

Bezpieczeństwo operacyjne w zautomatyzowanym magazynie wysokiego składowania: wielokrotne studium przypadku z wykorzystaniem fizycznego modelu LEGO oraz klasyfikacji ABC/XYZ

Operational Safety in an Automated High Bay Warehouse: A Multiple Case Study Using a Physical LEGO Model and ABC/XYZ Classification

Autor 1: Marcin Rogoza

Afiliacja: Uniwersytet WSB Merito w Wrocławiu

ORCID:

Autor 2 Małgorzata Kalendek

ORCID:

Streszczenie

Za cel główny badania przyjęto ocenę przydatności fizycznego, zautomatyzowanego modelu magazynu wysokiego składowania jako bezpiecznego środowiska do rozpoznawania, analizowania i korygowania sytuacji zagrożenia wynikających z błędów procesowych, informacyjnych i automatyki, przy jednoczesnym pomiarze skutków tych zakłóceń dla sprawności procesu magazynowego. Badanie zaplanowano jako osadzone wielokrotne studium przypadku obejmujące osiem standaryzowanych scenariuszy zakłóceń realizowanych przez studentów podczas laboratoriów. W scenariuszach zostaną wykorzystane między innymi czujniki koloru, automatyczna układnica samojezdna, błędy lokalizacyjne oraz celowo zmodyfikowane warunki klasyfikacji ABC/XYZ. Dane będą pozyskiwane z logów systemowych, standaryzowanych arkuszy obserwacji, pomiarów czasu reakcji, wskaźników procesu logistycznego oraz krótkiego testu wiedzy przed i po cyklu laboratoriów. Główne wyniki: [do uzupełnienia po zebraniu danych, z podaniem najważniejszych różnic pomiędzy przypadkami, miar efektu lub częstości poprawnych reakcji]. Wnioski: [do uzupełnienia po analizie empirycznej]. Zakłada się, że zastosowany projekt badawczy pozwoli ocenić, czy bezpieczne, kontrolowane odtwarzanie błędów typowych dla zautomatyzowanych magazynów może służyć jednocześnie analizie zachowań związanych z bezpieczeństwem oraz skutków logistycznych tych samych zdarzeń.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo magazynowe; automatyzacja magazynu; symulacja fizyczna; wielokrotne studium przypadku; ABC/XYZ; uczenie przez doświadczenie.

Abstract

The main objective of the study was defined as an assessment of the usefulness of a physical automated high bay warehouse model as a safe environment for identifying, analysing, and correcting hazardous situations caused by process, information, and automation errors, while simultaneously measuring the consequences of these disruptions for warehouse process performance. The study was designed as an embedded multiple case study comprising eight standardised disruption scenarios performed by students during laboratory classes. The scenarios will use colour sensors, an automated mobile stacker crane, location errors, and deliberately modified ABC/XYZ classification conditions. Data will be collected from system logs, standardised observation sheets, response time measurements, logistics process indicators, and a short knowledge test administered before and after the laboratory cycle. Main results: [to be completed after empirical data collection, including the most important differences between cases and relevant effect measures or frequencies of correct responses]. Conclusions: [to be completed after empirical analysis]. The research design is intended to determine whether the safe and controlled reproduction of errors typical of automated warehouses can support the simultaneous analysis of safety related behaviour and the logistics consequences of the same events.

Keywords: warehouse safety; warehouse automation; physical simulation; multiple case study; ABC/XYZ; experiential learning.

Bezpieczeństwo operacyjne w zautomatyzowanym magazynie wysokiego składowania: wielokrotne studium przypadku z wykorzystaniem fizycznego modelu LEGO oraz klasyfikacji ABC/XYZ

Operational Safety in an Automated High Bay Warehouse: A Multiple Case Study Using a Physical LEGO Model and ABC/XYZ Classification

Wprowadzenie

Automatyzacja procesów magazynowych prowadzi do wzrostu znaczenia systemów, w których decyzje dotyczące składowania, pobierania i przemieszczania jednostek ładunkowych są wykonywane przez urządzenia sterowane cyfrowo. W automatycznych systemach składowania i pobierania analizowane są przede wszystkim konfiguracja systemu, czas przejazdu, przypisywanie miejsc składowania, lokalizacja punktu oczekiwania oraz sekwencjonowanie zleceń (Roodbergen & Vis, 2009, p. 343). Wraz ze wzrostem automatyzacji zmienia się jednak charakter zagrożeń. Część nieprawidłowości nie jest bezpośrednio widoczna, ponieważ powstaje na styku danych, czujników, oprogramowania, urządzeń wykonawczych i decyzji człowieka.

Bezpieczeństwo magazynowe nie powinno być rozpatrywane wyłącznie jako konsekwencja technicznej sprawności urządzeń. W badaniach magazynów wskazano znaczenie systemów ograniczających zagrożenia, świadomości bezpieczeństwa oraz zachowań przywódczych. W badaniu obejmującym 78 magazynów oraz 1033 pracowników wykazano, że systemy redukujące zagrożenia oraz przywództwo ukierunkowane na bezpieczeństwo pozostawały związane z wynikami w obszarze bezpieczeństwa (de Koster et al., 2011, p. 753). Również Hofstra et al. (2018, p. 134) wskazali, że ocena bezpieczeństwa magazynu wymaga uwzględnienia zarówno technologii, jak i zachowań oraz sposobu organizacji pracy.

W rzeczywistym magazynie możliwość celowego odtwarzania niebezpiecznych sytuacji jest ograniczona ze względów etycznych, organizacyjnych i prawnych. Nie powinno się celowo powodować awarii, błędów lokalizacyjnych lub konfliktów ruchowych wyłącznie w celu szkoleniowym, jeżeli mogłyby one prowadzić do zagrożenia zdrowia ludzi, uszkodzenia urządzeń albo strat materialnych. Z tego względu wartość badawcza środowiska laboratoryjnego może polegać na stworzeniu warunków, w których podobny mechanizm zakłócenia zostanie odwzorowany w skali fizycznego modelu bez generowania ryzyka właściwego dla pełnowymiarowego magazynu.

