



RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Igora **BETKIERA**

pt. **Metoda komputerowego wspomagania procesu planowania
przemieszczania pojazdów nienormatywnych**

1. Informacje ogólne

Recenzja opracowana została na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Warszawskiej pismo nr 168/2021 z dnia 13.04.2021 r. na podstawie dostarczonej rozprawy doktorskiej pod wyżej wymienionym tytułem.

2 Ogólna charakterystyka pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Igora Betkiera liczy 218 stron zwartego opracowania wraz ze spisem literatury w liczbie 184 pozycji.

Rozprawa jest podzielona na sześć rozdziałów, wstęp, podsumowanie ze wskazanymi kierunkami dalszych prac oraz obszerną bibliografią. W pracy zamieszczono także wykaz najważniejszych oznaczeń, spis tabel i rysunków oraz streszczenie w języku polskim i angielskim.

Praca ma charakter teoretyczno-aplikacyjny i dotyczy zagadnień związanych z planowaniem tras przejazdów dla pojazdów nienormatywnych z wykorzystaniem nowoczesnych technologii komputerowych, grafowych baz danych oraz współrzędnych implementacji algorytmów przeszukiwania.

Rozprawa napisana jest z dużą starannością poprawnym i precyzyjnym językiem. Układ pracy jest przejrzysty, podział treści rozprawy na rozdziały i podrozdziały poprawny. Terminologia i pojęcia stosowane w pracy nie budzą większych zastrzeżeń. Materiały ilustracyjne oraz tabele z wynikami badań zamieszczone w pracy, w sposób właściwy przedstawiają studia Doktoranta, które dotyczą zagadnień planowania tras pojazdów nienormatywnych poruszających się po drogach krajowych z punktu widzenia gabarytów tych pojazdów oraz możliwości infrastruktury drogowej.

3 Ocena podjętego tematu

Transport drogowy odgrywa ważną rolę w życiu społeczno-gospodarczym każdego kraju. W Polsce przy wykorzystaniu tej właśnie gałęzi transportu realizowana jest większość przewozów ładunków oraz pasażerów. Drogowy transport ładunków nienormatywnych należy do bardzo wąskiego sektora transportu drogowego, który w ostatnim czasie bardzo dynamicznie się rozwija. Korzystają z niego zarówno przewoźnicy cywilni oraz wojsko. Przemieszczanie ładunków ponadgabarytowych transportem drogowym w wojsku jest tak powszechne i ważne z punktu widzenia bezpieczeństwa wewnętrznego kraju, że powołano specjalne organy wojskowe, które uprawnione są do wydawania stosownych zezwoleń na przejazd przez całą dobę, siedem dni w tygodniu.

Świadczenie usług na rynku przewozów nienormatywnych wiąże się z koniecznością posiadania i użytkowania drogiego specjalistycznego sprzętu, zatrudniania wysoko wyspecjalizowanej kadry, kompleksowego przygotowania obsługi logistycznej przewozu oraz uzyskania stosownych zezwoleń na realizację zleconej usługi przewozowej. Wymagania stawiane przed współczesnym transportem nienormatywnym wymuszają ciągłą aktualizację danych, w zakresie zdarzeń drogowych oraz stanu infrastruktury. Cały proces przewozu tego typu ładunków komplikuje jeszcze dodatkowo wzrastające z roku na rok natężenie ruchu innych pojazdów oraz budowa i przepustowość infrastruktury drogowej.

Autor podjął się bardzo niełatwego ale ważnego zadania związanego z opracowaniem komputerowej metody planowania tras dla pojazdów przewożących nienormatywne ładunki z uwzględnieniem strategicznego sektora z punktu widzenia bezpieczeństwa kraju a więc transportu wojskowego. Opracowana metoda oparta jest na założeniach teorii grafów. Na podstawie analizy literatury przedmiotu Autor rozprawy określił kryteria wyboru najlepszego rozwiązania z punktu widzenia rozważanego problemu, opracował model matematyczny metody wyznaczania trasy przejazdu dla pojazdu nienormatywnego, sformułował algorytm jej działania, opracował autorski program komputerowy oraz dokonał jego weryfikacji.

Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzenia uważam, że wybór tematu rozprawy jest aktualny i istotny z punktu widzenia planowania tras przejazdu ładunków nienormatywnych zarówno w transporcie cywilnych ładunków jak i w instytucjach państwowych np. Siłach Zbrojnych RP, lub Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad.

4 Analiza treści rozprawy

W przedstawionej do recenzji pracy Autor podjął się niełatwego zadania związanego z opracowaniem programu komputerowego służącego do planowania tras przejazdu ładunków nienormatywnych. Wykorzystano przy realizacji tego zdania założenia teorii grafów.

Wspomaganie procesu planowania przejazdów pojazdów nienormatywnych odnosi się do problemu wyznaczania tras przejazdu z punktu widzenia gabarytów pojazdów oraz możliwości infrastruktury drogowej. Wybór trasy przejazdu Autor rozpatrywał pod kątem minimalizacji czasu przejazdów, kosztów oraz bezpieczeństwa związanego z minimalizacją oddziaływania na innych uczestników ruchu oraz minimalizacji prawdopodobieństwa oddziaływania niekorzystnych warunków atmosferycznych. Odwzorowanie sieci drogowej wraz z jej właściwościami jest jedną z najbardziej istotnych kwestii wpływających na jakość finalnego rozwiązania problemu wyznaczania trasy.

Konsekwencją takiego podejścia do rozwiązania problemu badawczego, zdefiniowanego przez Autora rozprawy jest przyjęty układ pracy, oraz jej zawartość merytoryczna.

Rozdział pierwszy pracy to **wstęp** jest wprowadzeniem do problematyki zagadnień poruszanych w pracy. Autor w sposób jasny i precyzyjny wskazał obszar badań oraz zagadnienia, które są istotne dla rozwiązania postawionego problemu badawczego. W rozdziale tym scharakteryzowano drogowy transport ładunków nienormatywnych, wskazano elementy które muszą być wzięte pod uwagę podczas planowania takiego przewozu. Szczegółnie zwrócono uwagę na fakt, że osoby planujące tego typu przewozy podczas procesu planowania muszą uwzględniać dużą ilość danych w zakresie zdarzeń drogowych oraz stanu infrastruktury. Wymusza to na planistach korzystanie z wielu narzędzi i technologii informatycznych i wiąże się z możliwością popełnienia błędu wynikającego z niedoboru bądź nadmiaru danych. Przy dynamicznie rozwijających się gałęziach transportu, to właśnie sposób zarządzania danymi zwiększa jakość wykonywanych usług, poziom bezpieczeństwa jak i pozwala redukować koszty funkcjonowania, m. in. poprzez wyznaczanie optymalnych tras przejazdu. W rozdziale tym wskazano, że również w Polskich Siłach Zbrojnych zagadnienia związane z planowaniem przejazdu ładunków nienormatywnych jest także ważne z punktu widzenia bezpieczeństwa wewnętrznego kraju i jest powszechnie wykorzystywane.

Rozdział drugi dotyczy zagadnień związanych z **Identyfikacją obszaru badawczego** Autor pracy dokonał w nim analizy przewozów ładunków i pracy przewozowej poszczególnych gałęzi transportu w Polsce w latach 2014-2018 oraz przedstawił dane związane z liczbą wydawanych zezwoleń na przewóz materiałów nienormatywnych w transporcie cywilnym oraz wojskowym. Ponadto omówił także co w świetle obowiązujących przepisów rozumie się pod pojęciem transportu nienormatywnego, wskazał rodzaje ładunków, które są uważane za ładunki nienormatywne, środki transportu które mogą realizować tego typu przewozy oraz przedstawił najpopularniejsze technologie stosowane do wyznaczania tras przejazdów pojazdów nienormatywnych. W rozdziale tym Autor wymienił i opisał także podstawowe etapy procesu planowania przejazdu pojazdów nienormatywnych. Dla etapów związanych z wyznaczaniem trasy przejazdów stwierdzono, że są one podatne na zastosowanie wspomagania

