FE	Samsung Galaxy Z Flip 3	Xiaomi POCO F6	Meta Quest 3
Cube	31.1	30.3	31.7	48.0
Sphere	31.1	30.3	31.7	48.0
Cylinder	31.1	30.3	31.8	48.0
Utah_Teapot	31.1	30.3	31.9	48.0
Stanford_Bunny	31.1	30.3	31.9	58.0
Wkład_u-rurowy	28.9	30.5	32.2	55.0
Zbiornik	28.9	30.5	32.3	53.0
Stanford_Dragon	28.9	30.5	29.8	48.0
System_rurowy	29.4	30.5	32.1	48.5

Źródło: opracowanie własne.

Zużycie zasobów

Zależność pomiędzy obciążeniem GPU a złożonością renderowanych modeli jest zaprezentowana w tabeli 5. Meta Quest 3 wykazywał wzrastające obciążenie GPU: 0,2% dla Cube, 11,5% dla Sphere, 79,4% dla Cylinder, a następnie stałe 100% dla modeli od Utah_Teapot wzwyż. Wzorzec obciążenia był identyczny z urządzeniami mobilnymi.

Urządzenia mobilne wykazywały obciążenie GPU od około 0,2% przy najprostszych modelach do 100% w przypadku obiektów bardziej złożonych. Kluczowy punkt przecięcia zidentyfikowano dla modelu Utah_Teapot (17 382 trójkąty). Proste modele, takie jak Cube, Sphere czy Cylinder, nie wywoływały pełnego obciążenia GPU, natomiast obiekty o średniej i dużej szczegółowości praktycznie zawsze osiągały maksymalny poziom wykorzystania zasobów.

Tabela 5. Wykorzystanie GPU [%] dla różnych urządzeń i modeli

Model	Samsung Galaxy S20 FE	Samsung Galaxy Z Flip 3	Xiaomi POCO F6	Meta Quest 3
Cube	0.2	0.2	0.2	0.2
Sphere	11.5	11.5	11.5	11.5
Cylinder	79.4	79.4	79.4	79.4
Utah_Teapot	100.0	100.0	100.0	100.0
Stanford_Bunny	100.0	100.0	100.0	100.0
Wklad_u-rurowy	100.0	100.0	100.0	100.0
Zbiornik	100.0	100.0	100.0	100.0
Stanford_Dragon	100.0	100.0	100.0	100.0
System_rurowy	100.0	100.0	100.0	100.0

Źródło: opracowanie własne.

Zużycie pamięci operacyjnej dla różnych urządzeń i modeli testowych przedstawione jest w tabeli 6. Meta Quest 3 okazuje się najbardziej efektywny pod względem wykorzystania pamięci. Smartfony Samsung zachowują się przewidywalnie, a ich zużycie pamięci rośnie w sposób proporcjonalny do złożoności modeli. POCO F6 wykazywał najwyższe bazowe zużycie RAM (21-22 MB) dla prostych modeli. Pozostałe urządzenia charakteryzowały się około 6 MB bazowo. Meta Quest 3 utrzymywał najbardziej stabilne zarządzanie pamięcią z minimalnymi wahaniami w zakresie 5,3-5,4 MB dla większości modeli.

Tabela 6. Zużycie pamięci operacyjnej [MB] dla różnych urządzeń i modeli

Model	Samsung Galaxy Z Flip 3	Samsung Galaxy S20 FE	Xiaomi POCO F6	Meta Quest 3
Cube	5.5-5.6	5.7-6.1	5.5-21.6	5.4
Sphere	5.6-6.4	5.6-6.6	5.8-22.7	5.4
Cylinder	6.4-8.2	7.3-8.6	7.3-8.6	5.4
Utah_Teapot	7.8-8.2	7.4-8.7	7.4-8.7	5.4
Stanford_Bunny	7.8-8.2	6.7-8.6	7.6-8.5	5.3-5.4
Wklad_u-rurowy	5.5-5.7	5.9-6.3	5.7	5.3-5.4
Zbiornik	8.9-14.1	9.4-14.1	8.9	5.5-8.6
Stanford_Dragon	15.5-19.8	15.6-20.8	15.6-22.6	5.4
System_rurowy	5.5-21.0	5.7-21.7	5.7-21.2	5.4-20.8

Źródło: opracowanie własne.

Podsumowanie

Badania wydajności przeglądarki obiektów przestrzennych przeprowadzono dla czterech urządzeń testowych, dziewięciu modeli testowych o złożoności od 12 do 1 349 052 trójkątów, po trzy powtórzenia każdej sesji. Eksperymenty umożliwiły analizę wpływu geometrii na wydajność. Wyniki potwierdziły zależność wydajności od możliwości sprzętowych urządzeń. Ranking średniego FPS pokazał, że wszystkie urządzenia mobilne osiągnęły zbliżone rezultaty: Xiaomi POCO F6 – 30.0 FPS, Samsung Galaxy Z Flip 3 – 29.9 FPS, Samsung Galaxy S20 FE – 29.8 FPS przewyższające Meta Quest 3, który uzyskał najniższy wynik (24.0 FPS) z powodu systemowego limitu narzuconego przez tryb kompatybilności Android 2D. Jednocześnie teoretyczna analiza generacji GPU wskazuje, że Meta Quest 3 dysponuje najnowocześniejszą architekturą (Adreno 740), lecz jej potencjał pozostaje niewykorzystany.

Meta Quest 3, mimo zaawansowanej konstrukcji i aktywnego chłodzenia, pracował ze stałą częstotliwością 24 FPS niezależnie od złożoności modeli. Wysoka temperatura pracy (średnio 52°C) oraz stałe wykorzystanie GPU na poziomie 100% wskazują na ograniczenia wynikające z warstwy kompatybilności Android, a nie ze specyfiki sprzętu. Pełny potencjał urządzenia może zostać ujawniony wyłącznie w aplikacjach natywnych VR/XR.

Wpływ złożoności geometrycznej modeli na wydajność najsilniejszy jest dla urządzeń mobilnych. Wzrost liczby trójkątów prowadzi do systematycznych spadków FPS. Zidentyfikowano dwa kluczowe progi wydajnościowe:

- 277 644 trójkątów, do którego wszystkie urządzenia mobilne utrzymywały stałe ~30 FPS,
- 869 942 trójkątów, przy którym pojawiały się pierwsze spadki wydajności (np. POCO F6: 29.8 FPS, S20 FE: 29.7 FPS).

Najbardziej wydajne urządzenie – Xiaomi POCO F6 – utrzymało ponad 30 FPS aż do modelu Stanford_Dragon (869 942 trójkątów) i jako jedyne obsłużyło cały zestaw dziewięciu modeli, z minimalnym spadkiem do 29.3 FPS przy najcięższym modelu System_ruowy (1 349 052 trójkątów).

Wyniki dotyczące pamięci RAM wykazały liniowy wzrost zużycia wraz ze złożonością geometrii. Najprostszy model Cube wymagał około 6 MB

pamięci, natomiast Stanford_Dragon 15.5-22.6 MB. Najwyższe wykorzystanie pamięci dla złożonych modeli odnotowane na POCO F6 (12 GB RAM) przy najwyższej ilości średnich FPS, potwierdza bezpośrednią zależność między zasobami urządzenia a wydajnością i stabilnością pracy.

Wydajność przeglądarki obiektów przestrzennych jest silnie zależna od generacji GPU, złożoności geometrii modeli oraz ograniczeń systemowych platformy. Wyniki dostarczają pewnych wskazań projektowych: urządzenia z układami Adreno 660 i starszymi wymagają ograniczania złożoności modeli do ok. 277 644 trójkątów lub stosowania LOD; urządzenia nowsze (Adreno 735/740) mogą obsługiwać modele do ok. 870 000 trójkątów przy zachowaniu pełnej płynności. Badania tworzą solidną podstawę dla dalszych prac nad optymalizacją renderowania w mobilnych i mieszanych aplikacjach przestrzennych.

Literatura

1. Akenine-Möller, T., Haines, E., Hoffman, N. (2018). *Real-Time Rendering* (4th ed.). A K Peters/CRC Press.
2. Azuma, R., Baillot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S., MacIntyre, B. (2001). Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(6), 34-47. <https://doi.org/10.1109/38.963459>
3. Bailenson, J. (2018). *Experience on demand: What virtual reality is, how it works, and what it can do*. W.W. Norton & Company.
4. Blascovich, J., Bailenson, J. (2011). *Infinite Reality: Avatars, Eternal Life, New Worlds, and the Dawn of the Virtual Revolution*. William Morrow.
5. Bowman, D. A., McMahan, R. P. (2007). Virtual Reality: How Much Immersion Is Enough? *Computer*, 40(7), 36-43.
6. Buchwald, P. (2020). *Urządzenia mobilne w systemach rzeczywistości wirtualnej*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
7. Cignoni, P., Callieri, M., Corsini, M., Dellepiane, M., Ganovelli, F., Ranzuglia, G. (2008). MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool. *Sixth Eurographics Italian Chapter Conference*, 129-136.
8. Colborne, G. (2011). *Prostota i użyteczność. Projektowanie rozwiązań internetowych, mobilnych i interaktywnych*. Helion.

9. Cummings, J. J., Bailenson, J. N. (2016). How immersive is enough? A meta-analysis of the effect of immersive technology on user presence. *Media Psychology*, 19(2), 272-309.
10. Curless, B., Levoy, M. (1996). A volumetric method for building complex models from range images. *SIGGRAPH '96: Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 303-312. <https://doi.org/10.1145/237170.237269>
11. Garcia, F., Lopez, D. (2019). Mobile VR: Performance Analysis of 3D Rendering Techniques. *Mobile Information Systems*, 2019, 123456.
12. Jerald, J. (2015). *The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality*. Association for Computing Machinery & Morgan & Claypool.
13. Kowalski, M. (2022). Analiza wydajności aplikacji VR na urządzeniach mobilnych. *Informatyka*, 45(3), 123-135.
14. Marrs, A., Shirley, P., Wald, I. (red.). (2021). *Ray Tracing Gems II: Next Generation Real-Time Rendering with DXR, Vulkan, and OptiX*. Apress. <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-7185-8>
15. Nowak, A., Wiśniewski, P. (2021). Optymalizacja renderowania grafiki 3D w aplikacjach mobilnych. *Technologie Informacyjne*, 12(2), 98-110.
16. Sawa, J. (2025). *Ocena wydajności przeglądarki obiektów przestrzennych na wybranych urządzeniach rzeczywistości mieszanej i mobilnych*. Praca magisterska. Akademia Bialska im. Jana Pawła II.
17. Shreiner, D., Woo, M., Neider, J., Davis, T. (2013). *OpenGL Programming Guide: The Official Guide to Learning OpenGL* (8th ed.). Addison-Wesley Professional.
18. Smith, J., Brown, L. (2020). Performance Evaluation of 3D Object Viewers on VR Devices. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, 17(4), 45-59.
19. Turk, G., Levoy, M. (1994). Zippered polygon meshes from range images. *SIGGRAPH '94: Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 311-318. <https://doi.org/10.1145/192161.192241>
20. Wang, P., Sun, Y. (2018). Optimization Strategies for 3D Graphics Rendering on Mobile VR Platforms. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 24(7), 2105-2114.

Netografia

1. Unity Technologies. (2022). *Universal Render Pipeline Documentation Unity 2022.3 LTS*. Pobrane z: <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.render-pipelines.universal> (data dostępu: 12.10.2025).

mgr inż. Ewelina Melaniuk¹

Akademia Bialska im. Jana Pawła II, Biała Podlaska

https://doi.org/10.29316/9788368103281_8

NOWOCZESNE METODY EDUKACJI INFORMATYCZNEJ W SZKOLNICTWIE WYŻSZYM

MODERN METHODS OF COMPUTER SCIENCE EDUCATION IN HIGHER EDUCATION

Streszczenie

Współczesne szkolnictwo wyższe staje przed wyzwaniem dostosowania metod kształcenia do dynamicznie zmieniających się technologii cyfrowych. Edukacja informatyczna jest jednym z obszarów najbardziej podatnych na transformacje i wymaga zastosowania metod aktywizujących, środowisk projektowych, symulacji, pracy zespołowej oraz narzędzi sztucznej inteligencji. Celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie przeglądu nowoczesnych metod dydaktycznych stosowanych w edukacji informatycznej na poziomie akademickim, analiza ich efektywności, a także wskazanie kierunków dalszego rozwoju. W rozdziale omówiono m.in. podejścia konstruktywistyczne, metodę problem-based learning, blended learning, wykorzystanie laboratoriów wirtualnych i chmurowych, platform e-learningowych, gier dydaktycznych oraz narzędzi AI wspierających proces uczenia. Przedstawiono także wyzwania i ograniczenia związane z wprowadzaniem innowacji dydaktycznych.

Słowa kluczowe: edukacja informatyczna, project-based learning, computational thinking, blended learning, sztuczna inteligencja w edukacji, cyfrowe narzędzia edukacyjne, szkolnictwo wyższe, laboratoria wirtualne, nowoczesne metody dydaktyczne

¹ <https://orcid.org/0009-0002-9434-6258>, e-mail: e.melaniuk@dyd.akadmiabialska.pl

Abstract

Contemporary higher education faces the challenge of adapting teaching methods to dynamically changing digital technologies. Computer science education is one of the areas most susceptible to transformation and requires the use of engaging methods, project-based environments, simulations, teamwork, and artificial intelligence tools. The purpose of this article is to provide an overview of modern teaching methods used in computer science education at the academic level, analyze their effectiveness, and identify directions for further development. The chapter discusses, among other things, constructivist approaches, problem-based learning, blended learning, the use of virtual and cloud laboratories, e-learning platforms, educational games, and AI tools supporting the learning process. It also presents the challenges and limitations associated with implementing teaching innovations.

Keywords: computer science education, project-based learning, computational thinking, blended learning, artificial intelligence in education, digital educational tools, higher education, virtual laboratories, modern teaching methods

Wstęp

W ostatnich dekadach, dynamiczny rozwój technologii cyfrowych znacząco wpłynął na sposób funkcjonowania szkolnictwa wyższego, a w szczególności na obszar edukacji informatycznej. Współczesny rynek pracy wymaga od absolwentów kierunków informatycznych nie tylko biegłości technicznej, lecz także umiejętności kreatywnego rozwiązywania problemów, pracy zespołowej, adaptacji do zmieniających się technologii oraz ciągłego uczenia się (Redecker, 2017). Z tego względu tradycyjne podejścia dydaktyczne oparte głównie na wykładach i pracy indywidualnej stają się niewystarczające. Konieczne jest wdrażanie nowoczesnych metod edukacyjnych, które odpowiadają wyzwaniom współczesnego środowiska akademickiego i gospodarczego.

Równolegle rośnie znaczenie uczenia się wspieranego technologią – e-learningu, blended learningu, symulacji komputerowych, wirtualnych laboratoriów czy systemów inteligentnego oceniania. Badania wskazują, że wykorzystanie technologii edukacyjnych zwiększa motywację studentów oraz pozwala na efektywne przyswajanie materiału, szczególnie w dziedzinach wymagających pracy z kodem w środowiskach programistycznych (Pachler

i in., 2010; Dziuban i in., 2018). Ponadto rozwój sztucznej inteligencji otwiera nowe możliwości personalizacji procesu uczenia, automatyzacji oceniania, generowania materiałów dydaktycznych oraz wspierania studentów w pracy projektowej.

W edukacji informatycznej szczególnie istotne będą metody aktywizujące, takie jak Problem-Based Learning (PBL), Project-Based Learning, flipped classroom oraz grywalizacja. Wspomagają one kształtowanie umiejętności praktycznych i analitycznych, kluczowych w zawodach programisty, analityka danych, administratora systemów czy specjalisty ds. cyberbezpieczeństwa (Prince, Felder, 2006). Jak podkreśla Laurillard (2012), efektywne nauczanie informatyki wymaga przede wszystkim interakcji, eksperymentowania oraz możliwości natychmiastowego testowania tworzonych rozwiązań, co nie zawsze jest możliwe w tradycyjnej formie kształcenia.

Dodatkowo, globalizacja i rosnąca mobilność studentów prowadzą do większej różnorodności kompetencyjnej i kulturowej w grupach akademickich. Wymusza to stosowanie metod dydaktycznych elastycznych i skalowalnych, umożliwiających, z jednej strony indywidualizację pracy, a z drugiej prowadzenie zajęć w środowiskach międzynarodowych (Bond i in., 2021). Tym samym szkolnictwo wyższe w obszarze informatyki staje przed koniecznością redefinicji modelu kształcenia, który łączy tradycyjne wartości akademickie z nowoczesnymi narzędziami i metodami.

Celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie i analiza najważniejszych współczesnych metod edukacji informatycznej w szkołach wyższych, ze szczególnym uwzględnieniem technologii cyfrowych, metod aktywizujących oraz wykorzystania sztucznej inteligencji w procesie dydaktycznym. Omówione zostały teoretyczne podstawy modernizacji edukacji, praktyczne przykłady oraz wyniki badań naukowych potwierdzających skuteczność i konieczność nowoczesnych rozwiązań.

Tło teoretyczne nowoczesnej edukacji informatycznej

Współczesna edukacja informatyczna na poziomie akademickim opiera się na dynamicznej integracji treści technicznych, metod dydaktycznych oraz technologii wspomagających proces uczenia. Rozwój informatyki

wymaga od studentów zdobycia wiedzy teoretycznej, umiejętności praktycznych i kompetencji społecznych, które pozwalają efektywnie funkcjonować w szybko zmieniającym się środowisku pracy.

Fundament współczesnego kształcenia akademickiego stanowią kompetencje cyfrowe, szczególnie w dziedzinie informatyki. Według ram DIG-COMP 2.3 kompetencje cyfrowe obejmują, m.in. umiejętności techniczne, wyszukiwanie i krytyczną ocenę informacji, komunikację cyfrową, tworzenie treści cyfrowych, bezpieczeństwo cyfrowe oraz rozwiązywanie problemów technologicznych (Vuorikari i in., 2022). W kontekście edukacji informatycznej zakres ten ulega rozszerzeniu o kompetencje specjalistyczne, w tym: programowanie w językach wysokiego i niskiego poziomu, projektowanie i analiza algorytmów, zarządzanie systemami w środowisku chmurowym, cyberbezpieczeństwo i testowanie systemów oraz stosowanie narzędzi sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego.

Badania wykazują, że rozwój kompetencji cyfrowych nie jest jedynie kwestią poznania technologii, lecz także kształtowania umiejętności krytycznego myślenia i samodzielnego rozwiązywania problemów (Ferrari, 2013; Redecker, 2017). Kompetencje te są niezbędne, by studenci mogli skutecznie realizować projekty informatyczne, wdrażać innowacyjne rozwiązania w przedsiębiorstwach i odpowiadać na zmieniające się wymagania rynku pracy.

Współczesne programy nauczania informatyki coraz częściej integrują praktyczne zadania z laboratoriami chmurowymi, systemami kontroli wersji, platformami do nauki kodowania oraz narzędziami wspierającymi automatyczne ocenianie (Keuning i in., 2018). Takie podejście pozwala na rozwijanie kompetencji cyfrowych w kontekście realnych problemów technologicznych, co zwiększa skuteczność procesu kształcenia.

Konstruktywizm zakłada, że wiedza powstaje na drodze aktywnego konstruowania osobistych doświadczeń oraz refleksji nad nimi (Piaget, 1970; Vygotsky, 1978). W edukacji informatycznej przekłada się to na: samodzielne projektowanie aplikacji i systemów informatycznych, rozwiązywanie złożonych problemów programistycznych w laboratoriach praktycznych, a także analizę kodu, debugowanie i optymalizację algorytmów.

Konstruktywizm wspiera podejście „learning by doing”, które jest szczególnie istotne w nauce programowania, inżynierii oprogramowania czy administracji systemów. Badania wykazują, że studenci uczestniczący w aktywnych formach nauczania, w tym w projektach zespołowych i eksperymentach praktycznych, osiągają wyższe wyniki i lepiej przyswajają wiedzę (Freeman i in., 2014; Prince, Felder, 2006).

Konektywizm, zaproponowany przez Siemens (2005), traktuje wiedzę jako sieć powiązań między jednostką, społecznością oraz technologią. Uczucie się w kontekście konektywizmu odbywa się poprzez aktywne uczestnictwo w sieciach społecznych, platformach edukacyjnych i repozytoriach wiedzy. W informatyce studenci korzystają, m.in. z:

- GitHub – do zarządzania kodem i współpracy w projektach zespołowych,
- Stack Overflow – do rozwiązywania problemów programistycznych,
- Discord i Slack – do wymiany wiedzy i konsultacji grupowych.

Konektywizm wspiera rozwój umiejętności współpracy, adaptacyjności i krytycznej analizy źródeł informacji, co jest niezbędne w dynamicznie zmieniającym się środowisku IT (Downes, 2007; Kop, Hill, 2008).

Potrzeby rynku pracy

Współczesny rynek pracy w sektorze IT charakteryzuje się dużą dynamiką, zróżnicowaniem specjalizacji oraz szybkim tempem rozwoju technologii. Pracodawcy oczekują od absolwentów solidnych podstaw teoretycznych i umiejętności praktycznych oraz szerokiego wachlarza kompetencji miękkich, umożliwiających efektywne funkcjonowanie w zespołach projektowych, organizacjach międzynarodowych oraz środowiskach pracy zdalnej i hybrydowej (World Economic Forum, 2023). Najważniejsze kompetencje poszukiwane u młodych specjalistów IT obejmują:

- Pracę zespołową i współpracę w środowiskach wirtualnych.

Wielu pracodawców podkreśla, że projekty IT realizowane są obecnie w rozproszonych zespołach, często obejmujących pracowników z różnych krajów i stref czasowych. Oczekuje się więc od kandydatów umiejętności współpracy zdalnej przy wykorzystaniu narzędzi

takich, jak: GitHub, Jira, Figma, Slack czy Microsoft Teams. Efektywna współpraca wymaga także zdolności komunikacyjnych i odpowiedzialności za wykonywane zadania, co jest kluczowe zwłaszcza w projektach realizowanych w metodach zwinnych.

- Zarządzanie projektami i stosowanie metodyk Agile/DevOps.
Organizacje coraz częściej opierają swoje procesy produkcyjne na metodykach Agile i frameworkach (Scrum czy Kanban). Z kolei podejście DevOps integruje rozwój oprogramowania z procesami wdrożeniami, co wymaga zrozumienia automatyzacji testów, CI/CD oraz monitorowania aplikacji (Kim i in., 2016). Studenci informatyki muszą zatem opanować kompetencje techniczne i umiejętności organizacyjne, obejmujące planowanie sprintów, estymację zadań i tworzenie dokumentacji projektowej.
- Umiejętności adaptacyjne i szybkie uczenie się nowych technologii.
Tempo zmian w IT sprawia, że technologie wykorzystywane dziś mogą w krótkim czasie zostać zastąpione nowszymi rozwiązaniami. OECD (2023a) wskazuje, że odporność na zmiany, elastyczność poznawcza oraz gotowość do ciągłego uczenia się są kluczowe w nowych zawodach cyfrowych. Absolwenci powinni być przygotowani do pracy w ekosystemach, w których stale pojawiają się nowe biblioteki, frameworki i narzędzia automatyzacji. Oczekuje się od nich rozumienia podstaw uczenia maszynowego, przetwarzania danych i usług chmurowych, nawet jeśli nie są to ich główne specjalizacje.

Pracodawcy podkreślają, że nawet osoby o wysokich kompetencjach technicznych mogą mieć trudności z jasnym przedstawieniem wyników swojej pracy. W branży IT niezbędne jest przygotowywanie prezentacji dla zespołów projektowych, dokumentacji technicznej, raportów analitycznych i opisów działania systemów. Ponadto komunikacja między działami (np. IT – biznes – UX – QA) wymaga umiejętności tłumaczenia złożonych zagadnień technicznych na język zrozumiały dla odbiorców nietechnicznych (Nakata i in., 2020).

Opisane oczekiwania rynku pracy wskazują, że tradycyjne modele edukacji, oparte na wykładach i zadaniach indywidualnych, nie są wystarczające. Proces kształcenia powinien więc integrować teorię z praktyką poprzez:

- zadania zespołowe i symulacje projektów informatycznych – symulacje typu „mini-software house”, hackathony, realizacja projektów zgodnie z metodyką Scrum pozwalają studentom na rozwijanie kompetencji zgodnych z realnym środowiskiem pracy (Caballé, Conesa, 2018);
- laboratoria wirtualne i środowiska chmurowe – platformy takie, jak AWS Academy, Azure Lab Services, GitHub Classroom umożliwiają studentom pracę w środowiskach identycznych z tymi, które wykorzystuje przemysł IT (Zhong i in., 2020);
- metody aktywizujące: PBL i projekty zespołowe – Problem-Based Learning i Project-Based Learning ułatwiają rozwój kreatywności, myślenia krytycznego oraz kompetencji projektowych. Badania potwierdzają, że studenci informatyki uczący się poprzez projekty osiągają wyższy poziom samodzielności i efektywności w pracy zespołowej (Prince, Felder, 2006; Freeman i in., 2014).

Wdrożenie nowoczesnych metod dydaktycznych umożliwia więc uczelniom przygotowanie absolwentów do rzeczywistych warunków pracy, a studentom – zdobycie doświadczeń zbliżonych do profesjonalnych środowisk projektowych. Jak podkreślają Bond i in. (2021), integracja edukacji technologicznej i praktycznych metod kształcenia jest kluczowym elementem transformacji szkolnictwa wyższego.

Nowoczesne metody dydaktyczne w edukacji informatycznej

Współczesna edukacja informatyczna w szkołach wyższych ulega dynamicznym zmianom pod wpływem rozwoju technologii cyfrowych, zmian na rynku pracy oraz rosnących oczekiwań studentów. Badania wskazują, że tradycyjne wykłady są najmniej efektywną formą nauczania w obszarze informatyki, jeśli nie towarzyszy im komponent aktywnego uczenia się (Freeman i in., 2014). Z tego powodu uczelnie wdrażają metody skoncentrowane na studencie, oparte na rozwiązywaniu problemów, projektach, współpracy

i korzystaniu ze środowisk cyfrowych. W dalszej części rozdziału przedstawiono kluczowe podejścia uznawane za najskuteczniejsze we współczesnej edukacji informatycznej.

Fundament nowoczesnego kształcenia w dyscyplinach STEM stanowi Problem-Based Learning (PBL). Jego głównym założeniem jest uczenie poprzez samodzielne rozwiązywanie problemów, które mają charakter otwarty i często nie posiadają jednoznacznego rozwiązania (Savery, 2015). W kontekście informatyki ten model pozwala studentom rozwijać wiedzę techniczną oraz kluczowe kompetencje XXI wieku: myślenie krytyczne, współpracę, planowanie i analizę. Zastosowanie PBL w edukacji informatycznej obejmuje m.in.: projektowanie systemów bezpieczeństwa informatycznego, analizę złożonych przypadków cyberataków, opracowanie algorytmów optymalizacyjnych oraz diagnostykę błędów w dużych aplikacjach. Badania Prince’a i Feldera (2006) pokazują, że PBL znacząco zwiększa rozumienie materiału i motywację studentów do samodzielnego uczenia się. W kursach programistycznych obserwuje się także poprawę jakości kodu oraz większą świadomość podejmowanych decyzji projektowych.

Naturalnym wyborem w edukacji informatycznej jest Project-Based Learning (PjBL), ponieważ model pracy projektowej odzwierciedla realne praktyki przemysłu IT. Thomas (2000) wykazał, że PBL poprawia motywację, zaangażowanie oraz poczucie odpowiedzialności studentów, a także pozwala im nabyć umiejętności praktyczne potrzebne na rynku pracy. Typowe formy projektów akademickich obejmują: tworzenie aplikacji webowych lub mobilnych, projektowanie systemów IoT, implementację modułów sztucznej inteligencji, analizę danych i przygotowanie modeli predykcyjnych oraz budowę systemów sieciowych i administrację środowiskiem serwerowym. W badaniach przeprowadzonych przez Behera i Dash (2016) wskazano, że praca zespołowa w modelu projektowym zwiększa kompetencje komunikacyjne i poprawia zdolność studentów do pełnienia ról zawodowych: programisty, analityka, testera czy inżyniera DevOps.

Dominującym trendem w europejskich uczelniach stało się Blended Learning, czyli nauczanie hybrydowe łączące tradycyjne zajęcia kontaktowe z e-learningiem (Graham, 2019). Dzięki elastyczności i dostępowi do

zasobów cyfrowych studenci mogą rozwijać kompetencje informatyczne w sposób ciągły i autonomiczny.

Szczególną formą blended learningu jest flipped classroom (odwrócona klasa). W modelu tym studenci przyswajają podstawową wiedzę przed zajęciami (np. z materiałów wideo), zaś na zajęciach koncentrują się na rozwiązywaniu zadań i projektów. Badania Bishop i Verleger (2013) wykazały, że odwrócona klasa sprzyja zwiększonej aktywności studentów, lepszemu rozumieniu materiału oraz większemu zaangażowaniu w zajęcia praktyczne. W informatyce flipped classroom znajduje szczególne zastosowanie w kursach programowania, gdzie część teoretyczną można przekazać w formie nagrań, a cenny czas na zajęciach przeznaczyć na kodowanie, debugging i konsultacje z prowadzącym.

Przełom w edukacji informatycznej stanowi wprowadzenie laboratoriów chmurowych. Tradycyjne laboratoria komputerowe mają wiele ograniczeń, takich jak koszty sprzętowe, trudności w utrzymaniu infrastruktury i ograniczona skalowalność. Wirtualizacja i technologia cloud computing rozwiązują te problemy, umożliwiając studentom dostęp do zaawansowanych narzędzi niezależnie od czasu i miejsca. Laboratoria chmurowe umożliwiają pracę z: klastrami Kubernetes, serwerami wirtualnymi, konteneryzacją aplikacji, wirtualnymi sieciami korporacyjnymi, narzędziami DevOps (Jenkins, GitLab CI, Terraform) oraz platformami big data (Hadoop, Spark). Zhang i in. (2021) podkreślają, że użycie środowisk chmurowych zwiększa efektywność uczenia się administracji systemami i technologii sieciowych nawet o 40%. Dodatkowo uczelnie mogą symulować środowiska produkcyjne, ułatwiając przejście studentów do pracy zawodowej.

Istotnym elementem nowoczesnej edukacji stała się grywalizacja, a w informatyce znajduje szczególne zastosowanie ze względu na naturalną skłonność studentów do rozwiązywania problemów w środowiskach interaktywnych. Deterding i in. (2011) definiują grywalizację jako stosowanie elementów gier w kontekstach niezwiązanych z grami, co umożliwia wzrost motywacji i zaangażowania. Przykłady użycia grywalizacji w edukacji IT to m.in.: konkursy programistyczne (np. hackathony), systemy rankingowe na platformach e-learningowych, interaktywne zadania w środowiskach typu Codewars, symulacje cyberataków (np. capture-the-flag w cyberbezpieczeństwie).

Badania Papastergiou (2009) pokazują, że elementy gier poprawiają wyniki nauczania w obszarach technicznych, zwłaszcza gdy zadania mają charakter rywalizacji i natychmiastowego feedbacku.

Coraz większą popularność w edukacji zyskują techniki Pair Programming i Code Review, które wywodzą się z metodologii Extreme Programming. Williams i Kessler (2003) udowodnili, że programowanie w parach: skraca czas potrzebny na naukę nowych konceptów, zmniejsza liczbę błędów w kodzie, zwiększa satysfakcję studentów oraz poprawia komunikację zespołową. Z kolei Code Review umożliwia studentom nabywanie praktyk stosowanych na co dzień w branży IT – od analizowania stylu kodowania po wykrywanie luk bezpieczeństwa. Tego typu praktyki przyczyniają się do rozwijania kompetencji społecznych, kultury technicznej i odpowiedzialności za jakość pracy.

Sposób nauczania programowania, baz danych czy analizy danych radykalnie zmieniła sztuczna inteligencja (AI). Narzędzia takie, jak GitHub Copilot, ChatGPT, Amazon CodeWhisperer czy systemy automatycznego testowania kodu stają się integralną częścią środowiska pracy programisty i coraz częściej są włączane do procesów dydaktycznych. Badania Denny i in. (2023) wskazują, że korzystanie z asystentów AI może zwiększyć szybkość nauki programowania nawet o 30%, szczególnie u studentów początkujących. Jednak autorzy podkreślają również konieczność zachowania umiaru – nadmierne poleganie na generowanym kodzie może prowadzić do spadku umiejętności samodzielnego rozwiązywania problemów. Najważniejsze korzyści z zastosowania AI to przede wszystkim: możliwość natychmiastowego feedbacku, wspieranie studentów w pisaniu kodu, analiza błędów i ich automatyczne naprawianie, rekomendacje dotyczące stylu i architektury, a także indywidualizacja procesu uczenia się. W tym obszarze szczególnie istotne jest wprowadzenie do programów studiów treści dotyczących etyki AI, odpowiedzialnego wykorzystywania narzędzi oraz analizy ryzyk związanych z prywatnością, błędami algorytmicznymi i jakością kodu (Floridi, Cows, 2019).

Narzędzia wspierające nowoczesną edukację informatyczną

Współczesna edukacja informatyczna opiera się na nowoczesnych metodach dydaktycznych oraz wyspecjalizowanych narzędziach, które usprawniają nauczanie, ocenianie i rozwój kompetencji cyfrowych studentów. Oprogramowanie edukacyjne stosowane w szkolnictwie wyższym pełni wiele funkcji: automatyzuje zadania wykładowcy, zapewnia standaryzację środowiska pracy, wspomaga analizę wyników studentów i daje dostęp do zaawansowanych zasobów obliczeniowych. W tej części rozdziału przedstawiono najważniejsze kategorie narzędzi wykorzystywanych w nowoczesnej edukacji informatycznej.