Fizyczne symulacje z wykorzystaniem elementów LEGO były wcześniej stosowane w edukacji logistycznej. Drake i Mawhinney (2006, p. 28) opisali symulację łańcucha dostaw wykorzystującą klocki LEGO do zobrazowania przepływu materiałów, produktów i informacji. W nowszych badaniach Deif (2023, p. 161) wykorzystał LEGO Serious Play w kształceniu z zakresu Supply Chain 4.0, natomiast Franke et al. (2024, p. 964) przedstawili grę magazynową służącą uczeniu technik kompletacji. Dotychczasowe zastosowania koncentrują się przede wszystkim na zrozumieniu procesów, zaangażowaniu studentów i kształceniu umiejętności operacyjnych.

W niniejszym projekcie przyjęto inne ujęcie. Fizyczny model LEGO nie jest traktowany wyłącznie jako pomoc dydaktyczna, lecz jako kontrolowane środowisko badawcze pozwalające na wprowadzanie powtarzalnych zakłóceń. Każde zakłócenie ma prowadzić do jednoczesnej obserwacji dwóch kategorii następstw: reakcji uczestników z punktu widzenia bezpieczeństwa oraz zmiany parametrów procesu logistycznego. Tym samym analizie poddawany będzie nie tylko błąd, lecz także sposób jego rozpoznania, diagnozy, zatrzymania procesu, przywrócenia pracy i wpływu na efektywność operacji.

Za cel główny badania przyjęto ocenę przydatności fizycznego, zautomatyzowanego modelu magazynu wysokiego składowania jako bezpiecznego środowiska do rozpoznawania, analizowania i korygowania przez studentów sytuacji zagrożenia wynikających z błędów procesowych, informacyjnych i automatyki, przy jednoczesnym pomiarze skutków tych zakłóceń dla sprawności procesów magazynowych.

Za cel uzupełniający przyjęto ocenę możliwości wykorzystania klasyfikacji ABC/XYZ do konstruowania scenariuszy ujawniających zależności pomiędzy rozmieszczeniem zapasów, zmiennością zapotrzebowania, intensywnością pracy urządzeń automatycznych oraz występowaniem sytuacji wymagających interwencji operatora.

Wkład projektowanego badania ma polegać na opracowaniu zestawu ośmiu replikowalnych przypadków laboratoryjnych, w których ten sam model zautomatyzowanego magazynu będzie wykorzystywany do badania bezpieczeństwa operacyjnego, efektywności logistycznej i uczenia się na błędach. Nie będzie zakładane, że model LEGO pozwala bezpośrednio oszacować prawdopodobieństwo wypadku w rzeczywistym magazynie. Mierzone będą zachowania bezpieczne, zgodność z procedurą, czas i poprawność rozpoznania zagrożenia oraz modelowe wskaźniki obciążenia i zakłócenia procesu.

1. Bezpieczeństwo operacji magazynowych

Bezpieczeństwo operacji magazynowych jest wynikiem współdziałania rozwiązań technicznych, organizacyjnych i zachowań człowieka. W badaniu de Kostera et al. (2011, p. 753) systemy redukujące zagrożenia zostały powiązane z wynikami w zakresie bezpieczeństwa, jednak silne znaczenie przypisano również przywództwu ukierunkowanemu na bezpieczeństwo. Oznacza to, że nawet wysoki poziom technicznego zabezpieczenia procesu nie eliminuje potrzeby właściwego rozpoznawania sytuacji, podejmowania decyzji i przestrzegania procedur przez człowieka.

Hofstra et al. (2018, p. 134) zwrócili uwagę na ograniczoną liczbę badań poświęconych bezpieczeństwu magazynów oraz wskazali na potrzebę oceny i wspierania bezpieczeństwa w realiach operatorów logistycznych. W kontekście projektowanego badania szczególne znaczenie ma możliwość oddzielenia samego wystąpienia zakłócenia od sposobu, w jaki zostanie ono zinterpretowane przez uczestników. Ta sama awaria może bowiem prowadzić do reakcji prawidłowej, zbyt późnej albo potencjalnie niebezpiecznej.

Z tego względu bezpieczeństwo zostanie operacjonalizowane nie poprzez liczbę rzeczywistych wypadków, lecz przez wskaźniki behawioralne i proceduralne. Ocenie zostaną poddane między innymi czas rozpoznania zagrożenia, poprawność zatrzymania systemu, zachowanie wymaganej kolejności czynności, liczba prób nieuprawnionej ingerencji oraz poprawność przywrócenia procesu do stanu bezpiecznego.

1.1. Automatyczny magazyn wysokiego składowania jako system badawczy

Automated Storage and Retrieval Systems są wykorzystywane do automatycznego składowania oraz pobierania produktów w środowiskach dystrybucyjnych i produkcyjnych. W przeglądzie Roodbergena i Vis (2009, p. 343) wskazano, że projektowanie i sterowanie takimi systemami obejmuje między innymi konfigurację, estymację czasu przejazdu, przydzielanie lokalizacji, wybór punktów oczekiwania i sekwencjonowanie zleceń. Każdy z tych elementów może zostać odwzorowany w pomniejszonym modelu i wykorzystany do wprowadzania kontrolowanych odstępstw od pracy referencyjnej.

W projektowanym laboratorium szczególną rolę będą pełnił czujniki koloru oraz układnica samojezdna. Kolor będzie pełnił funkcję kodu identyfikującego jednostkę ładunkową albo klasę produktu. Błędny odczyt, brak odczytu lub zamiana kodu pozwolą na symulację problemów

odpowiadających błędowi identyfikacji, niespójności danych lub nieprawidłowej lokalizacji. Układnica pozwoli natomiast rejestrować liczbę ruchów, czas cyklu, przestoje, ponowienia oraz sekwencję przywracania procesu.

