

Optymalizacja Procesów Transportowo-Przeładunkowych w Terminalach Intermodalnych

Optimization of Transport and Transshipment Processes in Intermodal Terminals



Roland Jachimowski

Dr hab. inż., prof. uczelni

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

roland.jachimowski@pw.edu.pl



Michał Kłodawski

Dr hab. inż., prof. uczelni

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

michal.klodawski@pw.edu.pl



Karol Nehring

Dr inż.

Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

karol.nehring@pw.edu.pl

Streszczenie: Artykuł podejmuje problematykę optymalizacji procesów transportowo-przeładunkowych w kolejowo-drogowych terminalach intermodalnych, stanowiących kluczowe elementy współczesnych łańcuchów dostaw. Rosnące znaczenie transportu intermodalnego w łańcuchach dostaw wynika z jego efektywności ekonomicznej i środowiskowej, osiąganego dzięki integracji różnych gałęzi transportu. Tym samym właściwe funkcjonowanie terminali ma kluczowy wpływ na efektywność całego łańcucha dostaw. W pracy zidentyfikowano trzy główne, wzajemnie powiązane obszary decyzyjne determinujące efektywność operacyjną terminala: organizację składowania kontenerów na placu, planowanie rozmieszczenia kontenerów na pociągu oraz harmonogramowanie pracy suwnic. Podkreślono konieczność ich zintegrowanego rozpatrywania, ze względu na silne zależności funkcjonalne. W celu oceny efektywności optymalizacji procesów transportowo-przeładunkowych w terminalu intermodalnym przeprowadzono ich badania symulacyjne w środowisku FlexSim. Uzyskane wyniki symulacji wykazały, że zastosowanie algorytmów metaheurystycznych pozwala znacząco skrócić czas pracy suwnicy przy załadunku i obsłudze placu w porównaniu z intuicyjnym planowaniem jej ruchów. Ponadto przeprowadzone badania pozwoliły na wskazanie zależności pomiędzy liczbą warstw składowania kontenerów na placu a pracochłonnością pracy suwnicy i liczbą przestawianych na placu kontenerów.

Słowa kluczowe: Terminal intermodalny; Optymalizacja procesów przeładunkowych; Symulacja; FlexSim

Abstract: The article addresses the optimization of transport and transshipment processes in rail–road intermodal terminals, which constitute key elements of modern supply chains. The growing importance of intermodal transport in supply chains results from its economic and environmental efficiency, achieved through the integration of different transport modes. Therefore, the proper functioning of terminals has a crucial impact on the efficiency of the entire supply chain. The study identifies three main, interrelated decision areas determining terminal operational performance: container storage organization in the yard, planning of container allocation on trains, and scheduling of yard crane operations. The necessity of their integrated consideration is emphasized due to strong functional interdependencies. To evaluate the effectiveness of optimization in intermodal terminal processes, simulation studies were conducted using the FlexSim environment. The results indicate that the application of metaheuristic algorithms significantly reduces crane operating time during train loading and yard handling compared to intuitive planning approaches. Furthermore, the study identifies relationships between the number of container stacking layers, crane workload, and the number of container reshuffling operations in the yard.

Keywords: Intermodal terminal; Transshipment process optimization; Simulation; FlexSim

Rola terminali intermodalnych w łańcuchu dostaw

Transport intermodalny odgrywa coraz większą rolę w systemach transportowych, co jest bezpośrednio związane z rozwojem konteneryzacji, wzrostem masy przewożonych ładunków oraz postępem technologicznym w obszarze transportu kolejowego i drogowego. Polega on na przewożeniu ładunku w jednej jednostce transportowej różnymi gałęziami transportu na całej trasie przewozu. Dzięki temu możliwe jest połączenie mocnych stron poszczegól-

nych gałęzi transportu, co prowadzi do zwiększenia efektywności przewozów oraz ograniczenia kosztów zewnętrznych, w szczególności oddziaływania transportu na środowisko.

Znaczenie transportu intermodalnego rośnie również ze względu na konieczność ograniczania emisji zanieczyszczeń oraz racjonalizacji wykorzystania infrastruktury transportowej. Przenoszenie części przewozów na transport kolejowy lub wodny, przy jednoczesnym wykorzystaniu transportu drogowego na krótkich odcinkach dowozowo-odwozowych, pozwala

zmniejszyć zużycie energii, ograniczyć emisję oraz poprawić płynność ruchu. W efekcie transport intermodalny staje się istotnym elementem zrównoważonego rozwoju systemów logistycznych i transportowych [1].

Kluczową rolę w funkcjonowaniu transportu intermodalnego odgrywają terminale intermodalne, które stanowią punkty przeładunkowe umożliwiające zmianę środka transportu oraz integrację różnych gałęzi transportu. Terminale te świadczą usługi przeładunkowo-magazynowe oraz inne usługi związane z obsługą jednostek intermodalnych.