Fundament infrastruktury dydaktycznej współczesnych uczelni stanowią platformy e-learningowe typu LMS (Learning Management System). Systemy takie, jak Moodle, Blackboard Learn czy Canvas LMS umożliwiają zarządzanie treściami kursów, komunikację ze studentami, przeprowadzanie testów oraz monitorowanie postępów uczestników. Jak wskazują Watson i Watson (2012), platformy LMS odgrywają kluczową rolę w standaryzacji procesu dydaktycznego, a ich rozwój coraz częściej koncentruje się na automatyzacji interakcji i integracji z narzędziami analitycznymi. W edukacji informatycznej LMS pełnią dodatkowe funkcje takie, jak: automatyczne testowanie wiedzy z zakresu programowania, algorytmów, sieci komputerowych, obsługa quizów adaptacyjnych, które dostosowują poziom trudności do umiejętności studenta, integracja z systemami chmurowymi, np. Google Cloud, AWS Educate czy Azure for Students, analiza uczenia się (learning analytics) pozwalająca wykrywać trudności studentów we wczesnym etapie kursu oraz śledzenie aktywności i progresu, co pozwala wykładowcom na projektowanie bardziej spersonalizowanych ścieżek edukacyjnych. W badaniach Hrastinskiego (2019) podkreśla się rosnące znaczenie analityki uczenia opartej na danych, która wspiera podejmowanie decyzji dydaktycznych oraz rozwój funkcji predykcyjnych pozwalających przewidzieć ryzyko niezaliczenia kursu. Dzięki temu platformy e-learningowe stają się narzędziem dystrybucji treści i kluczowym elementem systemowego wsparcia edukacji informatycznej.

Tradycyjne nauczanie programowania wymagało instalacji i konfiguracji lokalnego oprogramowania, co prowadziło do znacznych problemów logistycznych – różnic w systemach operacyjnych, błędów konfiguracji czy braku kompatybilności bibliotek. Środowiska programistyczne online, takie jak GitPod, Replit, CodeSandbox, Google Colab czy AWS Cloud9, eliminują te problemy, dostarczając natychmiast gotowe do pracy, zunifikowane środowiska. Ich kluczowe zalety obejmują: dostęp z dowolnego urządzenia, również słabszego sprzętowo, automatyczne konfigurowanie środowisk, z instalacją bibliotek, frameworków i narzędzi, możliwość pracy grupowej online, w tym edycję kodu w czasie rzeczywistym, integrację z GitHubem i GitLabem, co wprowadza studentów w praktyki DevOps, a także obsługę kontenerów (np. Docker), które ułatwiają naukę mikroservisów i wdrażania aplikacji. W badaniach Marín i in. (2021) wykazano, że wykorzystanie zdalnych środowisk programistycznych zwiększa efektywność nauki programowania o ok. 25-30%, głównie dzięki redukcji problemów technicznych oraz możliwości szybkiego przejścia do właściwej pracy nad kodem. Ponadto ułatwiają one organizację zajęć w modelu hybrydowym i zdalnym, co okazało się szczególnie istotne w okresie pandemii COVID-19.

Środowiska online odgrywają również dużą rolę w kursach związanych z: analizą danych (Python, R), algorytmiką i strukturami danych, programowaniem aplikacji webowych (Node.js, React, Django) i sztuczną inteligencją (TensorFlow, PyTorch). Standardyzacja środowiska pracy znacząco ułatwia ocenianie projektów oraz analizę błędów oraz umożliwia studentom rozwijanie własnych projektów poza zajęciami.

Coraz większą rolę w edukacji informatycznej, szczególnie na dużych kierunkach, gdzie liczba studentów może utrudniać tradycyjne ocenianie, odgrywają automatyczne systemy oceny kodu. Narzędzia takie, jak CodeGrade, HackerRank for Education, Moss, Gradescope, CodeRunner czy Code.org Assessments umożliwiają: automatyczne sprawdzanie poprawności kodu, ocenianie wydajności i złożoności algorytmów, analizę stylu i jakości kodu, detekcję plagiatów programistycznych oraz generowanie natychmiastowej informacji zwrotnej. Keuning, Jeuring i Heeren (2018) dokonali systematycznego przeglądu narzędzi do automatycznego oceniania i wskazali, że redukują one obciążenie wykładowców nawet o 60-70% oraz poprawiają

spójność i obiektywność ocen. Automatyczne testy umożliwiają studentom wielokrotne podejście do zadania, co ma pozytywny wpływ na proces uczenia się, zgodnie z teorią „natychmiastowego feedbacku” Shute (2008).

Automatyzacja oceniania jest szczególnie cenna w kursach: programowania proceduralnego i obiektowego, struktur danych i algorytmów, systemów operacyjnych, baz danych i cyberbezpieczeństwa. Przykładowo w kursach SQL można testować zapytania na dużych zbiorach danych, a w kursach cyberbezpieczeństwa automatycznie oceniać konfiguracje serwerów czy symulacje ataków. Co istotne, narzędzia te mogą być integrowane z LMS, co pozwala uczelniom na tworzenie kompleksowych ekosystemów edukacyjnych obejmujących dystrybucję treści, środowisko pracy oraz ocenę wyników.

Sztuczna inteligencja (AI) odgrywa coraz większą rolę w procesie kształcenia na poziomie akademickim, a jej zastosowanie w edukacji informatycznej staje się jednym z najbardziej dynamicznie rozwijających się obszarów. Narzędzia oparte na AI wspierają prowadzących zajęcia i studentów, umożliwiając automatyzację procesów, personalizację nauczania, symulacje zaawansowanych środowisk oraz wsparcie w analizie kodu. Rozwój technologii dużych modeli językowych (LLM), systemów rekomendacyjnych oraz inteligentnych środowisk programistycznych zmienia sposób uczenia się i nauczania informatyki.

Jednym z kluczowych obszarów zastosowania AI są inteligentne asystenty edukacyjne, takie, jak ChatGPT, Google Gemini, Github Copilot, Codeium, czy narzędzia wbudowane w IDE, np. AI Assistant w IntelliJ IDEA. Systemy te umożliwiają: generowanie przykładowych rozwiązań programistycznych, wyjaśnianie złożonych zagadnień teoretycznych, analizę błędów w kodzie i proponowanie ich poprawy, symulowanie rozmowy z ekspertem lub tutorowanie krok po kroku oraz wspieranie w generowaniu dokumentacji. Badania Denny i in. (2023) wskazują, że studenci korzystający z asystentów AI uczą się programowania szybciej i popełniają mniej błędów syntaktycznych, co przekłada się na wzrost efektywności nawet o 30%. Jednocześnie istotne jest świadome korzystanie z takich narzędzi, ponieważ mogą one generować kod nieoptymalny lub błędny, jeśli problem jest nieprecyzyjnie opisany.

AI wspiera również proces indywidualizacji kształcenia poprzez analizę postępów studenta, identyfikację braków wiedzy oraz rekomendowanie odpowiednich materiałów dydaktycznych. Wykorzystuje się do tego: systemy adaptacyjnego uczenia, inteligentne moduły rekomendacyjne, analizę danych z LMS i detekcję obszarów trudności. Według Chen i in. (2020) narzędzia oparte na AI pozwalają na zwiększenie skuteczności nauki szczególnie u studentów, którzy mają trudności z przyswojeniem bardziej abstrakcyjnych konceptów informatycznych takich, jak złożoność obliczeniowa czy rekurencja. Systemy te umożliwiają: automatyczne dostosowanie poziomu trudności zadań, identyfikację wzorców błędów programistycznych, rekomendowanie dodatkowych ćwiczeń i materiałów, tworzenie profili kompetencyjnych studentów. Personalizacja nauki wpisuje się w paradygmat „learning analytics” i „data-driven education”, szczególnie podkreślany przez Zawackiego-Richtera i współautorów (2019).

AI wspiera także tworzenie zadań dydaktycznych. Narzędzia oparte na modelach językowych potrafią: generować zadania programistyczne na różnym poziomie trudności, tworzyć testy jednostkowe do automatycznego sprawdzania kodu, analizować styl i logikę programowania, wykrywać podobieństwa i potencjalną plagiaty w kodzie. Rozwiązania te są szeroko wykorzystywane w narzędziach takich, jak: CodeGrade AI, HackerRank AI Insights, Codex-based problem generators, MOSS (Machine Learning for plagiarism detection). Badania Keuning i in. (2018) podkreślają, że automatyczne systemy oceny wzbogacone o moduły AI zapewniają bardziej szczegółowy feedback oraz są w stanie wykrywać błędy logiczne, które wcześniej wymagały ręcznego sprawdzania.

Narzędzia AI coraz częściej stanowią integralną część nowoczesnych IDE. Rozwiązania takie, jak: Visual Studio Code (Copilot), JetBrains AI Assistant, Amazon CodeWhisperer, umożliwiają studentom uczenie się poprzez praktykę w środowisku zbliżonym do tego, którego używają profesjonaliści. Inteligentne środowiska potrafią bowiem: przewidywać fragmenty kodu (code completion), analizować jakość projektową (clean code), automatycznie refaktoryzować programy, wykrywać podatności bezpieczeństwa i sugerować optymalne struktury danych. Według Vaithilingam i in. (2022), użycie narzędzi AI w IDE poprawia szybkość pracy studentów o 15-40%,

szczególnie w zadaniach wymagających klejenia kodu lub stosowania znanych wzorców projektowych.

Chatboty oparte na AI pełnią funkcję wirtualnych tutorów dostępnych 24/7. Mogą odpowiadać na pytania studentów, wyjaśniać złożone zagadnienia i pomagać w rozwiązywaniu problemów technicznych. Przykładami takich rozwiązań są: Jill Watson – chatbot wykorzystywany na Georgia Tech (Goel, Polepeddi, 2016), chatboty wdrażane w systemach LMS do obsługi kursów programistycznych, a także narzędzia generatywne typu LLM służące jako mentorzy kodowania. Badania odnotowują, że chatboty edukacyjne mogą zmniejszyć liczbę pytań kierowanych bezpośrednio do wykładowcy o nawet 40-50%, co usprawnia zarządzanie dużymi grupami studentów (Winkler, Söllner, 2018).

W edukacji związanej z bezpieczeństwem IT narzędzia AI wspierają: symulacje cyberataków, analizę logów systemowych, wykrywanie anomalii sieciowych, automatyczne generowanie scenariuszy szkoleniowych. Dzięki temu studenci mogą ćwiczyć praktyczne umiejętności w środowiskach zbliżonych do realnych incydentów (Wada i in., 2025).

Wraz z rosnącą popularnością narzędzi AI pojawia się konieczność rozwijania kompetencji etycznych. Studenci powinni rozumieć ryzyka związane z błędami generowanymi przez modele językowe, problemy uprzedzeń i halucynacji w AI, zagadnienia prawne – w tym prawa autorskie dotyczące kodu generowanego przez AI, granice korzystania z AI podczas egzaminów i projektów oraz konieczność weryfikacji treści i kodu wygenerowanego automatycznie. Edukacja w obszarze AI musi obejmować rozwój umiejętności technicznych i etycznych, aby korzystanie z narzędzi było odpowiedzialne i wspierało rozwój kompetencji studenta zamiast ich zastępowania.

Wyzwania i ograniczenia

Mimo dynamicznego rozwoju narzędzi cyfrowych w edukacji informatycznej, wdrażanie nowoczesnych metod i technologii napotyka na szereg barier i wyzwań. Obejmują one kwestie infrastrukturalne, kompetencyjne, etyczne oraz organizacyjne. Analiza tych obszarów jest kluczowa dla efektywnego planowania transformacji dydaktyki na poziomie akademickim i szkolnym (Selwyn, 2016).

Wiele uczelni nadal boryka się z ograniczeniami infrastrukturalnymi, które utrudniają realizację nowoczesnych form kształcenia. Do najczęściej wskazywanych problemów należą: przestarzały sprzęt komputerowy, niedostateczna przepustowość sieci, ograniczony dostęp do chmury publicznej oraz brak odpowiednich licencji na oprogramowanie specjalistyczne. Badania wykazują, że infrastruktura ICT stanowi jeden z kluczowych czynników warunkujących sukces cyfrowej transformacji uczelni (Kirkwood, Price, 2014). Niewystarczające zaplecze techniczne ogranicza możliwość prowadzenia kursów z wykorzystaniem środowisk wirtualnych, narzędzi AI oraz projektów zespołowych w chmurze.

Również cyberbezpieczeństwo stanowi istotne wyzwanie. Rozbudowa infrastruktury cyfrowej wiąże się z koniecznością stosowania bardziej zaawansowanych procedur ochrony przed atakami – według raportów EDUCAUSE, ponad 60% instytucji szkolnictwa wyższego ocenia swoje zabezpieczenia jako niewystarczające (EDUCAUSE, 2022).

Transformacja edukacji informatycznej wymaga odpowiednio przygotowanej kadry dydaktycznej. Obejmuje to: znajomość metod aktywizujących (PBL, projekty, flipped classroom), kompetencje w zakresie narzędzi chmurowych i automatyzacji, umiejętność wykorzystania narzędzi AI w dydaktyce, a także gotowość do pracy zespołowej i prowadzenia mentoringu. Wielu nauczycieli akademickich deklaruje braki w przygotowaniu do pracy z narzędziami AI oraz środowiskami programistycznymi online. Badania potwierdzają, że kompetencje cyfrowe wykładowców są jedną z głównych barier skutecznego wdrażania innowacji technologicznych. Co więcej, część kadry wykazuje opór przed zmianami wynikający z przywiązania do tradycyjnych metod, braku czasu na podnoszenie kwalifikacji czy obaw przed utratą kontroli nad procesem dydaktycznym.

Dynamiczny rozwój modeli generatywnych (LLM) stwarza także nowe wyzwania dla edukacji informatycznej. Narzędzia AI mogą prowadzić do nadmiernego polegania na automatycznie generowanych odpowiedziach, co osłabia rozwój kompetencji problem-solving i umiejętności programistycznych. Modele generatywne potrafią wytwarzać kod, eseje i rozwiązania zadań trudne do wykrycia tradycyjnymi metodami antyplagiatowymi. Już dziś wiele uczelni raportuje wzrost przypadków nieuczciwości akademickiej

związanej z AI (Cotton i in., 2023). Kolejnym jest problem tzw. „hallucinations” – modele językowe mogą generować błędne lub fikcyjne informacje, co stanowi realne zagrożenie podczas nauki algorytmów, zasad bezpieczeństwa, procedur administracji systemami i praktyk projektowania oprogramowania. W związku z tym konieczne jest uczenie studentów kompetencji krytycznej oceny treści generowanych automatycznie.

Wdrażanie nowoczesnych metod dydaktycznych wiąże się również z szeregiem trudności o charakterze organizacyjnym. Pierwszą niedogodnością jest zwiększony nakład pracy, bowiem metody takie jak PBL czy nauczanie projektowe wymagają przygotowania realnych studiów przypadków, indywidualnej opieki nad zespołami studenckimi, częstszej ewaluacji postępów i czasu na analizę kodu i dokumentacji projektowej. Badania wskazują, że nauczyciele poświęcają nawet 50% więcej czasu na przygotowanie zajęć opartych na metodach aktywizujących w porównaniu z tradycyjnym wykładem (Hmelo-Silver, 2004). Kolejną trudnością jest złożoność logistyki pracy zespołowej – organizacja kursów projektowych wymaga harmonogramowania spotkań, zarządzania repozytoriami kodu, kontroli wersji i stałego monitorowania aktywności zespołów. Dodatkowo, ocenianie projektów aplikacyjnych, prac zespołowych czy zadań tworzonych z pomocą AI wymaga tworzenia bardziej elastycznych, wieloskładnikowych kryteriów, co bywa wyzwaniem w dużych grupach.

Kierunki rozwoju edukacji informatycznej

Edukacja informatyczna w szkolnictwie wyższym znajduje się w fazie intensywnej transformacji, na którą wpływają technologie cyfrowe i zmieniające się oczekiwania rynku pracy. W najbliższych latach można spodziewać się dalszej ewolucji modeli dydaktycznych, ukierunkowanej na pełniejsze wykorzystanie sztucznej inteligencji, immersyjnych środowisk symulacyjnych oraz elastycznych form potwierdzania kompetencji. Przegląd literatury wskazuje, że rozwój edukacji IT będzie opierał się na czterech strategicznych trendach (OECD, 2023b; Radianti i in., 2020).

- Personalizacja uczenia z wykorzystaniem AI.

Rozwój systemów edtech opartych na sztucznej inteligencji umożliwia tworzenie spersonalizowanych ścieżek edukacyjnych, dostosowanych

do stylu uczenia się, poziomu kompetencji oraz tempa pracy studenta. AI analizuje aktywność użytkownika, diagnozuje braki kompetencyjne i rekomenduje treści oraz zadania dopasowane do indywidualnych potrzeb. Najważniejsze kierunki rozwoju obejmują: inteligentnych tutorów wspierających naukę programowania (Denny i in., 2023), systemy adaptive learning, które automatycznie dostosowują poziom trudności zadań, asystentów AI analizujących kod, popełniane błędy i proponujących korekty, automatyczną analizę stylu pracy grup projektowych, w tym wkładu poszczególnych członków zespołu. Badania wykazują, że spersonalizowana edukacja oparta na danych zwiększa efektywność uczenia nawet o 20-35% w porównaniu z jednostandardowymi modelami dydaktycznymi (Xie i in., 2019).

- Symulacje VR i rozszerzona rzeczywistość w dydaktyce technicznej. Wirtualna rzeczywistość (VR) oraz rzeczywistość rozszerzona (AR) są coraz częściej wykorzystywane w szkolnictwie wyższym, zwłaszcza w dziedzinach technicznych. Ich największym atutem jest możliwość odwzorowania kosztownych, niebezpiecznych lub trudno dostępnych środowisk technicznych (Radianti i in., 2020). Przykłady zastosowań VR/AR w edukacji informatycznej: symulacje środowisk sieciowych i centrów danych, wizualizacja struktur algorytmicznych i złożonych procesów obliczeniowych, trening cyberbezpieczeństwa w warunkach zbliżonych do rzeczywistych (np. sandbox attack simulations), projektowanie i testowanie aplikacji AR/VR w laboratoriach wirtualnych. Symulacje immersyjne zwiększają zaangażowanie studentów oraz efektywność przyswajania wiedzy proceduralnej. Zgodnie z metaanalizami (Radianti i in., 2020), VR podnosi skuteczność nauki o 25-30% w porównaniu z metodami tradycyjnymi w obszarach wymagających uczenia manualnego lub proceduralnego.
- Mikrocertyfikaty i elastyczne ścieżki potwierdzania kompetencji. W odpowiedzi na dynamiczne zmiany technologiczne uczelnie coraz częściej sięgają po mikrokredencjały (microcredentials), czyli krótkie certyfikaty potwierdzające opanowanie konkretnej umiejętności. Najważniejsze korzyści: większa elastyczność dla studentów i pracowników, możliwość zdobywania kompetencji dokładnie wtedy, gdy są

potrzebne (just-in-time learning), współpraca uczelni z firmami technologicznymi (np. AWS, Google, Microsoft), szybkie uzupełnianie kwalifikacji wymaganych w projektach IT. Według badania European Commission (2022), rynek mikrokredencjałów podwoił się w latach 2020-2022, a ponad 70% uczelni wyższych planuje ich dalsze wdrażanie. Typowe mikrocertyfikaty w informatyce: certyfikaty chmurowe (AWS Cloud Practitioner, Azure Fundamentals), DevOps Foundations, Introduction to Cybersecurity, Data Analytics Fundamentals. Mikrocertyfikaty zwiększają szanse absolwentów na znalezienie pracy, ponieważ potwierdzają aktualne umiejętności bardziej precyzyjnie niż tradycyjne dyplomy.

- Automatyzacja laboratoriów i integracja z DevOps.

Kierunkiem o rosnącym znaczeniu jest pełna automatyzacja laboratoriów informatycznych, wykorzystująca technologie takie, jak: Infrastructure as Code (IaC), CI/CD, konteneryzacja (Docker), orkiestracja usług (Kubernetes). Automatyczne laboratoria umożliwiają studentom realizację zadań w środowiskach identycznych z tymi stosowanymi w przemyśle IT (Zhang i in., 2021). Dzięki temu proces dydaktyczny staje się bliższy rzeczywistym praktykom inżynierskim. Przykłady rozwiązań: GitHub Classroom z integracją CI/CD, wirtualne klastry Kubernetes dla zajęć laboratoryjnych, automatyczne testowanie aplikacji w pipeline'ach, generowanie środowisk na żądanie (on-demand labs). Automatyzacja laboratoriów: skraca czas konfiguracji środowiska o 70-90%, umożliwia jednoczesne prowadzenie zajęć dla dużych grup i minimalizuje błędy związane z różnicami sprzętowymi studentów. Integracja edukacji z praktykami DevOps pozwala studentom rozwijać kluczowe kompetencje wymagane przez współczesnych pracodawców, takie jak automatyzacja, współpraca zespołowa oraz szybkie wdrażanie zmian w oprogramowaniu.

Podsumowanie

Nowoczesne metody edukacji informatycznej w szkolnictwie wyższym stanowią odpowiedź na dynamiczne zmiany zachodzące w sektorze

technologii cyfrowych. Współczesna dydaktyka odchodzi od modelu transmisyjnego, opartego na biernym przyswajaniu wiedzy, na rzecz podejść aktywizujących, które angażują studentów w proces samodzielного badania, eksperymentowania i rozwiązywania problemów (Biggs, Tang, 2011). Szczególną rolę odgrywają metody projektowe (project-based learning), umożliwiające zdobywanie kompetencji praktycznych oraz rozwijanie umiejętności współpracy w zespołach, co jest zgodne z oczekiwaniami rynku pracy IT (Thomas, 2020).

Rozwój technologii chmurowych oraz narzędzi do wirtualizacji środowisk laboratoryjnych pozwala na prowadzenie zajęć w sposób skalowalny, dostępny i zautomatyzowany. Dzięki temu uczelnie mogą tworzyć nowoczesną, elastyczną infrastrukturę dydaktyczną, umożliwiając studentom pracę w warunkach zbliżonych do realnych środowisk produkcyjnych. Jednocześnie coraz większe znaczenie zyskują narzędzia sztucznej inteligencji, wspierające proces nauczania (np. automatyczna analiza kodu, generowanie feedbacku) i uczenia się, poprzez personalizację ścieżek edukacyjnych oraz inteligentne systemy tutoringowe (Marinescu, 2017).

Ważnym wyzwaniem pozostaje przygotowanie kadry akademickiej do transformacji dydaktycznej – zwłaszcza w zakresie kompetencji cyfrowych, pracy z narzędziami AI oraz projektowania kursów praktycznych wymagających interdyscyplinarnego podejścia (Redecker, 2020). Równie istotne jest zapewnienie równowagi między automatyzacją a rozwijaniem kompetencji manualnych i poznawczych. Nadmierne poleganie na narzędziach automatyzujących analizę kodu czy generowanie rozwiązań może ograniczać rozwój samodzielności oraz umiejętności krytycznego myślenia, kluczowych dla profesjonalistów IT (Shute, Wang, 2022).

Mimo tych wyzwań wdrażanie nowoczesnych metod dydaktycznych przynosi wymierne korzyści. Badania wskazują na zwiększoną motywację studentów, wyższą efektywność przyswajania materiału oraz lepsze przygotowanie absolwentów do pracy w branży technologicznej (Fischer et al., 2020). Integracja metod projektowych, środowisk chmurowych, narzędzi AI oraz pracy zespołowej pozwala uczelniom budować programy studiów bardziej dopasowane do realiów współczesnego rynku, a studentom – rozwijać kompetencje praktyczne i społeczne niezbędne w zawodach przyszłości.

Literatura

1. Behera, S., Dash, S. (2016). Project-based learning and its impact on engineering education. *International Journal of Engineering Research*.
2. Biggs, J., Tang, C. (2011). *Teaching for Quality Learning at University*. McGraw-Hill.
3. Bishop, J. L., Verleger, M. A. (2013). *The flipped classroom: A survey of the research*. ASEE National Conference.
4. Bond, M., Buntins, K., Bedenlier, S., Zawacki-Richter, O., Kerres, M. (2021). *Digital transformation in higher education: Challenges and opportunities*. Springer.
5. Caballé, S., Conesa, J. (2018). *Formative assessment, learning data analytics and gamification in ICT education*. Springer.
6. Chen, X., Xie, H., Zou, D., Hwang, G. J. (2020). Application and theory of artificial intelligence in education. *Educational Technology & Society*, 23(3), 14-28. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2020.100002>
7. Cotton, D., Cotton, P., Shipway, J. (2023). Chatting and cheating: Ensuring academic integrity in the era of ChatGPT. *Innovations in Education and Teaching International*, 1-12. <https://doi.org/10.1080/14703297.2023.2190148>
8. Deterding, S., Dixon, D., Khaled, R., Nacke, L. (2011). *From game design elements to gamefulness: Defining gamification*. MindTrek Conference.
9. Dziuban, C., Graham, C. R., Moskal, P., Norberg, A., Sicilia, N. (2018). Blended learning: The new normal and emerging technologies. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 15(3), 1-16. <https://doi.org/10.1186/s41239-017-0087-5>
10. EDUCAUSE. (2022). *Horizon Report: Information Security Edition*. EDUCAUSE Publications.
11. European Commission. (2022). *Microcredentials for lifelong learning and employability*.
12. Ferrari, A. (2013). *DIGCOMP: A framework for developing and understanding digital competence in Europe*. Publications Office of the European Union.
13. Fischer, C., Pardos, Z. A., Baker, R. S. (2020). The Impacts of Adaptive Learning on Student Performance. *Computers & Education*, 157, 103987.
14. Floridi, L., Cowls, J. (2019). *A unified framework of five principles for AI in society*. Harvard Data Science Review. <https://doi.org/10.1162/99608f92.8cd550d1>
15. Freeman, S., Eddy, S. L., McDonough, M., Smith, M. K., Okoroafor, N., Jordt, H., Wenderoth, M. P. (2014). *Active learning increases student performance in*

- science, engineering, and mathematics. PNAS, 111(23), 8410-8415. <https://doi.org/10.1073/pnas.1319030111>*
16. Goel, A., Polepeddi, L. (2016). *Jill Watson: A Virtual Teaching Assistant for the Classroom*. Georgia Institute of Technology Research Reports.
17. Graham, C. (2019). *Current trends in blended learning in higher education*. ECAR.
18. Hmelo-Silver, C. E. (2004). Problem-based learning: What and how do students learn? *Educational Psychology Review, 16(3)*, 235-266. <https://doi.org/10.1023/B:EDPR.0000034022.16470.f3>
19. Hrastinski, S. (2019). What do we mean by blended learning? *TechTrends, 63(5)*, 564-569.
20. Keuning, H., Jeurig, J., Heeren, B. (2018). A systematic literature review of automated feedback for programming exercises. *ACM Transactions on Computing Education, 19(1)*, 1-43. <https://doi.org/10.1145/3231711>
21. Kim, G., Humble, J., Debois, P., Willis, J. (2016). *The DevOps handbook*. IT Revolution Press.
22. Kirkwood, A., Price, L. (2014). Technology-enhanced learning and teaching in higher education: Critical review. *Learning, Media and Technology, 39(1)*, 6-36. <https://doi.org/10.1080/17439884.2013.770404>
23. Kop, R., Hill, A. (2008). Connectivism: Learning theory of the future or vestige of the past? *The International Review of Research in Open and Distributed Learning, 9(3)*, 1-13. <https://doi.org/10.19173/irrodl.v9i3.523>
24. Laurillard, D. (2012). *Teaching as a design science: Building pedagogical patterns for learning and technology*. Routledge.
25. Marín, V. (2021). Web-based coding environments in higher education: Effects on student engagement and performance. *Computers & Education*.
26. Marinescu, D. (2017). *Cloud Computing: Theory and Practice*. Morgan Kaufmann.
27. Nakata, K., Ravu, M., Ali, S. (2020). Communication challenges in software development teams. *Journal of Systems and Software, 170*, 110729.
28. OECD. (2023a). *Education at a Glance*. OECD Publishing.
29. OECD. (2023b). *Skills Outlook 2023: Learning in the digital age*. OECD Publishing.
30. Pachler, N., Bachmair, B., Cook, J. (2010). *Mobile learning: Structures, agency, practices*. Springer.
31. Papastergiou, M. (2009). Digital Game-Based Learning in high school Computer Science education: Impact on educational effectiveness and student

- motivation. *Computers & Education*, 52(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2008.06.004>
32. Piaget, J. (1970). *Science of education and the psychology of the child*. Orion Press.
33. Prince, M. J., Felder, R. M. (2006). Inductive teaching and learning methods: Definitions, comparisons, and research bases. *Journal of Engineering Education*, 95(2), 123-138. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2006.tb00884.x>
34. Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda. *Computers & Education*, 147, 103778. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103778>
35. Redecker, C. (2017). *European framework for the digital competence of educators: DigCompEdu*. Publications Office of the European Union.
36. Redecker, C. (2020). Digital Competence of Educators. *European Framework for the Digital Competence of Educators (DigCompEdu)*. Publications Office of the European Union.
37. Savery, J. R. (2015). *Overview of problem-based learning: Definitions and distinctions*. Interdisciplinary Journal of Problem-Based Learning.
38. Selwyn, N. (2016). *Education and Technology: Key Issues and Debates*. Bloomsbury.
39. Shute, V. J. (2008). Focus on formative feedback. *Review of Educational Research*, 78(1), 153-189. <https://doi.org/10.3102/0034654307313795>
40. Shute, V., Wang, L. (2022). The role of formative feedback in developing computational thinking. *Computers & Education*, 181, 104447.
41. Siemens, G. (2005). Connectivism: A learning theory for the digital age. *International Journal of Instructional Technology and Distance Learning*, 2(1), 3-10.
42. Thomas, J. (2020). Project-based learning in computer science education: A systematic review. *ACM Transactions on Computing Education*, 20(4), 1-25.
43. Thomas, J. W. (2000). *A review of research on project-based learning*. Autodesk Foundation.
44. Vaithilingam, P., Zhang, Y., Ross, B. (2022). *How developers use AI-assisted code completion tools*. ACM CHI Conference.
45. Vuorikari, R., Punie, Y., Carretero Gomez, S., Van den Brande, G. (2022). *DigComp 2.3: The Digital Competence Framework for Citizens*. European Commission.
46. Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in society: The development of higher psychological processes*. Harvard University Press.

47. Wada, I. U., Izibili, G. O., Babayemi, T., Abdulkareem, A., Macaulay, O. M., Emadoye, A. (2025). AI-driven cybersecurity in higher education: A systematic review and model evaluation for enhanced threat detection and incident response. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 25(3), 2233-2245. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2025.25.3.0989>
48. Watson, W. R., Watson, S. L. (2012). *The role of learning management systems in personalized learning*. TechTrends.
49. Williams, L., Kessler, R. (2003). *Pair programming illuminated*. Addison-Wesley.
50. Winkler, R., Söllner, M. (2018). *Unleashing the Potential of Chatbots in Education: A State-of-the-Art Analysis*. Academy of Management Annual Meeting Proceedings.
51. World Economic Forum. (2023). *Future of Jobs Report 2023*. WEF.
52. Xie, H., Chu, H. C., Hwang, G. J., Wang, C. C. (2019). Trends and development in artificial intelligence and adaptive learning research. *Interactive Learning Environments*, 27(5-6), 956-971. <https://doi.org/10.1080/10494820.2018.1495652>
53. Xu, L., Huang, D., Tsai, W. T. (2014). Cloud-based virtual laboratory for network security education. *IEEE Transactions on Education*, 57(3), 145-150. <https://doi.org/10.1109/TE.2013.2282285>
54. Zhong, R., Tian, Z., Zhuang, Y. (2020). Cloud-based virtual laboratories in computing education: A survey. *IEEE Access*, 8, 217202-217214. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3037067>

Netografia

1. Denny, P., MacNeil S., Savelka J., Porter L., Luxton-Reilly A. (2023). *Desirable Characteristics for AI Teaching Assistants in Programming Education*. Pobrane z: <https://arxiv.org/html/2405.14178v1> (data dostępu: 01.09.2025).
2. Downes, S. (2007). *What connectivism is*. Half an Hour. Pobrane z: <https://halfanhour.blogspot.com/2007/02/what-connectivism-is.html> (data dostępu: 01.09.2025).

mgr Magdalena Miczek¹

Wyższa Szkoła Bezpieczeństwa, Poznań

https://doi.org/10.29316/9788368103281_9

KORZYSTANIE DZIECI I MŁODZIEŻY Z TIK W KONTEKŚCIE KSZTAŁTOWANIA KOMPETENCJI KLUCZOWYCH

CHILDREN AND YOUNG PEOPLE'S USE OF ICT IN THE CONTEXT OF DEVELOPING KEY COMPETENCES

Streszczenie

Dynamiczny rozwój technologii informacyjno-komunikacyjnych (TIK) oddziałuje na wszystkie obszary funkcjonowania jednostki oraz społeczeństwa. Koniecznym staje się umiejętność dopasowania, elastycznego reagowania, nadążanie za zmianą przy jednoczesnym zachowaniu zasad bezpieczeństwa i higieny cyfrowej. Określone zostały kompetencje kluczowe, które należy kształcić w procesie edukacji dzieci i młodzieży, by sprostać wyzwaniom trudnej do przewidzenia i nieznanej przyszłości. Jednocześnie dzieci i młodzież, już od najmłodszych lat, mają szeroki dostęp do zasobów TIK, z których korzystają głównie w celach rozrywkowo-komunikacyjnych. Tworzy to środowisko, w którym proces edukacji i rozwoju może być zaburzony, a rozwój części kompetencji kluczowych ograniczać, a być może w pewnym stopniu nawet wykluczać, kształtowanie innych kompetencji, również uznanych za kluczowe. Celem rozdziału jest przedstawienie, na podstawie aktualnej literatury, analizy dokumentów oraz badań i raportów, w jaki sposób dzieci i młodzież korzystają z TIK oraz wskazanie zagrożeń, jakie z tego wynikają w kontekście kształtowania ich kompetencji kluczowych.