Wartość modelu nie będzie wynikała z jego pełnego podobieństwa geometrycznego do rzeczywistego magazynu. Za kluczowe zostanie uznane podobieństwo mechanizmu decyzyjnego: wykrycie niezgodności, ocena stanu urządzenia, wybór reakcji, zatrzymanie albo kontynuacja procesu, korekta danych i ponowne uruchomienie systemu.

1.2. Klasyfikacja ABC/XYZ i jej znaczenie dla warunków eksperymentalnych

Klasyfikacja ABC umożliwia różnicowanie zapasów ze względu na ich znaczenie ekonomiczne albo intensywność przepływu, natomiast klasyfikacja XYZ pozwala różnicować pozycje ze względu na przewidywalność i zmienność zapotrzebowania. Łączne wykorzystanie obu podejść prowadzi do macierzy obejmującej klasy AX, AY, AZ, BX, BY, BZ, CX, CY i CZ. Praktyczne zastosowanie połączonej analizy ABC/XYZ zostało przedstawione przez Stevicia i Bećirović (2021, p. 325).

W projektowanym badaniu macierz ABC/XYZ nie będzie traktowana wyłącznie jako narzędzie zarządzania zapasami. Zostanie wykorzystana jako mechanizm sterowania obciążeniem systemu. Pozycje klasy A będą generowały większą częstotliwość pobrań niż pozycje klasy C, natomiast pozycje Z będą charakteryzowały się większą nieregularnością niż pozycje X. Celowe błędy klasyfikacji albo lokalizacji pozwolą sprawdzić, czy niewłaściwa organizacja zapasu powoduje wzrost liczby przejazdów, czasu cyklu, przestojów oraz sytuacji wymagających interwencji człowieka.

Szczególnie istotne będzie porównanie warunków, w których błąd prowadzi tylko do pogorszenia wydajności, z warunkami, w których zwiększona liczba ruchów albo nieoczekiwane zlecenie wywołują konieczność zatrzymania systemu. Pozwoli to analizować relację pomiędzy efektywnością logistyczną a bezpieczeństwem reakcji.

1.3. Symulacja fizyczna, LEGO i uczenie przez doświadczenie

Zastosowanie fizycznych modeli w dydaktyce logistycznej ma ugruntowane podstawy. Drake i Mawhinney (2006, p. 28) wykorzystali klocki LEGO do symulacji przepływu materiałów, produktów i informacji w łańcuchu dostaw. Deif (2023, p. 161) wskazał możliwość wykorzystania

LEGO Serious Play w kształceniu związanym z Supply Chain 4.0. Franke et al. (2024, p. 964) pokazali natomiast, że środowisko gry magazynowej może służyć uczeniu technik kompletacji oraz analizie błędów i czasu wykonania zadań.

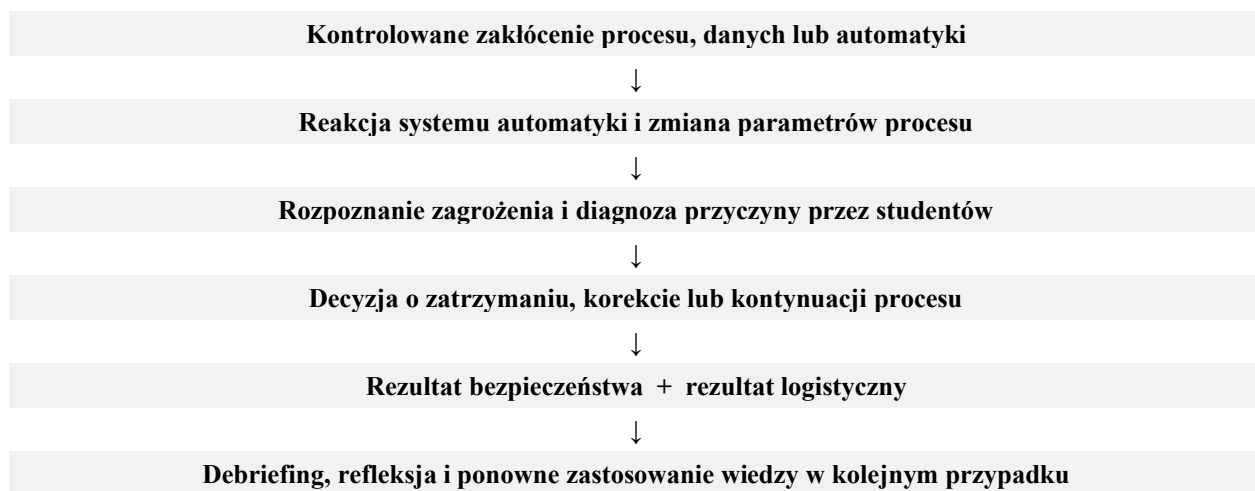
Projektowane laboratorium rozszerza ten nurt poprzez zastosowanie modelu fizycznego do uczenia poprzez bezpieczne doświadczenie błędu. Zgodnie z koncepcją uczenia się przez doświadczenie wiedza może być rozwijana poprzez cykl obejmujący konkretne doświadczenie, refleksję, konceptualizację oraz ponowne eksperymentowanie. Proces uczenia się przez doświadczenie został systematycznie opisany przez Kolba, a rozdział poświęcony temu procesowi rozpoczyna się na stronie 20 jego monografii (Kolb, 1984, p. 20).