Umożliwiają one wykonywanie operacji załadunku i wyładunku, składowanie jednostek, a także realizację czynności manipulacyjnych związanych z ich dalszym przemieszczaniem. W praktyce terminal intermodalny stanowi system obejmujący infrastrukturę, urządzenia przeładunkowe, środki transportu oraz odpowiednią organizację pracy, które wspólnie umożliwiają sprawną realizację procesów transportowych [2].

Znaczenie terminali intermodalnych wynika z faktu, że to właśnie w ich obrębie zachodzą kluczowe operacje decydujące o ciągłości i sprawności całego łańcucha dostaw. Terminale pełnią funkcję węzłów integrujących przepływ ładunków między transportem kolejowym i drogowym, a ich lokalizacja i wyposażenie determinują możliwości organizacji przewozów intermodalnych. Bez sprawnie funkcjonujących terminali nie byłoby możliwe efektywne wykorzystanie zalet transportu intermodalnego [3].

Jednocześnie należy podkreślić, że procesy zachodzące w terminalach intermodalnych w istotny sposób determinują funkcjonowanie całego systemu transportu intermodalnego. Czas realizacji operacji przeładunkowych, sposób organizacji składowania kontenerów, efektywność wykorzystania urządzeń przeładunkowych oraz koordynacja obsługi pociągów i pojazdów drogowych wpływają bezpośrednio na czas i koszt realizacji przewozów. W związku z tym procesy terminalowe nie mogą być traktowane jako odrębny element systemu, lecz jako jego kluczowy komponent wpływający na efektywność całego łańcucha transportowego. Tym samym ich optymalizacja stanowi jeden z podstawowych warunków efektywnego funkcjonowania transportu intermodalnego jako całości.

Problematyka optymalizacji procesów transportowo-przeładunkowych w kolejowo-drogowych terminalach intermodalnych

W kolejowo-drogowym lądowym terminalu intermodalnym do najważniejszych problemów optymalizacyj-

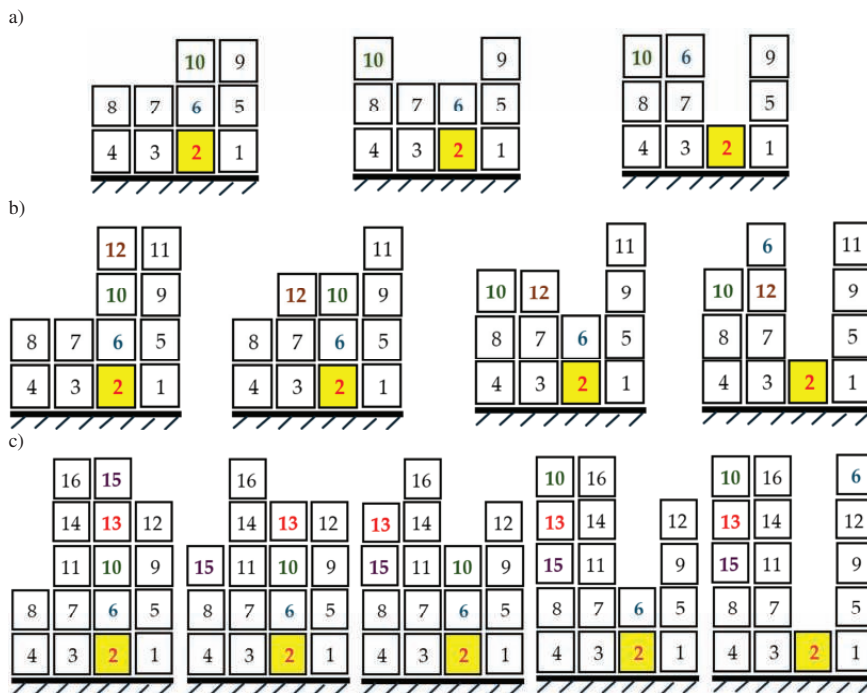
nych należą zagadnienia związane ze składowaniem kontenerów na placu, planowaniem ich rozmieszczenia na pociągu oraz przydziałem i organizacją pracy suwnic. Problemy te nie funkcjonują w praktyce jako odrębne obszary decyzyjne, lecz tworzą jeden wzajemnie powiązany układ operacyjny, od którego zależy sprawność całego terminala. Każda decyzja dotycząca lokalizacji kontenera na placu wpływa na sposób jego późniejszego pobrania, czas obsługi pociągu, liczbę ruchów urządzeń przeładunkowych oraz możliwość sprawnego zorganizowania przeładunku między transportem kolejowym i drogowym. Z tego względu optymalizacja pracy terminala wymaga jednoczesnego uwzględniania tych procesów, a nie rozpatrywania ich oddzielnie [4].