¹ <https://orcid.org/0009-0007-5446-4328>, e-mail: magdalena.miczek@wsb.net.pl

Słowa kluczowe: technologie informacyjno-komunikacyjne (TIK), kompetencje kluczowe, umiejętności podstawowe, edukacja, dzieci, młodzież, kompetencje cyfrowe, myślenie krytyczne, zagrożenia cyfrowe, media społecznościowe, cyberbezpieczeństwo

Abstract

Dynamic development of Information and Communication Technology (ICT) impacts on all areas of individual and society activities. It becomes necessary to have the ability to adjust, to react in flexible way, to follow the changes while keeping the rules of safety and digital hygiene. There are pointed the key competences, which are needed to develop to meet the challenges of unpredictable and unfamiliar future. At the same time, children and teenagers, from a very early age, have wide access to ICT and use them mainly for entertainment and communication purposes. It creates an environment which may have a negative impact on the process of learning and growth. The development of some key competences may be limited or even contrary to the development of another one indicated as key competences as well. The purpose of this chapter is to present the way children and teenagers use ICT and to point out the dangers of it in the context of development of their key competences. The following research methods and techniques were used: subject literature analysis, legal texts and acts analysis, reports and research data analysis.

Keywords: Information and Communication Technology (ICT), key competences, basic skills, education, children, teenagers, digital competence, critical thinking, digital danger, digital abuse, social media, cybersecurity

Technologie informacyjno-komunikacyjne – ogień XXI wieku

Ludzkość w całej swojej historii odnotowała kilka spektakularnych przełomów, które w sposób nieodwracalny, ale i znaczący przestawiły zwrotnice rozwoju na zupełnie nowe tory. Punktami zwrotnymi były m.in.: umiejętność opanowania i kontrolowania ognia, czy – w kontekście dziejów wydawałoby się całkiem niedawna – rewolucja przemysłowa. W XXI w., choć zapoczątkowana w stuleciu poprzednim, takim przełomem stała się rewolucja cyfrowa, rozumiana jako „zamiana zjawisk i procesów analogowych na cyfrowe” (Zybertowicz, 2024, s. 24). Rozwój technologii informacyjno-komunikacyjnych (TIK), który nieprzerwanie, a od momentu wynalezienia Internetu w sposób szczególny, ewoluuje w postępie geometrycznym, nie tylko oddziałuje na wszelkie sfery życia ludzkiego, ale też zmienia strukturę i obszary funkcjonowania jednostek, społeczeństw, państw. Co ważne podkreślenia, główna różnica w odniesieniu do wcześniejszych wynalazków technologicznych zawiera

się w tym, że były one w stosunku do użytkownika pasywne. Nie występowała interakcja między człowiekiem a urządzeniem, czego nie można powiedzieć dzisiaj o smartfonach czy różnych aplikacjach, które domagając się naszego nieustannego zaangażowania, stają się wręcz przedmiotem uzależnienia (Zybertowicz, 2022, s. 18-19). Ponadto, korzystanie z narzędzi tj.: młotek, śrubokręt, ołówek, pióro, czy też jazda na łyżwach, prowadzenie samochodu, wymaga osiągnięcia określonego poziomu rozwoju psychomotorycznego. Wydaje się, że w kontekście technologii informacyjno-komunikacyjnych poziom ten, w przypadku dzieci i młodzieży, jest wtórny w stosunku do ich atrakcyjności, jak i powszechnego dostępu. Ma to swoje konsekwencje.

Technologie informacyjno-komunikacyjne (TIK) w edukacji

Analizując kierunki rozwoju polityki oświatowej państwa w ostatnich pięciu latach można zauważyć wyraźne ukierunkowanie na rozwój kompetencji cyfrowych zarówno wśród uczniów, jak i nauczycieli. Formułowane przez Ministerstwo Edukacji Narodowej priorytety w tym obszarze, w ostatnich latach szkolnych, kształtowały się następująco:

- 2020/2021: Wykorzystanie w procesach edukacyjnych narzędzi i zasobów cyfrowych oraz metod kształcenia na odległość. Bezpieczne i efektywne korzystanie z technologii cyfrowych (MEN, pkt 4, 2020).
- 2021/2022: (...) Roztropne korzystanie w procesie kształcenia z narzędzi i zasobów cyfrowych oraz metod kształcenia wykorzystujących technologie informacyjno-komunikacyjne (MEN, pkt 4, 2021).
- 2022/2023: Rozwijanie umiejętności metodycznych nauczycieli w zakresie prawidłowego i skutecznego wykorzystywania technologii informacyjno-komunikacyjnych w procesach edukacyjnych. Wsparcie edukacji informatycznej i medialnej, w szczególności kształtowanie krytycznego podejścia do treści publikowanych w Internecie i mediach społecznościowych (MEN, pkt 7, 2022).
- 2023/2024: Wspieranie rozwoju umiejętności cyfrowych uczniów i nauczycieli, ze szczególnym uwzględnieniem bezpiecznego poruszania się w sieci oraz krytycznej analizy informacji dostępnych w Internecie. Poprawne metodycznie wykorzystywanie przez nauczycieli narzędzi

i materiałów dostępnych w sieci, w szczególności opartych na sztucznej inteligencji (MEN, pkt 8, 2023).

- 2024/2025: Wspieranie rozwoju umiejętności cyfrowych uczniów i nauczycieli, ze szczególnym uwzględnieniem bezpiecznego poruszania się w sieci oraz krytycznej analizy informacji dostępnych w Internecie. Poprawne metodycznie wykorzystywanie przez nauczycieli narzędzi i materiałów dostępnych w sieci, w szczególności opartych na sztucznej inteligencji, korzystanie z zasobów Zintegrowanej Platformy Edukacyjnej (MEN, pkt 4, 2024a).
- 2025/2026: Promowanie higieny cyfrowej i bezpiecznego poruszania się w sieci. Rozwijanie umiejętności krytycznej analizy informacji dostępnych w Internecie. Poprawne metodycznie wykorzystywanie przez nauczycieli nowoczesnych technologii, w szczególności opartych na sztucznej inteligencji oraz korzystanie z zasobów Zintegrowanej Platformy Edukacyjnej (MEN, pkt 5, 2025).

O ile w latach 2020-2022 Ministerstwo Edukacji Narodowej formułowało w sposób zwięzły zasadność bezpiecznego, roztropnego korzystania z narzędzi i zasobów cyfrowych, o tyle w latach kolejnych prawidłowe i skuteczne wykorzystywanie technologii informacyjno-komunikacyjnej w procesie edukacyjnym łączy z koniecznością kształtowania krytycznego myślenia, umiejętnością analizy treści, weryfikacji informacji dostępnych w sieci oraz higieną cyfrową. Wyszczególnia także konkretne obszary tj.: Internet, media społecznościowe, sztuczna inteligencja.

Należy podkreślić, że kierunki rozwoju polityki oświatowej dotyczą całego systemu oświaty, który obejmuje m.in.: przedszkola, szkoły podstawowe i ponadpodstawowe, a także placówki oświatowo-wychowawcze, placówki kształcenia ustawicznego, centra kształcenia zawodowego, branżowe centra umiejętności, poradnie psychologiczno-pedagogiczne, młodzieżowe ośrodki wychowawcze, młodzieżowe ośrodki socjoterapii, specjalne ośrodki szkolno-wychowawcze, ośrodki rewalidacyjno-wychowawcze (Ustawa Prawo oświatowe z dnia 14 grudnia 2016 r.). W tym kontekście proces kształtowania kompetencji cyfrowych oraz wykorzystywania technologii informacyjno-komunikacyjnych dotyczy dzieci i młodzieży w przedziale wiekowym

od trzeciego do dziewiętnastego roku życia. O konieczności edukacji cyfrowo – medialnej mówi się już bowiem także w odniesieniu do dzieci przedszkolnych, co wynika z faktu wczesnego dostępu do urządzeń typu: smartfon, tablet (Wojnowska, 2024).

Od wielu lat są wdrażane i realizowane programy wspierające szkoły i placówki, w celu podnoszenia poziomu oraz jakości edukacji w obszarze technologii informacyjno-komunikacyjnych. Przykładem może być, realizowany od roku 2017, program Aktywna tablica, którego celem jest rozwój szkolnej infrastruktury, jak również kompetencji uczniów oraz nauczycieli w zakresie TIK poprzez dofinansowanie do zakupu nowoczesnego sprzętu, tj.: tablice interaktywne, projekторы, laptopy etc. (MEN, 2024b). Innym przykładem jest program Laboratoria Przyszłości (MEN, GovTech Polska, 2024), który umożliwiał wyposażenie szkół w sprzęt wspomagający rozwój kompetencji przyszłości w obszarze tzw.: STEAM², np.: drukarki 3D, okulary VR, roboty edukacyjne. Nauczyciele i uczniowie mogą również korzystać z programu Ogólnopolska Sieć Edukacyjna (OSE), który zapewnia szkołom w całym kraju bezpłatny dostęp do szerokopasmowego Internetu oraz bezpiecznego połączenia (OSE, 2025). Oprócz bezpośredniego wsparcia finansowego dla szkół na zakup sprzętu czy oprogramowania, istnieje również szeroka oferta szkoleń, kursów, konferencji, warsztatów skierowanych do nauczycieli oraz uczniów, których celem jest doskonalenie i podnoszenie ich kompetencji w obszarze wykorzystywania TIK w nauce oraz pracy. Programy realizowane są zarówno w skali całego kraju, jak i regionalnej. Przykładem może być Cyfrowa Szkoła Wielkopolsk@ 2030, projekt, którego celem jest „podniesienie do 2029 r. jakości edukacji na każdym szczeblu kształceniu ogólnego” (CSW, b.d.).

Powyższe wskazuje, że obszar technologii informacyjno-komunikacyjnych stanowi istotny element w procesie edukacji dzieci i młodzieży już od najmłodszych lat. Kształtowanie kompetencji cyfrowych, jak i otwarcie na nowe technologie jest bowiem kluczowe w społeczeństwie informacyjnym. Sprawne i efektywne poruszanie się w cyfrowym świecie TIK stanowi już nie

² STEAM to skrót od pierwszych liter słów: Science, Technology, Engineering, Arts, Mathematics.

tylko kluczowe kompetencje przyszłości, ale umiejętności podstawowe (Komisja Europejska, 2025), które są fundamentem i punktem wyjścia do dalszego rozwoju w obszarze cyfrowym i technicznym w procesie uczenia się przez całe życie (Komisja Europejska, 2025). Edukacja i szkolenia w zakresie kompetencji cyfrowych stanowią jeden z ważniejszych elementów unijnego budżetu na lata 2021-2027 oraz instrumentu NextGenerationEU, których ogólnym celem jest osiągnięcie bardziej zielonej, bardziej cyfrowej, bardziej odpornej i lepiej przygotowanej na bieżące oraz przyszłe wyzwania Europy (Komisja Europejska, Dyrekcja Generalna ds. Budżetu, 2021). W świetle przyjętych założeń i obranych kierunków, polski system oświaty stara się nie tylko dopasować do otaczającej rzeczywistości, ale też zapewnić uczniom kształcenie umiejętności poszukiwanych oraz cenionych na rynku pracy.

Kompetencje przyszłości

Komisja Europejska wyróżnia aktualnie dwa pojęcia: umiejętności podstawowe oraz kompetencje kluczowe. Wskazuje je, jako podstawę do bycia niezależnym, lepiej zorientowanym, w znaczeniu posiadającym informację, oraz przygotowanym, zaangażowanym i aktywnym obywatelem. Ma to wspomóc ochronę demokracji oraz wartości fundamentalnych w kontekście rosnącej polaryzacji w obszarze politycznym, erozji zaufania do instytucji oraz rosnącej manipulacji informacją. Na umiejętności podstawowe składają się (Komisja Europejska, 2025):

- umiejętność czytania i pisania: rozumienie, zastosowanie, ocenianie, umiejętność wypowiedzi ustnie oraz pisemnie, stosowanie materiałów wizualnych, audio oraz cyfrowych w różnych kontekstach i z różnych dziedzin,
- umiejętności matematyczne: zdolność do matematycznego rozumowania, formułowanie, interpretowanie oraz stosowanie rozwiązań matematycznych w sytuacjach problemowych w realnym świecie, właściwa ocena oraz podejmowanie decyzji w oparciu o dane,
- umiejętności naukowe: indywidualne podejście oraz zdolność do zaangażowania w zagadnienia naukowe, umiejętność naukowego

wyjaśniania zjawisk, oceny, formułowania problemów badawczych, interpretacji danych oraz dowodów,

- umiejętności cyfrowe: pewne, krytyczne i odpowiedzialne korzystanie z technologii cyfrowych do celów: nauki, pracy, uczestniczenia w życiu społecznym; umiejętność czytania i pisania informacji, poruszania się w mediach, komunikowania się, tworzenia treści cyfrowych, bezpiecznego korzystania z Internetu, higiena cyfrowa,
- umiejętności obywatelskie: zdolność do odpowiedzialnego działania oraz pełnego uczestnictwa w życiu publicznym, opartego na zrozumieniu społecznych, ekonomicznych, prawnych i politycznych struktur; rozumienie i ocena obywatelskich pojęć, instytucji oraz procesów, włączając demokrację, media oraz gotowość kryzysową.

Powyższe pięć obszarów stanowi punkt wyjścia, fundament, na którym oparto kompetencje kluczowe w procesie uczenia się przez całe życie. Kompetencje kluczowe określone są jako elementy, których nabycie jest potrzebne do aktywności na rynku pracy, w życiu społecznym, obywatelskim, jak również własnego rozwoju oraz spełnienia. Zalicza się do nich: wiedzę, umiejętności i postawy. W swoich zaleceniach Rada Unii Europejskiej wyszczególniła osiem kompetencji kluczowych, których nabycie ma przyczynić się do osiągnięcia „samorealizacji, zdrowego i zrównoważonego stylu życia, szans na zatrudnienie, aktywnej postawy obywatelskiej i integracji społecznej” (Komisja Europejska, 2025). Są to:

- umiejętność czytania i pisania
- wielojęzyczność
- umiejętność liczenia, umiejętności naukowe i inżynierskie
- kompetencje cyfrowe i techniczne
- umiejętności interpersonalne i zdolność do nabywania nowych kompetencji
- aktywna postawa obywatelska
- przedsiębiorczość
- świadomość i ekspresja kulturalna

Na początku stycznia 2025 roku Światowe Forum Ekonomiczne opublikowało „Raport o przyszłości miejsc pracy 2025”. W przedstawionym

materiale można znaleźć m.in.: badania dotyczące aktualnie poszukiwanych, jak i przewidywanych, jako pożądane w roku 2030, kluczowych kompetencji pracowników (World Economic Forum, 2025). Wyniki wskazują, że zarówno dziś, jak i za pięć lat poszukiwani będą pracownicy posiadający poniższe umiejętności, a procentowy wzrost na ich zapotrzebowanie wynosi odpowiednio (Tableau, 2024):

- praca ze sztuczną inteligencją oraz w obszarze dużych zbiorów danych (AI and big data) – 88%,
- umiejętności technologiczne (Technological literacy) – 71%,
- kreatywność (Creative thinking) – 57%,
- odporność, elastyczność, zręczność/sprawność (Resilience, flexibility and agility) – 68%,
- ciekawość i uczenie się przez całe życie (Curiosity and lifelong learning) – 65%,
- przywództwo i wpływ społeczny (Leadership and social influence) – 61%,
- zarządzanie talentami (Talent management) – 60%,
- myślenie analityczne (Analytical thinking) – 58%,
- myślenie systemowe (Systems thinking) – 55%,
- motywacja i samoświadomość (Motivation, and selfawareness) – 52%.

Kompetencje, które na chwilę obecną nie są jeszcze postrzegane jako krytyczne, ale mogą się takimi stać do roku 2030 są (tamże):

- sieć i cyberbezpieczeństwo (Networks and cybersecurity),
- ochrona środowiska (Environmental stewardship),
- projektowanie oraz doświadczenia użytkowników (Design and users experience).

Co ciekawe, kompetencje, które obecnie mają znaczenie, tj.: empatia i aktywne słuchanie (Empathy and active listening), obsługa klienta i zorientowanie na usługi (Service orientation and customer service), zarządzanie zasobami oraz operacyjne (Resource management and operations) są postrzegane jako kluczowe obecnie. Nie jest jednak antycypowany znaczący wzrost ich znaczenia w przyszłości.

W badaniu wyróżniono jeszcze czwartą grupę kompetencji, które już obecnie mają coraz mniejsze znaczenie i nie przewiduje się, by na znaczeniu miały zyskiwać. Wymienione w tym zbiorze są:

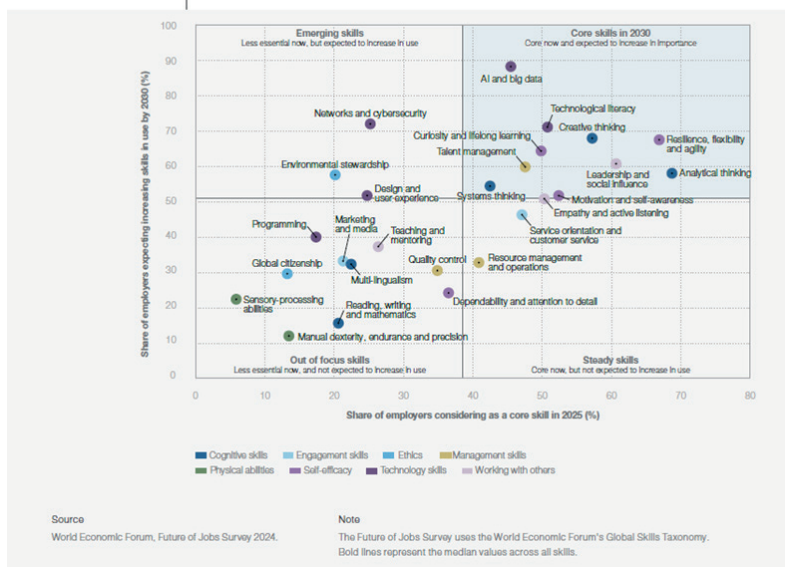
- programowanie (Programming),
- marketing i media (Marketing and media),
- nauczanie i mentoring (Teaching and mentoring),
- kontrola jakości (Quality control),
- wielojęzyczność (Multi-lingualism),
- tzw. obywatelstwo globalne (Global citizenship),
- zdolności przetwarzania sensorycznego (Sensory-processing abilities),
- czytanie, pisanie, liczenie (Reading, writing and mathematics),
- niezawodność i dbałość o szczegóły (Dependability and attention to detail),
- sprawność manualna, wytrwałość, precyzja (Manual dexterity, endurance and precision).

Rozkład poszczególnych kompetencji pracowników uważanych za kluczowe w roku 2025 oraz przewidywanych jako kluczowe do roku 2030 w ujęciu procentowym przedstawia rysunek 1.

FIGURE 3.6

Core skills in 2030

Share of employers considering skills to be a core skill in 2025 and share of employers expecting skills to increase in importance by 2030.



Rysunek 1. Udział kompetencji pracowników uważanych za kluczowe w roku 2025 oraz przewidywanych jako kluczowe do roku 2030
Źródło: World Economic Forum, 2025.

Dla porównania, rynek w Polsce antycypuje wzrost znaczenia kompetencji kluczowych w rozkładzie podobnym co w skali globalnej. Występują jednak pewne różnice. W grupie kompetencji zyskujących na znaczeniu do roku 2030 nie przewiduje się zapotrzebowania na myślenie systemowego (nie jest uwzględnione w żadnej grupie) oraz motywacji i samoświadomości (ta zdolność poniekąd spadła do zbioru kompetencji mających znaczenie obecnie, ale których wartość nie będzie wzrastać). Znalazło się natomiast zorientowanie na usługi oraz obsługa klienta. Przewidywany wzrost poszczególnych kompetencji na rynku polskim kształtuje się następująco (Tableau, 2024):

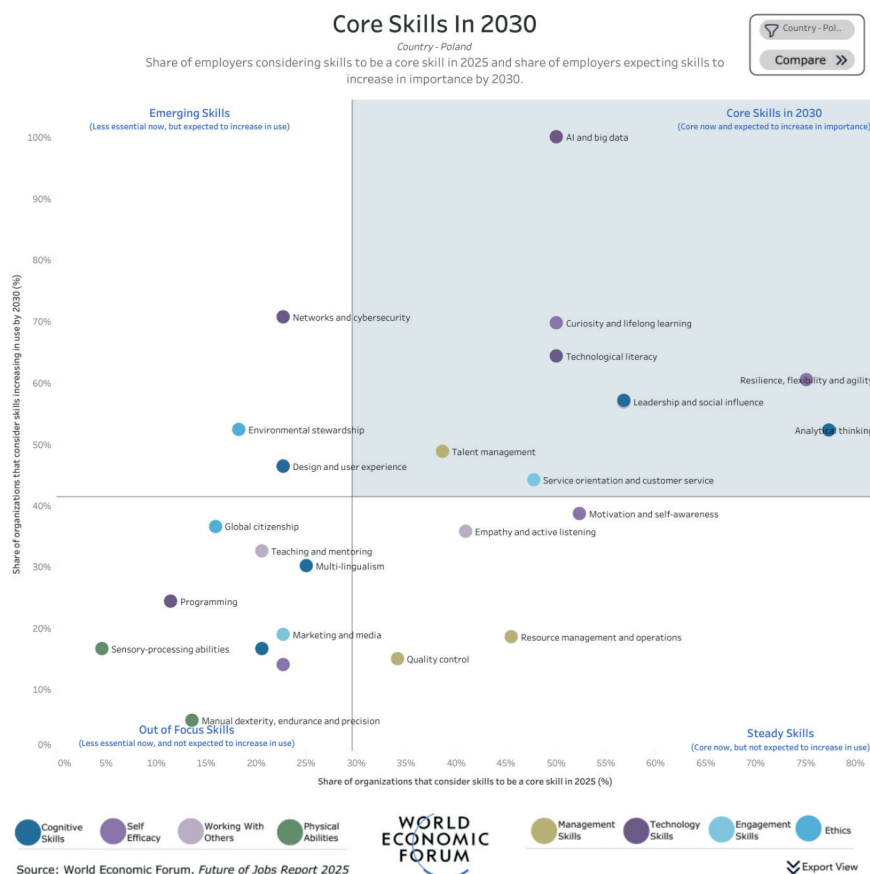
- praca ze sztuczną inteligencją oraz w obszarze dużych zbiorów danych (AI and big data) – 100%,
- ciekawość i uczenie się przez całe życie (Curiosity and lifelong learning) – 70%,
- umiejętności technologiczne (Technological literacy) – 64%,

- odporność, elastyczność, zręczność/sprawność (Resilience, flexibility and agility) – 61%,
- kreatywność (Creative thinking) – 57%,
- przywództwo i wpływ społeczny (Leadership and social influence) – 57%,
- myślenie analityczne (Analytical thinking) – 52%,
- zarządzanie talentami (Talent management) – 49%,
- obsługa klienta i zorientowanie na usługi (Service orientation and customer service) – 44%.

Ponadto, w Polsce wciąż umiejętnością o kluczowym znaczeniu jest kontrola jakości (Quality control), która znalazła się wraz z empatią i aktywnym słuchaniem (Empathy and active listening), motywacją i samoświadomością (Motivation, and selfawareness), zarządzaniem zasobami oraz operacyjnym (Resource management and operations) w grupie kompetencji potrzebnych dziś, ale bez perspektyw wzrostu w perspektywie najbliższych pięciu lat.

Rozkład poszczególnych kompetencji pracowników uważanych za kluczowe w roku 2025 oraz przewidywanych jako kluczowe do roku 2030 w Polsce w ujęciu procentowym przedstawia rysunek 2.

Organizacja Współpracy Gospodarczej i Rozwoju OECD w opracowanym w 2019 r. dokumencie OECD Przyszłość Edukacji i Umiejętności 2030 Kompas Edukacyjny 2030, definiuje kompetencje, jako pojęcie obejmujące: wiedzę (Knowledge), umiejętności (Skills), podejście (Attitude) oraz wartości (Values) (OECD, 2019).



Rysunek 2. Udział kompetencji pracowników uważanych za kluczowe w roku 2025 oraz przewidywanych jako kluczowe do roku 2030 w Polsce
Źródło: Tableau, 2024.

Według OECD edukacja powinna ewoluować w takim kierunku, by wzmacniać i rozwijać w uczniach: umiejętność czytania i pisanie, kompetencje cyfrowe, zdrowie fizyczne i psychiczne, kompetencje społeczne i emocjonalne. Celem działań edukacyjnych, w kontekście szybko i nieprzewidywalnie zmieniającej się rzeczywistości, ma być samodzielność w poruszaniu się po nieznanym obszarze oraz odpowiedzialne i sensowne odnajdywanie kierunku, zamiast otrzymywanie gotowych instrukcji i wskazówek od nauczycieli. Nakreślone w dokumencie OECD kierunki są spójne i komplementarne względem dokumentów Komisji Europejskiej, zaleceń Rady Unii

Europejskiej czy raportu Światowego Forum Ekonomicznego. Na marginesie być może warto zaznaczyć, że zestawiając umiejętności i kompetencje wskazane jako kluczowe do 2030 roku przez Unię Europejską z badaniami Światowego Forum Ekonomicznego można zauważyć pewne rozbieżności. Z punktu widzenia biznesu rozwój zdolności związanych z czytaniem, pisanem, liczeniem czy wielojęzycznością jest mniej istotny. Może wynikać to z faktu różnego rozłożenia akcentów obu organizacji – czy punkt ciężkości jest położony na człowieka i jego rozwój osobisty, czy biznes, w kontekście potrzeb rynku pracy.

Wszystkie wymienione kompetencje kluczowe (łącznie w badaniu ŚFE jest ich 26) są podzielone na osiem kategorii. Na potrzeby niniejszego rozdziału, dotyczącego korzystania z technologii informacyjno-komunikacyjnych w kontekście edukacji i rozwoju dzieci i młodzieży, autor wyróżnia dwie: umiejętności poznawcze (Cognitive skills) oraz społeczne (Working with others). W celu uporządkowania według kategorii, kompetencje związane z rozwojem funkcji poznawczych to: umiejętność czytania i pisanie, zdolności matematyczne (rozwijające myślenie logiczne), wielojęzyczność, myślenie kreatywne (twórczość, związana z wyobraźnią), myślenie analityczne, myślenie krytyczne, myślenie systemowe; kompetencje związane z kształtowaniem umiejętności społecznych to: empatia i aktywne słuchanie, nauczanie i mentoring, przywództwo i wpływ społeczny. Wskazane w kategorii drugiej elementy, warunkujące dobrą współpracę z innymi, obejmują wszystkie poziomy komunikacji społecznej, rozumianej jako „zbiór procesów umożliwiających nawiązanie kontaktu, relacji pomiędzy członkami danej grupy społecznej czy zbiorowości” (Nowicka, 2023).

Korzystanie dzieci i młodzieży z TIK w kontekście ich edukacji i rozwoju

Pierwszy kontakt dzieci z technologiami informacyjno-komunikacyjnymi ma miejsce już od najmłodszych lat. Badania wykonane przez Urząd Komunikacji Elektronicznej w 2021 r. wskazują, że 2% polskich dzieci posiada własny smartfon już w wieku 3-4 lat (Białecka, Gil, 2024). Inne analizy, że dostęp do smartfona, tableta, smartwatcha czy laptopa posiada 54% dzieci w wieku 0-6 lat (Rowicka, Bujalski, 2022), choć rekomendowany wiek,

w którym dziecko powinno otrzymać własny smartfon, to lat 13 (Białecka, Gil, 2024).

Badania z 2023 r. wykonane przez NASK pokazały, że uczniowie w przedziale wiekowym 13-17 lat średnio przez 5 godz. 36 minut dziennie korzystają z Internetu w dni powszednie, podczas gdy w weekend czas ten wydłuża się średnio do 6 godz. 16 min. dziennie. Z wiekiem, tzn.: pomiędzy VII klasą szkoły podstawowej a II klasą szkoły ponadpodstawowej czas ten sukcesywnie wzrasta – różnica wynosił 1 godz. 27 min. Trend wzrostowy utrzymuje się również na przestrzeni lat. Od 3 godz. 30 min. w 2014 roku do 5 godz. 36 min. w roku 2022 (NASK, 2024).

W pojęciu TIK mieszczą się: sprzęt, oprogramowanie, usługi informatyczne oraz telekomunikacyjne, zasoby sieciowe, a wszystkie te elementy służą tworzeniu, gromadzeniu, przetwarzaniu i przesyłaniu informacji w formie elektronicznej, jak również umożliwiają integrowanie i komunikowanie się między maszynami, ludźmi oraz organizacjami (ZPE, 2024). Korzystanie z TIK może zatem, w pierwszym odruchu, kojarzyć się z wymogiem posiadania już określonych kompetencji cyfrowych. Jeśli jednak przeanalizujemy poszczególne elementy TIK, otrzymamy przykładowo: smartfon, tablet, smartwatch, laptop, komputer, aplikacje, streaming, gry wideo, e-sport, media społecznościowe, komunikatory internetowe, druk 3D, robotykę, telewizję, e-materiały, platformy dydaktyczne, wirtualną rzeczywistość. Te pojęcia zdecydowanie bardziej przemawiają do wyobraźni w kontekście korzystania z TIK przez dzieci i młodzież.

Ma ono przede wszystkim charakter rozrywkowo-komunikacyjny i sprowadza się do grania w gry, słuchania muzyki, oglądania bajek, filmów, komunikacji, użytkowania portali społecznościowych. Początkowo dla zabawy, zabicia nudy, „świętego spokoju” rodziców, atrakcyjnej alternatywy angażującej umysł i zmysły, z czasem nieodzownego elementu codziennej rutyny i aktywności, a zdarza się, że aż do przymusu, odczuwanego jako FOMO (Fear of missing out), które oznacza lęk, że ominię mnie coś ciekawego, gdy będę offline (Białecka, Gil, 2024), czy też poczucie dyskomfortu, będące efektem spadku poziomu „cyfrowej” dopaminy i potrzebą dostarczenia natychmiastowej satysfakcji w postaci lajków, serduszek etc. lub gratyfikacji ze zdobywania kolejnych poziomów w grze (Górny, 2024). Dane pokazują, że

54,9% nastolatków często lub bardzo często korzysta z Internetu lub smartfona równocześnie z wykonywaniem innych czynności. Połowa badanych nie rozstaje się ze smartfonem podczas spożywania posiłków czy zasypiania. Towarzyszy on także części nastolatków podczas odrabiania lekcji, oglądania telewizji, filmów, bezpośredniej rozmowy ze znajomymi, kolegami czy bezpośredniej rozmowy z rodzicami lub opiekunami (NASK, 2024).

Intencjonalne korzystanie z zasobów Internetu w celu uczenia się, deklaruje stosunkowo niski odsetek nastolatków w porównaniu z aktywnością rozrywkowo-informacyjną: odrabianie lekcji – 34,6%, poszerzanie wiedzy w ramach swoich zainteresowań, hobby – 19,7%, przygotowanie do sprawdzianów, klasówek – 16,3%, tworzenie grafiki, muzyki, filmów, przetwarzanie zdjęć – 7,8%, przeglądanie wiadomości, czytanie artykułów – 7%, poszerzanie wiedzy potrzebnej do szkoły – 6% (tamże).

Szeroki, a nierzadko zdarza się, nieograniczony i niedostosowany do ich wieku oraz rozwoju psychomotorycznego i emocjonalnego, dostęp dzieci i młodzieży do TIK, w szczególności związany z dostępem do Internetu, korzystaniem z mediów społecznościowych, używaniem komunikatorów, gram, nie przekłada się na większe sukcesy edukacyjne. Nie ma dowodów, że są lepszymi uczniami, choć mogą mieć większe rozpoznanie schematów czy wzorców. Istnieją natomiast badania i dowody, które wskazują, „że mogą istnieć znaczące negatywne kliniczne i neurologiczne wpływy technologii na *Dzieci ekranu* (...). Badania techniką neuroobrazowania pokazują, że jarzące się ekrany (...) są tak samo stymulujące dla ośrodka przyjemności w mózgu oraz tak samo podnoszą poziom dopaminy (głównego neuroprzekaźnika przyjemności), jak seks. To właśnie (...) czyni ekrany tak bardzo uzależniającymi dla dorosłych, a jeszcze bardziej dla dzieci, których mózgi wciąż się rozwijają i nie są jeszcze odpowiednio wyposażone, by radzić sobie z takim poziomem stymulacji” (Kardaras, 2025). Nadmierne pobudzenie układu nerwowego, interaktywne korzystanie z urządzeń elektronicznych, ciągle narażenie na intensywne bodźce, uruchamiające instynkt przetrwania (reakcja walki lub ucieczki), przeżywanie silnego napięcia, może prowadzić do chronicznego stresu, którego przejawem są zaburzenia snu, jak również problemy natury umysłowej, emocjonalnej, społecznej (Dunkley, 2022). Prowadzone na szeroką skalę badania kliniczne przynoszą alarmujące wnioski, dotyczące związku

pomiędzy ekspozycją dzieci na jarzące się ekrany z „zaburzeniami psychiatrycznymi jak ADHD, uzależnienia, niepokój, depresja, nadmierna agresja czy nawet psychoza. (...) nadmierna styczeńność z ekranem może neurologicznie zniszczyć rozwijający się mózg młodej osoby w taki sam sposób jak uzależnienie od kokainy” (Kardaras, 2025). W literaturze można spotkać również pojęcie zespołu stresu elektronicznego (ZSE), który „cehuje się nadmierną stymulacją i pobudzeniem oraz jest definiowany przez obecność objawów afektywnych, kognitywnych i/lub behawioralnych, które ustępują po wyeliminowaniu kontaktu z urządzeniami elektronicznymi” (Dunckley, 2022).

Wczesna inicjacja korzystania przez dzieci z TIK „narusza rozwój kluczowych umiejętności poznawczych, takich jak podejmowanie decyzji, myślenie i kreatywność” (Białecka, Gil, 2024), a wynikające z niej przebudowanie skutkuje „przeciążeniem pamięci, zakłóceniami uwagi, problemami z koncentracją, zaburzeniami snu, stanami depresyjnymi, zanikiem samodzielnego myślenia i uzależnieniem od mediów” (Górny, 2024).

Pojawia się zatem kluczowe pytanie: Jak odnieść powyższe do rozwoju pożądaných kompetencji kluczowych w obszarze poznawczym? W jaki sposób uczeń ma rozwijać myślenie analityczne, logiczne, krytyczne, kreatywność, dokonywać analizy i syntezy, refleksji, wyciągać wnioski, tworzyć, szukać nowych rozwiązań, stosować obliczenia matematyczne, gdy jeszcze w wieku przedszkolnym i wczesnoszkolnym zanurzony w ekranie, grach, różnorodnych aplikacjach, komunikatorach, mediach społecznościowych, przy aprobacie dorosłych oraz instytucji, dokonuje sabotażu sam na swoich własnych funkcjach poznawczych, które osłabia w domu w ramach zabawy i rozrywki, jak i w szkole w ramach rozwoju kompetencji cyfrowych. Czy przypadkiem nie jest to błędne koło?