W warunkach projektowanego badania konkretnym doświadczeniem będzie reakcja na zakłócenie, refleksja zostanie przeprowadzona podczas debriefingu, konceptualizacja będzie polegała na powiązaniu obserwowanego zdarzenia z mechanizmem rzeczywistego procesu magazynowego, natomiast ponowne eksperymentowanie będzie możliwe w kolejnym scenariuszu. W ten sposób błąd nie będzie traktowany jako niepowodzenie studenta, lecz jako zaprojektowany bodziec badawczy i dydaktyczny.

1.4. Luka badawcza i model konceptualny

W dostępnej literaturze można wyróżnić trzy rozwijane odrębnie nurty: badania bezpieczeństwa magazynowego, badania nad projektowaniem i sterowaniem zautomatyzowanymi magazynami oraz badania wykorzystujące symulacje lub LEGO w edukacji logistycznej. Nie zidentyfikowano jednak w przeanalizowanej bazie źródeł badania, w którym w jednym fizycznym środowisku laboratoryjnym kontrolowane zakłócenia automatyki i procesu magazynowego byłyby wykorzystywane do jednoczesnego pomiaru reakcji związanej z bezpieczeństwem, skutku logistycznego oraz efektu uczenia się. Z tego względu nie będzie formułowane twierdzenie o absolutnym pierwszeństwie światowym, lecz wskazana zostanie wyraźna luka integracyjna.

W projektowanym modelu konceptualnym przyjęto, że rodzaj zakłócenia wpływa najpierw na stan i zachowanie systemu automatyki. Następnie zakłócenie jest rozpoznawane przez uczestników, diagnozowane i poddawane decyzji o sposobie interwencji. Decyzja ta prowadzi równolegle do rezultatu w zakresie bezpieczeństwa oraz rezultatu logistycznego. Po zakończeniu przypadku przeprowadzany jest debriefing, który tworzy podstawę do uczenia się w kolejnych scenariuszach.



Rysunek 1. Model konceptualny badania

Źródło: opracowanie własne na podstawie koncepcji badania.

1.5. Pytania badawcze i propozycje badawcze

RQ1. W jaki sposób rodzaj kontrolowanego zakłócenia występującego w zautomatyzowanym magazynie dydaktycznym różnicuje zdolność studentów do rozpoznawania sytuacji potencjalnie niebezpiecznych?

RQ2. Jakie zależności występują pomiędzy bezpieczeństwem reakcji studentów a skutkami zakłócenia mierzonymi parametrami procesu magazynowego?

RQ3. W jaki sposób nieprawidłowe zastosowanie klasyfikacji ABC/XYZ zmienia intensywność pracy systemu oraz częstość występowania sytuacji wymagających interwencji?

RQ4. W jaki sposób presja czasu zmienia reakcję studentów na zakłócenie wymagające wyboru pomiędzy szybkością realizacji zadania a przestrzeganiem procedury bezpieczeństwa?

P1. Zakłócenia ukryte, związane z danymi lub sensorami, będą rozpoznawane później niż zakłócenia powodujące bezpośrednie zatrzymanie urządzenia.

P2. Błędne rozmieszczenie produktów o wysokiej częstotliwości obsługi będzie zwiększało liczbę ruchów systemu oraz liczbę sytuacji wymagających reakcji użytkownika.

P3. Zakłócenia dotyczące pozycji o dużej zmienności zapotrzebowania będą generowały większą liczbę nieplanowanych interwencji niż zakłócenia dotyczące pozycji o stabilnym zapotrzebowaniu.

P4. Wprowadzenie presji czasu będzie zwiększało rozbieżność pomiędzy decyzją korzystną logistycznie w krótkim okresie a decyzją zgodną z procedurą bezpieczeństwa.

P5. W kolejnych scenariuszach będzie obserwowany wzrost skuteczności identyfikacji zagrożeń i skrócenie czasu prawidłowej reakcji, przy czym efekt kolejności zostanie kontrolowany w projekcie badania.

2. Metodologia badań

2.1. Projekt badawczy

Badanie zostanie przeprowadzone jako osadzone wielokrotne studium przypadku. Za przypadek zostanie uznany pojedynczy, standaryzowany scenariusz zakłócenia procesu magazynowego. Osiem scenariuszy będzie stanowiło osiem przypadków analizowanych według tej samej procedury. Zespoły studentów realizujące zadania zostaną potraktowane jako osadzone jednostki analizy w obrębie każdego przypadku.

Wybór ośmiu przypadków jest zgodny z logiką teorii budowanej z badań przypadków. Eisenhardt (1989, p. 545) wskazała, że nie istnieje idealna liczba przypadków, jednak liczba od czterech do dziesięciu zazwyczaj umożliwia zachowanie równowagi pomiędzy złożonością materiału a możliwością uzyskania wiarygodnego ugruntowania empirycznego. W projekcie przyjęto również logikę replikacji, a nie logikę próby statystycznej. Yin (2018, p. 107) wskazuje, że wielokrotne studium przypadku powinno opierać się na replikacji, przy czym poszczególne przypadki mogą zawierać osadzone jednostki analizy oraz dane ilościowe.

W części przypadków oczekiwane będą wyniki podobne z przewidywalnych powodów, co odpowiada replikacji literalnej. W innych przypadkach oczekiwane będą wyniki odmienne z powodów wynikających z rodzaju zakłócenia, co odpowiada replikacji teoretycznej. Takie rozwiązanie pozwoli porównać zakłócenia jawne i ukryte, błędy techniczne i informacyjne oraz sytuacje występujące bez presji czasu i w warunkach presji czasu.

2.2. Środowisko laboratoryjne

Badanie zostanie przeprowadzone w laboratorium logistycznym jednej z niepublicznych uczelni wyższych w Polsce. Nazwa instytucji zostanie zanonimizowana w wersji przekazywanej do recenzji. Po zakończeniu procesu double blind możliwe będzie przywrócenie pełnej nazwy miejsca badania: Uniwersytet WSB Merito we Wrocławiu.