Pierwszym z kluczowych zagadnień jest problem składowania kontenerów na placu. W terminalu intermodalnym plac składowy pełni funkcję bufora między transportem kolejowym i drogowym, ponieważ trafiają na niego kontenery, które nie mogą zostać przeładowane bezpośrednio z wagonu na samochód ciężarowy lub odwrotnie. Problem ten nie sprowadza się więc do prostego zajmowania wolnych miejsc, lecz polega na takim rozmieszczeniu jednostek, aby z jednej strony efektywnie wykorzystać dostępną przestrzeń, a z drugiej zapewnić szybki dostęp do kontenera w chwili jego wydania lub załadunku. W praktyce oznacza to konieczność podejmowania decyzji najpierw o tym, w której części placu dany kontener powinien zostać umieszczony, a następnie o wyborze konkretnego miejsca składowania. Przy podejmowaniu takich decyzji należy brać pod uwagę przewidywany termin wyjazdu kontenera z placu, jego powiązanie z określonym pociągiem lub kierunkiem przewozu, odległość od miejsca załadunku lub rozładunku, aktualne i przyszłe obciążenie urządzeń przeładunkowych, a także cechy samego kontenera, takie jak jego masa, wymiary czy dopuszczalna wysokość składowania [4], [6], [7].

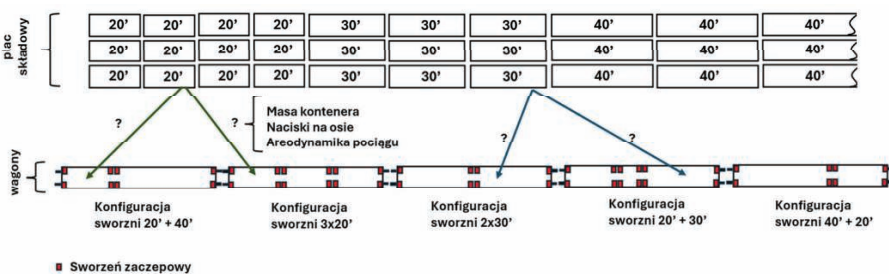
Z problemem składowania bezpośrednio wiąże się problem przestawiania kontenerów na placu (reshufflingu)

[5]. Występuje on wtedy, gdy kontener potrzebny do wydania lub załadunku nie jest łatwo dostępny, ponieważ został ustawiony pod innymi jednostkami lub w miejscu utrudniającym jego pobranie. W takiej sytuacji konieczne stają się dodatkowe operacje przeładunkowe, które nie tworzą nowej wartości, ale wydłużają czas obsługi i zwiększają koszty funkcjonowania terminala. Z tego powodu jakość organizacji placu ocenia się nie tylko przez stopień wykorzystania powierzchni, lecz również przez liczbę koniecznych przestawień. Im więcej takich ruchów, tym większe obciążenie suwnic, większe zużycie czasu pracy urządzeń i wyższe ryzyko powstawania zatorów operacyjnych. W praktyce szczególnie istotne jest ograniczanie przestawień wymuszonych, natomiast przestawienia planowe powinny być realizowane tylko wtedy, gdy faktycznie poprawiają sprawność późniejszych operacji. Oznacza to, że optymalizacja składowania polega na znalezieniu kompromisu pomiędzy intensywnym wykorzystaniem przestrzeni placu a łatwością późniejszego dostępu do kontenerów [5], [8]. Problem przestawiania/rekonfiguracji kontenerów na placu składowym schematycznie przedstawiono na rysunku 1.

Drugim podstawowym zagadnieniem optymalizacyjnym jest planowanie rozmieszczenia kontenerów na pociągu. Jego istotą jest takie przypisanie kontenerów do wagonów i miejsc na wagonach, aby zapewnić bezpieczny przewóz, odpowiednie wykorzystanie zdolności przewozowej składu oraz sprawną realizację operacji przeładunkowych. W praktyce nie chodzi jedynie o to, czy dany kontener zmieści się na wagonie, ale o takie ułożenie całego składu, które będzie technicznie poprawne, ekonomicznie uzasadnione i korzystne z punktu widzenia organizacji pracy terminala. Każdy wagon ma określone parametry techniczne, takie jak długość, dopuszczalne obciążenie, naciski na osie oraz konfigurację trzpiegni zaczepowych, a to właśnie one wyznaczają możliwe miejsca ładunkowe i dopuszczalne kombinacje załadunku kontenerów o różnych długościach. Jednocześnie same kontenery różnią się masą, wymiarami, typem, przezna-



1. Problematyka przestawiania kontenerów na placu składowym w zależności od liczby warstw składowania. a) 3 warstwy, b) 4 warstwy, c) 5 warstw



2. Problematyka załadunku pociągu intermodalnego

zeniem oraz wymaganiami przewo-
zowymi. W rezultacie liczba możliwych
wariantów załadunku jest bardzo duża,
a wybór najlepszego rozwiązania wy-
maga jednoczesnego uwzględnienia
wielu ograniczeń [9], [10].