Młodzi ludzie żyją dziś na granicy dwóch światów: realnego i cyfrowego. Przy czym ten drugi jest dla nich często atrakcyjniejszy i stanowi wręcz ucieczkę od trudów tego pierwszego. W dużym stopniu przyczyniły się do tego lockdowny i nauka zdalna w latach 2020-2022, podczas których całe ich życie – od nauki, przez rozrywkę, po kontakty towarzyskie – przeniosło się do sieci (Białecka, Gil, 2024). Korzystanie z komunikatorów i mediów społecznościowych może wydawać się sprzyjające zawieraniu znajomości, posiadaniu szerokiego grona znajomych bez barier geograficznych, budowaniu

relacji, podtrzymywaniu przyjaźni bez względu na odległość i czas oraz rozwojowi umiejętności komunikacyjnych. Niestety nie potwierdzają tego badania, które dowodzą, że ekrany nie zastąpią tzw. synchroniczności dzielonego doświadczenia, które to zjawisko polega na wspólnym robieniu czegoś, chociażby oglądaniu razem filmu, co pogłębia więzi społeczne. Nie są też w stanie zastąpić fizycznego kontaktu: dotyku, pogłaskania, przytulenia, który wywołuje wydzielanie endorfin, istotnych dla budowania osobistych więzi. Wczesny dostęp do TIK oddziałuje negatywnie na rozwój tych obszarów mózgu, które odpowiadają za interakcje społeczne, empatię oraz umiejętności interpersonalne, gdyż „jeśli pozbawimy dziecko interakcji i dotyku we wczesnym wieku, ponieważ głównie kontaktują się z ludźmi za pomocą ekranu, obszary te nie rozwiną się w pełni” (Kardaras, 2025). Ponadto, relacje w mediach społecznościowych są nietrwałe i powierzchowne. Często sprowadzają się do szybkich, krótkich reakcji – mechanicznych nie autentycznych – na wpisy lub wiadomości, co jednak – poprzez wyrzut dopaminy – utrzymuje odbiorcę w iluzji poczucia akceptacji, przynależności i lojalności (Bialecka, Gil, 2024). Trudno w nich jednak o zaufanie, dyskrecję, prawdziwe wsparcie, co ma odzwierciedlenie w zaburzeniach nastroju, osłabieniu zdrowia psychicznego, poczuciu wyalienowania i smutku, zwiększonym prawdopodobieństwie depresji. To wszystko powoduje, że „w erze mediów społecznościowych, będziemy bardziej opóźnieni społecznie” a nawet „możemy w przyszłości być mniej społeczni” (Kardara, 2025).

Ponownie pojawia się ważne pytanie: Jak odnieść powyższe do rozwoju kompetencji kluczowych w obszarze społecznym? W jaki sposób uczeń ma rozwijać kompetencje społeczne, które determinują funkcjonowanie człowieka w środowisku społecznym, jeśli to środowisko przestaje być organiczne, a staje się mechaniczne, a nawet syntetyczne? Ograniczony bezpośredni kontakt z drugim człowiekiem osłabia zdolności do nawiązywania kontaktów, nie stwarza przez to możliwości uczenia się czytania zachowania drugiego człowieka *inter-legere*, czyli odbierania sygnałów komunikacji niewerbalnej, która między innymi kształtuje naszą inteligencję emocjonalną. Jeżeli „podstawą dojrzałości emocjonalnej jest przede wszystkim umiejętność odnajdywania się w interakcji z drugim człowiekiem, a także umiejętność prowadzenia dialogu i aktywnego słuchania” (Nowicka, 2023), czy w perspektywie

utrzymującej się tendencji korzystania przez dzieci i młodzież z TIK, w coraz większym zakresie i coraz młodszym wieku, nie tworzymy społeczeństwa niedojrzałego emocjonalnie, o niskich kompetencjach komunikacji interpersonalnej, docelowo niezdolnego do empatii i aktywnego słuchania, nauczania i mentoringu, przywództwa i wpływu społecznego? Czy przypadkiem nie jest to błędne koło?

Warto zasygnalizować tutaj jeszcze kwestie: bytów syntetycznych, z którymi dzieci i młodzież wchodzi w interakcje, nawiązują relacje, a które wydają się bezkonkurencyjne w stosunku do żywych, realnych, prawdziwych przyjaciół, z którymi inwestowanie w budowanie relacji w świecie offline jest trudniejsze i zbyt czasochłonne, którzy nie zawsze są tak mili i dostępni – tu pojawia się też problem odróżnienia prawdy od fikcji (funkcje poznawcze); zjawiska phubbingu, czyli lekceważenia, ignorowania innych osób z uwagi na używanie telefonu komórkowego (Ministerstwo Cyfryzacji, 2023), czy ghosting – znikanie bez śladu, nagłe zerwanie kontaktu, co (i phubbing, i ghosting), oddziałuje na relacje międzyludzkie. Są to kolejne wątki warte przyjrzenia się w kontekście edukacji i rozwoju dzieci i młodzieży, jak i etyki.

Podsumowanie

Żyjąc w świecie dynamicznej, a przy tym ciągłej zmiany, umiejętność dopasowania, elastycznego reagowania, nadążanie za zmianą stały się wyzwaniem, a wręcz warunkiem sine qua non, codziennego funkcjonowania społeczeństwa informacyjnego. Jednocześnie, w celu zachowania poczucia bezpieczeństwa na poziomie jednostki, jak i wspólnoty koniecznym jest posiadanie pewnych stałych punktów odniesienia – kotwic, jak również przekonanie, że rozumiemy otaczającą rzeczywistość, panujemy nad sytuacją; że po nieustannie rozszerzającym się oceanie infosfery nie dryfujemy, ale wciąż sami trzymamy ster i kurs. Niewątpliwie pomocne w tym są kompetencje poznawcze oraz społeczne, kształtowane w procesie edukacji i rozwoju.

Zbyt szeroki dostęp dzieci i młodzieży, już od wczesnego dzieciństwa, do zasobów Internetu, mediów społecznościowych, gier, w połączeniu ze światowymi trendami w dydaktyce cyfrowej (upowszechnienie platform

edukacyjnych, e-zasobów, nauka programowania oraz myślenia komputacyjnego³, wykorzystanie AI, zwiększanie atrakcyjności zajęć poprzez stosowanie grywalizacji) (Lew-Starowicz, 2024), edutainment, immersja VR, tworzą środowisko, w którym proces ich edukacji i rozwoju może być zaburzony, a rozwój części kompetencji kluczowych ograniczać, a być może w pewnym stopniu nawet wykluczać, kształtowanie innych kompetencji, również uznanych za kluczowe. Trudno bowiem podnosić poziom umiejętności społecznych, emocjonalnych i poznawczych, przy obniżającym się ogólnym poziomie zdrowia psychicznego dzieci i młodzieży, do czego przyczyniają się: deprawacja społeczna, deprawacja snu, rozproszenie uwagi, uzależnienie (Haidt, 2025), zjawisko autyzmu rzekomego⁴ – skutki uboczne płynące nie tyle z samego rozwoju technologii informacyjno-komunikacyjnych, co łatwego do nich dostępu najmłodszych, braku rozwiązań systemowych, niskiej lub niepełnej świadomości rodziców i wychowawców, lub braku konsekwencji z ich strony, ogólnej akceptacji społecznej niniejszego status quo.

Rozwój technologii informacyjno-komunikacyjnych nie stanowi problemu *per se*, a zasadność i konieczność ich stosowania we współczesnym świecie jest bezdyskusyjna. Istotą rzeczy jest, w jaki sposób z nich korzystamy. Czy traktujemy je przedmiotowo i utylitarnie, jako narzędzie, czy też jak demiurga, którego mocy ulegamy, a która czyni nas cyfrowymi niewolnikami? Czy nie za wcześnie pozwalamy zanurzyć się w świat TIK dzieciom i młodzieży, które niegotowe psychicznie, fizycznie i emocjonalnie, już dziś ponoszą tego konsekwencje? Ostateczne skutki są trudne do przewidzenia.

Literatura

1. Białecka, B., Gil, A. (2024). *Pomoc dziecku w cyberpułapce*, Fronda.

³ Myślenie komputacyjne stanowi poszerzenie kompetencji określanych jako 3R (reading, writing, arithmetic) o umiejętności stosowania metod pochodzących z informatyki przy rozwiązywaniu problemów, por. (Warchoń, Solecka, 2023).

⁴ Pojęcie związane z korzystaniem przez dzieci z nowych technologii w sposób problemowy, a nawet patologiczny. Jest związane z nadmierną stymulacją medialną. Brak dostępu do ekranów, mediów elektronicznych i interaktywnych, skutkuje ustąpieniem objawów, por. (Ogonowska, 2021).

2. Dunckley, V. (2022). *Od nowa Wymieć śmieci z mózgów dzieci*. Wydawnictwo WS, Kornice.
3. Górny, G. (2024). *Kto chce ukraść dusze naszych dzieci*. Wydawnictwo AA s.c., Kraków.
4. Haidt, J. (2025). *Niespokojne pokolenie*. Zys i S-ka Wydawnictwo, Poznań.
5. Kardaras, N. (2025). *Dzieci ekranu, Jak uzależnienie od ekranu przejmuje kontrolę nad naszymi dziećmi – i jak wyrwać je z transu*. CeDeWu, Warszawa.
6. Nowicka, J. (2023). *Kompetencje komunikacyjne i społeczne w obszarze bezpieczeństwa, Po pierwsze jednostka i jej ekspozycja publiczna*. Część pierwsza. Wydawnictwo Akademii Sztuki Wojennej, Warszawa.
7. Ogonowska, A. (2021). *Cyberpsychologia Media-użytkownicy-zastosowania*. Oficyna Wydawnicza Impuls, Kraków.
8. Warchoń, T., Solecka, M. (2023). Rozwijanie myślenia komputacyjnego w edukacji wczesnoszkolnej. *Kultura – Przemiany – Edukacja*, s. 12-13. DOI: 378-387.10.15584/kpe.2023.12.23.
9. Zybertowicz, A. (2024). *AI eksploracja*. Zona Zero, Warszawa.
10. Zybertowicz, A. (2022). *Cyber kontra real. Cywilizacja w techno-pułapce*. Wydawnictwo Nowej Konfederacji, Warszawa, s. 18-19.

Akty prawa

1. Ustawa Prawo oświatowe z dnia 14 grudnia 2016 r. (t.j. Dz.U. z 2025 r. poz. 1043, 1160), art. 2. Pobrane z: <https://isap.sejm.gov.pl> (data dostępu: 12.12.2025).

Netografia

1. CSW. (b.d.). *Cyfrowa Szkoła Wielkopolsk@2030: o Projekcie*. Pobrane z: <https://csw2030.pl/o-projekcie/> (data dostępu: 12.12.2025).
2. Gov.pl. (2023). *Kompetencje przyszłości, które warto kształtować u dzieci i młodzieży*. Pobrane z: <https://www.gov.pl/web/laboratoria/kompetencje-przyszlosci-ktore-warto-ksztaltowac-u-dzieci-i-mlodziezy> (data dostępu: 12.12.2025).
3. Komisja Europejska. (2021). *The EU's 2021-2027 long-term budget and NextGenerationEU: facts and figures*. Urząd Publikacji Unii Europejskiej, 8. Pobrane z: <https://data.europa.eu/doi/10.2761/808559> (data dostępu: 12.12.2025).
4. Komisja Europejska. (2025). *Kompetencje kluczowe i umiejętności podstawowe*. Pobrane z: <https://education.ec.europa.eu/pl/education-levels/school-education/basic-skills?> (data dostępu: 12.12.2025).

5. Komisja Europejska. (2025). *Zalecenie Rady w sprawie kompetencji kluczowych w procesie uczenia się przez całe życie*. Pobrane z: <https://education.ec.europa.eu/pl/focus-topics/improving-quality/key-competences?> (data dostępu: 12.12.2025).
6. Lew-Starowicz, R. (2024). Światowe trendy w cyfryzacji nauczania. *Magazyn TIK w edukacji*, 2(11). Pobrane z: <https://e.tikwedukacji.pl> (data dostępu: 12.12.2025).
7. MEN. (2020). *Podstawowe kierunki realizacji polityki oświatowej państwa w roku szkolnym 2020/2021*. Pobrane z: <https://www.gov.pl/web/edukacja/podstawowe-kierunki-realizacji-polityki-oswiatowej-panstwa-w-roku-szkolnym-20202021> (data dostępu: 12.12.2025).
8. MEN. (2021). *Podstawowe kierunki realizacji polityki oświatowej państwa w roku szkolnym 2021/2022*. Pobrane z: <https://www.gov.pl/web/edukacja/podstawowe-kierunki-realizacji-polityki-oswiatowej-panstwa-w-roku-szkolnym-20212022> (data dostępu: 12.12.2025).
9. MEN. (2022). *Podstawowe kierunki realizacji polityki oświatowej państwa w roku szkolnym 2022/2023*. Pobrane z: <https://www.gov.pl/web/edukacja/podstawowe-kierunki-realizacji-polityki-oswiatowej-panstwa-w-roku-szkolnym-20222023> (data dostępu: 12.12.2025).
10. MEN. (2023). *Podstawowe kierunki realizacji polityki oświatowej państwa w roku szkolnym 2023/2024*. Pobrane z: <https://www.gov.pl/web/edukacja/podstawowe-kierunki-realizacji-polityki-oswiatowej-panstwa-w-roku-szkolnym-20232024> (data dostępu: 12.12.2025).
11. MEN. (2024a). *Podstawowe kierunki realizacji polityki oświatowej państwa w roku szkolnym 2024/2025*. Pobrane z: <https://www.gov.pl/web/edukacja/podstawowe-kierunki-realizacji-polityki-oswiatowej-panstwa-w-roku-szkolnym-20242025> (data dostępu: 12.12.2025).
12. MEN. (2024b). *Aktywna tablica – edycja 2024*. Pobrane z: <https://www.gov.pl/web/edukacja/aktywna-tablica--edycja-2024> (data dostępu: 12.12.2025).
13. MEN. (2025). *Podstawowe kierunki realizacji polityki oświatowej państwa w roku szkolnym 2025/2026*. Pobrane z: <https://www.gov.pl/web/edukacja/podstawowe-kierunki-realizacji-polityki-oswiatowej-panstwa-w-roku-szkolnym-20252026> (data dostępu: 12.12.2025).
14. MEN, GovTech Polska. (2024). *Laboratoria Przyszłości*. Pobrane z: <https://www.gov.pl/web/laboratoria> (data dostępu: 12.12.2025).

15. Ministerstwo Cyfryzacji. (2023). *Czym jest zjawisko phubbingu?* Pobrane z: <https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/czym-jest-zjawisko-phubbingu> (data dostępu: 12.12.2025).
16. NASK. (2024). *Nastolatki 3.0. Raport z ogólnopolskiego badania uczniów i Rodziców*. Pobrane z: https://www.nask.pl/media/2024/10/Thinkstat_raport_nastolatki-3_0_online-2.pdf (data dostępu: 12.12.2025).
17. OECD. (2019). *Learning Compass 2030*. Pobrane z: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/about/projects/edu/education-2040/concept-notes/OECD_Learning_Compass_2030_concept_note.pdf#page=1&zoom=auto,-272,722 (data dostępu: 12.12.2025).
18. OSE. (2025). *Internet OSE*. Pobrane z: <https://ose.gov.pl/internet-ose> (data dostępu: 12.12.2025).
19. Rowicka, M., Bujalski, M. (2022). *Raport z badań: Brzdąc w sieci – zjawisko korzystania z urządzeń mobilnych przez dzieci w wieku 0-6 lat*. Pobrane z: <https://twojasprawa.org.pl/file/e5f1f74a-0b05-11ec-abb0-0022480e68c2> (data dostępu: 12.12.2025).
20. Tableau. (2024). *Future of jobs - core skills 30*. Pobrane z: <https://public.tableau.com/app/profile/world.economic.forum.data.analytics/viz/Futureofjobs-core-skills30/coreskills30> (data dostępu: 12.12.2025).
21. Wojnowska, Z. (2024). Wprowadzenie najmłodszych w świat TIK. *Magazyn TIK w edukacji*, 2(62). Pobrane z: <https://e.tikwiedukacji.pl> (data dostępu: 12.12.2025).
22. World Economic Forum. (2025). *Future of Jobs Report 2025*. Pobrane z: <https://www.weforum.org/publications/the-future-of-jobs-report-2025/> (data dostępu: 12.12.2025).
23. ZPE. (2025). *Znaczenie technologii informacyjno-komunikacyjnych*. Pobrane z: <https://zpe.gov.pl/a/znaczenie-technologii-informacyjno-komunikacyjnych/D16xlmSWx> (data dostępu: 12.12.2025).

mgr Julia Aleksandrowicz¹

Uniwersytet Vizja, Warszawa

https://doi.org/10.29316/9788368103281_10

CYFROWA REWOLUCJA W OCHRONIE ZDROWIA – OSIĄGNIĘCIA I WYZWANIA

THE DIGITAL REVOLUTION IN HEALTHCARE – ACHIEVEMENTS AND CHALLENGES

Streszczenie

Pierwsze możliwości wykorzystania komputerów do prowadzenia dokumentacji medycznej pojawiły się na gruncie polskiego prawa na początku lat 90. Początkowo regulacje nie dawały możliwości wykorzystania systemów informatycznych jako jedyne źródła danych medycznych, mogły one stanowić jedynie wsparcie dla prowadzenia papierowej dokumentacji. Od 2020 roku obowiązują przepisy nakazujące prowadzenie dokumentacji w formie elektronicznej, przewidują one jednak szeroko interpretowane wyjątki. Rok 2011 przyniósł ustawę o systemie informacji w ochronie zdrowia, jednak ostateczny moment przejścia wyłącznie na dane cyfrowe był odsuwany w czasie. Obecnie funkcjonuje katalog dokumentów, które mają być prowadzone w formie elektronicznej, jednak i w tej formule pojawiają się problemy sprawiające, że informatyzacja w dalszym ciągu ma jedynie częściowy charakter. Dokumentacja papierowa nadal odgrywa bardzo dużą rolę w procesie leczenia, w tym również w zakresie danych historycznych o świadczeniach udzielonych pacjentowi, które nie zostały wprowadzone do systemu. Zmiany wymagają odpowiednich nakładów, ale i odpowiedniego podejścia personelu. Potrzebne są kompleksowe rozwiązania poparte wnikliwą analizą już funkcjonujących regulacji prawnych.

Słowa kluczowe: informatyzacja, dokumentacja medyczna, elektroniczna dokumentacja medyczna, ochrona zdrowia

¹ e-mail: j.aleksandrowicz@vizja.pl.

Abstract

The first opportunities for using computers to maintain medical records emerged in Polish law in the early 1990s. Initially, regulations did not allow for the use of IT systems as the sole source of medical data; they could only support paper records. Since 2020, regulations requiring records to be maintained electronically have been in force, but these regulations provide for broadly interpreted exceptions. The year 2011 brought the passage of the Healthcare Information System Act, but the final transition to exclusively digital data has been postponed. Currently, a catalog of documents is in place to be maintained electronically, but even this format faces challenges, resulting in only partial computerization. Paper documentation still plays a significant role in the treatment process, including historical data on services provided to patients that have not been entered into the system. These changes require appropriate investment, but also a focused approach from staff. Comprehensive solutions supported by a thorough analysis of existing legal regulations are needed.

Keywords: computerization, medical records, electronic medical records, healthcare

Wstęp

Sektor ochrony zdrowia w ostatnich latach wdrożył kolejne rozwiązania zmierzające do odejścia od pracy przy wykorzystaniu papierowej dokumentacji na rzecz danych przechowywanych w systemach informatycznych o ogólnopolskim zasięgu. Celem niniejszego rozdziału jest ukazanie procesu przemian, poczynwszy od pierwszych regulacji prawnych z początku lat 90., po wdrożenie funkcjonujących dziś rozwiązań. Na podstawie analizy aktualnego stanu prawnego i historycznych regulacji, a także w oparciu o piśmiennictwo zidentyfikowano kluczowe przeszkody i trudności, z jakimi trzeba się zmierzyć, żeby osiągnąć cel w postaci informatyzacji sektora ochrony zdrowia.

Informatyzacja to proces rozciągnięty w czasie i od lat budzący wiele kontrowersji nie tylko co do kształtu rozwiązań, ale i ogólnej zasadności ich wprowadzania. Nowoczesne technologie cyfrowe, które powinny być synonimem wygody, często okazują się uciążliwością – zarówno z perspektywy „odbiorców” przyzwyczajonych do papierowej dokumentacji, jak i do „wytwórców” dokumentów, którzy chcieliby więcej czasu poświęcić na bezpośredni kontakt z pacjentem niż na uzupełnianie dokumentacji. Różnice

w postrzeganiu informatyzacji są widoczne również dla przedstawicieli różnych pokoleń. Nie ma zatem jednej, wspólnej wszystkim idei zmian, w duchu której podejmowane mogłyby być działania.

Początki informatyzacji

Początek lat 90. to nie tylko okres transformacji ustrojowej, ale czas pojawienia się pierwszych komputerów w zakładach pracy. Zmiany nie omiły sektora ochrony zdrowia, który doczekał się nowej regulacji stanowiącej podstawy funkcjonowania systemu ochrony zdrowia w zmienionych realiach społeczno-gospodarczych, czyli ustawy z dnia 30 sierpnia 1991 r. o zakładach opieki zdrowotnej (t.j. Dz.U. z 2007 r. Nr 14, poz. 89 ze zm.). Jej uzupełnienie stanowiły akty wykonawcze, dotyczące m.in. zasad prowadzenia dokumentacji medycznej, w których to właśnie pojawiła się tematyka wykorzystania komputerów w pracy placówek medycznych.

Pierwszym wydanym przez ministra właściwego do spraw zdrowia rozporządzeniem dotyczącym prowadzenia dokumentacji medycznej było rozporządzenie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z dnia 17 grudnia 1992 r. w sprawie rodzajów dokumentacji medycznej, sposobu jej prowadzenia oraz szczegółowych warunków jej udostępniania (Dz.U. z 1993 r. Nr 3, poz. 13 ze zm.). Wobec braku szerszej regulacji w ustawie to właśnie rozporządzenie było podstawowym aktem prawnym ustalającym zasady prowadzenia dokumentacji medycznej. § 5 rozporządzenia stanowił zatem, że dokumentacja medyczna powinna być sporządzana i prowadzona czytelnie, w miarę możliwości pismem maszynowym i w porządku chronologicznym. Nie oznaczało to jednak możliwości oparcia się jedynie na zapisach wykonanych „mechanicznie”, bowiem w dalszej części rozporządzenia pojawiał się wymóg złożenia przez lekarza czy pielęgniarkę podpisu, który to wymóg przez jeszcze wiele lat i pod rządami kolejnych regulacji będzie istotnym utrudnieniem na drodze do rezygnacji z papierowych dokumentów. Nie mniej rozporządzenie rozstrzygało również wprost, że zbiory danych i informacji objętych dokumentacją medyczną mogą być sporządzane i przechowywane w komputerowych nośnikach informacji (które notabene nie zostały nigdzie zdefiniowane) pod warunkiem sporządzania i przechowywania wydruków komputerowych

będących odpowiednikami wymaganej na gruncie rozporządzenia dokumentacji. Ten zapis z perspektywy czasu nie może być oceniany inaczej niż wyraz braku zaufania wobec zapisywania dokumentów w środowisku informatycznym. Komputery de facto zostały sprowadzone do funkcji maszyny do pisanie. Zapis w komputerze mógł być narzędziem usprawniającym pracę, ale nie mógł stanowić jedynej formy dokumentowania świadczeń. Naczelnym argumentem była możliwość łatwej utraty danych i większa pewność dokumentów istniejących w formie fizycznej.

Tendencja do traktowania narzędzi informatycznych jako opcji pomocniczej a nie równoważnej alternatywy dla prowadzenia dokumentacji w formie papierowej była obecna także w kolejnym rozporządzeniu dotyczącym dokumentacji medycznej. Zapisy rozbudowano i doprecyzowano, wskazując w rozporządzeniu Ministra Zdrowia z dnia 10 sierpnia 2001 r. w sprawie rodzajów dokumentacji medycznej w zakładach opieki zdrowotnej, sposobu jej prowadzenia oraz szczegółowych warunków jej udostępniania (Dz.U. z 2001 r. Nr 88, poz. 966 ze zm.), że zbiory informacji objętych dokumentacją mogą być sporządzane i utrwalane także na komputerowych nośnikach informacji pod warunkiem:

1. zachowania selektywności dostępu do zbioru informacji,
2. zabezpieczenia zbioru informacji przed dostępem osób nieuprawnionych,
3. zabezpieczenia zbioru informacji przed zniszczeniem,
4. sporządzania zbioru informacji w zakresie pozwalającym na prowadzenie dokumentacji indywidualnej (czyli dotyczącej poszczególnych pacjentów) w postaci formularzy lub druków,
5. sporządzania i przechowywania wydruków podpisanych przez osoby uprawnione do udzielania świadczeń zdrowotnych.

Wydruk dalej pozostał warunkiem obligatoryjnym, a nierozwiązanym problemem podpisywanie dokumentacji medycznej przez personel, które wymagało złożenia tradycyjnego podpisu na papierowym dokumencie.

Zmiany nastąpiły kilka lat później za sprawą rozporządzenia z dnia 21 grudnia 2006 r. w sprawie rodzajów i zakresu dokumentacji medycznej w zakładach opieki zdrowotnej oraz sposobu jej przetwarzania (Dz.U. z 2006 r. Nr 247, poz. 1819 ze zm.), w którym opisano sposób składania

podpisu elektronicznego oraz wskazano na możliwość powiązania dokumentacji prowadzonej w formie elektronicznej z dokumentacją papierową stanowiącą np. wyniki badań. Można zatem mówić o znacznym progresie. Problemem okazało się jednak na tym etapie niewielkie rozpowszechnienie możliwości składania podpisu elektronicznego. Użycie tego narzędzia wymagałoby znacznych kosztów na sam podpis oraz zapewnienie odpowiedniego zaplecza sprzętowego. 20 lat temu nie mogło jeszcze o tym być mowy, zwłaszcza w dużych podmiotach, w których brakowało stanowisk komputerowych.

Niestety poza zmianami stanowiącymi krok w dobrym kierunku, w rozporządzeniu z 2006 roku pojawił się bardzo szkodliwy – z uwagi na rozbieżności interpretacyjne – zapis mówiący o prowadzeniu dokumentacji w „postaci pisemnej lub elektronicznej”. Został on powielony w następnych rozporządzeniach regulujących tę materię (w kolejnych mowa była co prawda o postaci elektronicznej lub papierowej, co mimo wszystko należy uznać za bardziej precyzyjne określenie, jednak istota zapisu pozostała bez zmian). Takie ujęcie prowadziło do kontrowersji w związku z częstym interpretowaniem go w ten sposób, że dopuszczalne są obydwie formy, nawet w odniesieniu do jednego podmiotu leczniczego (np. część lekarzy prowadziła dokumentację w wersji papierowej, część w komputerze) czy nawet konkretnego pacjenta (niektóre wpisy były dokonywane w dokumentacji papierowej, w tym w szczególności wyniki badań dodatkowych, inne wyłącznie w formie elektronicznej, bez załączania wydruku). Efektem takiej interpretacji był brak chronologii, niekompletność dokumentacji oraz ryzyko pomyłek.

Dopiero w najnowszym, obecnie obowiązującym rozporządzeniu rozstrzygnięto ten problem wskazując, że dokumentacja medyczna jest co do zasady prowadzona w formie elektronicznej, a dokument prowadzony w jednej formie nie może być jednocześnie prowadzony w drugiej z nich. Nie oznacza to jednak, że obowiązujące od 15 kwietnia 2020 r. rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 6 kwietnia 2020 r. w sprawie rodzajów, zakresu i wzorów dokumentacji medycznej oraz sposobu jej przetwarzania (t.j. Dz.U. z 2024 r. poz. 798 ze zm.) w pełni stawia na dokumentację elektroniczną. Dopuszczono możliwość prowadzenia dokumentacji medycznej w postaci papierowej, jeżeli przepis rozporządzenia tak stanowi lub warunki organizacyjno-techniczne

uniemożliwiają prowadzenie dokumentacji w postaci elektronicznej. O ile pierwsza z przesłanek jest dość łatwa do weryfikacji, ponieważ katalog takiej dokumentacji nie będzie bardzo szeroki (np. książeczka zdrowia dziecka, która ma być wydawana i prowadzona jako papierowy dokument o określonej treści), o tyle druga możliwość w praktyce dała szerokie pole do nadużyć. Czy warunkiem organizacyjno-technicznym nie będzie brak odpowiedniego sprzętu? Patrząc literalnie na przepis, nie zastrzeżono w nim, że musi to być przeszkoda trudna do pokonania chociażby z uwagi na nadmierne nakłady lub wymagająca szczególnego wykazania czy udokumentowania. Ważąc korzyści i zagrożenia wynikające z niedostosowania się do wymogu prowadzenia dokumentacji w postaci elektronicznej, łatwo dojść do wniosku, że wysiłek związany z informatyzacją wcale nie musi się opłacać. Bez wątpienia do trudności w egzekwowaniu przepisu przyczynił się także moment wejścia w życie nowego aktu prawnego – rozporządzenie zostało wydane w pierwszych tygodniach pandemii, co obniżyło jego priorytet wobec innych, kluczowych wówczas wyzwań dla systemu ochrony zdrowia. Nie było to jednak działanie intencjonalne – prace nad projektem rozporządzenia zostały zainicjowane już w październiku 2019 r. (Projekt rozporządzenia Ministra Zdrowia..., 2019).

Rozproszenie regulacji

Omawiane rozporządzenia dotyczące dokumentacji medycznej odnoszą się do kluczowych dokumentów wytwarzanych w związku z udzielaniem świadczeń zdrowotnych. Z perspektywy pacjenta z pewnością najistotniejszą składową jest dokumentacja indywidualna, której trzon stanowi historia choroby w przypadku świadczeń stacjonarnych oraz historia zdrowia i choroby w odniesieniu do świadczeń ambulatoryjnych. Generalnie koresponduje to z intencją ustawodawcy, który ostatecznie umieścił kluczowe regulacje dotyczące dokumentacji medycznej w ustawie z dnia 6 listopada 2008 r. o prawach pacjenta i Rzeczniku Praw Pacjenta (t.j. Dz.U. z 2024 r. poz. 581), niejako wyjmując ten zakres z ustawy o zakładach opieki zdrowotnej, która obowiązywała jeszcze do 2011 roku. W nowej konstrukcji prawnej zatem, prowadzenie dokumentacji medycznej jest przede wszystkim wyrazem realizacji prawa pacjenta do rzetelnej i kompletnej informacji o swoim stanie

zdrowia i otrzymanych świadczeniach, realizowanym przy użyciu zestandaryzowanych narzędzi w postaci prowadzonej na ogólnie ustalonych zasadach dokumentacji medycznej. Nie oznacza to jednak, że temat został wyczerpany w zapisach ustawy o prawach pacjenta i Rzeczniku Praw Pacjenta oraz rozporządzeniach wydanych w oparciu o zawarte w ustawie delegacje.

Regulacje dotyczące dokumentacji medycznej wydane najpierw w oparciu o delegacje ustawowe zawarte w ustawie o zakładach opieki zdrowotnej, a następnie w ustawie o prawach pacjenta i Rzeczniku Praw Pacjenta dotyczą w praktyce wąskiego wycinka dokumentacji, które w powszechnym postrzeganiu funkcjonuje jako dokumentacja medyczna. Wynika to z kilku nakładających się na siebie przyczyn. Na przestrzeni lat zakres dokumentów opisanych w rozporządzeniach ulegał zmianie, często w odpowiedzi na zmieniające się warunki organizacyjne – zmiany w innych przepisach czy utworzenie nowych struktur (np. dokumentacja Państwowego Ratownictwa Medycznego, dokumentowanie świadczeń udzielanych przez fizjoterapeutów, czyli przedstawicieli zawodu, który dopiero w 2015 roku doczekał się odrębnej ustawy). Tworzenie niektórych dokumentów nie było sankcjonowane na gruncie rozporządzeń, ale np. na poziomie zarządzeń Prezesa NFZ jako obligatoryjne dla świadczeń realizowanych jako świadczenia opieki zdrowotnej finansowane ze środków publicznych, podczas gdy rozporządzenia dotyczące dokumentacji medycznej mają zastosowanie dla wszystkich usług medycznych, niezależnie od źródła ich finansowania. Główną przeszkodę stanowił jednak brak definicji legalnej dokumentacji medycznej, mimo że próby jej stworzenia można było zaobserwować na gruncie ustawy o zakładach opieki zdrowotnej i w wydawanych do wczesnych lat 2000 rozporządzeniach dotyczących dokumentacji medycznej. Później ograniczono się tylko do enumeratywnego katalogu dokumentacji, który jednak nigdy nie miał charakteru zamkniętego (Nyczaj, Piecuch, 2013). Alternatywnie dla wyliczenia dokumentów lub określenia ich minimalnej zawartości można by przyjąć, tak jak najczęściej postrzegają to pacjenci, że dokumentacja medyczna to wszystkie dokumenty wytworzone w trakcie lub w związku z udzielaniem świadczeń zdrowotnych. Być może byłoby to rozwiązanie rozwiewające pewne wątpliwości, natomiast szerokie ujęcie mogłoby rodzić problemy innej natury. Jako główne zastrzeżenie należy wskazać trudności związane ze stosowaniem

przepisów dotyczących udostępniania dokumentacji medycznej, które mogłyby okazać się problematyczne do wyegzekwowania, gdyby dokumentację medyczną przyjmować w szerszym ujęciu np. w kwestii udostępniania recept czy zaświadczeń sporządzanych na odrębnych formularzach, których treść oraz fakt ich wydania zostały jedynie odnotowane w dokumentacji medycznej, bez zamieszczania ich duplikatu. Trudno zatem o uniwersalne rozwiązanie dla tego problemu.