Środowisko badawcze stanowi fizyczny model magazynu wysokiego składowania wykonany z elementów LEGO, wyposażony w automatyczną układnicę samojezdną, system lokalizacji jednostek ładunkowych oraz czujniki koloru wykorzystywane do identyfikacji

jednostek albo ich klas. Układ umożliwi automatyczne wykonywanie operacji odkładania i pobierania oraz rejestrację wybranych zdarzeń systemowych.

W opracowaniu zostaną podane parametry pozwalające na replikację badania: [liczba miejsc składowania], [liczba poziomów], [liczba i typ czujników], [liczba rozpoznawanych kolorów], [typ sterownika], [sposób komunikacji], [logika sterowania układnicą], [punkty przyjęcia i wydania], [częstotliwość rejestrowania logów], [sposób awaryjnego zatrzymania] oraz [wersja oprogramowania]. Parametry te powinny zostać opisane na podstawie rzeczywistej konfiguracji pracowni, bez ich rekonstruowania z pamięci lub przybliżeń.

2.3. Uczestnicy i dobór próby

Uczestnikami badania będą studenci realizujący zajęcia laboratoryjne związane z logistyką lub zarządzaniem procesami magazynowymi. Do analizy zostaną włączeni wyłącznie uczestnicy, którzy wyrażą świadomą zgodę na udział w badaniu. Udział w badaniu nie powinien wpływać na ocenę z przedmiotu, a odmowa udziału nie powinna powodować żadnych konsekwencji dydaktycznych.

W opracowywanym zestawieniu należy podać: N = [liczba uczestników], liczbę zespołów = [], średnią liczebność zespołu = [], kierunek i poziom studiów = [], semestr = [], wcześniejsze doświadczenie magazynowe = [jeżeli będzie mierzone] oraz kryteria włączenia i wyłączenia. Jeżeli te same osoby będą realizowały więcej niż jeden przypadek, dane powinny być oznaczone identyfikatorem anonimowym umożliwiającym analizę powtarzanych pomiarów bez ujawniania tożsamości.

2.4. Osiem przypadków badawczych

W Tabeli 1 przedstawiono macierz ośmiu przypadków. Każdy przypadek został zdefiniowany przez typ kontrolowanego zakłócenia, problem logistyczny, odpowiadający mu problem bezpieczeństwa oraz zestaw podstawowych wskaźników. W scenariuszach nie będzie symulowany rzeczywisty uraz ani wypadek. Odtwarzany będzie mechanizm decyzji i zakłócenia prowadzący do konieczności bezpiecznej reakcji.

Tabela 1. Macierz ośmiu przypadków badawczych

Przypadek	Kontrolowane zakłócenie	Problem logistyczny	Problem bezpieczeństwa	Podstawowe wskaźniki
CS1	Błędne rozpoznanie koloru jednostki ładunkowej	Skierowanie produktu do niewłaściwej lokalizacji	Kontynuacja procesu mimo błędnej identyfikacji i konieczność właściwego zatrzymania systemu	czas wykrycia; liczba błędnych ruchów; poprawność diagnozy; zgodność z procedurą
CS2	Brak albo niestabilny odczyt czujnika koloru	Zatrzymanie cyklu lub wielokrotne powstawanie operacji	Próba obejścia zabezpieczenia albo wznowienia pracy bez ustalenia przyczyny	czas reakcji; liczba restartów; poprawność sekwencji diagnostycznej; czas odzyskania sprawności
CS3	Błędne rozmieszczenie według klasyfikacji ABC	Produkt klasy A znajduje się w niekorzystnej lokalizacji, a produkt klasy C w lokalizacji uprzywilejowanej	Zwiększona liczba ruchów układnicy i wzrost liczby sytuacji wymagających interwencji	liczba cykli; łączny czas realizacji; liczba relokacji; liczba interwencji
CS4	Błędna klasyfikacja XYZ	Produkt o nieregularnym popycie jest traktowany jak pozycja stabilna	Nagłe uzupełnienie i wzrost presji operacyjnej mogą prowadzić do skracania procedury	braki; czas uzupełnienia; liczba nieplanowanych zleceń; liczba odstępstw od procedury
CS5	Konflikt dwóch poleceń albo blokada lokalizacji	Powstanie kolejki zadań i brak możliwości wykonania zaplanowanego ruchu	Niewłaściwa próba ręcznej ingerencji lub wznowienia ruchu bez usunięcia konfliktu	czas przestoju; liczba anulowanych operacji; poprawność ustalenia priorytetu; czas przywrócenia
CS6	Przerwanie cyklu układnicy	Niedokończone pobranie albo odłożenie jednostki	Nieoczekiwany ruch po restarcie i utrata wiedzy o aktualnym stanie systemu	kolejność czynności; czas restartu; liczba błędnych operacji po wznowieniu; poprawność weryfikacji stanu
CS7	Niezgodność stanu fizycznego i systemowego	System wskazuje towar w lokalizacji, w której znajduje się inna jednostka albo lokalizacja jest pusta	Pokusa bezpośredniej ingerencji w strefę automatyki zamiast zastosowania procedury blokady i inwentaryzacji	dokładność stanu; czas identyfikacji; poprawność blokady lokalizacji; poprawność korekty danych
CS8	Pilne zamówienie połączone z awarią lub błędem czujnika	Presja na terminową realizację zlecenia przy niesprawnym systemie	Konflikt pomiędzy szybkością wykonania zadania a bezpiecznym zatrzymaniem procesu	czas decyzji; liczba naruszeń procedury; czas realizacji zamówienia; liczba błędów i ponowień

Źródło: opracowanie własne.