Z punktu widzenia terminala łą-
dowego problem ten ma szczególne
znaczenie, ponieważ plan załadunku
pociągu pozostaje bezpośrednio po-
wiązany z organizacją placu składo-
wego. Kontenery trafiają na wagony z
konkretnych lokalizacji na placu, a więc
ich rzeczywiste położenie wpływa na
liczbę przejazdów urządzeń, czas po-
brania oraz konieczność wykonywania
dodatkowych przestawień. Jeśli konte-
nery przeznaczone na dany pociąg są
rozproszone, ukryte pod innymi jed-
nostkami lub położone daleko od wła-
ściwego obszaru frontu ładunkowego,
obsługa pociągu staje się mniej wy-
dajna. W efekcie dobry plan załadunku

musi uwzględniać nie tylko parametry
wagonów i kontenerów, ale także orga-
nizację placu składowego oraz łatwość
dostępu do jednostek przeznaczonych
do załadunku [11]. Problematykę tę
schematycznie przedstawiono na ry-
sunku 2.

W praktyce planowanie załadunku
może mieć charakter statyczny albo
dynamiczny. Statyczne planowanie jest
możliwe wtedy, gdy wszystkie konte-
nery przeznaczone na dany pociąg są
wcześniej dostępne w terminalu i zna-
ne są ich parametry. W rzeczywistych
warunkach pracy terminala często
występuje jednak niepewność związa-
na z opóźnieniami dostaw, błędami w
danych, zmianami priorytetów obsługi
czy nieterminowym pojawieniem się
kontenerów eksportowych. W takich
sytuacjach wcześniej przygotowany
plan musi być aktualizowany, a nie-
kiedy nawet modyfikowany w trakcie

obsługi pociągu. Oznacza to, że plano-
wanie załadunku nie jest jednorazową
czynnością planistyczną, lecz elemen-
tem bieżącego sterowania procesami
terminalowymi [12].

Trzecim podstawowym problemem
optymalizacyjnym jest przydział do
zadań i organizacja pracy suwnic. To
właśnie od sposobu ich wykorzystania
zależy przepustowość terminala, czas
obsługi pociągów i liczba możliwych
operacji przeładunkowych. Problem
ten polega na takim przypisaniu za-
dań do poszczególnych suwnic oraz
takim ustaleniu kolejności ich realizacji,
aby zapewnić możliwie szybką i płyn-
ną obsługę pociągów oraz pojazdów
drogowych. W praktyce oznacza to
konieczność określenia, która suwnica
powinna obsłużyć dany kontener lub
obszar placu, a także w jakiej kolejności
powinny być wykonywane operacje
przeładunkowe [13].

Złożoność tego problemu wynika
z faktu, że suwnice w terminalach ko-
lejowo-drogowych obsługują jedno-
cześnie tory kolejowe, plac składowy i
pasy drogowe. Każda decyzja o przy-
dziale zadania wpływa więc nie tylko
na realizację konkretnej operacji, ale
również na dostępność urządzenia dla
innych zadań i ogólną płynność pracy
terminala. Jednym z najważniejszych
ograniczeń technicznych jest to, że
suwnice poruszają się po wspólnym
torze i nie mogą się wzajemnie mijać.
W efekcie ich kolejność wzdłuż placu
jest stała, a możliwość elastycznego
reagowania na zmiany obciążenia po-
zostaje ograniczona. W praktyce pro-
wadzi to do stosowania statycznego
podziału placu na obszary robocze
przypisane do konkretnych suwnic.
Rozwiązanie to upraszcza organizację
pracy, ale jednocześnie zmniejsza ela-
styczność systemu i może prowadzić
do nierównomiernego obciążenia
urządzeń. Alternatywą jest dynamiczny
przydział zadań, który pozwala lepiej
wykorzystać dostępne zasoby, lecz wy-
maga zaawansowanych narzędzi infor-
matycznych działających w czasie rze-
czywistym i uwzględniających bieżące
zakłócenia operacyjne [14]. Problema-
tykę tę schematycznie przedstawiono
na rysunku 3.