Na zasadzie wyliczenia a nie scharakteryzowania czy opisanie szczególnych cech wyróżniających daną formę opiera się także definicja elektronicznej dokumentacji medycznej zawarta w ustawie z dnia 28 kwietnia 2011 r. o systemie informacji w ochronie zdrowia (t.j. Dz.U. z 2025 r. poz. 302 ze zm.). Ustawa ta określa organizację i zasady działania systemu informacji w ochronie zdrowia, w którym przetwarzane są dane niezbędne do prowadzenia polityki zdrowotnej państwa, podnoszenia jakości i dostępności świadczeń opieki zdrowotnej oraz finansowania zadań z zakresu ochrony zdrowia. Wdrażanie tej ustawy dobrze obrazuje trudności, jakie napotymano przy informatyzacji.

Początkowo zakładano zrealizowanie obowiązku wdrożenia EDM do dnia 1 sierpnia 2014 r. Pomimo, że było wiadomo, że ten zamiar się nie powiedzie, z uwagi na niski stopień zaawansowania wdrożeń, losy nowelizacji ważyły się do ostatniej chwili. Prezes Naczelnej Rady Lekarskiej w kwietniu 2014 roku apelował do Ministra Zdrowia o niezwłoczne zintensyfikowanie prac legislacyjnych dotyczących obowiązku prowadzenia dokumentacji medycznej w postaci elektronicznej, nie mniej na parę miesięcy przed upływem terminu, nie było jeszcze wiadomo, jakie będzie ostateczne rozstrzygnięcie (Materna, 2023). Ostatecznie termin został zmieniony na 1 sierpnia 2017 roku, co było podyktowane szeregiem przeszkód, przede wszystkim w postaci braku odpowiednich narzędzi i systemów informatycznych. Nawet jeżeli szpitale dysponowały oprogramowaniem, brakowało np. sprzętu medycznego umożliwiającego cyfrowy zapis wyniku badania (Bartczak, Barańska, 2015). Z analiz przeprowadzonych w 2014 roku w 20 szpitalach w Warszawie wynikało, że tylko listy kolejkowe i gospodarka lekami były prowadzone wszędzie w formie elektronicznej, natomiast dokumentację medyczną prowadziły w systemie informatycznym jedynie dwa szpitale (Karlińska, 2014).

Problemem było także duże zróżnicowanie procesu informatyzacji zauważalne na poziomie regionów. Przykładowo województwo dolnośląskie dzięki projektowi „Dolnośląskie e-zdrowie” obejmującego większość publicznych zakładów opieki zdrowotnej poziomem informatyzacji zbliżało się do prawie pełnej cyfryzacji (włącznie z elektroniczną dokumentacją medyczną), podczas gdy w województwie podkarpackim czy kujawsko-pomorskim informatyzacja nie była na zadowalającym poziomie, a ponadto sytuacja była bardzo zróżnicowana w zależności od wielkości podmiotu. Większe szpitale w dużych miastach były co do zasady lepiej przygotowane niż szpitale powiatowe czy niewielkie placówki w małych miejscowościach (Kielar, 2013).

Ostatecznie nie wprowadzono całościowych rozwiązań, a zdecydowano o systematycznym wdrażaniu kolejnych elementów. Obecnie zatem, na podstawie ustawy o systemie informacji w ochronie zdrowia oraz wydane go na jego podstawie rozporządzenia Ministra Zdrowia z dnia 8 maja 2018 r. w sprawie rodzajów elektronicznej dokumentacji medycznej (t.j. Dz.U. z 2023 r. poz. 1851 ze zm.), ustalić można zakres wymaganej elektronicznej dokumentacji medycznej. Są nią zatem dokumenty wytworzone w postaci elektronicznej opatrzone kwalifikowanym podpisem elektronicznym, podpisem zaufanym, podpisem osobistym albo z wykorzystaniem sposobu potwierdzania pochodzenia oraz integralności danych dostępnego w systemie teleinformatycznym udostępnionym bezpłatnie przez Zakład Ubezpieczeń Społecznych:

- 1) recepty,
- 2) informacje o rozpoznaniu choroby, problemu zdrowotnego lub urazu, wynikach przeprowadzonych badań, przyczynie odmowy przyjęcia do szpitala, udzielonych świadczeniach zdrowotnych oraz ewentualnych zaleceniach – w przypadku odmowy przyjęcia pacjenta do szpitala,
- 3) informacje dla lekarzy kierujących świadczeniobiorcą do poradni specjalistycznej lub leczenia szpitalnego o rozpoznaniu, sposobie leczenia, rokowaniu, ordynowanych lekach, środkach spożywczych specjalnego przeznaczenia żywieniowego i wyrobach medycznych, w tym okresie ich stosowania i sposobie dawkowania oraz wyznaczonych wizytach kontrolnych, określone w rozporządzeniu Ministra Zdrowia z dnia 8

- września 2015 r. w sprawie ogólnych warunków umów o udzielanie świadczeń opieki zdrowotnej (t.j. Dz.U. z 2025 r. poz. 400 ze zm.),
- 4) karty informacyjne z leczenia szpitalnego,
 - 5) wyniki badań laboratoryjnych wraz z opisem,
 - 6) opisy innych badań diagnostycznych,
 - 7) karty profilaktycznego badania ucznia,
 - 8) Indywidualne Plany Opieki Medycznej,
 - 9) karty medycznych czynności ratunkowych,
 - 10) karty medyczne lotniczego zespołu ratownictwa medycznego,
 - 11) skierowania na świadczenia finansowane ze środków publicznych,
 - 12) zlecenia na zaopatrzenie i zlecenia naprawy wyrobów medycznych,
 - 13) Karty Szczepień, czyli elektroniczne dokumenty, które docelowo mają zastąpić dokumentację indywidualną wewnętrzną w postaci kart uodpornienia,
 - 14) wyniki badania histopatologicznego.

Powyższe wyliczenie pokazuje, jak wiele elementów jest już gotowych. Obecnie e-recepta oraz e-skierowanie stanowią jedno z najczęściej świadczonych usług z zakresu e-zdrowia w Polsce (Płaciszewski, 2022). Wystawiono już 2,3 mld e-recept (Strona, 2025). Porównując to z danymi z 2011 roku, w którym prototyp e-Recepty był wdrożony w 16 aptekach, dwóch gabinetach lekarskich oraz dwóch przychodniach ambulatoryjnych w Lesznie, widać zdecydowany progres (Panteli, Sagan, 2012).

Fragmentaryczność rozwiązań

Analiza dokumentów wymienianych na gruncie ustawy o systemie informacji w ochronie zdrowia skłania ku refleksji, że katalog ten jest jednak stosunkowo wąski względem ogółu dokumentacji, jaka powstaje w związku z udzielaniem świadczeń pacjentom. W dużej mierze wymogi dotyczą świadczeń finansowanych ze środków publicznych (np. dokumentacja zespołów ratownictwa medycznego czy Indywidualne Plany Opieki Medycznej, które powstają na potrzeby Podstawowej Opieki Zdrowotnej, czyli wyłącznie świadczeń finansowanych ze środków publicznych). Jednak nawet kiedy wybierano dokumenty objęte obowiązkiem prowadzenia w formie

elektronicznej, często czyniono szereg dodatkowych zastrzeżeń. W przypadku skierowań nie zdecydowano, że będą one obowiązywały dla wszystkich świadczeń, tylko wprowadzono wyliczenie, zgodnie z którym obowiązek wydawania skierowań w formie elektronicznej obejmuje:

- 1) ambulatoryjne świadczenia specjalistyczne finansowane ze środków publicznych, z wyłączeniem porady specjalistycznej – logopedia,
- 2) badania:
 - a) echokardiograficzne płodu finansowane ze środków publicznych,
 - b) endoskopowe przewodu pokarmowego finansowane ze środków publicznych,
 - c) medycyny nuklearnej finansowane ze środków publicznych oraz ze środków innych niż środki publiczne,
 - d) rezonansu magnetycznego finansowane ze środków publicznych,
 - e) tomografii komputerowej finansowane ze środków publicznych oraz ze środków innych niż środki publiczne,
- 3) leczenie szpitalne w szpitalu, który zawarł umowę o udzielanie świadczeń opieki zdrowotnej finansowanych ze środków publicznych,
- 4) rehabilitację leczniczą u świadczeniodawcy, który zawarł umowę o udzielanie świadczeń opieki zdrowotnej,
- 5) leczenie uzdrowiskowe albo rehabilitację uzdrowiskową finansowane ze środków publicznych, z wyłączeniem przypadku, gdy świadczenie ma być zrealizowane przez podmioty udzielające świadczeń zdrowotnych z zakresu lecznictwa uzdrowiskowego poza granicami kraju.

Należy też zauważyć, że nawet ta część rozwiązań, które obowiązują w odniesieniu do wszystkich podmiotów jest wdrażana stopniowo, co rodzi trudności organizacyjne. Przykładowo karta szczepień jako element dokumentacji medycznej nie była od początku obligatoryjna, co może przyczynić się do braku spójności dokumentacji medycznej pacjenta, w odniesieniu, do którego część szczepień będzie dokumentowana w wersji papierowej, a część w wersji elektronicznej. Z kolei możliwość rezygnacji z papierowych recept istniała od 1 stycznia 2019 r., jednak do 7 stycznia 2020 r. funkcjonowały one w formie papierowej, natomiast rozliczenia świadczeń zdrowotnych

wymagały dostosowania systemu do dnia 10 stycznia 2022 r. (Klich, Gołownik-Hudała, Białecki, Olcay, 2025).

Patrząc na dokumentację medyczną z perspektywy zarówno pacjenta, jak i personelu medycznego, dokumentowanie świadczeń jawi się jednak przede wszystkim jako skomplikowany proces. Personel pracujący w różnych miejscach może nie tylko spotkać się z różnym oprogramowaniem do dokumentowania świadczeń, ale również z podleganiem pod inne wymogi w zakresie prowadzenia elektronicznej dokumentacji medycznej. „Centralizacja” prowadzenia dokumentacji medycznej w formie elektronicznej nie ma bowiem charakteru kompleksowego i może zależeć nie tylko jednostkowo od podmiotu, ale również od rodzaju świadczeń czy źródła ich finansowania. W tej sytuacji nie może dziwić, że według danych z badania przeprowadzonego przez Centrum e-Zdrowia, wśród podmiotów zgłaszających trudności w informatyzacji drugim najczęściej wymienianym ograniczeniem były – w zależności od rodzaju działalności: niewystarczające kompetencje cyfrowe pracowników oraz opór ze strony personelu medycznego (Centrum, 2025).

Pacjent także może mieć mylne przeświadczenie, że jego rekordy dotyczące zdarzeń o charakterze medycznym są gromadzone w jednej bazie, a więc i dostępne w każdym podmiocie, do którego się zwróci o świadczenia zdrowotne. Oczekiwania pacjentów zderzają się z mankamentami systemu np. w postaci braku pełnej integracji – nie wszystkie dokumenty dotyczące pacjenta są dostępne przez Internetowe Konto Pacjenta, ponieważ placówki nie zawsze przesyłają dokumentację do centralnego systemu, a nawet jeżeli przesyłają może dochodzić do opóźnień w aktualizacji i publikacji danych w IKP (Klich i in., 2025). Ponadto sytuacja może być jeszcze bardziej skomplikowana, jeżeli świadczenia będą realizowane przez świadczeniodawców podlegających różnym resortom. Tylko część dokumentacji medycznej – chociaż oczywiście znacząca – prowadzona jest przez podmioty podlegające Ministrowi Zdrowia. Odrębne regulacje są wydawane dla podmiotów nadzorowanych np. przez Ministerstwo Obrony Narodowej, Ministerstwo Sprawiedliwości czy Ministerstwo Spraw Wewnętrznych i Administracji, a przecież pacjent może być diagnozowany i leczony w różnego rodzaju podmiotach. Tymczasem spójność i kompletność danych mogą mieć wpływ na bezpieczeństwo pacjenta, które należy w procesie udzielania świadczeń postrzegać

nie tylko w kategoriach stricte medycznych, ale i w szerszej perspektywie – właściwej organizacji świadczeń, w tym prowadzenia dokumentacji medycznej (Gąska, 2021).

Dyskusja

Informatyzacja sektora ochrony zdrowia wymaga gotowości wszystkich uczestników systemu. Nieprzemyślana, źle zaplanowana i nieudolnie realizowana cyfryzacja negatywnie wpływa na bezpieczeństwo pacjentów i prowadzi do narastającego niezadowolenia wszystkich interesariuszy systemu opieki zdrowotnej (Chelstowski, Gontarz, 2025). Te zależności niejednokrotnie sprawiały, że prawodawca robił krok w przód, by za chwilę zrobić krok w tył argumentując to brakiem gotowości czy oporem jednej z grup interesariuszy. O ile jednak pacjenci – jak pokazuje przykład e-recepty – są w stanie wbrew licznym obawom ekspertów korzystać z nowoczesnych rozwiązań, niezależnie od tego czy na co dzień posługują się komputerem czy internetem, o tyle podmioty wykonujące działalność leczniczą zmagają się z długim technologicznym wynikającym z priorytetów niewłaściwie ustalonych przez ich kierownictwo oraz niskich nakładów na ochronę zdrowia w Polsce w porównaniu do innych krajów UE (Płaciszewski, 2022). Jako główną przeszkodę w cyfryzacji brak wystarczających środków finansowych na inwestycje w IT wskazuje 82,1% podmiotów doświadczających trudności z wdrożeniem elektronicznej dokumentacji medycznej. Problem ten szczególnie dotyczy szpitali, gdzie odsetek takich wskazań wyniósł aż 91,5% (Centrum e-Zdrowia, 2025).

Odnosząc się do nakładów na informatyzację, nie można też zapomnieć, że wdrażanie rozwiązań informatycznych to ogromne pieniądze i przyjęcie konkretnych rozwiązań ma istotne przełożenie nie tylko na finanse szpitala czy przychodni, ale i może być źródłem nacisków różnych grup interesów. Za trafny należy uznać pogląd M. Kielara, który już w 2013 roku pisał o słomianym zapale decydentów, któremu sprzyjały zmienne wizje następujących po sobie u władzy ugrupowań politycznych, brak konsekwentnie prowadzonej realizacji rozpoczynanych etapów prac oraz silne ciążenie akcentów politycznych, co ostatecznie prowadziło do zarzucenia podjętych wcześniej

zamierzeń (Kielar, 2013). Często zmiany w systemie ochrony zdrowia są również efektem bieżących, nagłaśnianych medialnie problemów, bez większego wglądu w funkcjonowanie pewnych rozwiązań w codziennej pracy szpitala czy przychodni. W dyskusji nad zmianami nierzadko dominuje presja bieżących, nie zawsze kluczowych problemów, odzwierciedlana przez ton i treść doniesień medialnych (Zejda, 2008). Szeroko komentowanym przykładem takich działań było np. wprowadzenie od 2016 roku papierowej Książeczki Zdrowia Dziecka. Pod hasłem poprawy opieki nad dziećmi, w dobie informatyzacji wprowadzono papierowy, archaiczny dokument, który tylko iluzorycznie coś zmieni. Działanie to było całkowicie niespójne z dążeniem do prowadzenia elektronicznej dokumentacji medycznej. Co więcej, problem z książeczką mają przede wszystkim przychodnie, które pracują wyłącznie w systemie – konieczność jej ręcznego wypełniania to dublowanie pracy, co znacząco przedłuża np. czas poświęcany na bilans zdrowia. (Mastalerz-Migas, 2016). Jest to jeden z przykładów sytuacji, w której wzrastająca liczba dokumentów cyfrowych oraz równoległe stosowanie dokumentów cyfrowych i papierowych przy niedostatecznej integracji i interoperacyjności systemów powodują zniechęcenie lekarzy (Chelstowski, Gontarz, 2025).

Emocje, trudna dyskusja merytoryczna nawet w gronie ekspertów, kwestie polityczne, interesy korporacyjne i firm informatycznych to czynniki dodatkowo utrudniające podejmowanie optymalnych decyzji (Sikorski, 2008). System nie jest przejrzysty i przewidywalny a zmieniające się koncepcje, przepisy intertemporalne i przedłużane *vacatio legis* nie sprzyjają zaangażowaniu we wdrażanie nowych rozwiązań. Niejednokrotnie bowiem okazywało się, że podmioty, które przygotowały się na zmiany inwestując w infrastrukturę i szkolenia personelu, zanim doczekały wprowadzenia odwołanego obowiązku stosowania rozwiązań informatycznych, miały już przestarzały sprzęt lub zaangażowały się w projekty, które nie zostaną powszechnie wdrożone. Paradoksalnie opóźnienia w zakupie sprzętu sprawiają, że ostatni będą mieli najnowsze wyposażenie, najlepiej dostosowane do ostatecznego kształtu wymagań. Podmiotów, które zwlekają z wprowadzeniem zmian jest sporo: z danych zebranych przez Centrum e-Zdrowia z 11 185 podmiotów wykonujących działalność leczniczą (w tym 9731 realizujących świadczenia ambulatoryjne) wynika, że nadal ponad 13% podmiotów, które wypełniły ankietę

nie ma liczby stanowisk komputerowych wystarczającej do wdrożenia EDM (Centrum e-Zdrowia, 2025).

Analizując piśmiennictwo i dokumenty sprzed kilkadziesiąt lat, nie sposób oprzeć się wrażeniu, że pomimo upływu czasu pewne problemy pozostały nierozwiązane, chociaż zarówno założenia, jak i przyjęte cele były słuszne. W opracowaniu opublikowanym w 2008 roku przez Polskie Towarzystwo Informatyki wskazywano na rolę dostępu do wiarygodnych danych medycznych w systemie ochrony zdrowia jako podstawy oceny społecznego znaczenia ochrony zdrowia w jej podstawowych wymiarach, w zakresie bieżącego funkcjonowania i skuteczności (Zejda, 2008). Problem ten pozostaje nadal nierozwiązany – fragmentaryczność danych uniemożliwia ocenę jak diagnozowane i leczone są choroby, które rozwiązania terapeutyczne są najefektywniejsze w kontekście długofalowym oraz jak alokować środki, żeby osiągnąć najlepszy efekt. Kwestia jakości danych powraca chociażby w najnowszym projekcie zmian w ustawie o działalności leczniczej w kontekście wydawałoby się bardzo prozaicznym tj. sprawozdawania przyczyn zgonu, które są w Polsce określane z niedostateczną precyzją. Światowa Organizacja Zdrowia od lat wyklucza Polskę z analiz porównawczych, dotyczących umieralności według przyczyn, a podstawą do wykluczenia danego kraju jest co najmniej 25% udział zgonów o nieprecyzyjnych i bezużytecznych określeniach/opisach przyczyn (tzw. kody śmieciowe) (Uzasadnienie, 2025).

Nie traci zatem na aktualności postulat by główne założenia informatyzacji zmierzały do:

- 1) bezpieczeństwa pacjenta (opieka zdrowotna oparta na dowodach, ograniczenie ryzyka szkód dla pacjenta),
- 2) jakości opieki (zadowolenie pacjenta, skuteczność i wydajność usług opieki zdrowotnej),
- 3) dostępności (równoprawny dostęp, skrócenie czasu oczekiwania i lepsze wykorzystanie środków),
- 4) usamodzielnienia (skoncentrowanie uwagi na pacjencie, wpływ i bezpośrednio zaangażowanie pacjenta w proces leczenia),
- 5) ciągłości opieki (koordynacja działań i wzajemne przekazywanie informacji pomiędzy placówkami opieki zdrowotnej) (Frączkowski, 2010).

Potrzeba zmian była z resztą dostrzegana na przestrzeni lat nie tylko przez ekspertów, ale również przez płatnika publicznego. W 2007 roku NFZ wskazywał w swojej strategii, że „W stosunku do Narodowego Funduszu Zdrowia wyrażane są ogromne społeczne oczekiwania związane z poprawą dostępności, zakresu i jakości świadczeń zdrowotnych. Realizacja tych oczekiwań jest możliwa tylko poprzez optymalne dysponowanie posiadanymi środkami przekazywanymi świadczeniodawcom za zakontraktowane usługi medyczne, co również przekłada się na konieczność posiadania i rozwijania odpowiednich systemów informatycznych” (Strategia, 2007, s. 5). Mimo tego, przez ostatnie lata nie przeprowadzono pełnej informatyzacji sektora ochrony zdrowia, co jednoznacznie pokazuje skalę trudności i problemy na etapie przejścia od założeń do wdrożenia.

Wnioski

Prowadzenie dokumentacji medycznej w formie elektronicznej ma szereg zalet, takich jak większa czytelność i łatwiejsze zapewnienie kompletności danych, możliwość standaryzacji wpisów, a także ułatwienie dostępu do danych medycznych z pominięciem jakichkolwiek barier przestrzennych i geograficznych. Ponadto posiadanie kompletnych danych o stanie zdrowia pacjenta pozwala zwiększyć bezpieczeństwo postępowania wobec pacjenta oraz ograniczyć koszty wynikające z ponownego wykonywania badań diagnostycznych (Klich, 2017).

Niestety, obecnie informatyzacja ma charakter fragmentaryczny zarówno z perspektywy rozwiązań prawnych (nie wszystkie dokumenty są objęte wymogiem prowadzenia ich w formie elektronicznej), praktyki stosowania przepisów (brak odpowiedniego zaplecza organizacyjno-technicznego w części podmiotów), jak i dążenia do całkowitej rezygnacji z papieru, zarówno w ujęciu bieżącym, jak i historycznym. Wprowadzono także wyjątki od zasady prowadzenia dokumentacji w formie elektronicznej, które są skrzętnie wykorzystywane. Generalnie nie szuka się sposobu, by wyeliminować np. papierowe zaświadczenia lekarskie czy konieczność przedkładania innym organom papierowych kopii dokumentacji medycznej. Nie uznaje się także za priorytet przenoszenia do systemów danych historycznych, czyli informacji

z papierowej dokumentacji, tak żeby elektroniczna dokumentacja medyczna zawierała wszystkie szczegóły dotyczące udzielonych danemu pacjentowi świadczeń. Cyfrową archiwizację dokumentacji papierowej realizuje tylko 29,6% podmiotów objętych badaniem Centrum e-Zdrowia. Aż 70,4% placówek, nie podejmuje działań związanych z digitalizacją dokumentacji w postaci papierowej (Centrum e-Zdrowia, 2025).

Sytuacji nie poprawia stosunek kierownictwa podmiotów wykonujących działalność leczniczą oraz personelu do informatyzacji: przykładowo większość badanych placówek (59,6%) nie oferuje pacjentom dostępu do e-usług przez stronę internetową i nie ma w planach ich wdrożenia. Takie rozwiązanie oferuje pacjentom tylko 17,4% badanych podmiotów (Centrum e-Zdrowia, 2025).

Zasadniczo poziom rozwoju technologicznego sprzyja uznaniu, że elektroniczna dokumentacja medyczna stanowi większą gwarancję zapewnienia bezpieczeństwa ochrony danych medycznych niż tradycyjnie prowadzona dokumentacja, tj. w formie papierowej (Klich, 2017), nie mniej w praktyce niska efektywność i jakość systemów IT w ochronie zdrowia zwiększa ryzyko cyberataków i utrudnień w dostępie do danych, jako że aż 77% systemów IT w szpitalach ma luki w zabezpieczeniach (Chełstowski, Gontarz, 2025). Nie ma zatem wątpliwości, że z jednej strony należy nadać informatyzacji odpowiednie tempo, z drugiej strony musi ona opierać się na konkretnym, możliwym do wyegzekwowania planie a nie na pochopnych działaniach, które nie są kompleksowym i optymalnym rozwiązaniem o minimalnym ryzyku. Pierwszym krokiem powinna być wnikliwa analiza już funkcjonujących rozwiązań prawnych i niwelowanie trudności wynikających z problematycznie sformułowanych przepisów dotyczących dokumentacji medycznej.

Literatura

1. Bartczak, K., Barańska, A. (2015). Analiza wykorzystania systemów informatycznych przez polskie szpitale. *Acta Universitatis Nicolai Copernici Oeconomia XLVI*, 2, 185-193. http://dx.doi.org/10.12775/AUNC_ECON.2015.010
2. Centrum e-Zdrowia (2025). *VIII Edycja Badania stopnia informatyzacji podmiotów wykonujących działalność leczniczą*. Centrum e-Zdrowia.

3. Chelstowski, D., Gontarz, A. (2025). *Cyfryzacja systemu ochrony zdrowia w ramach Krajowego Planu Odbudowy: wyzwania, szanse i rekomendacje*. Polskie Towarzystwo Informatyczne.
4. Frączkowski, K. (2010). Systemy informacyjne oraz usługi w ochronie zdrowia oparte na technologiach SOA (Service Oriented Architecture). *Acta Bio-Optica et Informatica Medica*, 1(16), 81-86.
5. Gąska, M. (2021). Prawidłowe prowadzenie dokumentacji medycznej jako warunek bezpieczeństwa pacjenta w procesie leczniczym. *Ius et Administratio*, 1(44), 24-42. <http://dx.doi.org/10.15584/iuseta.2021.1.2>
6. Karlińska, M. (2014). Informatyzacja opieki stacjonarnej w systemie ochrony zdrowia na przykładzie warszawskich szpitali publicznych. *Studia Ekonomiczne*, 199, 99-106.
7. Kielar, M. (2013). Trendy informatyzacji szpitali w Polsce. *OPM*, 3, 56-58.
8. Klich, A. (2017). Wybrane zagadnienia prawne elektronicznej dokumentacji medycznej. *Ekonomiczne Problemy Usług*, 1(126), t. 2, 351-360. <http://dx.doi.org/10.18276/epu.2017.126/2-35>
9. Klich, A., Gołowkin-Hudała, M., Białecki, M., Olćay, L. (2025). Integracja Internetowego Konta Pacjenta z elektroniczną dokumentacją medyczną: klucz do bezpiecznego udostępniania informacji medycznej – doświadczenia polskie i tureckie. *Prawo w działaniu Sprawy cywilne*, 62, 241-263. <http://dx.doi.org/10.32041/pwd.6209>
10. Mastalerz-Migas, A. (2016). Książeczka zdrowia dziecka jako dokumentacja medyczna. *Lekarz POZ*, 1, 83-84.
11. Materna, N. (2023). E-dokumentacja medyczna a ochrona danych osobowych. *Biuletyn Stowarzyszenia Absolwentów i Przyjaciół Wydziału Prawa Katolickiego Uniwersytetu Lubelskiego*, 9(1), 31-49. <https://doi.org/10.32084/bsawp.5773>
12. Nyczaj, K., Piecuch, P. (2013). *Elektroniczna dokumentacja medyczna. Wdrożenie i prowadzenie w placówce medycznej*. Wiedza i Praktyka.
13. Panteli, D., Sagan A. (red.). (2012), *Polska: Zarys systemu ochrony zdrowia*. Drukarnia Open Eyes.
14. Krzysztof Płaciszewski. (2022). E-health – use of information and communications technology (ICT) in Polish health care system. *Medycyna Ogólna i Nauki o Zdrowiu*, 28(2), 126-131. <https://doi.org/10.26444/monz/150276>
15. Sikorski, L. (2008). Wybrane zagadnienia programu informatyzacji ochrony zdrowia w kontekście projektu ustawy o systemie informacji w ochronie zdrowia. W: G. Bliźniuk, P. W. Fuglewicz, L. Sikorski, Z. Szyjewski (red. nauk.).

- Informatyzacja ochrony zdrowia. Wybrane zagadnienia.* Polskie Towarzystwo Informatyczne – Oddział Górnośląski.
16. NFZ. (2007). *Strategia wykorzystania zasobów informacyjnych przez NFZ oraz kierunki rozwoju systemu informatycznego NFZ na lata 2007-2010.* Narodowy Fundusz Zdrowia.
 17. Zejda, J. E. (2008). Społeczny wymiar reformy systemu ochrony zdrowia. W: G. Bliźniuk, P.W. Fuglewicz, L. Sikorski, Z. Szyjewski (red. nauk.). *Informatyzacja ochrony zdrowia. Wybrane zagadnienia.* Polskie Towarzystwo Informatyczne – Oddział Górnośląski.

Akty prawa:

1. Ustawa z dnia 30 sierpnia 1991 r. o zakładach opieki zdrowotnej (t.j. Dz.U. z 2007 r. Nr 14, poz. 89 ze zm.).
2. Ustawa z dnia 6 listopada 2008 r. o prawach pacjenta i Rzeczniku Praw Pacjenta (t.j. Dz.U. z 2024 r. poz. 581).
3. Ustawa z dnia 28 kwietnia 2011 r. o systemie informacji w ochronie zdrowia (t.j. Dz.U. z 2025 r. poz. 302 ze zm.).
4. Rozporządzenie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z dnia 17 grudnia 1992 r. w sprawie rodzajów dokumentacji medycznej, sposobu jej prowadzenia oraz szczegółowych warunków jej udostępniania (Dz. z 1993 r. Nr 3, poz. 13 ze zm.).
5. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 10 sierpnia 2001 r. w sprawie rodzajów dokumentacji medycznej w zakładach opieki zdrowotnej, sposobu jej prowadzenia oraz szczegółowych warunków jej udostępniania (Dz.U. z 2001 r. Nr 88, poz. 966 ze zm.).
6. Rozporządzenie z dnia 21 grudnia 2006 r. w sprawie rodzajów i zakresu dokumentacji medycznej w zakładach opieki zdrowotnej oraz sposobu jej przetwarzania (Dz.U. z 2006 r. Nr 247, poz. 1819 ze zm.).
7. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 21 grudnia 2010 r. w sprawie rodzajów i zakresu dokumentacji medycznej oraz sposobu jej przetwarzania (Dz.U. z 2014 r. poz. 177 ze zm.).
8. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 8 września 2015 r. w sprawie ogólnych warunków umów o udzielanie świadczeń opieki zdrowotnej (t.j. Dz.U. z 2025 r. poz. 400 ze zm.).
9. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 9 listopada 2015 r. w sprawie rodzajów, zakresu i wzorów dokumentacji medycznej oraz sposobu jej przetwarzania (Dz.U. z 2015 r. poz. 2069).

10. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 8 maja 2018 r. w sprawie rodzajów elektronicznej dokumentacji medycznej (t.j. Dz.U. z 2023 r. poz. 1851 ze zm.).
11. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 15 kwietnia 2019 r. w sprawie skierowań wystawianych w postaci elektronicznej w Systemie Informacji Medycznej (t.j. Dz.U. z 2024 r. poz. 103).
12. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 6 kwietnia 2020 r. w sprawie rodzajów, zakresu i wzorów dokumentacji medycznej oraz sposobu jej przetwarzania (t.j. Dz.U. z 2024 r. poz. 798 ze zm.).
13. Projekt rozporządzenia Ministra Zdrowia w sprawie rodzajów, zakresu i wzorów dokumentacji medycznej oraz sposobu jej przetwarzania z dnia 11.10.2019 r. (Druk nr MZ 767).
14. Uzasadnienie do projektu ustawy o zmianie ustawy o działalności leczniczej oraz niektórych innych ustaw z dnia 8.10.2025 r. (Druk nr UD234).

Netografia

1. Centrum e-Zdrowia. (2025). *Ponad 2,3 miliarda wystawionych e-recept*. Pobrane z: <https://cez.gov.pl/pl/page/o-nas/aktualnosci/ponad-23-miliarda-wystawionych-e-recept> (data dostępu: 05.12.2025).

dr inż. Marta Chodyka¹, Łukasz Wielgosz²,

mgr inż. Sebastian Sawczuk³

Akademia Bialska im. Jana Pawła II, Biała Podlaska

https://doi.org/10.29316/9788368103281_11

BEZPIECZEŃSTWO I ODPORNOŚĆ MIKROKLASTRÓW RASPBERRY PI W ZDECENTRALIZOWANYCH SIECIACH BLOCKCHAIN – STUDIUM PRZYPADKU MONERO

SECURITY AND RESILIENCE OF RASPBERRY PI
MICROCLUSTERS IN DECENTRALIZED BLOCKCHAIN
NETWORKS – A CASE STUDY OF MONERO

Streszczenie

Rozdział monografii analizuje możliwość wykorzystania mikroklastra Raspberry Pi do obsługi zdecentralizowanej sieci blockchain na przykładzie kryptowaluty Monero, ze szczególnym uwzględnieniem aspektów bezpieczeństwa i odporności systemu. Zweryfikowano, czy klastr zbudowany z niskokosztowych mikrokomputerów jest w stanie zapewnić bezpieczne i niezawodne funkcjonowanie w sieci blockchain oraz jak radzi sobie z awariami węzłów. Przeprowadzono eksperyment z klastrem złożonym z pięciu Raspberry Pi 5 skonfigurowanych w środowisku Kubernetes (k3s) – jeden węzeł nadrzędny i cztery podrzędne. Na każdym węźle uruchomiono kontenery z oprogramowaniem

¹ <https://orcid.org/0000-0002-8819-2451>, e-mail: m.chodyka@dyd.akademiabialska.pl

² student, <https://orcid.org/0009-0006-6732-3447>, e-mail: wielgosz13245@stud.akademiabialska.pl

³ e-mail: s.sawczuk@dyd.akademiabialska.pl

górnym Monero (XMRig) w celu symulacji procesu wydobywania. Monitorowano parametry wydajności (hashrate, obciążenie CPU, pobór mocy, temperatury) podczas stopniowego dodawania kolejnych węzłów oraz symulowano awarię jednego z nich. Kłaster osiągnął łączną moc obliczeniową ~1,6 kH/s przy pełnej konfiguracji (5 węzłów), a wzrost wydajności był bliski liniowemu wraz z dołączaniem kolejnych jednostek. Zużycie energii rosło proporcjonalnie do obciążenia – od ~2 W na węzeł w spoczynku do ~6-8 W pod pełnym obciążeniem. System okazał się stabilny termicznie (temperatury <60°C) i wysoce efektywny energetycznie (~50 H/s na wat mocy). Symulacja awarii ujawniła spadek wydajności klastra proporcjonalny do utraconego węzła oraz brak automatycznego przełączenia obciążenia na pozostałe jednostki, co wskazuje na ograniczoną odporność na uszkodzenia w obecnej konfiguracji. Mimo to kłaster zachował ciągłość pracy pozostałych węzłów, potwierdzając potencjał zastosowań w środowiskach wymagających taniej, rozproszonej infrastruktury obliczeniowej.