komputerowego z uwagi na aspekt, że mogłyby być realizowane przy pomocy jednego narzędzia teleinformatycznego. Za koniecznością optymalizacji wskazanych ogniw przemawia jeszcze fakt, że stanowią one aż 1/3 całości czasu przeznaczanego na proces planowania. W związku z tym, dla wskazanych obszarów przyjęto potencjalną możliwość optymalizacji przez technologie komputerowe i wiedza ta posłużyła jako punkt wyjścia do dalszych rozważań.

W trzecim rozdziale **Czynniki determinujące przebieg tras przejazdu pojazdów nienormatywnych** zawarto informacje dotyczące przepisów prawnych regulujących przewóz ładunków nienormatywnych zarówno w ruchu cywilnym jak i wojskowym. Kolejnym elementem na który zwrócono uwagę w tym rozdziale były zagadnienia związane z budową infrastruktury i jej wpływem na organizację przewozów szczególnie ładunków nienormatywnych realizowanych przez wojsko. Bardzo ciekawe były zamieszczone w tym rozdziale wykresy, na których przedstawiono porównanie wysokości, szerokości i długości wojskowych pojazdów realizujących wyżej wymienione przewozy ze skrajną poszczególnych klas dróg czy rond. Ponadto Autor pracy odniósł parametry infrastruktury dróg do parametrów używanego przez wojsko sprzętu samochodowego do przewozu różnego rodzaju ładunków nienormatywnych i problemy związane z organizacją tego typu przewozów. Poza parametrami związanymi z infrastrukturą w rozdziale tym zwrócono jeszcze uwagę i omówiono także inne czynniki które wpływają na organizację transportu materiałów nienormatywnych tj. natężenie i utrudnienia w ruchu, czas pracy kierowców, warunki atmosferyczne oraz czynności towarzyszące związane z wstępnym objazdem trasy, wyznaczeniem tras alternatywnych oraz planowanie prac i kosztów w związku z przygotowaniem trasy.

W czwartym rozdziale rozprawy przedstawiono **Problem badawczy, cele i tezę pracy**. Celem rozprawy jest: systematyka wiedzy na temat procesu planowania transportu nienormatywnego w kontekście określenia potrzeb tego segmentu przewozów, analiza dostępnych metod oraz narzędzi wykorzystywanych w procesie planowania przemieszczania ładunków ponadgabarytowych, sformułowanie metody wsparcia procesu planowania przemieszczania pojazdów nienormatywnych na podstawie założeń teoretycznych, warunków logicznych a także odpowiednich ograniczeń, opracowanie aplikacji internetowej wraz z implementacją zaproponowanej metody, weryfikacja opracowanego rozwiązania poprzez testy manualne, testy z wykorzystaniem rzeczywistych danych oraz ocena poprawności wyników.

Teza pracy została sformułowana następująco: Wyznaczenie tras przejazdu dla pojazdów nienormatywnych jest procesem którego automatyzacja poprzez poprawną implementację komputerową skraca czas planowania oraz zwiększa poziom bezpieczeństwa realizacji zadania transportowego.

Rozdział piąty **Algorytm wyznaczania optymalnych tras bazujące na teorii grafów** jest pierwszym rozdziałem w którym Autor rozprawy rozpoczyna proces formułowania swojego modelu. Rozdział ten ma charakter teoretyczny. Zostały w nim przedstawione podstawy metodyczne związane z zastosowaną w rozprawie teorią grafów. Swoje rozważania Autor koncentruje wokół takich obszarów jak: kryteria wyboru algorytmu wyznaczania trasy przejazdu dla pojazdu nienormatywnego, omówieniu algorytmu znajdowania najlepszego rozwiązania oraz przedstawia algorytmy, które na podstawie analizy zagadnienia i określonych kryteriów uznano za najbardziej obiecujące z punktu widzenia transportu nienormatywnego należą do nich: Algorytm Dijkstry, Algorytm Dijkstry z nieposortowaną tablicą kluczy, Algorytm Dijkstry z kopcem binarnym, Algorytm Dijkstry z kopcem Fibonacciego, dwukierunkowy Algorytm Dijkstry, Algorytm A* oraz Algorytm Bellmana-Forda.