Zatem z punktu widzenia zarządza-

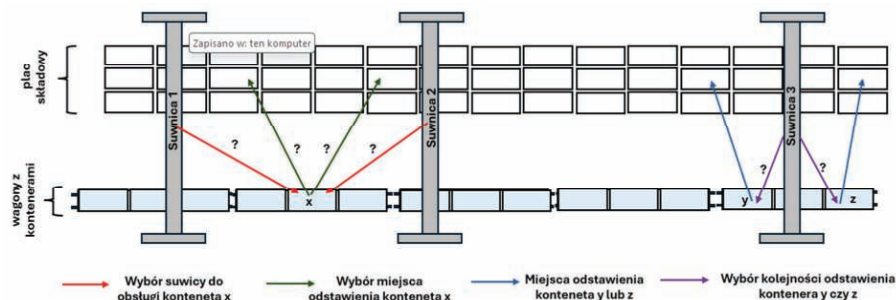
nia terminalem celem optymalizacji jest jednocześnie skrócenie czasu obsługi pociągów i samochodów ciężarowych, ograniczenie liczby przeładunków kontenerów, zmniejszenie liczby pustych przejazdów urządzeń przeładunkowych, równomierne obciążenie placu i suwnic, lepsze wykorzystanie pojemności pociągów oraz zachowanie wszystkich ograniczeń technicznych wagonów i kontenerów. Osiągnięcie tych celów wymaga uwzględnienia wielu czynników jednocześnie [15].

Optymalizacja procesów wymaga w dalszej kolejności ich weryfikacji. Jednym ze sposobów weryfikacji poprawności uzyskanych w procesie optymalizacji wyników jest przeprowadzenie badań symulacyjnych. Symulacje odgrywają kluczową rolę w analizie wyników optymalizacji, ponieważ pozwalają sprawdzić, jak zaproponowane rozwiązania zachowują się w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Dzięki nim można ocenić stabilność i odporność rozwiązania na zmienność parametrów wejściowych oraz niepewność danych. Symulacje umożliwiają także porównanie różnych wariantów optymalizacyjnych bez konieczności kosztownego wdrażania ich w praktyce. Dodatkowo pomagają wykryć potencjalne problemy, które nie są widoczne na etapie samego modelowania matematycznego. W rezultacie zwiększają wiarygodność i jakość podejmowanych decyzji [16].

Przykłady optymalizacji procesów transportowo-przeładunkowych w terminalu

Przykład 1. Optymalizacja procesu załadunku pociągu intermodalnego i jego symulacja

Celem zobrazowania korzyści płynących z optymalizacji procesów transportowo-przeładunkowych w terminalu poniżej przedstawiono model symulacyjny procesu załadunku pociągu intermodalnego przez suwnicę. Model symulacyjny wykonano w środowisku FlexSim. Analizowano jak wykorzystanie wybranych algorytmów heurystycznych i metaheurystycznych do planowania kolejności ruchów



3. Problematyka harmonogramowania pracy suwnic

suwnicy wpływa na skrócenie tego czasu załadunku. Proces załadunku kontenerów na wagony warunkowany był przez masę brutto kontenerów, konfigurację sworzni zaczepowych na wagonach oraz dopuszczalne naciski na osie wagonów. W modelu odwzorowano plac składowy składający się z trzech rzędów kontenerów składowanych w trzech warstwach, wagony intermodalne oraz suwnicę wykonującą załadunek pociągu (przykład modelu symulacyjnego we FlexSim przedstawiono na rysunku 5). Na potrzeby badań przeanalizowano 4 typowe dla operatorów suwnic strategie wyboru kolejności obsługi kontenerów oraz 2 algorytmy optymalizacyjne:

- L1 – priorytet wagonów kolejowych – suwnica dla kolejnych w składzie wagonów szuka pasujących kontenerów począwszy od początku bloku składowego;
- L2 – priorytet kontenerów – suwnica dla kolejnych kontenerów na placu poszukuje pasujących wagonów począwszy od początku składu pociągu;
- L3 – najkrótsza odległość od wagonu kolejowego do kontenera – suwnica dla kolejnych w składzie wagonów poszukuje najbliższych im pasujących kontenerów;
- L4 – najkrótsza odległość od kontenera do wagonu kolejowego – suwnica dla kolejnych na placu kontenerów poszukuje najbliższych im pasujących wagonów;
- L5 – najkrótsza odległość od bieżącego kontenera do wagonu kolejowego oraz od bieżącego wagonu kolejowego do kontenera – algorytm najbliższego sąsiada (algorytm heurystyczny).
- L6 – algorytm mrówkowy (metoda

optymalizacji kombinatorycznej, w której rozwiązania są konstruowane przez sztuczne „mrówki” na podstawie rozkładu prawdopodobieństwa zależnego od intensywności feromonów i funkcji heurystycznej, a następnie iteracyjnie aktualizowane w celu maksymalizacji jakości rozwiązania).