Słowa kluczowe: Raspberry Pi, mikrokłaster, Monero, blockchain, bezpieczeństwo, odporność, Kubernetes, hashrate, RandomX, sieci rozproszone

Abstract

This book chapter examines the feasibility of employing a Raspberry Pi micro-cluster to operate a decentralized blockchain network using the Monero cryptocurrency, with particular emphasis on system security and resilience. The study verifies whether a cluster built from low-cost single-board computers can provide secure and reliable blockchain operations and how it copes with node failures. An experiment was conducted with a cluster of five Raspberry Pi 5 boards configured under Kubernetes (k3s) – one master node and four worker nodes. Each board ran containers with the Monero mining software XMRig to simulate the mining process. Performance metrics (hash-rate, CPU load, power consumption, temperature) were monitored while successively adding nodes, and a failure of one node was simulated. Results show that the fully configured cluster (five nodes) achieved a cumulative computational power of approximately 1.6 kH/s, with nearly linear performance growth as additional units were added. Energy consumption increased proportionally with load-rising from ~2 W per node at idle to ~6-8 W under full load. The system remained thermally stable (temperatures < 60 °C) and highly energy-efficient (~50 H/s per watt). The failure simulation revealed a drop in cluster performance proportional to the lost node and no automatic workload fail-over, indicating limited fault tolerance in the current configuration. Nonetheless, the remaining nodes maintained continuous operation, confirming the potential of such clusters for environments that require low-cost, distributed computing infrastructure.

Keywords: Raspberry Pi, micro-cluster, Monero, blockchain, security, resilience, Kubernetes, hash-rate, RandomX, distributed networks

Wstęp

Rozproszona technologia blockchain zyskała reputację jako fundament bezpiecznych, odpornych na awarie systemów transakcyjnych pozbawionych centralnego punktu kontroli (Nakamoto, 2008). W tradycyjnych sieciach finansowych czy krytycznej infrastrukturze teleinformatycznej awaria pojedynczego, scentralizowanego serwera może skutkować poważnym zakłóceniem usług. Blockchain dzięki swojej decentralizacji i mechanizmom konsensusu oferuje model, w którym wiele niezależnych węzłów przechowuje i weryfikuje kopie tego samego rejestru, eliminując pojedynczy punkt awarii i utrudniając manipulacje danymi (Nofer i in, 2017). Z tego powodu rozważane jest zastosowanie technologii blockchain do zwiększenia odporności cybernetycznej infrastruktury krytycznej – jej niezmiennosc i rozproszenie mogą wzmocnić bezpieczeństwo systemów kluczowych dla społeczeństwa (Govea i in, 2014). Równocześnie jednak klasyczne wdrożenia blockchain (np. Bitcoin) wiążą się z rosnącymi wymaganiami sprzętowymi i energetycznymi, które nie zawsze są akceptowalne w kontekście zrównoważonego rozwoju czy zastosowań w urządzeniach o ograniczonych zasobach. Monero (ticker: XMR) jest przykładem kryptowaluty, która od początku projektowana była z myślą o maksymalnej descentralizacji wydobycia oraz ochronie prywatności użytkowników. W przeciwieństwie do Bitcoina czy wielu innych monet, gdzie dominują wyspecjalizowane układy ASIC i duże farmy górnicze, Monero wykorzystuje algorytm Proof-of-Work o nazwie RandomX, zoptymalizowany pod kątem wydajności na procesorach ogólnego zastosowania (CPU). RandomX cechuje się wysoką odpornością na implementację ASIC poprzez zastosowanie losowego wykonywania kodu i intensywnego wykorzystania pamięci, co sprawia, że przewaga sprzętu specjalizowanego nad standardowymi CPU zostaje zminimalizowana (Trail of Bits, 2019). Dzięki tej filozofii „egalitarnego” wydobycia, do sieci Monero mogą dołączać nawet użytkownicy dysponujący niedrogim sprzętem, takim jak komputery osobiste czy mikrokontrolery, bez obawy o bycie zdominowanym przez potężne kopalnie. Dodatkowym wyróżnikiem Monero z punktu widzenia bezpieczeństwa jest nacisk na anonimowość transakcji – wykorzystanie unikalnych rozwiązań kryptograficznych (podpisów pierścieniowych,

jednorazowych adresów stealth czy ukrytych kwot dzięki RingCT) sprawia, że Monero bywa określane „królem prywatności” wśród kryptowalut (Hoskinson, 2021). Te cechy czynią Monero interesującym obiektem badań nad możliwościami uruchamiania sieci blockchain na nietypowych platformach sprzętowych. Wraz z pojawieniem się wydajniejszych generacji mikrokomputerów jednopłytkowych, takich jak Raspberry Pi 4 i 5, otworzyła się możliwość tworzenia niewielkich, tanich klastrów obliczeniowych zdolnych do wykonywania względnie złożonych zadań. Raspberry Pi w kolejnych wersjach zyskały coraz mocniejsze procesory (np. czterordzeniowy Cortex-A76 2,4 GHz w RPi 5) oraz większą ilość pamięci RAM, co czyni je potencjalnie zdolnymi do obsługi wymagających algorytmów, takich jak RandomX (Raspberry Pi Foundation, 2023). W literaturze odnotowano wiele eksperymentów z klastrami Raspberry Pi, od małych grup kilku urządzeń po instalacje liczące dziesiątki, a nawet setki węzłów. Badania wskazują, że choć moc obliczeniowa takiego mikroklastra jest ograniczona, może on stanowić skalowalne i odporne komponenty obliczeniowe na brzegu sieci (edge), zachowując przy tym niski koszt wdrożenia (Komnison i in, 2019). Mikroklastry znalazły zastosowanie m.in. w edukacji (do nauki programowania równoległego i architektur rozproszonych), w systemach IoT, a nawet w badaniach z obszaru bezpieczeństwa. W kontekście kryptowalut, pomysł wykorzystania klastrów Raspberry Pi idzie w parze z rosnącym zainteresowaniem infrastrukturą chmurową rozproszoną na brzegu sieci. Dzięki konteneryzacji i narzędziom orkiestracji, takim jak Kubernetes, można zarządzać wieloma węzłami jako jednolitą platformą usługową. DeCarlo (DeCarlo, 2018) zademonstrował, że użycie lekkiej dystrybucji Kubernetes (k3s) na klastrze Raspberry Pi pozwala uruchomić rozproszoną sieć kryptowaluty z mechanizmami automatycznego równoważenia obciążenia, zwiększając niezawodność i czas bezawaryjnej pracy takiego systemu.

Łącząc powyższe trendy, celem niniejszego badania było sprawdzenie czy sieć blockchain Monero – znana z odporności na specjalizowany sprzęt i przyjazna dla CPU – może funkcjonować na mikroklastrze Raspberry Pi oraz jakie wyzwania bezpieczeństwa i niezawodności się z tym wiąże. Szczególnie istotne było zbadanie odporności systemu na awarie: w klasycznym ujęciu sieć blockchain jest odporna na wyłączenie pojedynczego węzła (reszta

sieci nadal działa poprawnie), jednak w konfiguracji klastrowej, gdzie wiele urządzeń współpracuje w ramach jednego „węzła logicznego”, pojawia się pytanie o wewnętrzną tolerancję uszkodzeń. Rozdział koncentruje się zatem na dwóch aspektach: wydajność i skalowalność – jak dodawanie kolejnych mikrokomputerów wpływa na moc obliczeniową i wykorzystanie zasobów, oraz bezpieczeństwo i niezawodność – jak klastery reaguje na awarie części składowych oraz jakie wnioski płyną z tego dla projektowania odpornych systemów rozproszonych.

Architektura rozwiązania i metodologia badawcza

Platforma sprzętowa: Do eksperymentu zbudowano klastery złożony z pięciu jednopłytkowych mikrokomputerów Raspberry Pi 5. Wybór najnowszego modelu podyktowany był jego ulepszonymi parametrami – m.in. szybszym czterordzeniowym procesorem 64-bit ARM, zwiększoną przepustowością I/O oraz obsługą interfejsu GbE, co redukuje wąskie gardła poprzednich generacji (Raspberry Pi Foundation, 2023). Każdy z Raspberry Pi został wyposażony w 8 GB RAM oraz kartę microSD klasy U3 (64 GB) na system operacyjny i dane blockchain. Ze względu na wysokie obciążenie obliczeniowe związane z wydobywaniem Monero, wszystkie jednostki chłodzone były aktywnie za pomocą miniaturowych wentylatorów, aby utrzymać stabilne temperatury pracy (~60°C). Poszczególne Raspberry Pi połączono w sieć lokalną za pośrednictwem przełącznika Gigabit Ethernet, co zapewniło niskie opóźnienia i wystarczającą przepustowość dla komunikacji w klastrze. Programowanie i konfiguracja klastra: Na wszystkich węzłach zainstalowano minimalistyczny system Raspberry Pi OS Lite (64-bit) oraz lekką platformę orkiestracji kontenerów Kubernetes k3s. Jeden z mikrokomputerów pełnił rolę węzła nadrzędnego (master) klastra k3s – uruchomiono na nim serwer Kubernetes zarządzający harmonogramem zadań i stanem klastra. Pozostałe cztery Raspberry Pi działały jako węzły robocze (workery) dołączone do klastra. Takie rozproszone środowisko pozwoliło traktować sumę zasobów wszystkich urządzeń jako wspólną pulę obliczeniową. W kontenerach Docker na węzłach wdrożono instancje oprogramowania XMRig – popularnego open-source narzędzia do wydobywania Monero (wersja skompilowana dla

architektury ARM64). Kontenery zostały przygotowane tak, by w momencie uruchomienia automatycznie dołączać do publicznego poolu miningowego MoneroOcean, co umożliwiała wspólne wydobywanie i śledzenie udziału klastra w rozwiązywaniu bloków. Uruchomienie górników w kontenerach pod kontrolą k3s zapewniało, że zadania były zarządzane centralnie – węzeł master przydzielał kontenery (pody) do dostępnych Raspberry Pi zgodnie z zadeklarowaną konfiguracją. Początkowo skonfigurowano wdrożenie tylko jednego poda XMRig (na jednym z węzłów), następnie stopniowo skalowano deployment zwiększając liczbę replik, aby sprawdzić wpływ liczby równoległych instancji (pracujących na odrębnych urządzeniach) na łączny hashrate i obciążenie systemu. Pomiary i monitorowanie: W trakcie eksperymentu kluczowe metryki systemowe były monitorowane z użyciem wielu narzędzi. Do bieżącego śledzenia wykorzystania procesora, pamięci i wątków na poszczególnych Pi użyto htop, zaś do analizy zużycia energii i stanu zasilania – powertop. Ponadto wdrożono kontenery z Prometheus i Grafana w celu zbierania i wizualizacji danych telemetrycznych z węzłów (CPU load, temperatura, zużycie RAM, wykorzystanie sieci). Z poziomu MoneroOcean rejestrowano akceptowane przez pulę udziały (shares) oraz raportowany przez pulę łączny hashrate klastra (uśredniany w czasie). Dodatkowo logi tekstowe XMRig z każdego poda zbierano i analizowano pod kątem stabilności pracy (zanotowane bieżące wartości H/s każdego wątku, błędy połączeń itp.). Wszystkie pomiary prowadzono w sieci testowej przez kilkanaście godzin ciągłej pracy, co umożliwiło osiągnięcie stanu ustabilizowanego wydobywania i temperatur. Plan testów: Scenariusz eksperymentu podzielono na etapy odpowiadające zwiększaniu skali i badaniu odporności:

Test wydajności skalowania: Uruchomiono klaster z początkowo 1 aktywnym węzłem górniczym (1 pod XMRig na jednym Raspberry Pi). Następnie co ok. 30 minut dodawano kolejną instancję górnika (na kolejnym Pi), aż do wykorzystania wszystkich 5 urządzeń. Na każdym poziomie (1 do 5 węzłów) notowano stabilny hashrate łącznie i per węzeł, średnie obciążenie CPU, wykorzystanie pamięci oraz łączny pobór mocy przez cały klaster. Dzięki temu określono skalowalność rozwiązania – czy przyrost mocy obliczeniowej jest liniowy, malejący czy występują ewentualne efekty synergii lub ograniczenia zasobów.

Test odporności na awarię: Po osiągnięciu pełnej konfiguracji (5 działających podów) przeprowadzono symulację awarii jednego z węzłów. W praktyce zrealizowano to poprzez odizolowanie węzła master od sieci (odłączenie przewodu Ethernet), co odpowiada utracie węzła zarządzającego klastrem. Taki scenariusz jest skrajnie niekorzystny, ponieważ zakłada awarię centralnego komponentu odpowiedzialnego za koordynację – pozwala jednak ocenić, jak system rozproszony zachowa się przy utracie jednostki pełniącej kluczową rolę. Monitorowano natychmiastowy wpływ na hashrate (zarówno globalny klastrowy, jak i poszczególnych pozostałych węzłów), stan podów oraz próby ich ewentualnej relokacji przez Kubernetes. Dodatkowo zbadano logi górników i poolu pod kątem błędów komunikacji z utraconym węzłem.

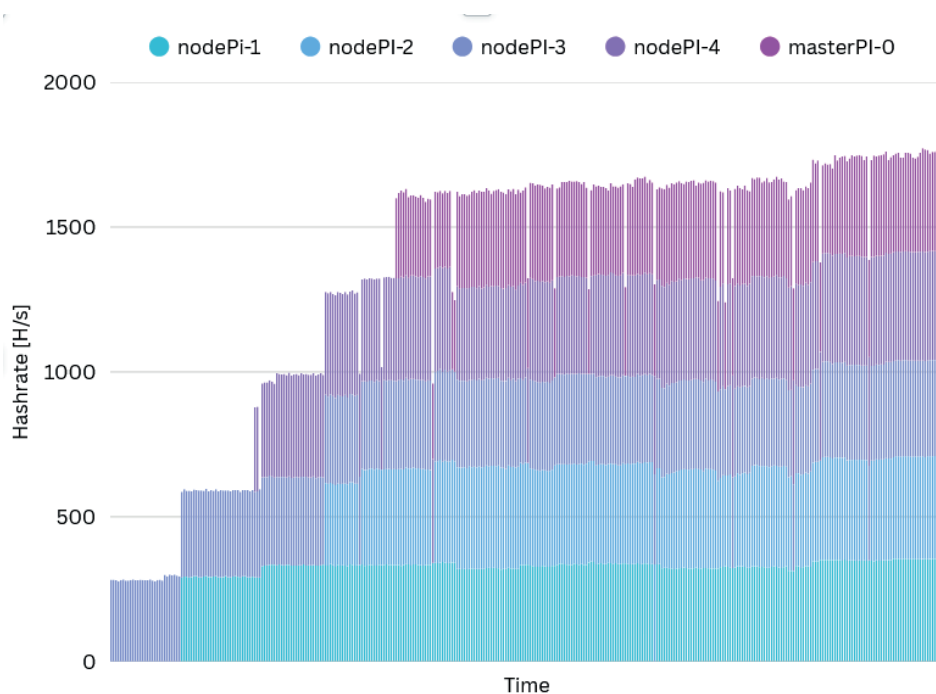
Test ciągłości pracy: W ramach oceny niezawodności, klastery (już po przywróceniu połączenia mastera) pozostawiono w trybie 5 węzłów na dalsze kilka godzin, by obserwować stabilność wydobywania, ewentualne fluktuacje hashrate oraz temperatur. Sprawdzono, czy nie występują zjawiska degradacji wydajności w czasie (np. throttling CPU z powodu temperatur lub spadek hashrate wskutek błędów w oprogramowaniu). Zwracano uwagę na spójność danych – czy wszystkie instancje pozostają zsynchronizowane z siecią Monero, co potwierdzały komunikaty o nowych blokach i transakcjach w logach XMRig.

Zgromadzone dane z powyższych etapów posłużyły do sformułowania wniosków dotyczących zarówno osiągalnej wydajności takiego mikroklastra, jak i jego zachowania w obliczu zakłóceń.

Wyniki i dyskusja

Eksperyment potwierdził, że nawet niewielki klastery Raspberry Pi jest w stanie skutecznie uczestniczyć w procesie wydobywania kryptowaluty Monero. W momencie uruchomienia pierwszego węzła (1 pod na pojedynczym Raspberry Pi) uzyskano moc obliczeniową rzędu ~ 300 H/s. Włączenie drugiego węzła spowodowało wzrost łącznego hashrate do około 600 H/s, a z trzecim węzłem przekroczono 900 H/s. Ostatecznie, przy pięciu jednocześnie pracujących instancjach górnika, klastery osiągnął szczytowy hashrate wynoszący ok. 1,8 kH/s, ze średnią ustaloną na poziomie 1,66 kH/s. Zależność mocy od

liczby węzłów była bliska liniowej – każda dodatkowa jednostka wносиła porównywalny przyrost (~ 300 H/s) do sumarycznej wydajności.



Rysunek 1. Wykres przedstawiający hashrate dla poszczególnych workerów

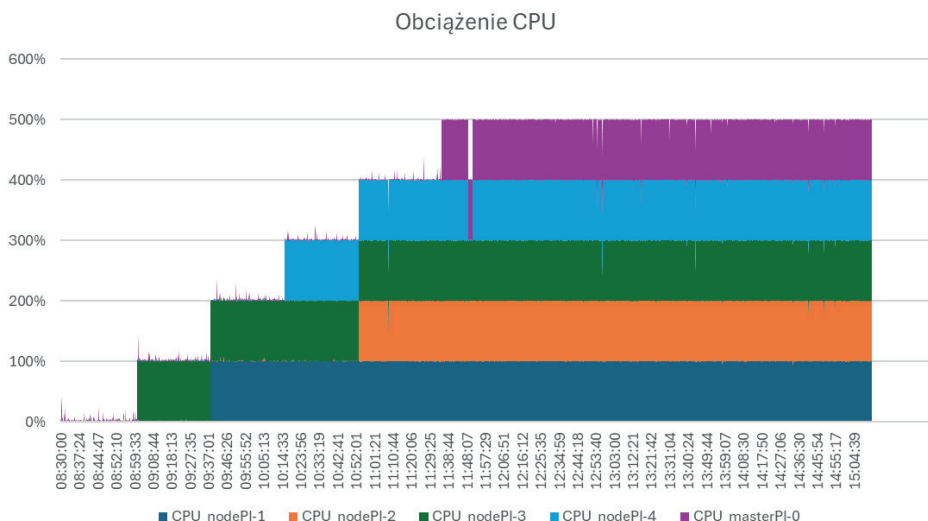
Źródło: opracowanie własne.

Co istotne, nie zanotowano drastycznych spadków efektywności pojedynczych Raspberry Pi wraz ze wzrostem liczby uczestniczących węzłów, co sugeruje minimalny narzut komunikacyjny przy tak małej skali systemu. Zaobserwowano jednak pewne skokowe zwiększanie hashrate zamiast idealnie płynnej linii, co wynika z sekwencyjnego dołączania węzłów i czasu potrzebnego na ich pełne rozpędzenie (wydajność wzrastała stopniowo po starcie nowej instancji). Podobne zjawisko nieliniowości raportowali również inni badacze dla większych klastrów – wraz z dodawaniem wielu węzłów marginalny przyrost mocy może maleć z uwagi na narzuty koordynacji i ograniczenia sieciowe (Komninos i in., 2019). W opracowanym pięciowęzłowym klastrze efekt degradacji skalowania okazał się jednak pomijalny, co wynika z relatywnie niskiego ruchu sieciowego generowanego przez górników

Monero (komunikaty o nowych blokach i udziały mają małą objętość) oraz wystarczającej przepustowości sieci LAN. W kontekście realnego udziału w sieci Monero, klastrer podczas ~12 godzin pracy rozwiązał łącznie 6253 udziały (shares), co odpowiada w przybliżeniu 5000 rzeczywistych transakcji przetworzonych w blockchain (liczba transakcji została oszacowana na podstawie udziału klastra w znajdowaniu bloków w puli). Wynik ten stanowi dowód na pełną funkcjonalność mikroklastra jako węzła obliczeniowego – wszystkie instancje były poprawnie zsynchronizowane z globalną siecią i dokonywały prawidłowej walidacji/obsługi transakcji. Należy jednak podkreślić, że z punktu widzenia wydajności bezwzględnej taka konfiguracja pozostaje daleko w tyle za profesjonalnymi farmami miningowymi. Uzyskany hashrate 1,8 kH/s to ułamek promila globalnej mocy sieci Monero, co przekłada się na marginalne korzyści ekonomiczne. W trakcie testu klastrer wygenerował około 0,0001 XMR nagrody, co przy bieżącym kursie (~400 EUR/XMR) odpowiada jedynie ~0,04 EUR – wartość dalece niewystarczającą do pokrycia kosztów energii czy sprzętu. Ten wynik nie jest zaskoczeniem, gdyż celem projektu nie była opłacalność wydobywania, lecz ocena technicznych możliwości i ograniczeń. Potwierdza on jedynie, że w warunkach komercyjnych takie rozwiązanie nie konkuruje z wydajnym sprzętem, lecz znajduje niszę w zastosowaniach eksperymentalnych i edukacyjnych.

Monitorowanie klastra ujawniło istotną korelację pomiędzy obciążeniem obliczeniowym a zużyciem zasobów sprzętowych. Uruchomienie procesu XMRig na danym węźle powodowało natychmiastowy wzrost wykorzystania CPU do blisko 100% na wszystkich czterech rdzeniach oraz zauważalny skok zużycia pamięci (do ok. 250 MB na pod, głównie z tytułu alokacji datasetu RandomX w RAM). Wykres obrazujący obciążenie procesora w czasie pokazuje wyraźne piki w momentach dołączania kolejnych węzłów,

po czym następuje stabilizacja na wysokim poziomie użycia przedstawiono na rysunku 2.

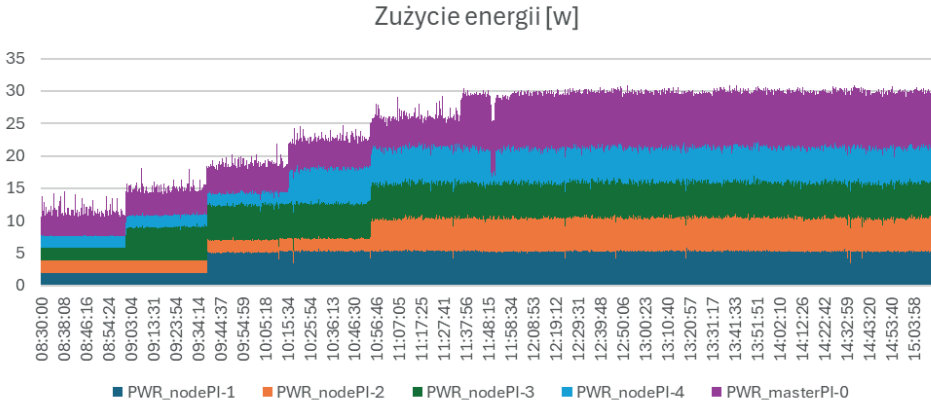


Rysunek 2. Wykres obciążenia CPU podczas uruchamiania i pracy poszczególnych węzłów

Źródło: opracowanie własne.

Każdy nowy węzeł dodaje obciążenie niezależnie od pozostałych, co wskazuje na minimalne wzajemne wpływy procesów górniczych uruchomionych na osobnych urządzeniach. Ciekawym spostrzeżeniem jest drobny efekt synergii – zaobserwowano, że dodanie nowego węzła niekiedy nieznacznie podnosiło hashrate już pracujących sąsiadów (o 1-2%), co można tłumaczyć lepszym wykorzystaniem wspólnych zasobów sieciowych bądź mechanizmami boost w CPU przy pełnym obciążeniu wszystkich rdzeni. Efekt ten jednak mieści się w granicach błędu pomiarowego i wymagałby dalszych badań. Od strony poboru mocy klastr okazał się zaskakująco energooszczędny. W stanie spoczynku pojedyncze Raspberry Pi pobierało ~1,5-2,0 W (przy uruchomionym systemie i usługach pomocniczych, lecz bez aktywnego miningu). Natomiast w trakcie intensywnego wydobywania każdy węzeł zwiększał zużycie energii do średnio ~5 W, a maksymalnie około 6-6,5 W. Wyróżniał się jedynie węzeł nadrzędny (masterPI-0), który jako jedyny dźwigający procesy

zarządzające klastrem osiągał szczytowo do ~ 8 W – prawdopodobnie z uwagi na dodatkowe obciążenie związane z obsługą procesu kube-apiserver i koordynacji podów, co zostało przedstawione na rysunku 3.

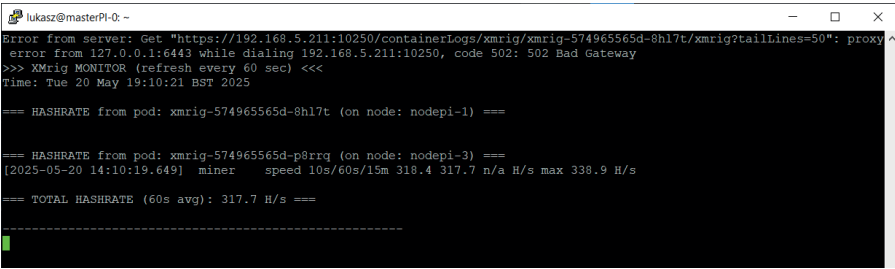


Rysunek 3. Wykres przedstawiający pobór energii podczas pracy klastra (moc w watach)

Źródło: opracowanie własne.

Łączna konsumpcja mocy całego klastra, z pięcioma aktywnymi węzłami, wyniosła około 24,6 W średnio, przy maksymalnym zaobserwowanym poborze $\sim 33,5$ W (krótkotrwałe piki przy pełnym obciążeniu wszystkich jednostek). Oznacza to, że na każdy pobierany wat mocy przypadało w systemie około 50 H/s mocy haszującej. Dla porównania, wysokowydajne koparki GPU czy ASIC osiągają co prawda setki kilohashy na sekundę, ale kosztem kilkuset watów, przez co ich efektywność energetyczna bywa na poziomie 20-30 H/s/W lub niższym. Opracowany mikroklastr okazał się zatem bardzo efektywny energetycznie, co można przypisać energooszczędnej architekturze ARM i relatywnie niskim częstotliwościom pracy. Wynik ~ 50 H/s/W przewyższa typowe wartości dla starszych CPU używanych w miningowych (np. wiele procesorów x86 osiąga 30-40 H/s/W przy RandomX). Oczywiście, absolutna moc jest niska, ale z punktu widzenia zielonego IT jest to rezultat obiecujący – wskazuje, że rozdrobnione, niskonapięciowe węzły mogą konkurować pod względem efektywności energetycznej z większymi jednostkami. Warto dodać, że dzięki wspomnianemu aktywnemu chłodzeniu,

temperatury wszystkich Raspberry Pi utrzymywały się stabilnie w okolicach 55-60°C pomimo długotrwałego maksymalnego obciążenia. Zapobiegło to zjawisku thermal throttling, czyli ograniczania taktowania CPU przy przegrzewaniu, co oznacza, że klastrował cały czas ze szczytową wydajnością bez przerw czy spadków spowodowanych przegrzaniem – a to istotne dla nieprzerwanego i bezpiecznego działania systemu (brak ryzyka uszkodzenia termicznego komponentów). Odporność na awarie i ciągłość działania: Kluczowym elementem badania była symulacja awarii w celu oceny wewnętrznej odporności mikroklastra. Wybrano skrajny scenariusz – utratę łączności z węzłem master – aby przeanalizować zachowanie systemu w warunkach braku centralnej koordynacji. Bezpośrednim skutkiem takiej awarii było zatrzymanie procesu orkiestracji: węzeł nadrzędny przestał być osiągalny dla agentów klastrowych na pozostałych Raspberry Pi. Natychmiastową obserwacją był spadek łącznego hashrate mniej więcej o wartość odpowiadającą wydajności jednego węzła (ok. 300 H/s). Logi XMRig na pozostałych dostępnych węzłach odnotowały utratę jednego z podów – instancja przypisana wcześniej do nodePI-1 (pracująca pod kontrolą mastera) zakończyła pracę i nie została automatycznie zrestartowana gdzie indziej. Wynik przedstawiono na rysunku 4.



```

lukasz@masterPI-0: ~
Error from server: Get "https://192.168.5.211:10250/containerlogs/xmrig/xmrig-574965565d-8hl7t/xmrig?tailLines=50": proxy
error from 127.0.0.1:6443 while dialing 192.168.5.211:10250, code 502: 502 Bad Gateway
>>> XMRig MONITOR (refresh every 60 sec) <<<
Time: Tue 20 May 19:10:21 BST 2025

=== HASHRATE from pod: xmrig-574965565d-8hl7t (on node: nodepi-1) ===

=== HASHRATE from pod: xmrig-574965565d-p8rrq (on node: nodepi-3) ===
[2025-05-20 14:10:19.649]  miner      speed 10s/60s/15m 318.4 317.7 n/a H/s max 338.9 H/s

=== TOTAL HASHRATE (60s avg): 317.7 H/s ===

```

Rysunek 4. Logi XMRig, awaria jednego z nodów pracujących w systemie
Źródło: opracowanie własne.

Pool MoneroOcean również zgłaszał brak odpowiedzi od jednego workera. Oznacza to, że awaria węzła zarządzającego spowodowała utratę części zadań obliczeniowych klastra, co było oczekiwane, ale istotne jest, że reszta systemu kontynuowała pracę. Trzy z czterech pozostałych podów (na

nieuszkodzonych węzłach) dalej wydobywały Monero, utrzymując ~75% poprzedniego hashrate. Nie zaobserwowano rozproszenia czy desynchronizacji – te węzły w dalszym ciągu komunikowały się z p2p siecią Monero i po ol’em, co świadczy o pewnej rezyliencji: pojedyncza awaria nie zatrzymała całkowicie działania usługi blockchain. Niemniej, test ujawnił poważne ograniczenie: w obecnej konfiguracji Kubernetes (k3s) nie podjął próby automatycznej re-schedulacji utraconego poda na innym dostępnym węźle. Innymi słowy, klaster nie zaadaptował się do awarii przez uruchomienie brakującej instancji górnika np. na jednym z działających Raspberry Pi. Taka sytuacja wynika prawdopodobnie z faktu, że w architekturze k3s z jednym masterem, utrata mastera w praktyce „zamraża” funkcję kontrolera – bez niego nowe decyzje odnośnie podów nie są podejmowane. W typowych wdrożeniach produkcyjnych Kubernetes zaleca się konfigurację wysokiej dostępności (HA) dla warstwy zarządzającej, np. poprzez kilkietapowy klaster masterów, tak by awaria jednego nie wstrzymywała całego systemu (DeCarlo, 2018). W eksperymencie celowo pominięto tę komplikację, aby ocenić najgorszy przypadek. Wynik wskazuje, że aby mikroklastery były rzeczywiście odporne na uszkodzenia, należałoby zaimplementować mechanizmy redundancji w warstwie orkiestracji lub zastosować alternatywne rozwiązania (np. lekkie schedulery rozproszone oparte na konsensusie w stylu Raft, albo ręczne przełączenie roli mastera na inny węzeł). Pomimo braku automatycznego self-healingu, pozytywnym aspektem jest, że pozostałe węzły utrzymały swoje zadania i po przywróceniu połączenia z masterem system mógł zostać przywrócony do pełnej funkcjonalności bez restartu całości. W praktyce po ponownym dołączeniu węzła nadrzędnego klastra, brakujący pod XMRig został ponownie zdeployowany (zgodnie z deklarowanym stanem 5 replik) i hashrate powrócił do poprzedniego poziomu. Incydent ten pokazał jednak, że obecny mechanizm nie gwarantuje ciągłości pełnej wydajności w momencie awarii – klaster działa dalej, ale w trybie zdegradowanym. Z punktu widzenia bezpieczeństwa systemów krytycznych, gdzie często zakłada się tolerancję na awarię N-1 elementów bez utraty funkcji, należałoby ten mankament wyeliminować. Możliwe sposoby to:

- wprowadzenie zapasowego mastera,

- wykorzystanie bardziej autonomicznych agentów (każdy węzeł sam utrzymuje zadanie niezależnie),
- architektura leader election pomiędzy węzłami.

Podsumowując testy niezawodności, można stwierdzić, że mikrosystem oparty o Raspberry Pi jest w stanie kontynuować pracę nawet w warunkach częściowej awarii, ale wymaga pewnych usprawnień by osiągnąć pełną odporność systemową. Warto zauważyć, że sama sieć blockchain Monero jako całość pozostała niewzruszona utratą jednego węzła – z perspektywy globalnej decentralizacji był to incydent bez znaczenia. To podkreśla, że odporność na poziomie makro (całej sieci blockchain) jest wysoka, natomiast odporność na poziomie mikro zależy od wewnętrznej architektury. W kontekście zabezpieczania takich mikroklastrów przed awariami, należałoby także rozważyć kwestie zasilania awaryjnego (UPS dla każdego node'a lub przynajmniej mastera) – w przeprowadzonym badaniu brak zasilania zapasowego oznaczałby natychmiastowe przerwanie działania całego klastra w razie zaniku prądu. Dla infrastruktury krytycznej byłby to poważny problem, stąd w realnych wdrożeniach konieczne jest projektowanie warstw redundancji zarówno w sprzęcie, jak i oprogramowaniu.