2.5. Operacjonalizacja zmiennych i wskaźników

Zastosowane zostaną trzy grupy wskaźników: bezpieczeństwa, logistyczne oraz uczenia się. Rozdzielenie tych grup ma zapobiegać błędnemu utożsamianiu liczby ruchów układnicy z bezpośrednim ryzykiem wypadku. Liczba dodatkowych ruchów może być interpretowana wyłącznie jako modelowy wskaźnik zwiększonej ekspozycji procesu na zakłócenie, a nie jako bezpośrednie prawdopodobieństwo urazu.

Tabela 2. Plan operacjonalizacji kluczowych zmiennych

Wymiar	Zmienna	Definicja operacyjna	Skala	Źródło danych
Bezpieczeństwo	Czas wykrycia zagrożenia	Czas od pierwszego zdarzenia systemowego do poprawnego zgłoszenia nieprawidłowości	sekundy	log systemowy + obserwacja
Bezpieczeństwo	Poprawność zatrzymania	Zastosowanie wymaganej sekwencji zatrzymania bez nieuprawnionej ingerencji	0/1 albo skala punktowa	arkusz obserwacji
Bezpieczeństwo	Poprawność diagnozy	Prawidłowe wskazanie źródła zakłócenia	0/1	arkusz obserwacji + debriefing
Bezpieczeństwo	Naruszenia procedury	Liczba zachowań zdefiniowanych wcześniej jako niezgodne z procedurą	liczba	arkusz obserwacji
Logistyka	Czas cyklu	Czas realizacji zdefiniowanej operacji odkładania lub pobierania	sekundy	log systemowy
Logistyka	Liczba ruchów układnicy	Łączna liczba wykonanych ruchów w scenariuszu	liczba	log systemowy
Logistyka	Przestój	Czas od zatrzymania do przywrócenia stanu operacyjnego	sekundy	log systemowy
Logistyka	Dokładność stanu	Odsetek lokalizacji zgodnych pomiędzy stanem fizycznym i systemowym	procent	inwentaryzacja kontrolna
Uczenie się	Wynik testu wiedzy	Liczba poprawnych odpowiedzi w krótkim teście przed i po cyklu laboratoriów	punkty	test wiedzy
Uczenie się	Transfer między przypadkami	Zmiana czasu i poprawności reakcji w kolejnych scenariuszach po kontrolowaniu kolejności	czas + wynik punktowy	logi + obserwacja

Źródło: opracowanie własne.

2.6. Procedura badawcza

Dla każdego przypadku zostanie przygotowany jednolity protokół. Najpierw wykonany zostanie proces referencyjny bez zakłócenia. Następnie do systemu zostanie wprowadzone kontrolowane zakłócenie bez podawania studentom jego rodzaju. Od momentu aktywacji zdarzenia rejestrowane będą parametry systemowe oraz zachowania uczestników. Zakończenie przypadku nastąpi po bezpiecznym przywróceniu procesu albo po osiągnięciu zdefiniowanego limitu czasu.

Po każdym przypadku zostanie przeprowadzony krótki, ustrukturyzowany debriefing. Omówione zostaną: pierwsze symptomy zakłócenia, sposób jego interpretacji, podjęta decyzja, skutki dla bezpieczeństwa, skutki logistyczne oraz alternatywne działanie. Debriefing będzie oddzielony od oceny wyników studentów, tak aby nie był traktowany jako element sankcyjny.

W celu ograniczenia efektu kolejności scenariusze nie powinny być realizowane przez wszystkie zespoły w identycznej sekwencji. Zalecane jest zastosowanie zrównoważonych sekwencji,

na przykład częściowej kontrbalansacji. Kolejność przypadków zostanie zapisana i uwzględniona w analizie. Pozwoli to oddzielić różnicę wynikającą z rodzaju zakłócenia od poprawy wynikającej z wcześniejszego doświadczenia.

Jeżeli arkusz obserwacji będzie kodowany przez dwóch badaczy, przed rozpoczęciem właściwego badania zostanie wykonana procedura kalibracji. Dla zmiennych kategorycznych zostanie obliczony współczynnik κ Cohena służący do oceny zgodności między ocenającymi ponad poziom zgodności oczekiwanej przypadkowo (Cohen, 1960). Kryteria kodowania powinny zostać ustalone przed rozpoczęciem gromadzenia danych właściwych.

2.7. Strategia analizy danych

Analiza zostanie przeprowadzona w dwóch etapach. Najpierw wykonana zostanie analiza wewnątrz każdego przypadku, obejmująca opis przebiegu zakłócenia, wyniki poszczególnych zespołów, parametry bezpieczeństwa oraz parametry logistyczne. Następnie przeprowadzona zostanie synteza przekrojowa przypadków, w której porównane zostaną wzorce wspólne i odmienne.

Dane ilościowe będą prezentowane przy użyciu statystyk opisowych odpowiednich do rozkładu i skali pomiaru. W zależności od liczebności próby i schematu powtarzanych pomiarów możliwe będzie zastosowanie modeli dla danych powtarzanych, testów nieparametrycznych albo modeli mieszanych. Wybór testu zostanie dokonany po ocenie rozkładu danych i liczby obserwacji. Przed zebraniem danych nie powinien być deklarowany jeden test statystyczny bez znajomości struktury wyników.

Dla odpowiedzi jakościowych z debriefingu zostanie przygotowany system kodów obejmujący co najmniej: sposób rozpoznania symptomu, identyfikowaną przyczynę, uzasadnienie decyzji, odniesienie do bezpieczeństwa oraz odniesienie do efektywności procesu. Dane jakościowe będą służyły wyjaśnieniu różnic obserwowanych w logach i arkuszach obserwacyjnych, a nie zastępowaniu pomiaru ilościowego.

2.8. Wiarygodność, triangulacja i ograniczanie stronniczości

Wiarygodność badania będzie wzmacniana poprzez triangulację źródeł danych. Dla tego samego zdarzenia zostaną zestawione logi systemowe, obserwacja zachowania uczestników oraz wypowiedzi z debriefingu. W przypadku rozbieżności pomiędzy źródłami zostanie zachowany ślad decyzyjny wyjaśniający sposób klasyfikacji.