Ponadto w modelu założono:

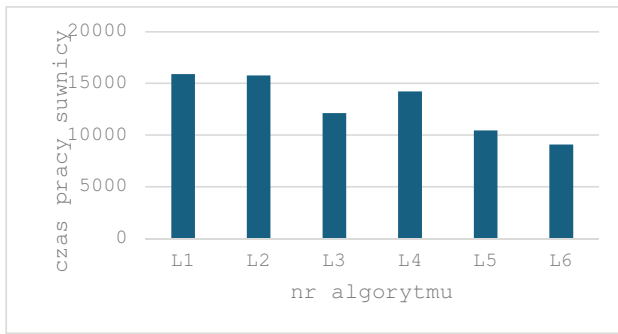
- Wykorzystanie kontenerów 20', 30', 40';
- Kontenery sparametryzowano przez 5 różnych przedziałów wagowych dla każdej z analizowanych długości kontenera, celem odwzorowania wpływu masy brutto kontenera na jego położenie na wagonie i w składzie pociągu.

Badania symulacyjne wykonywano dla wielu iteracji. Założono losowe rozmieszczenie kontenerów na placu oraz losową konfigurację sworzni na wagonach. W rezultacie uzyskano wyniki czasu pracy suwnicy dla poszczególnych algorytmów, które zestawiono na rysunku 4.

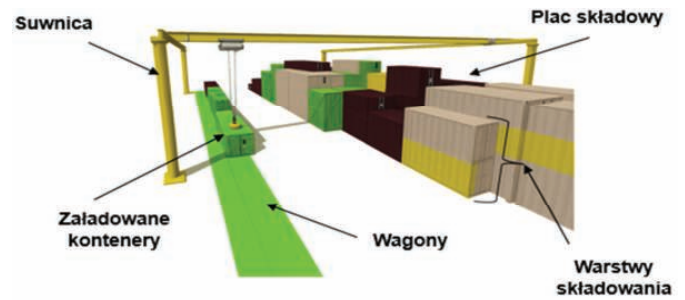
Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują, że algorytm L6 (metaheurystyczny algorytm mrówkowy) jest zdecydowanie najefektywniejszy, osiągając najkrótszy czas pracy suwnicy i wyraźnie przewyższając wszystkie pozostałe rozwiązania.

Przykład 2. Wpływ liczby warstw składowania kontenerów na placu na czas załadunku pociągu

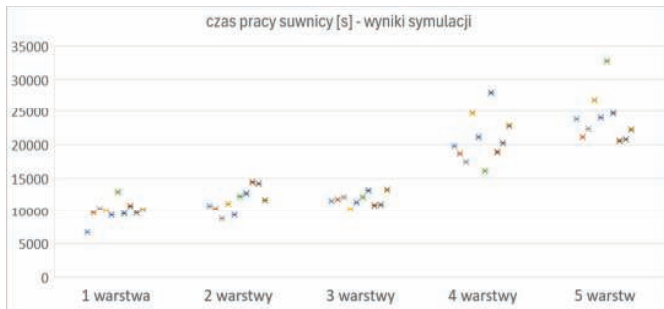
Optymalizacja pracy maszyn ładunkowych nie jest możliwa bez odpowiedniego zaplanowania placu składowego. Wspomniana w poprzednim



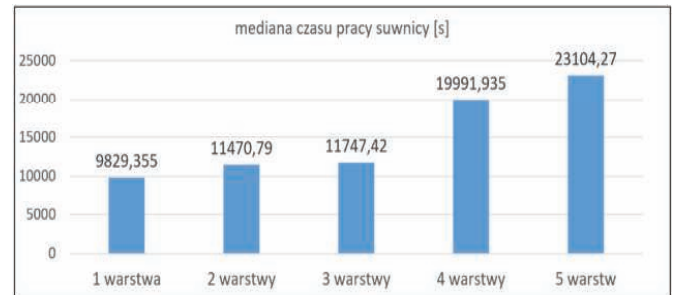
4. Wyniki czasu pracy suwnicy dla poszczególnych algorytmów



5. Fragment modelu symulacyjnego wraz z rozmieszczeniem kontenerów na placu



6. Czas pracy suwnicy w kolejnych symulacjach



7. Mediana czasu pracy suwnicy dla poszczególnych warstw składowania

rozdziale problematyka przestawiania kontenerów na placu składowym jest silnie związana z planowaniem rozmieszczenia tych kontenerów na placu oraz wielkością tego placu, wyrażaną również liczbą warstw składowania.