Analizując aspekty bezpieczeństwa, poza odpornością na awarie fizyczne, warto odnieść się do innych wymiarów bezpieczeństwa takiego rozwiązania. W trakcie eksperymentu skupiono się na wydajności, jednak pewne obserwacje można poczynić. Po pierwsze, klastr operował w środowisku lokalnym z zaufaną siecią – w otwartym środowisku produkcyjnym należałoby zadbać o zabezpieczenia sieciowe (firewalle, segmentacja sieci dla węzłów, szyfrowanie ruchu między nimi) aby zapobiec atakom na węzły (np. przejęcie kontroli nad którymś Raspberry Pi mogłoby posłużyć do manipulacji wynikami wydobywania lub jako przyczółek do ataków na inne systemy). Same protokoły Monero są już zbudowane tak, by zapewnić integralność i uwierzytelnienie (transakcje podpisane kryptograficznie, konsensus PoW chroniący przed nadużyciami), więc atakujący nie mógłby łatwo zmienić danych w blockchainie. Mógłby jednak próbować zakłócić pracę klastra – np. przez atak DoS na węzeł master lub zapełnienie go złośliwymi podami w Kubernetes. Te wektory można ograniczyć, stosując odpowiednie polityki

bezpieczeństwa K8s (ograniczenia dostępu, monitorowanie anomalii). Drugim aspektem jest bezpieczeństwo fizyczne i niezawodność komponentów: Raspberry Pi nie są urządzeniami klasy przemysłowej o podwyższonej niezawodności, dlatego w zastosowaniach produkcyjnych należy liczyć się z możliwością częstszych usterek (np. zużycie karty SD, awarie zasilania). Badanie wskazuje, że nawet przy intensywnej pracy i braku przerw, wszystkie jednostki działały stabilnie (co potwierdza dojrzałość RPi 5 jako platformy). Niemniej do systemów, gdzie bezpieczeństwo jest krytyczne (np. przetwarzanie danych medycznych, sterowanie ruchem), dobór sprzętu powinien uwzględniać te czynniki – być może lepszym rozwiązaniem byłyby tu dedykowane moduły obliczeniowe Raspberry Pi z bardziej niezawodną pamięcią eMMC i zasilaniem redundantnym. Porównując rozwiązanie z tradycyjnymi infrastrukturami, interesującym ćwiczeniem jest porównanie zaproponowanego mikroklastra z klasycznymi serwerami stosowanymi jako węzły blockchain. Typowy węzeł Monero uruchomiony na serwerze x86 (np. 8-rdzeniowym) mógłby osiągnąć kilkukrotnie wyższy hashrate niż pojedynczy Pi, ale kosztem również wyższego zużycia energii (rzędu 100 W). Aby uzyskać $\sim 1,6$ kH/s jak opracowany klastr, wystarczyłby współczesny procesor klasy desktop, jednak wówczas występuje pojedynczy punkt awarii – uszkodzenie tego serwera zatrzymuje cały węzeł. W opracowanym rozwiązaniu awaria pojedynczego Raspberry Pi redukuje wydajność, ale nie eliminuje systemu całkowicie, co jest cenne z perspektywy odporności (system degraduje się stopniowo, a nie binarnie). Dodatkowo mikroklastr można łatwo rozproszyć geograficznie (np. łącząc węzły przez VPN), zwiększając odporność na awarie lokalne (pożar, zalanie jednej serwerowni itp.). Jest to zgodne z duchem decentralizacji – wiele małych node'ów zamiast jednego dużego. Zgodnie z badaniami (Govea i in., 2024), integracja blockchain z rozproszonymi węzłami IoT może znacząco podnieść odporność i bezpieczeństwo systemów w smart cities, choć wymaga pokonania wyzwań skalowalności i standaryzacji. Otrzymane w przeprowadzonym badaniu wyniki wpisują się w ten obraz – pokazują wykonalność takiej integracji na małą skalę oraz wskazują obszary wymagające dalszych usprawnień (automatyzacja redundancji, zabezpieczenia przed awariami zasilania, ochrona przed atakami sieciowymi na poziomie orkiestracji).

Podsumowanie

Przeprowadzone badanie wykazało, że mikroklastery Raspberry Pi mogą z powodzeniem pełnić rolę węzła w zdecentralizowanej sieci blockchain takiej jak Monero. Pomimo ograniczeń sprzętowych, pięć współpracujących minikomputerów było w stanie osiągnąć zauważalną moc obliczeniową $\sim 1,6$ kH/s i utrzymać stabilne wydobycie kryptowaluty przez dłuższy czas. Otrzymane wyniki dowodzą, iż nawet przy minimalnych zasobach obliczeniowych możliwe jest stworzenie w pełni funkcjonalnego, rozproszonego systemu zdolnego do integracji z globalnym blockchainem (Monero) – potwierdzając tym samym zasadność założeń algorytmu RandomX o inkluzywności słabszych urządzeń. Z perspektywy inżyniersko-technologicznej, klastery ujawniły bardzo dobrą skalowalność w małej skali – wydajność rosła niemal liniowo wraz z dodawaniem kolejnych węzłów, a narzut związany z koordynacją nie zdławił mocy obliczeniowej. Efektywność energetyczna okazała się wręcz atutem – przy łącznym poborze mocy ~ 30 W klastery uzyskały wskaźnik ~ 50 H/s na wat, co czyni go konkurencyjnym wobec wielu tradycyjnych konfiguracji pod względem hashowania na jednostkę energii. Takie rozwiązanie jest zatem atrakcyjne w kontekście zastosowań, gdzie dostępna jest ograniczona moc lub gdzie priorytetem jest niski koszt operacji (np. zasilanie z paneli słonecznych w odległych lokalizacjach). Modularność i łatwość skalowania mikroklastra pozwala elastycznie dostosować jego wydajność do potrzeb – można zwiększyć liczbę węzłów dla większej mocy lub zredukować dla oszczędności energii, bez konieczności inwestycji w drogi sprzęt. Z punktu widzenia bezpieczeństwa i niezawodności, wyniki wskazują na pewną wrodzoną odporność takiego rozproszonego węzła, ale i obszary wymagające usprawnienia. Pozytywne jest to, że awaria pojedynczego węzła nie eliminuje całkowicie funkcji – pozostałe węzły kontynuują pracę i utrzymują sieć przy życiu. W kontekście systemów krytycznych oznacza to potencjalnie większą ciągłość działania w porównaniu z jednolitą jednostką obliczeniową. Jednak brak automatycznego przejmowania zadań przez inne węzły w razie awarii ujawnia, iż obecna architektura nie spełnia rygorystycznych wymogów wysokiej dostępności. Aby mikroklastery mogły być uznane za w pełni odporne, konieczne byłoby zastosowanie mechanizmów redundancji

w warstwie zarządzania (np. klaster HA dla Kubernetes) oraz zabezpieczenie przed awariami zasilania i komunikacji. W praktyce, biorąc pod uwagę wyniki, rekomenduje się:

1. Wprowadzenie redundancji mastera: co najmniej dwa węzły Raspberry Pi powinny pełnić rolę współdzieloną zarządzającą (np. wykorzystując zewnętrzny etcd i tryb HA Kubernetes), by awaria jednego nie zatrzymała harmonogramu podów.
2. Mechanizmy autoskalowania i autorestartu: włączyć polityki Pod Disruption Budget i restartPolicy tak, aby w razie wykrycia niedziałającego poda, klaster próbował go odtworzyć na innym dostępnym węźle.
3. Zabezpieczenia fizyczne: zastosować zasilanie awaryjne (UPS) przynajmniej dla głównych elementów, a także monitoring sprzętu (watchdogi) by zautomatyzować restart zawieszonych jednostek.
4. Aktualizacje i hardening: regularnie aktualizować oprogramowanie (zarówno system Raspberry Pi OS jak i kontenery), a także stosować zasady hardeningu (np. uruchamianie kontenerów z najmniejszymi uprawnieniami, izolacja sieciowa) by minimalizować ryzyko ataków.

Mikroklastry oparte na tanich urządzeniach jak Raspberry Pi mogą znaleźć zastosowanie w wielu dziedzinach jako tania i elastyczna platforma blockchain. W środowiskach badawczych i dydaktycznych umożliwiają studentom i inżynierom eksperymentowanie z prawdziwymi sieciami blockchain w skali laboratoryjnej, bez konieczności posiadania kosztownego sprzętu – rozwiązanie udowodniło, że nawet wymagająca sieć Monero może działać na takim klastrze, co otwiera drogę do badań nad optymalizacją algorytmów konsensusu czy zarządzania energią w sieciach blockchain. W obszarze IoT, gdzie miliardy urządzeń wymieniają dane i wymagają zabezpieczonej rejestracji zdarzeń, integracja lekkich węzłów blockchain z urządzeniami brzegowymi może zapewnić niezawodną i odporną na manipulacje platformę wymiany informacji. Klaster Raspberry Pi mógłby pełnić rolę lokalnego rejestratora transakcji np. w inteligentnej sieci energetycznej czy systemie czujników miejskich, zapewniając ciągłość działania nawet przy awarii części sensorów. Dodatkowo, architektury odporne na awarie przy użyciu taniej infrastruktury stają się możliwe do wdrożenia w miejscach, gdzie dotąd barierą

był koszt – np. w małych gminach do prowadzenia lokalnych rejestrów (kaster, rejestry mieszkańców) w sposób rozproszony i odporny na utratę danych. Badanie pokazuje, że technicznie jest to realne, choć wymaga dbałości o szczegóły implementacyjne. Na koniec warto zaznaczyć, że trend polegający na demokratyzacji dostępu do technologii blockchain poprzez wykorzystanie urządzeń powszechnie dostępnych i energooszczędnych wpisuje się w szerszy obraz zmian w IT. Wraz z postępem technologicznym, różnica między profesjonalnym sprzętem a hobbystycznym zaciera się – Raspberry Pi 5 jest kilkukrotnie wydajniejszy od swoich poprzedników (Kominos i in., 2019) i przyszłe generacje mogą jeszcze bardziej zwiększyć tę wydajność. Można sobie wyobrazić, że za kilka lat mikroklastry staną się jeszcze potężniejsze, umożliwiając np. działanie lokalnych mini-sieci blockchain obsługujących konkretne społeczności czy zadania (np. wymiana energii między sąsiadującymi domami w ramach smart grid). Już dziś jednak, jak wykazano, nawet obecne rozwiązania pozwalają budować działające, choć niewielkie, „ekosystemy blockchain” w skali mikro, które odzwierciedlają cechy dużych systemów – decentralizację, odporność na cenzurę i (w pewnym stopniu) odporność na awarie – za ułamek kosztów i z minimalnym zużyciem energii.

Bezpieczeństwo i odporność mikroklastrów Raspberry Pi w sieciach blockchain wydaje się obiecujące, o ile uwzględni się specyfikę tych platform. Monero jako studium przypadku udowodniło, że prywatna i zdecentralizowana kryptowaluta może być obsługiwana przez tani, rozproszony sprzęt, co potwierdza zamierzenia jej twórców co do egalitarności protokołu. Jednocześnie doświadczenia wyniesione z testów awaryjnych podkreślają, że osiągnięcie pełnej niezawodności wymaga uzupełnienia architektury o mechanizmy tolerancji uszkodzeń. Niniejsza praca dostarcza podstaw zarówno inżynierom, jak i badaczom bezpieczeństwa do dalszego rozwijania koncepcji odpornych mikro-infrastruktur blockchain – czy to w celu zabezpieczenia krytycznych danych, czy zapewnienia ciągłości działania rozproszonych usług w skali lokalnej. W dobie rosnących zagrożeń cybernetycznych, rozwiązania łączące blokową odporność (blockchain) z modułową redundancją (mikroklastry) mogą odegrać istotną rolę w kształtowaniu przyszłych, bardziej odpornych systemów informacyjnych.

Literatura

1. Govea, J., Gaibor-Naranjo, W., Villegas-Ch., W. (2024). Securing Critical Infrastructure with Blockchain Technology: An Approach to Cyber-Resilience. *Computers*, 13(5), 122. <https://doi.org/10.3390/computers13050122>
2. Nofer, M., Gomber, P., Hinz, O., Schiereck, D. (2017). Blockchain. *Business & Information Systems Engineering*, 59(3), 183-187. <https://doi.org/10.1007/s12599-017-0467-3>

Netografia

1. DeCarlo, P. (2018). *Cryptocurrency Node Cluster with K8s on Raspberry Pi*. Hackster.io. Pobrane z: <https://www.hackster.io/pjdecarlo/cryptocurrency-node-cluster-with-k8s-on-raspberry-pi-696933> (data dostępu: 10.12.2025).
2. Hoskinson, C. (2021). *Why Monero Is the Privacy King of Cryptocurrencies*. Medium (data dostępu: 10.12.2025).
3. Komninos, A., Simou, I., Gkorgkolis, N., Garofalakis, J. (2019). *Performance of Raspberry Pi Micro-Clusters for Edge Machine Learning in Tourism*. In Proc. AmI-2019. CEUR Workshop Proceedings, 2492, 8-18. Pobrane z: <http://ceur-ws.org/Vol-2492/paper2.pdf> (data dostępu: 10.12.2025).
4. Nakamoto, S. (2008). *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*. (White paper). Pobrane z: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf> (data dostępu: 10.12.2025).
5. Raspberry Pi Foundation. (2023). *Introduction to Raspberry Pi 5 and Its New Features*. *Raspberry Pi Documentation*. Pobrane z: <https://www.raspberrypi.com/news/introducing-raspberry-pi-5> (data dostępu: 10.12.2025).
6. Trail of Bits. (2019). *State of the Art Proof-of-Work: RandomX*. Trail of Bits Blog. Pobrane z: <https://blog.trailofbits.com/2019/07/02/state-of-the-art-proof-of-work-randomx> (data dostępu: 10.12.2025).

dr inż. Czesław Fliśnik¹

Akademia WSB, Dąbrowa Górnicza

https://doi.org/10.29316/9788368103281_12

DIGITAL RADIO DAB+ IN THE DIGITAL AGE

RADIO CYFROWE DAB+ W ERZE CYFROWEJ

Abstract

The contemporary media market is going through a phase of technological revolution in virtually every sector. This phenomenon is influenced by innovative technologies entering the world of media through the general digitization of analogue radio and television stations, Internet networks and the increasingly ubiquitous social media. The study contains an analysis of the impact of general trends of innovative transformations in digital media, in confrontation with the essence of human capital, and presents the answer to the bothering question whether, in the new perspective of electronic digital media and their impact on the environment, efficient HR can constitute the basis for the development of a given media organization. The increase in the benefits of the DAB+89 digital radio implementation, as indicated in the research analysis by public opinion, should contribute to the rapid development of this innovative technology.

Keywords: digitization, media, DAB+ radio, innovation, management

Streszczenie

Współczesny rynek mediów przechodzi fazę rewolucji technologicznej praktycznie w każdym sektorze. Na zjawisko to wpływają innowacyjne technologie wkraczające do świata mediów poprzez powszechną cyfryzację analogowych stacji radiowych i telewizyjnych, sieci internetowe oraz coraz bardziej wszechobecne media społecznościowe.

¹ <https://orcid.org/0000-0003-1909-1785>, e-mail: czflisnik@gmail.com

Badanie zawiera analizę wpływu ogólnych trendów innowacyjnych przemian w mediach cyfrowych w konfrontacji z istotą kapitału ludzkiego i przedstawia odpowiedź na nurtujące pytanie, czy w nowej perspektywie elektronicznych mediów cyfrowych i ich wpływu na otoczenie, efektywne zarządzanie zasobami ludzkimi może stanowić podstawę rozwoju danej organizacji medialnej. Wskazany w analizie badawczej wzrost korzyści z wdrożenia radia cyfrowego DAB+ w opinii publicznej powinien przyczynić się do szybkiego rozwoju tej innowacyjnej technologii.

Słowa kluczowe: cyfryzacja, media, radio DAB+, innowacje, zarządzanie

Introduction

The media has been accompanying people for several decades (Briggs, Burke, 2010), along with the transport of goods on ships, books and scripts containing new knowledge and ideas were covered more and more distances, but it was only electronic media that enabled access to information. Meanwhile, digital electronic media (Adamski, Gralczyk, Kwasik, Laskowska, 2012) have gone a step further, providing entertainment, information and education in an interactive form. Their role cannot be overestimated, we watch DVB-T television every day, listen to DAB+ radio, browse social networks and even participate in educational activities. The ubiquitous and widely listened to radio (Adamski, 2012) plays the leading role in the multitude of information provided in the entire maze of public and commercial media. Digital media is used for information, training, work, entertainment and business. As research has shown (McKinsey, 2016), digitized service companies in EU countries were ranked fourth after ICT (Information and communications technology) and traditional media, reflecting the high level of digitization of their own resources. Digital electronic media indirectly owe their development to innovative information technologies, which have made IT equipment (computer and software) become the basic instruments in practically every workplace, in particular in media organizations. Computerization and artificial intelligence connected in intranet and Internet networks (clouds) connecting communities of producers, intermediaries, sellers and consumers of electronic media, providing the community, in addition to information and entertainment, the possibility of organizing classes, meetings and teleconferences. (Pańkowska, 2017). Digital media, and DAB+ radio in particular,

often serve individuals, smaller communities, and ultimately the general public (McKinsey, 2017). Digital media deals with topics relating to virtually all areas of social life. We value this medium due to the speed and wide range of access to information, its diverse and frequently updated selection of national and global services, and above all, an easy-to-use and 24/7 means of social communication. The modern user of electronic services available in the latest DAB+ standards (ETSI, 2019) cannot imagine everyday life without immediate access to media services. According to recent research (UKE, 2019), the population increasingly uses digital network media and DAB+ radio.

Media environment for the subject of the study

DAB+ digitization is a new perspective of development opportunities for the radio media organization (Lamri, 2020), both in terms of technology and programming. An innovative element is introduced in the form of new opportunities, an additional information channel (graphics, video, text information), an increase in the number of programs (Ogrodowczyk, Roslan-Kuhn, 2019) enabling the expansion of the competences of the current staff, employment of a new higher qualifications, or possibly transfer to other jobs (Skałkowski, 2016). Innovative technology initiates new challenges for the organization, increases competitiveness among existing broadcasters and enables additional economic entities to enter the media market. New media players entering the market, on the one hand, pose a competitive threat to the existing broadcasters, and, from another perspective, inspire mobilization and improvement of the quality of services offered. The real threat to the current order may be foreign corporations with large capital, new broadcasters with greater programming and capital possibilities, world tycoons who have not been present on the internal media market so far. The digitization of the media also increases the number of media entities, which creates the threat of fragmentation of the advertising market, which is particularly important for smaller commercial broadcasters (Mazurek, 2021).

Purpose of the study and research methods

In this study, the author will analyze the impact of factors determining the success of digitization in relation to entrepreneurship, innovation, as well as competitiveness against other media economic entities (Chałubińska-Jentkiewicz, Nowikowska, Wąsowski, 2021). The study will explain the issue of correlations that directly affect human resources management and the existing external factors, directly related to the environment of the organization and internal ones related to the employed staff, in the context of modern management methods and concepts (Martyniak, 2002). Due to the complexity of the problem, which relates to two issues, both the public opinion poll perceiving the organization from the outside (the audience) and the staff of the DAB+ media organization, creating a product in the form of radio broadcasts for the audience, which is also a specific market brand of the organization (Wojtaszczyk, 2012). In this monograph, the author used triangulation (Stańczyk, 2015), with the help of which he will conduct a research project in both quantitative and qualitative form. In the study, the author used the method of questionnaire research, which focuses on solving the problem on the basis of empirical approach, which requires methodological rigor (Majetun, 2016). The author decided on the form of public opinion poll, using the CAWI (Computer-Assisted Web Interview) technique, which, in addition to the ease of establishing contact with a potential respondent, uses the Internet with computer software that watches over the smooth running of the survey, while controlling the correctness of the interview process. Thanks to the use of this technology, the process of collecting data is shorter and is less time-consuming for the respondent. For the author of the study, the group of uninformed converts should be the subject of special attention in the research process concerning the implementation of digital radio DAB+, because at present they constitute a significant group of public opinion that may disturb the credibility of the measurement results. Therefore, along with the form, respondents receive a short brochure explaining the issue of radio conversion. After a thorough analysis of various ways and methods of applying the type of research, the author decided to combine the quantitative and qualitative methods with the use of CAWI. Such an analysis will be more reliable than

a unit study (Dźwigoł, 2015). The respondents participating in the analysis were divided into four groups, which ultimately form two groups defined as: “Beneficiaries” – (radio listeners) women and men and “Producers” – office workers and program creators as “Substantive” and technical staff employed in the radio and broadcasting stations, as well as broadcast vans, were referred to as “Technical”.

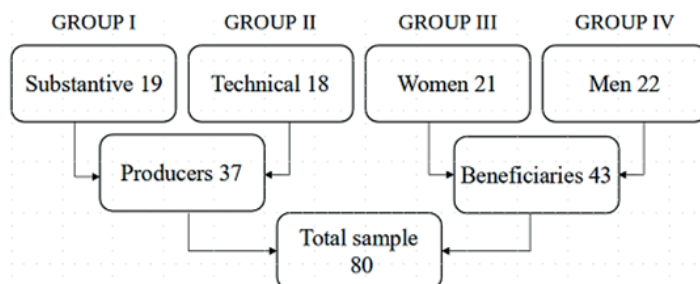


Figure 1. Diagram of the research procedure divided into groups and a list of the number of respondents used in the analytical chain

Source: own study.

Public opinion polls

Quantitative “how much” methods combined with qualitative “how and why” methods allow to obtain answers to important questions, incl. how many listeners (of the public opinion) know DAB+ technology and what they think and how many media professionals associate DAB+ well with “producers” and how many people are generally satisfied with the introduction of media digitization. The practical case study (“case study”) plays the role of an additional tool increasing the credibility of the “producer” (DAB+ radio) in relation to the potential “beneficiary” (radio listener). An important element of such credibility are the responses of people directly involved in the creation and dissemination of radio programs and the recipients of their programs included in the “case studies”. As a result of the analysis of the above examples of the types of research procedures used, it can be concluded that qualitative research is in some cases more attractive than quantitative, but at

this point it should be noted that it is the research problem that determines the use of the most appropriate research procedure (Milic-Czerniak, 2021). The sample representative for the regional population was $n=80$, age: 20-65 years. The sample in terms of: gender, age, profession, education and region according to the Central Statistical Office. The questionnaire contains specific questions based on a previously specially prepared list. The answer is obtained automatically, it is enough for the respondent to fill in the received “e-form”. An important element in the study is the selection of appropriate groups of respondents and a set of questions for the issue at hand. The representative sample consists of four survey groups for which a set of basic questions was prepared, selected from the list of issues. The thematic questions are specific and focused on the issues of human resource management in the DAB+ organization.

Research procedure

In the survey group of “beneficiaries” and “producers”, a total of 80 people randomly selected from among employees of electronic media and a significant number of listeners of radio stations were surveyed. Each group consists of two factions. Producers differ in terms of employment, which for research purposes they named them as substantive and technical in the proportions of approx. 24% and 23%. The beneficiaries are women and men in the amount of 26% and 28%, respectively (Table 1). The research used a set of various questions that allow for the drawing of conclusions and conclusions in the field of “media digitization interaction analysis in correlation to human resource management on the example of digital radio DAB+”, to which relatively consistent and authoritative answers were obtained.

Table 1. Percentage share in a given research group

	Analyzed basic survey groups			
	Women	Men	Substantive	Technicians
Number of people	21	22	19	18
Participation	26,25%	27,50%	23,75%	22,50%

Source: own study.

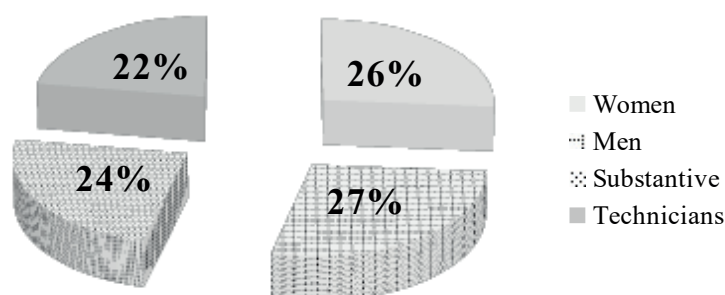


Figure 2. Percentage share of respondent groups

Source: own study.

Beneficiaries and Producers – the results of the analysis

The type of CAWI (on-line, internet) interview was used, in which the respondent provides answers on his / her own. This method is currently one of the most popular, more frequently used and fastest spreading new methods of social research (Lutostański et al., 2021). A set of questions was used in the questionnaires, to which various answers were obtained. The research hypothesis concerned the basic issues related to the impact of digitization of DAB+ radio on HR and, consequently, on the entire media organization. The main goal of this survey is to prove that the hypotheses formulated therein are true or false (Czakon, 2015). The study was conducted on people related to or interested in the analyzed subject, i.e. the digitization of DAB+ radio. By using the methods of electronic data acquisition and analysis, you can test whether a hypothesis is proven or not. Already initially, after a short analysis and compilation of a few more important parameters listed in Table 2, you can initially evaluate the research results and draw the first conclusions.

Table 2. List of the twelve highest and lowest rated responses

Survey question	A: no.	Answers with the highest ↑ and the lowest ↓ scored	No of points
What impact will the digitization of DAB+ have on radio employees?	2	It will motivate to education and development	24
	3	Discourage to further education	5
How many% of employees, according to you, will benefit from the digitization of radio?	5	80 %	32
	1	10 %	3
What will the organization be characterized by after the implementation of DAB+?	4	Build careers	29
	5	Worse work and pay	2
How do you assess the impact of DAB+ on staff changes	1	It will increase the number of jobs	26
	2	It will reduce jobs	6
What elements of HR will be influenced by the introduction of DAB+ in the organization	4	Staff development	21
	3	Nothing will change	1
To what extent will higher qualifications of employees be needed in the DAB+ radio?	6	6	24
	1	1	1
To be successful in DAB+ radio on in the professional field:	3	Continuous learning	23
	5	Work on personal development	6
Which factors are positively influenced by the introduction of DAB+ in the organization?	4	Personal development	20
	6	Training	9
To what extent is the possibility of development decisive for starting work in the DAB+ radio	6	6	29
	1	1	2
What, in your opinion, are the factors that determine the choice of DAB+ as a workplace	5	Social advancement, ennoblement	24
	1	location	5
To what extent are financial factors decisive for starting a job in DAB+ radio?	5	5	24
	1	1	1
Which crew characteristics are influenced by the introduction of the DAB+ radio	2	Knowledge	18
	5	Value system	6

Source: own study.

The survey methods of searching for research used for the purpose of searching, which enable the search for data acquisition and provide the collected data. By using the method of data discovery and analysis, you can find out whether it is possible to prove that there is a method or not. Already at the first

steps, after a short analysis and compilation of a few new parameter elements (Figure 3), you can start evaluating the projects and the first solution.

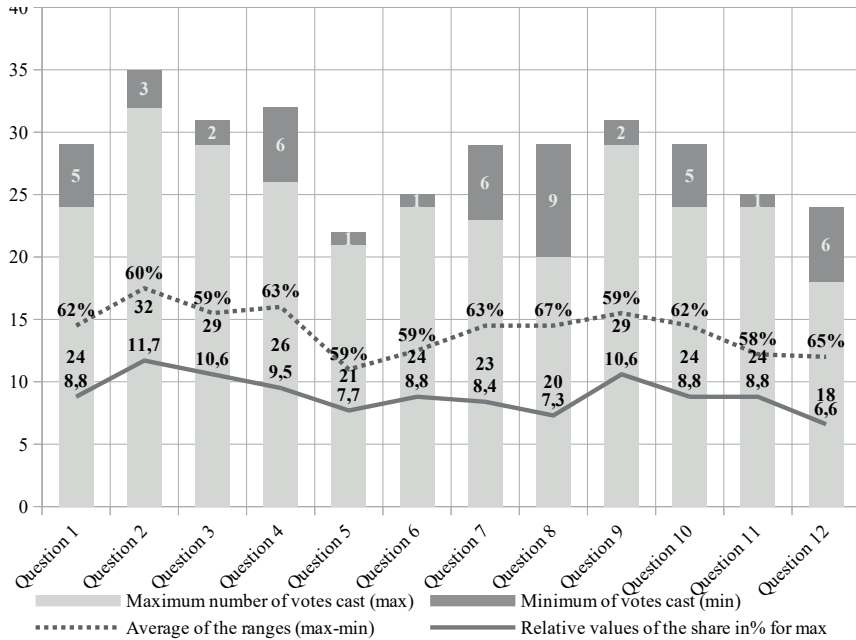


Figure 3. Percentage of the highest and lowest opinions and relative values

Source: own study.

The results of the author's interest were obtained and analyzed from the CAWI electronic questionnaire. The data includes the number and proportions of votes cast for each of the twelve closed questions. Depending on their experience with the media, the respondents expressed their opinions and views by voting on the presented responses (one or multiple choice). In addition to quantitative data, the chart shows statistical measures, min. the most intuitive measure of variability of cases in the sample population, called the range, which characterizes the empirical area of variability of the studied case (feature).

Professional career as a boon of digitization

According to the research results, thirty-two respondents expressed their opinion that as many as “80% of the workforce should benefit” from the benefits of digitization in a media company. The second very important premise for introducing a new technology into an organization will be, as it was shown by twenty-nine respondents, “the possibility of creating professional careers” in a modern media institution. No less important element, which was also noted by the participants of the public opinion poll, which is related to digital radio, will be the possibility of “increasing jobs” in the organization of electronic media. On the other hand, the highest rated data, as shown in Table 3, clearly indicate that 80% of employees will benefit from digitization. In addition, an important message for the digitization process is also the information on “development opportunities”, which reached 6 points, placing it in the second position of the highest-rated benefits for HR.

Table 3. List of the highest rated favorable answers for HR according to the sample of 80’

Rated the highest for DAB+ related responses	Points	Ranking position
It will motivate to education and development	24	4
80% of employees will benefit from digitization	32	1
Build careers	29	2
It will increase the number of jobs	26	3
Staff development	21	6
Higher qualifications of employees -6 points	24	4
Continuous learning	23	5
Personal development	20	7
Development possibility - 6 points	29	2
Social advancement, ennoblement	24	4
Financial factors - 5 points	24	4
Knowledge	18	8

The confirmation of the legitimacy of the choice of an innovative technology, which is DAB+ digital radio, is the unequivocal research results, on the basis of which it can be concluded that there is a general public acceptance

of the concept of media digitization, which is indicated by the result of the ranking of the highest rated answers and their position according to the 80' sample shown in Figure 4.

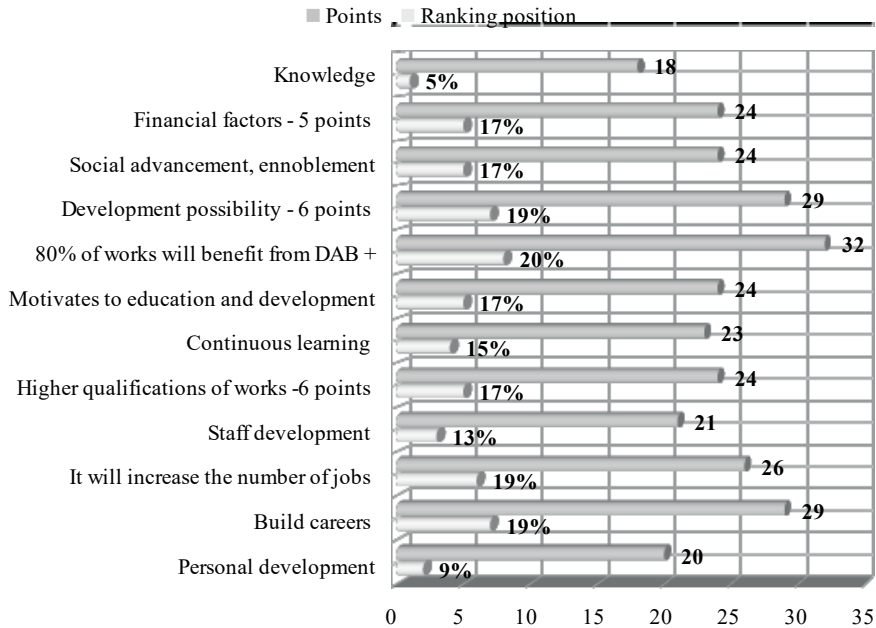


Figure 4. Ranking of the highest rated answers and their position according to the „a sample of 80” / „80-person sample”

Source: own study.

The results of the research procedure

The analysis showed the dependence of the influence of art and HR management skills and their impact on the organization in the era of digital transformation of electronic media. According to the surveyed groups of respondents, the employees of DAB+ radio will definitely benefit from digitization. Out of the entire group of respondents, thirty-two people voted for the survey item indicating the introduction of DAB+ as “80 percent benefit for the radio crew”, obtaining the best result in the ranking. The second position was taken by two parallel factors relating to “career creation” and “development opportunities”. The next place, also highly classified (third),

as a benefit for the organization, shows that DAB+ will “increase the number of jobs”. Apart from the podium (fourth place), there are four equal factors, which cover a wide segment of the human resources economy of the organization, signaling that DAB+ will “motivate education and development”, will ensure “social promotion and ennoblement” and “will affect financial factors and higher qualifications of employees”. Observing the results of the research procedure, it is worth noting that the analysis can be extended with additional research tools in the field of decision-making effectiveness of management, including the implementation of benchmarking, which may supplement the above query (Fliśnik, 2021). Using additional research instruments, it can be assumed that on the basis of the entire study, both from the group of respondents and the additional benchmarking process, it can be assumed that the results obtained in this way will be sufficiently consistent and, above all, reliable.

Conclusions from the opinion poll

The increase in the benefits of DAB+ digital radio, indicated in the above research analysis by the public, may contribute to the rapid development of this innovative technology. Assuming confirmation of success in practice, it can be stated that employees should benefit in all social terms from the digitization of radio. Certainly, in the initial period, it will be necessary to invest in the new technology, but in the long term the balance of profits should be positive. An important element will be the method of managing innovations and acquired knowledge, which, combined with innovative technology, will result in a decisive competitive advantage (Makieła, Stuss, 2018). The analysis of planned changes in the HR system in DAB+ media organizations should be supplemented with consultations to help the management understand how innovative changes are perceived by the staff, and to capture the complexity of non-rational elements that appear in the implementation of digital radio. Experience shows that the staff is the basic segment of the media organization, also in the sense of its unreliability, and as a result, it can become a critical link in the organization management chain (Przytuła, 2019). The perception of the crew, their features and attributes as human capital

supports the shaping of professional careers and improving the qualifications of employees in a manner consistent with the needs and goals of DAB+ radio. The above theses clearly show how important it is for HR management to be competent and responsible for decisions made in the field of organization management (Edmondson, 2021). It can therefore be assumed with a high degree of certainty that modern innovative human resource management plays an equally strategic role as digital DAB+ radio in the twenty-first century.