Dla wszystkich ośmiu przypadków zostanie zastosowany wspólny protokół, wspólne definicje zmiennych oraz jednolity arkusz obserwacji. Zmiana procedury w trakcie badania będzie dopuszczalna wyłącznie po udokumentowaniu przyczyny i wskazaniu, których przypadków dotyczy. Takie rozwiązanie ma ograniczyć ryzyko dopasowywania kryteriów do uzyskiwanych wyników.

W analizie należy uwzględnić możliwy efekt uczenia się, efekt obserwatora oraz różnice we wcześniejszym doświadczeniu studentów. Jeżeli wcześniejsze doświadczenie zawodowe w magazynie będzie wystarczająco zróżnicowane, powinno zostać zebrane jako zmienna kontrolna.

2.9. Zasady etyczne i anonimizacja

Przed rozpoczęciem badania powinna zostać uzyskana decyzja właściwej komisji etycznej albo formalne potwierdzenie, że dla tego typu badania zgoda komisji nie jest wymagana. W manuskrypcie należy podać numer decyzji: [do uzupełnienia].

Dane uczestników zostaną zanonimizowane. W publikacji nie będą prezentowane nazwiska, numery albumów ani inne dane umożliwiające identyfikację. Nagranie obrazu lub dźwięku, jeżeli zostanie zastosowane, będzie wymagało odrębnej zgody oraz określenia okresu przechowywania. W wersji przeznaczony do double blind review nazwa uczelni, komisji etycznej oraz inne elementy mogące ujawniać autorów zostaną zanonimizowane zgodnie z instrukcją redakcji. Dane te zostaną przywrócone po zakończeniu recenzji, jeżeli redakcja tego wymaga.

3. Wyniki badania

W obecnej wersji koncepcyjnej dane empiryczne nie zostały jeszcze zebrane. Z tego względu nie przedstawia się wyników oczekiwanych jako wyników rzeczywistych. Po zakończeniu badania sekcja zostanie uzupełniona zgodnie z poniższym schematem raportowania.

3.1. Analiza wewnątrz przypadków

Dla każdego przypadku zostaną przedstawione: charakter zakłócenia, liczba zespołów, mediana albo średnia czasu wykrycia, odsetek prawidłowych reakcji, liczba naruszeń procedury, wpływ na czas cyklu oraz opis dominującego sposobu diagnozy. W tekście powinny zostać przywołane wszystkie wartości prezentowane w tabelach.

Tabela 3. Szablon raportowania wyników dla ośmiu przypadków

Przypadek	N zespołów	Czas wykrycia	Poprawna reakcja	Naruszenia procedury	Skutek logistyczny
CS1	[]	[]	[]	[]	[]

Przypadek	N zespołów	Czas wykrycia	Poprawna reakcja	Naruszenia procedury	Skutek logistyczny
CS2	[]	[]	[]	[]	[]
CS3	[]	[]	[]	[]	[]
CS4	[]	[]	[]	[]	[]
CS5	[]	[]	[]	[]	[]
CS6	[]	[]	[]	[]	[]
CS7	[]	[]	[]	[]	[]
CS8	[]	[]	[]	[]	[]

Źródło: opracowanie własne. Tabela do uzupełnienia po zebraniu danych.

3.2. Synteza przekrojowa przypadków

W syntezie przekrojowej zostaną porównane przypadki według rodzaju zakłócenia, widoczności symptomu, obecności presji czasu oraz związku z klasyfikacją ABC/XYZ. Szczegółnej analizy wymagać będą przypadki, w których szybkie działanie poprawia krótkookresową wydajność, lecz prowadzi do naruszenia procedury bezpieczeństwa.

Tabela 4. Plan macierzy syntezy przekrojowej

Przypadek	Widoczność zakłócenia	Presja czasu	Dominujący błąd decyzji	Wpływ na bezpieczeństwo	Wpływ na logistykę
CS1	[]	[]	[]	[]	[]
CS2	[]	[]	[]	[]	[]
CS3	[]	[]	[]	[]	[]
CS4	[]	[]	[]	[]	[]
CS5	[]	[]	[]	[]	[]
CS6	[]	[]	[]	[]	[]
CS7	[]	[]	[]	[]	[]
CS8	[]	[]	[]	[]	[]

Źródło: opracowanie własne. Tabela do uzupełnienia po analizie przekrojowej.

4. Dyskusja

W wersji końcowej dyskusja powinna zostać zbudowana wokół czterech pytań badawczych, a nie wokół kolejnego streszczenia wyników. Wyniki dotyczące bezpieczeństwa powinny zostać odniesione do znaczenia technologii, systemów redukujących zagrożenia i zachowań człowieka opisywanych w literaturze magazynowej (de Koster et al., 2011, p. 753; Hofstra et al., 2018, p. 134).

Drugi blok dyskusji powinien dotyczyć relacji pomiędzy bezpieczeństwem a wydajnością. Szczególnie istotne będzie ustalenie, czy wystąpiły konfiguracje, w których wynik logistyczny był krótkookresowo korzystny, lecz został osiągnięty kosztem naruszenia bezpiecznej procedury. Pozwoliłoby to pokazać, że kryterium najkrótszego czasu realizacji nie może być traktowane jako jedyne kryterium poprawności decyzji w systemie automatycznym.

Trzeci blok powinien dotyczyć zastosowania ABC/XYZ jako narzędzia różnicowania warunków eksperymentalnych. Jeżeli błędna alokacja pozycji A albo nieprawidłowe potraktowanie pozycji Z zwiększy liczbę ruchów, przestojów lub interwencji, będzie można wykazać związek pomiędzy decyzją dotyczącą zapasu a ekspozycją procesu na sytuacje zakłóceń.