Zasadniczo liczba warstw w danym obszarze składowania w terminalu zależy przede wszystkim od przewidywanego czasu składowania kontenerów. W przypadku składowania krótkookresowego, np. do 1 doby w buforach, istotne jest zapewnienie szybkiego dostępu do kontenerów położonych głębiej. Stąd w strefach buforowych w terminalach składowanie to zazwyczaj nie przekracza 3 warstw.

W przypadku składowania długookresowego liczba warstw będzie rosła. Dlatego celem przedstawionych poniżej badań symulacyjnych jest zbadanie, jak liczba warstw składowania wpływa na czas załadunku pociągu intermodalnego. Przedstawione poniżej wyniki symulacji pozwolą określić dynamikę zmian czasu obsługi ładunkowej kontenerów w funkcji liczby warstw składowania.

Podobnie jak w przykładzie 1, tak i tu do budowy modelu symulacyjnego wykorzystano środowisko FlexSim. Na potrzeby badań przyjęto, że

- Blok składowy składa się z trzech rzędów kontenerów i maksymal-

nie 5 warstw. W bloku składowym ustawiono kontenery 20', 30' i 40'. Założono 80% wypełnienie bloku składowego.

- Na potrzeby wypełnienia placu składowego przez kontenery w badaniach założono, że liczba kontenerów poszczególnych typów w zależności od liczby warstw składowania wynosiła:

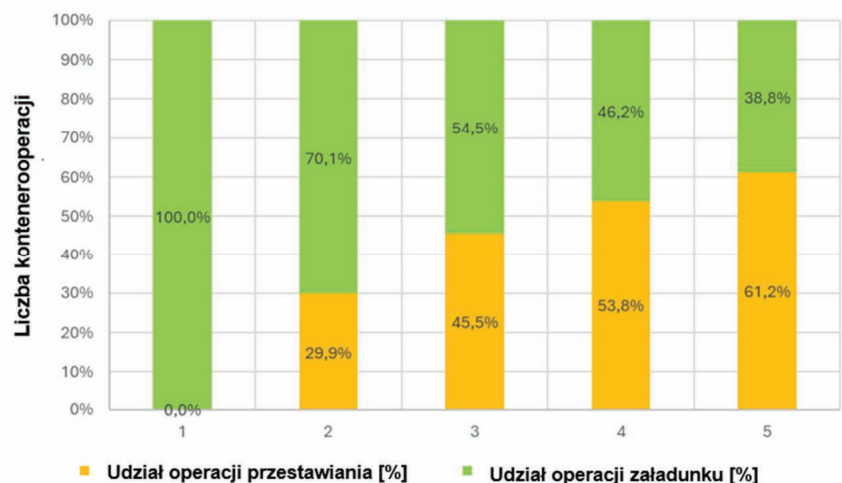
- 1 warstwa – 260 jednostek różnych typów (20', 30', 40')
- 2 warstwy – 518 jednostek
- 3 warstwy – 777 jednostek
- 4 warstwy – 1035 jednostek
- 5 warstw – 1296 jednostek

Fragment opracowanego modelu sy-

mulacyjnego przedstawiono na rysunku 5.

W obliczeniach wykorzystano przedstawiony w przykładzie 1 algorytm najbliższego sąsiada. Każdy z wariantów symulacji to inna liczba warstw. Symulacje powtarzano 10-krotnie w każdym z wariantów, za każdym razem losując rozmieszczenie kontenerów na placu składowym. Badaniu podlegał całkowity czas pracy poszczególnych elementów suwnicy takich jak brama, wózek i wciągarka. Wyniki badań symulacyjnych przedstawiono na rysunkach 6 i 7.

Analiza uzyskanych wyników symulacji wskazuje, że wraz ze zwiększaniem liczby warstw składowania kontenerów wydłuża się czas pracy suwnicy.



8. Udział operacji załadunku i przestawiania kontenerów w procesie obsługi pociągu

Dla niewielkiej liczby warstw (1–3) wzrost ten ma charakter umiarkowany i przebiega stopniowo. Wyraźne pogorszenie parametrów obserwuje się natomiast przy 4 i 5 warstwach. Mediana czasu pracy suwnicy dla pięciu warstw jest ponad dwukrotnie wyższa niż dla jednej warstwy. Najbardziej zauważalny skok następuje przy przejściu z 3 do 4 warstw, gdzie mediana czasu pracy zwiększa się o ponad 50%.

Istotnym elementem przeprowadzonych badań symulacyjnych było też określenie, jaki przy tych losowych danych do modelu symulacyjnego oraz przy zadanych warstwach składowania w kolejnych symulacjach, udział w procesie obsługi pociągu będą miały efektywne ruchy załadunku oraz ruchy związane jedynie z przestawianiem kontenerów na placu. Wyniki symulacji w tym zakresie przedstawiono na rysunku 8.