References

1. Adamski, A. (2012). *Media w analogowym i cyfrowym świecie. Wpływ cyfrowej rewolucji na rekonfigurację komunikacji społecznej*. Elipsa.
2. Adamski, A., Graczyk, A., Kwasik, K., Laskowska, M. (2012). *Media audiowizualne i cyfrowe wobec wyzwań współczesnego społeczeństwa*. Elipsa.
3. Briggs, A., Burke, P. (2019). *Spoleczna historia mediów*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
4. ETSI. (2019). *Radio DNS Hybrid Radio; Hybrid lookup for radio services*. ETSI TS 103 270 V1.3.1.
5. Chałubińska-Jentkiewicz, K., Nowikowska, M., Wąsowski, K. (2021). *Media w erze cyfrowej*. Wolters Kluwer.
6. Czakon, W. (2015). Rygor metodologiczny. W: Czakon, W. (red.), *Podstawy metodologii badań w naukach o zarządzaniu*. Nieoczywiste.
7. Dźwigoł, H. (2015). Założenia do budowy metodyki badawczej. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Organizacja i Zarządzanie*, 78, 99-116.
8. Edmondson, A. (2021). *Firma bez strachu*, MT Biznes.
9. Fliśnik, C. (2021). Innowacyjny management w digitalnych mediach. W: Ł. Wójtowicz, *MIK-21. Międzynarodowa Innowacyjność i Konkurencyjność w XXI w. Aspekty Innowacyjne* (s. 17-31). Spatium.
10. Kurowska-Pysz, J., Wróblewski, Ł. (2015). *Wybrane problemy zarządzania i marketingu w instytucjach kultury*, Akademia WSB Dąbrowa Górnicza.
11. Lamri, J. (2020). *Kompetencje XXI wieku*, Wolters Kluwer.
12. Lombardo, M. (2017). *Cost-benefit analysis of FM, DAB, DAB+ and Broad-band for radio broadcasters and listeners*. EBU Technical Review.
13. Lutostański, M., Protasiuk, M., Łebkowska, A. (2021). *Badanie rynku*. Wydawnictwo Naukowe PWN.

14. Makiela, Z., Stuss, M. (2018). *Przedsiębiorczość i zarządzanie innowacjami. Wiedza technologia konkurencja przedsiębiorstwo*. C. H. Beck.
15. Martyniak, Z. (2002). *Nowe metody i koncepcje zarządzania*. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Krakowie.
16. Matejun, M. (2016) Metodyka badań ankietowych w naukach o zarządzaniu. ujęcie modelowe. W: M. Lisiński, B. Ziębicki (red.), *Współczesne problemy rozwoju metodologii zarządzania*. Fundacja Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie.
17. Mazurek, G. (2021). *Transformacja cyfrowa*, Wydawnictwo Naukowe PWN.
18. McKinsey&Company. (2016). *Digital Europe: pushing the frontier, capturing the benefits*. McKinsey Global Institute
19. Milic-Czerniak, R. (2021). *Badania marketingowe*. Wydawnictwo Difin.
20. Pańkowska, M. (2017). *Zarządzanie asobami informatycznymi*. Prace Naukowe, Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach.
21. Przytuła, S. (2019). *Zarządzanie różnorodnością pracowników*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
22. Skałkowski, M. (red). (2016). *Kodeks pracy 2016 z komentarzem*. INFOR PL.
23. Stańczyk, S. (2015). Triangulacja – łączenie metod badawczych i urzetenienie badan. W: W. Czakon (red.), *Podstawy metodologii badań w naukach o zarządzaniu*. Nieoczywiste.
24. Szczepańska-Woszczyna, K., Dacko-Pikiewicz, Z., Lis, M. (2015). Responsible Leadership: A Real Need or Transient Curiosity. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 213, 546-551. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.11.448>.
25. UKE. (2019). *Raport o stanie rynku telekomunikacyjnego w 2019 r*. Urząd Komunikacji Elektronicznej.
26. Wojtaszczyk, K. (2012) *Employer branding czyli zarządzanie marką pracodawcy. Uwarunkowania, procesy, pomiar*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.

mgr inż. Natalia Krukar¹

Politechnika Lubelska

https://doi.org/10.29316/9788368103281_13

QUALITY INDICATORS AND METHODOLOGY FOR EVALUATING ALGORITHM EFFECTIVENESS IN SKIN LESION DETECTION AND SEGMENTATION

WSKAŹNIKI JAKOŚCI I METODYKA OCENY SKUTECZNOŚCI
ALGORYTMÓW W WYKRYWANIU I SEGMENTACJI ZMIAN
SKÓRNYCH

Abstract

With the global rise in skin cancer cases, Artificial Intelligence-based Computer-Aided Diagnosis (CAD) systems are becoming essential in modern dermatology. This chapter analyzes the methodology for evaluating machine learning algorithms in two key domains: object detection and semantic segmentation. The study challenges the sufficiency of global Accuracy as a primary metric, highlighting its fundamental flaws in the context of imbalanced medical datasets. Based on a literature review, including works on YOLO and U-Net architectures, the clinical significance of the confusion matrix, IoU, mAP, and the DSC is deconstructed. The aim of this study is to define an evaluation standard that balances the technical precision of algorithms with patient safety requirements.

Keywords: artificial intelligence, dermatology, evaluation metrics, segmentation, detection, melanoma

¹ e-mail: natalia.krukar@pollub.edu.pl.

Streszczenie

Wraz ze wzrostem liczby przypadków raka skóry na całym świecie, systemy komputerowej diagnostyki wspomaganej (CAD) oparte na sztucznej inteligencji stają się niezbędne we współczesnej dermatologii. Niniejszy rozdział analizuje metodologię oceny algorytmów uczenia maszynowego w dwóch kluczowych obszarach: wykrywaniu obiektów i segmentacji semantycznej. Badanie podważa wystarczalność globalnej dokładności jako podstawowego wskaźnika, podkreślając jej fundamentalne wady w kontekście nie zrównoważonych zbiorów danych medycznych. Na podstawie przeglądu literatury, w tym prac dotyczących architektur YOLO i U-Net, zdekonstruowano znaczenie kliniczne macierzy pomyłek, IoU, mAP i DSC. Celem niniejszego badania jest zdefiniowanie standardu oceny, który równoważy precyzję techniczną algorytmów z wymogami bezpieczeństwa pacjentów.

Słowa kluczowe: sztuczna inteligencja, dermatologia, wskaźniki oceny, segmentacja, wykrywanie, czerniak

Introduction

Skin cancers are currently one of the most common groups of oncological diseases globally, creating a significant burden for healthcare systems and society. According to data from the World Health Organization (WHO) and the International Agency for Research on Cancer (IARC), over 1.5 million new skin cancer cases were diagnosed in 2022, including approximately 330,000 cases of melanoma, which accounted for nearly 60,000 deaths. These statistics show an upward trend, especially in fair-skinned populations, correlating with lifestyle changes and exposure to ultraviolet (UV) radiation.

The timing of diagnosis is the key factor determining patient prognosis. Early detection of melanoma, when the lesion is limited to the epidermis (in situ) or has low thickness (AJCC Stage I), is associated with a 5-year survival rate exceeding 99%. At this stage, treatment is usually restricted to simple surgical excision. In contrast, diagnosis at an advanced stage (Stage IV), when distant metastases have occurred, drastically worsens the prognosis. Historical survival rates hovered below 15-20%, although modern immunotherapies (e.g., checkpoint inhibitors) are improving these statistics, albeit at a significant cost (Gevorgyan, 2025).

The economic aspect is an inseparable part of the discussion on diagnostics. The cost of treating advanced melanoma is disproportionately higher than treating early lesions. Studies indicate that treating a Stage IV patient can be over twenty times more expensive than Stage I, translating to billions of dollars annually in the United States alone (Crealey et al., 2023). Therefore, early warning and precise diagnostic systems are not merely clinical tools but strategic elements of health policy.

A shortage of dermatologists, combined with the growing number of patients requiring screening, has created a gap that is increasingly being filled by artificial intelligence algorithms. The evolution from classical image processing methods based on handcrafted feature extraction (such as asymmetry or texture) to Deep Neural Networks (DNN), and specifically Convolutional Neural Networks (CNN), marked a turning point. Modern architecture, such as the You Only Look Once (YOLO) series in detection tasks or U-Net and DeepLab in segmentation tasks, achieve performance comparable to, and sometimes exceeding, that of dermatologists in experimental settings (Elshahawy et al., 2023). These algorithms do not merely classify lesions as benign or malignant but perform two fundamental computer vision tasks:

- **Object Detection** – Answers the question “Where is the lesion?”. This task involves localizing the lesion in an image (often macroscopic or dermoscopic) and marking it with a bounding box. This is crucial in triage systems where the algorithm must identify a suspicious area in Total Body Photography.
- **Semantic Segmentation** – Answers the question “What is the exact shape of the lesion?”. Here, the model assigns a label (e.g., “lesion” or “background”) to every pixel in the image. Precise boundary delineation is essential for assessing the dermoscopic structure of the lesion, such as border irregularity, which is one of the main criteria in the ABCD rule (Asymmetry, Border, Color, Diameter).

Despite the enthusiasm surrounding AI implementation, issues of trust and verifiability arise. How do we measure if an algorithm is “good”? The traditional “Accuracy” metric can be misleading in medicine. In a dataset where 95% of cases are benign moles and only 5% are melanomas, a model that ignores all malignancies and classifies everything as “healthy” will achieve

an impressive 95% accuracy while being clinically useless and dangerous (Moffat, 2024).

The aim of this paper is to decompose and analyze advanced evaluation metrics that allow for reliable model verification under conditions of strong class imbalance and high risk of error. Specific metrics for detection (mAP, IoU) and segmentation (Dice, Jaccard) will be analyzed, taking into account the specificity of dermatological data, such as the HAM10000 or ISIC Archive datasets.

The Problem of Data Imbalance in Dermatology

The foundation of any evaluation of classification and detection models in medicine is the confusion matrix. It is a contingency table that compares model predictions against the Ground Truth, typically defined by histopathological examination (biopsy) or expert consensus. The visual structure of this tool, distinguishing between predicted and actual classes, is presented in Figure 1.

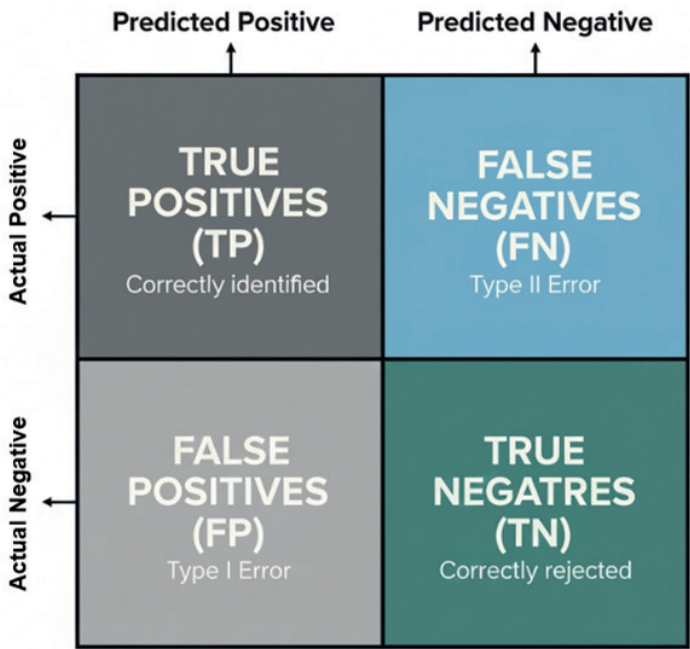


Figure 1. Example Confusion Matrix
Source: own study.

In a binary context (malignant vs. benign), we distinguish four states whose medical interpretation is crucial for understanding further metrics (Natha, RajaRajeswari, 2024; Rahi, 2025). In the context of skin lesion diagnostics, these states carry distinct clinical implications:

- True Positive (TP) – The model correctly identifies a malignant lesion (e.g., melanoma) as malignant. This represents a diagnostic success. The patient is referred to for further treatment (excision), which saves lives in cases of early detection. In segmentation tasks, this refers to lesion pixels correctly classified as tumor.
- True Negative (TN) – The model correctly identifies a benign lesion (e.g., a nevus) as benign or background as background. The patient avoids unnecessary stress and invasive procedures. In screening systems, a high TN rate is crucial for cost-effectiveness, preventing healthcare system overload from false alarms.
- False Positive (FP – Type I Error) – The model incorrectly classifies a benign lesion as malignant (false alarm). In detection, this implies marking healthy skin or artifacts (e.g., hair, rulers) with a bounding box. While less critical for survival than FN, this error generates tangible financial and psychological costs. An unnecessary biopsy incurs additional costs, risks of complications, and scarring. On a population scale, a high FP rate leads to resource waste and “alarm fatigue” among physicians.
- False Negative (FN – Type II Error) – The model fails to detect an existing malignant lesion or classifies it as benign. This is a critical error. Missing a melanoma allows for its continued growth and potential metastasis. The cost of such an error is measured not only in currency (treating advanced cancer is vastly more expensive) but primarily in Years of Potential Life Lost (YPLL). Therefore, medical algorithms are optimized primarily to minimize FN (Alexandrescu, 2009).

A concise summary of these states, along with their direct consequences for the patient and the healthcare system, is provided in Table 1.

Table 1. Interpretation of the confusion matrix in the context of skin cancer

State	Medical Interpretation	Consequences for Patient and System
TP (True Positive)	Correct detection of a malignancy.	Early treatment, high cure rate (survival >99% in Stage I).
TN (True Negative)	Correctly ignoring a benign lesion.	No intervention, patient peace of mind, resource saving.
FP (False Positive)	False alarm (healthy skin considered cancer).	Unnecessary biopsy (cost, scarring), patient stress, burden on dermatologists.
FN (False Negative)	Missing a malignancy.	Delayed diagnosis, progression to Stage IV (metastasis), high mortality, drastic increase in treatment costs.

Source: own study.

Visualizing the Class Imbalance Problem

In analyzing dermatological data, it is crucial to understand that these four values are not equivalent. In a typical screening dataset, the ratio of benign to malignant lesions can be 10:1 or even 100:1. This leads to the Accuracy Paradox.

The traditional Accuracy metric is defined by the formula:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

Consider a scenario with 100 patients, where only one has melanoma. A model that diagnoses everyone as “healthy” (TP=0, TN=99, FP=0, FN=1) achieves 99% accuracy. However, its sensitivity (the ability to detect the disease) is 0%. Consequently, in scientific reports and clinical validations of AI systems, Accuracy is treated as a supplementary metric rather than a decisive one (Çetinel, 2024) (Pope et al., 2024).

Metrics in Object Detection Tasks

In detection tasks, implemented by architectures such as YOLOv5, YOLOv8, or EfficientDet, the goal is not only classification but primarily localization. The model output consists of a Bounding Box, a class label,

and a prediction confidence score. Evaluating the quality of such predictions requires metrics that account for geometry.

Intersection over Union (IoU)

Intersection over Union is a fundamental metric quantifying the degree of overlap between the predicted bounding box and the reference box (Ground Truth).

$$IoU = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}$$

Where **A** is the bounding box predicted by the algorithm, and **B** is the bounding box annotated by the dermatologist. A value of 1.0 indicates perfect overlap, while a value of 0.0 indicates the absence of any shared area. In object detection, IoU serves as a threshold criterion. If the IoU value exceeds a predefined threshold (typically >0.5), the detection is considered a True Positive (TP). Otherwise, it is treated as a false alarm (False Positive - FP), even if the class label is correct (Ultralytics, 2025b) (Shah, 2023).

Precision and Recall

After determining which detections constitute True Positives (TP) and False Positives (FP) based on the IoU threshold, two key metrics are calculated.

Precision:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

This metric indicates the reliability of the model's predictions. High precision means that when the model marks a skin lesion, there is a high probability that it is indeed a lesion, rather than a shadow or a benign nevus.

Recall:

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN}$$

This measures the proportion of all existing lesions successfully identified by the model. In dermatology, this is the most critical safety indicator. A model with low Recall “misses” lesions, which is unacceptable in a clinical setting.

Precision-Recall Curve and mean Average Precision (mAP)

Since there is a natural trade-off between Precision and Recall (increasing recall by lowering the detection threshold usually increases the number of false alarms, thereby lowering precision), single values do not provide a complete picture. The solution is mAP.

Average Precision (AP) is the area under the Precision-Recall curve (Area Under Curve - AUC PR) for a given class. It is calculated as an integral (or, in practice, a discrete weighted sum):

$$AP = \int_0^1 p(r) dr$$

mAP is the arithmetic mean of AP values for all classes (e.g., melanoma, basal cell carcinoma, nevus). Two main standards for reporting mAP are distinguished in scientific literature, as evident in studies on YOLO models (Ultralytics, n.d.) (Ultralytics, 2025a):

- **mAP@50** – A “liberal” metric indicating the correctness of the lesion localization itself (IoU > 0.5). In screening studies, this is often sufficient, as the primary goal is simply to identify the lesion for further analysis.
- **mAP@50-95** – A “strict” metric (COCO standard), calculated as the average over IoU thresholds from 0.5 to 0.95. It rewards not only the detection of the lesion but also its highly precise localization (bounding box accuracy).

F1-Score in Detection

As a harmonic mean, the F1-Score is useful for rapid model comparison, providing a single value that evaluates the balance between Precision and Recall:

$$F1\ Score = 2 * \frac{Precision * Recall}{Precision + Recall}$$

In the context of detecting small objects (such as early-stage skin lesions), the F1-Score is often more informative than Accuracy because it heavily penalizes low values in either component (e.g., very low recall despite high precision (Khandaker et al., 2025)).

Metrics in Semantic Segmentation Tasks

Segmentation is a task involving a higher level of granularity. Here, the objective is not a bounding box but a binary mask that distinguishes every pixel of the lesion from healthy skin. Models such as U-Net, DeepLabV3+, or newer transformer-based architectures (e.g., Swin-Unet) are evaluated using set-based metrics.

Dice Similarity Coefficient (DSC)

DSC is the most widely used metric in medical image segmentation. It measures the degree of overlap between two sets of pixels: the predicted set **A** and the ground truth **B**.

$$DSC(A, B) = \frac{2 * |A \cap B|}{|A| + |B|} = \frac{2 * TP}{2 * TP + FP + FN}$$

DSC is normalized (0-1) and intuitive. A value of 1 indicates identical masks. The formula emphasizes the intersection (TP), which is desirable in medical applications. It is the standard in ISIC segmentation challenges. In studies comparing various architectures on hybrid datasets, DSC served as the primary quality indicator. Models such as U-Net++ achieved scores

exceeding 0.90, demonstrating high concordance with expert annotations (Çetinel et al., 2024).

Jaccard Index

The Jaccard Index (equivalent to IoU in segmentation contexts) is a stricter metric than the DSC:

$$J(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} = \frac{TP}{TP + FP + FN}$$

The relationship between these metrics is defined by the equation:

$$DSC = \frac{2J}{1 + J}$$

The relationship $J < DSC$ consistently holds (except when both equal 1). This implies that the Jaccard index penalizes errors (FP and FN) more heavily. In research practice, both values are typically reported; however, the Jaccard index is often preferred to avoid over-optimistic results, particularly when segmenting small lesions where every erroneous pixel carries greater weight relative to the total lesion area (Moffat, 2024; Le et al., 2023).

Limitations of Pixel Accuracy in Segmentation

Similar to classification tasks, accuracy in segmentation can be calculated at the pixel level (Pixel Accuracy):

$$PixelAccuracy = \frac{TP_{pix} + TN_{pix}}{Total_{pix}}$$

However, this metric is highly misleading in dermatological imaging. A skin lesion often occupies only a small portion of the image (e.g., 5%). A model predicting “background only” (an all-black mask) would achieve a Pixel Accuracy of 95%, while having zero diagnostic value ($Dice = 0$). For this reason, professional scientific literature is moving away from this metric

in favor of the Dice and Jaccard coefficients (Ultralytics, 2025b; Müller et al., 2022).

Hausdorff Distance (HD) – Clinical Boundary Fidelity

Overlap-based metrics (such as Dice and IoU) suffer from a significant clinical drawback: they are insensitive to local shape deviations as long as the overall area matches. However, in oncological surgery, where a single millimeter determines the resection margin, the maximum error distance is paramount.

The Hausdorff Distance (HD) metric addresses this issue and is defined as:

$$d_H(A, B) = \max \{ \sup \inf d(a, b), \sup \inf d(b, a) \}$$

In practice, the 95th percentile of this distance (HD95) is used to eliminate the impact of isolated outlier pixels (noise). If a model achieves a high Dice score (e.g., 0.95) but a high Hausdorff error, it indicates that while the lesion was generally located correctly, there is a significant deviation in a specific area (e.g., the model missed a tumor infiltration). Consequently, in automatic surgical margin planning systems, HD95 takes precedence over the Dice coefficient (Mustafa, Alquran, 2025).

ROC Curve and Area Under the Curve (AUC)

In the evaluation of diagnostic systems, single metrics such as sensitivity or precision are dependent on the selected probability threshold. To assess the model's global discriminatory power, independent of the chosen threshold, the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve is employed. This curve plots the relationship between Sensitivity (True Positive Rate) and Specificity (expressed as $1 - \text{Specificity}$ or False Positive Rate). An ideal classifier is located at the top-left corner of the plot (100% sensitivity, 0% false positives).

Area Under the Curve (AUC)

This metric ranges from 0.5 (random guessing) to 1.0 (perfect classification). In the context of dermatology:

- $AUC > 0.9$: The model is considered excellent, often outperforming visual assessment by primary care physicians.
- $0.8 < AUC < 0.9$: A good model, clinically useful as a decision support tool.
- $AUC < 0.7$: A model with low diagnostic value.

AUC analysis is a particularly valuable metric for imbalanced datasets, as it remains insensitive to class proportions in the test set, in contrast to Precision or the F1-Score.

Comparison of Metrics

The analysis of performance metrics presented in the previous sections highlights the complexity of evaluating AI systems in dermatology. No single metric is universally applicable; each possesses specific strengths predisposing it to specific clinical applications (e.g., Recall in screening contexts), but also significant limitations (e.g., Dice’s sensitivity to lesion size). To synthesize this knowledge and facilitate the selection of the appropriate criterion depending on the research goal, Table 2 provides a concise comparison of the discussed indicators. This overview includes not only mathematical formulations but primarily the medical interpretation of advantages and disadvantages, which is crucial for accurately assessing the model’s clinical utility.

Table 2. Metrics Comparison

Metric	Advantages in Dermatology	Disadvantages / Limitations
Accuracy	Intuitive; provides a general overview of model effectiveness.	Misleading with imbalanced data. A high score may mask missed cancer detections (False Negatives).
Recall (Sensitivity)	Crucial for safety. Measures the ability to detect every cancer case.	Does not account for false alarms (False Positives). On its own, it may encourage the “over-flagging” of lesions.

Metric	Advantages in Dermatology	Disadvantages / Limitations
Precision	Measures the reliability of alerts. Important for reducing the number of unnecessary biopsies.	Ignore missed cases (False Negatives), which poses a significant risk in oncology.
F1-Score	Balances Precision and Recall. A robust measure for uneven class distributions.	Treats FP and FN errors equivalently, which is not always desirable in medicine (where the cost of FN > FP).
Dice (DSC)	The gold standard in medical competitions (e.g., ISIC challenges). It is intuitive (0-1 range) and emphasizes the correctness of the overlap (True Positives), a priority in pigmented lesion segmentation.	Less strict than Jaccard. Exhibits high sensitivity to very small skin lesions (size bias) – an error of just a few pixels on a small mole drastically lowers the score, which does not always reflect actual clinical utility. Fails to detect the „smoothing” of irregular borders.
IoU (Jaccard)	More rigorous than Dice, penalizing False Positive and False Negative errors more heavily. Better reflects the „worst-case” overlap, increasing the safety margin when evaluating algorithms for surgical boundary definition.	Numerical values are always lower than or equal to DSC (), which non-technical stakeholders may misinterpret as „poorer” performance. Like Dice, it is an area-based metric and does not precisely evaluate shape fidelity (border irregularities), requiring supplementation with distance-based metrics (e.g., Hausdorff).
mAP	Comprehensive evaluation of detection across various confidence thresholds.	Complex clinical interpretation. Requires analysis at various IoU thresholds (e.g., @50 vs @50-95).

Source: own study.

Discussion

The evaluation of AI algorithms does not occur in a vacuum. Numerical results (*mAP*, *DICE*) are intrinsically linked to the quality and characteristics of the test data. In dermatology, specific challenges must be considered when interpreting these results. Datasets such as HAM10000 or the ISIC Archive reflect clinical reality, where benign lesions (nevi, seborrheic keratosis) occur significantly more frequently than melanomas or skin cancers. In the HAM10000 dataset, nevi constitute the vast majority (over 6700 cases),

while vascular lesions or dermatofibromas number only a few hundred each (Adebiyi et al., 2024; ISIC, n.d.). Training on such data without appropriate techniques (e.g., augmentation, weighted loss functions like Focal Loss) leads to a bias toward the dominant class. The algorithm learns that it is statistically advantageous to predict a “benign lesion.” This results in high Accuracy but low Recall for the minority class (melanoma). Therefore, performance analysis must be conducted on a class-wise basis rather than globally (Pope et al., 2024; Alam et al., 2022).

In supervised learning, it is typically assumed that labels (Ground Truth) are indisputable. In dermatology, this assumption is flawed. Studies indicate that inter-rater agreement among dermatologists in assessing dermoscopic features can be moderate (Cohen’s Kappa coefficient in the range of 0.5-0.6). There exists a group of lesions (e.g., dysplastic nevi) that are difficult to unequivocally classify even for experts (Polesie et al., 2021; Mevorach et al., 2025). Furthermore, datasets often mix histopathologically confirmed diagnoses (certain) with diagnoses based on visual assessment or follow-up (less certain). Research on the ISIC dataset demonstrates that the quality of Ground Truth (whether derived from a single physician, consensus, or biopsy) has a fundamental impact on algorithm evaluation. An algorithm evaluated against an “imperfect” annotator may be unfairly penalized for a correct diagnosis that conflicts with the provided label (Silva-Clavería et al., 2025; Haggemüller et al., 2025).

AI models tend to engage in “shortcut learning.” If melanoma images in the training set frequently contain rulers (used for measurement prior to excision) while images of benign nevi do not, the network may learn to detect the ruler rather than the tumor. High metrics (*mAP*, *Accuracy*) in such cases are illusory and will drop drastically on “clean” data. Consequently, reliable evaluation requires the use of external datasets devoid of artifacts, or the application of inpainting techniques to remove these elements prior to analysis (Ünver, Ayan, 2019; Lama et al., 2023).

Conclusion

The analysis of quality metrics in digital dermatology leads to the conclusion that no single, universal evaluation metric exists. The validation process of AI systems must be multidimensional. In screening tasks (detection), patient safety is the priority, necessitating the maximization of Sensitivity (Recall) to eliminate false negative errors. In surgical planning tasks (segmentation), shape fidelity metrics (Dice, Jaccard, Hausdorff Distance) are crucial. High results reported in the literature (e.g., mAP > 98%) must be interpreted with caution, taking into account the dataset structure and the quality of the Ground Truth.

It is recommended that future research mandatorily report the full confusion matrix and results broken down by individual diagnostic classes to ensure the transparency and safety of deployed solutions.

References

1. Adebisi, A., Abdalnabi, N., Smith, E. H., Hirner, J., Simoes, E. J., Becevic, M., Rao, P. (2024). Accurate skin lesion classification using multimodal learning on the HAM10000 and ISIC 2017 datasets. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2024.05.30.24308213>
2. Alam, T. M., Shaukat, K., Khan, W. A., Hameed, I. A., Almuqren, L. A., Raza, M. A., Aslam, M., Luo, S. (2022). An efficient Deep Learning-Based skin cancer classifier for an imbalanced dataset. *Diagnostics*, 12(9), 2115. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12092115>
3. Alexandrescu, D. T. (2009). Melanoma costs: A dynamic model comparing estimated overall costs of various clinical stages. *Dermatology Online Journal*, 15(11), 1. <https://doi.org/10.5070/d353f8q915>
4. Çetinel, G., Aydın, B. M., Gül, S., Akgün, D., Kara, R. Ö. (2024). An evaluation of skin lesion segmentation using deep learning architectures. *Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences*, 7(3), 449-459. <https://doi.org/10.35377/saucis.1543993>
5. Crealey, G. E., Hackett, C., Harkin, K., Heckmann, P., Kelleher, F., Lyng, Á., McCarthy, T., McEnery, M., Meaney, C., Roche, D., Tobin, A. (2023). Melanoma-related costs by disease stage and phase of management in Ireland. *Journal of Public Health*, 45(3), 714-722. <https://doi.org/10.1093/pubmed/fdac154>

6. Elshahawy, M., Elnemr, A., Oproescu, M., Schiopu, A., Elgarayhi, A., El-mogy, M. M., Sallah, M. (2023). Early melanoma detection based on a hybrid YOLOV5 and ResNet technique. *Diagnostics*, 13(17), 2804. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13172804>
7. Haggemüller, S., Wies, C., Abels, J., Winterstein, J. T., Heinlein, L., Nogueira Garcia, C., Utikal, J. S., Wohlfeil, S. A., Meier, F., Hobelsberger, S., Gellrich, F. F., Sergon, M., Hauschild, A., French, L. E., Heinzerling, L., Schlager, J. G., Ghoreschi, K., Schlaak, M., Hilke, F. J., Poch, G. (2025). Discordance, accuracy and reproducibility study of pathologists' diagnosis of melanoma and melanocytic tumors. *Nature Communications*, 16(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56160-x>
8. Khandaker, A. I., Al Shafi, A., Ahmad, M. (2025). Handling Class Imbalance Problem in Skin Lesion Classification: Finding Strengths and Weaknesses of Various Balancing Techniques. *2025 International Conference on Quantum Photonics, Artificial Intelligence, and Networking (QPAIN)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/qpain66474.2025.11171649>
9. Lama, N., Hagerty, J., Nambisan, A., Stanley, R. J., Van Stoecker, W. (2023). Skin lesion segmentation in dermoscopic images with noisy data. *Journal of Digital Imaging*, 36(4), 1712-1722. <https://doi.org/10.1007/s10278-023-00819-8>
10. Le, P. T., Pham, B., Chang, C., Hsu, Y., Tai, T., Li, Y., Wang, J. (2023). Anti-aliasing attention U-Net model for skin lesion segmentation. *Diagnostics*, 13(8), 1460. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13081460>
11. Mevorach, L., Farcomeni, A., Pellacani, G., Cantisani, C. (2025). A comparison of skin lesions' diagnoses between AI-Based image classification, an expert dermatologist, and a non-expert. *Diagnostics*, 15(9), 1115. <https://doi.org/10.3390/diagnostics15091115>
12. Müller, D., Soto-Rey, I., Kramer, F. (2022). Towards a guideline for evaluation metrics in medical image segmentation. *BMC Research Notes*, 15(1), 210. <https://doi.org/10.1186/s13104-022-06096-y>
13. Mustafa, W. A., Alquran, H. (2025). Editorial for the special issue "Advances in Medical Image Processing, Segmentation, and Classification". *Diagnostics*, 15(9), 1114. <https://doi.org/10.3390/diagnostics15091114>
14. Natha, P., RajaRajeswari, P. (2024). Advancing skin cancer prediction using ensemble models. *Computers*, 13(7), 157. <https://doi.org/10.3390/computers13070157>

15. Polesie, S., Sundback, L., Gillstedt, M., Ceder, H., Gyllencreutz, J. D., Fougelberg, J., Backman, E. J., Pakka, J., Zaar, O., Paoli, J. (2021). Interobserver agreement on dermoscopic features and their associations with in situ and invasive cutaneous melanomas. *Acta Dermato-Venereologica*, 101(10), adv00570. <https://doi.org/10.2340/actadv.v101.281>
16. Pope, J., Hassanuzzaman, M., Chapman, W., Day, H., Sherpa, M., Emara, O., Adhikari, N., Joshi, A. (2024). *Skin Cancer Machine Learning Model Tone Bias*. ArXiv.org. <https://arxiv.org/abs/2410.06385>
17. Silva-Clavería, F., Serrano, C., Matas, I., Serrano, A., Toledo-Pastrana, T., Acha, B. (2025). Concordance in Basal Cell Carcinoma Diagnosis. Building a Proper Standard Reference to Train Artificial Intelligence Tools. *Skin Research and Technology*, 31(10). <https://doi.org/10.1111/srt.70277>
18. Rahi, A. (2025). A hybrid deep learning ensemble for accurate skin cancer classification. *medRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2025.09.03.25335044>
19. Ünver, H. M., Ayan, E. (2019). Skin lesion segmentation in dermoscopic images with combination of YOLO and GrabCut algorithm. *Diagnostics*, 9(3), 72. <https://doi.org/10.3390/diagnostics9030072>

Netography

1. Gevorgyan, A. (2025). *Melanoma cure rate: What patients need to know in 2025*. OncoDaily. Retrieved from: <https://oncodaily.com/oncolibrary/melanoma-cure-rate> (access date: 10.09.2025).
1. ISIC. (n.d.). *International Skin Imaging Collaboration*. Retrieved from: <https://www.isic-archive.com/> (access date: 10.09.2025).
2. Moffat, M. (2024). *Performance metrics in medical image segmentation*. Retrieved from: <https://medium.com/@matthewmoffat/different-performance-metrics-in-medical-imaging-segmentation-877f3d20f350> (access date: 10.09.2025).
3. Shah, D. (2023). *Intersection over Union (IoU): Definition, calculation, code*. Retrieved from: <https://www.v7labs.com/blog/intersection-over-union-guide> (access date: 10.09.2025).
4. Ultralytics. (2025a). *YOLOv8 vs YOLOv5: Evolution of real-time object detection*. Retrieved from: <https://docs.ultralytics.com/compare/yolov8-vs-yolov5> (access date: 10.09.2025).

5. Ultralytics. (2025b). *Performance metrics deep dive*. Retrieved from: <https://docs.ultralytics.com/guides/yolo-performance-metrics/#how-can-validation-metrics-from-yolov11-help-improve-model-performance> (access date: 10.09.2025).
6. Ultralytics. (n.d.). *Mean Average Precision (mAP)*. Retrieved from: <https://www.ultralytics.com/glossary/mean-average-precision-map> (access date: 10.09.2025).



ISBN 978-83-68103-28-1