Czwarty blok powinien dotyczyć znaczenia dydaktycznego. Jeżeli w kolejnych przypadkach zostanie zaobserwowana poprawa rozpoznawania zagrożeń, wyniki mogą zostać odniesione do badań nad symulacją logistyczną i uczeniem przez doświadczenie (Drake & Mawhinney, 2006, p. 28; Deif, 2023, p. 161; Franke et al., 2024, p. 964; Kolb, 1984, p. 20). W dyskusji należy jednak oddzielić efekt dydaktyczny od efektu kolejności i powtarzania podobnych zadań.

6. Wnioski

W obecnej wersji koncepcyjnej nie formułuje się wniosków empirycznych. Po zakończeniu badania wnioski powinny odpowiadać bezpośrednio na cel główny i cztery pytania badawcze. Zakładany wkład teoretyczny polega na integracji trzech perspektyw: bezpieczeństwa magazynowego, sterowania zautomatyzowanym procesem magazynowym oraz uczenia poprzez kontrolowane doświadczenie błędu. Zakładany wkład metodyczny polega na opracowaniu ośmiu standaryzowanych przypadków, które mogą być replikowane w kolejnych grupach uczestników. Zakładany wkład praktyczny polega na stworzeniu środowiska, w którym błędy odpowiadające problemom spotykanym w magazynach mogą być analizowane bez narażania uczestników na zagrożenia właściwe dla pełnowymiarowych urządzeń.

W wersji publikacyjnej należy pozostawić wyłącznie te wnioski, które zostaną bezpośrednio poparte wynikami. Nie powinno się formułować twierdzenia, że model LEGO odtwarza rzeczywiste prawdopodobieństwo wypadku. Uprawnione będzie natomiast wnioskowanie o sposobie rozpoznawania zakłóceń, zgodności reakcji z procedurą oraz zmianie modelowych parametrów procesu.

7. Ograniczenia i kierunki dalszych badań

Pierwszym ograniczeniem będzie wykorzystanie pomniejszonego modelu fizycznego. Model odwzorowuje mechanizm procesu, lecz nie odwzorowuje energii, masy, prędkości ani konsekwencji urazu właściwych dla pełnowymiarowych urządzeń magazynowych.

Drugim ograniczeniem będzie badanie studentów, a nie pracowników magazynowych. Wyniki będą opisywały zachowania w warunkach kształcenia i nie powinny być automatycznie generalizowane na operatorów z wieloletnim doświadczeniem zawodowym.

Trzecim ograniczeniem może być realizacja badania w jednej instytucji i przy jednej konfiguracji technicznej stanowiska. W dalszych badaniach wskazana będzie replikacja w innych laboratoriach albo na innych konfiguracjach automatyki.

Czwartym ograniczeniem będzie efekt uczenia się pomiędzy kolejnymi przypadkami. Zostanie on ograniczony poprzez kontrbalansację kolejności oraz uwzględnienie numeru kolejnego scenariusza w analizie.

Piątym ograniczeniem może być świadomość obserwacji przez studentów, która może modyfikować sposób zachowania. W kolejnych badaniach możliwe będzie porównanie obserwacji bezpośredniej z analizą wyłącznie logów systemowych.

Dalsze badania mogą objąć rozszerzenie scenariuszy o błędy skanowania kodów, awarie komunikacji, błędy priorytetyzacji zleceń, kolizje reguł sterowania, interakcję z autonomicznym wózkiem transportowym oraz symulowane zdarzenia typu near miss.

Bibliografia

- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 37–46
- Deif, A. M. (2023). Going from 2D to 3D in supply chain 4.0 education: An LSP approach. *International Journal of Industrial Engineering and Operations Management*, 5(3), 161–180. <https://doi.org/10.1108/IJIEOM-11-2022-0065>
- de Koster, R. B. M., Stam, D., & Balk, B. M. (2011). Accidents happen: The influence of safety specific transformational leadership, safety consciousness, and hazard reducing systems on warehouse accidents. *Journal of Operations Management*, 29(7–8), 753–765. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2011.06.005>
- Drake, M. J., & Mawhinney, J. R. (2006). The building blocks of supply chain management. *INFORMS Transactions on Education*, 6(3), 28–37. <https://doi.org/10.1287/ited.6.3.28>
- Eisenhardt, K. M. (1989). Building theories from case study research. *Academy of Management Review*, 14(4), 532–550. <https://doi.org/10.5465/amr.1989.4308385>
- Franke, S., Hermes, S., & Roidl, M. (2024). An educational game to learn picking techniques in warehousing: WareMover. *Simulation & Gaming*, 55(5), 964–975. <https://doi.org/10.1177/10468781241258606>
- Hofstra, N., Petkova, B., Dullaert, W., Reniers, G., & de Leeuw, S. (2018). Assessing and facilitating warehouse safety. *Safety Science*, 105, 134–148. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.02.010>
- Kolb, D. A. (1984). *Experiential learning: Experience as the source of learning and development*. Prentice Hall.

- Roodbergen, K. J., & Vis, I. F. A. (2009). A survey of literature on automated storage and retrieval systems. *European Journal of Operational Research*, 194(2), 343–362.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.01.038>
- Stević, Ž., & Bećirović, M. (2021). ABC/XYZ inventory management model in a construction material warehouse. *Alphanumeric Journal*, 9(2), 325–334.
<https://doi.org/10.17093/alphanumeric.1052034>
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). SAGE Publications.

Spis tabel

Tabela 1. Macierz ośmiu przypadków badawczych

Tabela 2. Plan operacjonalizacji kluczowych zmiennych

Tabela 3. Szablon raportowania wyników dla ośmiu przypadków

Tabela 4. Plan macierzy syntezy przekrojowej

Spis rysunków

Rysunek 1. Model konceptualny badani