Na podstawie wyników przedstawionych na rysunku 8 wyraźnie można stwierdzić, że wraz ze wzrostem liczby warstw składowania kontenerów rośnie również liczba operacji przestawiania. Przy dwóch warstwach operacje te stanowią prawie 30% wszystkich ruchów suwnicy, natomiast przy pięciu warstwach przestawianie odpowiada już za ponad 61% wszystkich operacji przeładunkowych.

Wnioski

Transport intermodalny odgrywa kluczową rolę w nowoczesnych łańcuchach dostaw, a terminale intermodalne stanowią ich strategiczne ogniwa decydujące o sprawności przepływu ładunków. Efektywność funkcjonowania terminali zależy od właściwej organizacji i optymalizacji współzależnych procesów, takich jak składowanie kontenerów, planowanie załadunku czy harmonogramowanie pracy urządzeń przeładunkowych. Problemy te mają charakter złożony i wymagają zintegrowanego podejścia oraz wykorzystania zaawansowanych metod optymalizacyjnych.

Przeprowadzone badania potwierdzają, że zastosowanie algorytmów heurystycznych i metaheurystycznych pozwala znacząco skrócić czas reali-

zacji operacji przeładunkowych, przy czym najlepsze rezultaty osiągają metody bardziej zaawansowane. Jednocześnie wykazano, że sposób organizacji placu składowego, w szczególności liczba warstw składowania, ma istotny wpływ na efektywność pracy terminala. Tym samym prowadzenie badań symulacyjnych stanowi istotne narzędzie umożliwiające ocenę i porównanie wariantów organizacji procesów terminalowych w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Jacyna M., Pyza D. Rola intermodalnych terminali przeładunkowych w przewozach kolejowo-drogowych. *Problemy kolejnictwa - Railway problems*, 2015, 169, 15-27.
- [2] Szaciłło L., Zielaskiewicz, H. Rozwój przewozów intermodalnych w województwie kujawsko-pomorskim na przykładzie projektu budowy terminala intermodalnego w Emilianowie. *Przegląd komunikacyjny - Transportation Overview Journal*, 2019, 74.
- [3] Böse J. W. (Ed.). *Handbook of terminal planning*. New York: Springer, 2011.
- [4] Boysen N., Flidner M., Jaehn F., & Pesch E. A survey on container processing in railway yards. *Transportation Science*, 2023, 47(3), 312-329.
- [5] Jachimowski, R., Kłodawski, M. The impact of container yard layout on the cargo handling time of external transport vehicles in an intermodal terminal. *Archives of Transport*, 2025, 73 (1)
- [6] Jachimowski R., Kłodawski M., Lewczuk K., Wasiak M. Selection of a Container Storage Strategy at the Rail-road Intermodal Terminal as a Function of Minimization of the Energy Expenditure of Transshipment Devices and CO2 Emissions. *Rocznik Ochrona Środowiska - Annual Set The Environment Protection*, 2018, 20.
- [7] Hu X., Liang C., Chang D., & Zhang Y. Container storage space assignment problem in two terminals with the consideration of yard sha-

ring. *Advanced Engineering Informatics*, 2021, 47.

- [8] Zhou C., Wang W., Li H. Container reshuffling considered space allocation problem in container terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2020, 136.
- [9] Nehring K., Kłodawski M., Jachimowski, R., Klimek, P., Vašek, R. Simulation analysis of the impact of container wagon pin configuration on the train loading time in the intermodal terminal. *Archives of Transport*, 2020, 60(4)
- [10] Bruns F., Knust S. Optimized load planning of trains in intermodal transportation. *OR spectrum*, 2012, 34(3).
- [11] Kłodawski M., Jachimowski R., Chamiér-Gliszczyński N. Analysis of the overhead crane energy consumption using different container loading strategies in urban logistics hubs. *Energies*, 2024, 17(5).
- [12] Corry P., Kozan E. An assignment model for dynamic load planning of intermodal trains. *Computers & Operations Research*, 2006, 33(1).
- [13] Liu W., Zhu X., Wang L., Li S. Flexible yard crane scheduling for mixed railway and road container operations in sea-rail intermodal ports with the sharing storage yard. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2024, 190,
- [14] He J., Tan C., Zhang Y. Yard crane scheduling problem in a container terminal considering risk caused by uncertainty. *Advanced Engineering Informatics*, 2019, 39.
- [15] Szczepański E., Gołębiowski P., Kondracka B. Evaluation of the technological process of wagon processing at shunting stations using the simulation model. *Zeszyty Naukowe. Transport-Politechnika Śląska - Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 2023, 120.
- [16] Lewczuk K., Kłodawski M., Gepner P. Energy consumption in a distributional warehouse: A practical case study for different warehouse technologies. *Energies*, 2021, 14(9).