W kolejnym szóstym rozdziale **Założenia teoretyczne metody wsparcia komputerowego procesu planowania przemieszczania pojazdów nienormatywnych** został przedstawiony Autorski model matematyczny metody wyznaczającej trasy przejazdu dla pojazdu nienormatywnego oraz sformułowano algorytm jego działania. W opracowanym modelu w pierwszej kolejności odwzorowano obiekt badań – pojazd (pojazd jednoczłonowy jak i zestaw ciągnika siodłowego z naczepą) oraz jego parametry istotne z punktu widzenia planowania trasy – określono 14 parametrów. Kolejnym etapem formułowania modelu był opis struktury sieci drogowej, w którym zdefiniowano strukturę sieci drogowej (grafu): wejścia i wyjścia do i z sieci oraz węzły sieci drogowej skrzyżowania dróg o ruchu zwykłym i okrężnym. Następnie zdefiniowano charakterystyki elementów punktowych sieci oraz połączeń pomiędzy jego elementami. W pracy Autor założył, że charakterystyka elementów punktowych sieci drogowej odwzorowana zostanie za pomocą wektora danych. Główna uwaga Autora została skupiona na przejeździe pojazdu nienormatywnego przez rondo – opracowano pięć założeń przejazdu przez ten fragment infrastruktury. Model uwzględnia także szereg innych czynników wpływających na przejazd pojazdu nienormatywnego między innymi wpływ warunków atmosferycznych oraz ograniczenia związane z przejazdem przez tzw. obiekty ograniczające przejazd (wiadukty, mosty, ostre zakręty oraz nośność obiektów inżynierskich). Dla tak zebranych i opisanych danych dokonano optymalizacji pod kątem minimalizacji czasu i kosztów przejazdu oraz zwiększenia poziomu bezpieczeństwa. Rozdział kończy się opisem procedury wyznaczania trasy przejazdu oraz algorytmami sprawdzania poprawności trasy i przejezdności pojedynczych dróg (łuków) trasy.

Przed ostatni rozdział pracy doktorskiej to **Implementacja i weryfikacja metody komputerowego wsparcia procesu planowania przemieszczania pojazdów nienormatywnych na podstawie autorskiej aplikacji internetowej ROUTE-MESH 1.0.0.** w rozdziale tym zawarto szczegółowy opis opracowanej przez Autora pracy aplikacji komputerowej. Składa się ona z kilku modułów: Front-end, Back-end, Baza danych,

Webserwis obliczeniowy i Webserwisy zewnętrzne, które są niezbędne do jej prawidłowego działania. Dla opracowanego modelu i aplikacji Autor rozprawy dokonał weryfikacji opracowanej metody bazując na rzeczywistych danych. Zaplanowano przewóz trzech ładunków (ładunku długiego – stalowego przęsła mostowego, ładunku ciężkiego – czołgu Leopard 2A5 oraz ładunku ponadgabarytowego specjalnego – pionowego cylindrycznego zbiornika na produkty ropopochodne). Wszystkie wymienione ładunki ze względu na swoje parametry zewnętrzne w istotny sposób wpływają na trudność zrealizowania danego przewozu. Do realizacji tak postawionego zadania dobrano także odpowiednie pojazdy. Założono także, że opracowana aplikacja dokona sprawdzenia możliwości przejazdu na kierunku północ – południe oraz wschód – zachód dla 12 par węzłów które swoją lokalizację mają w województwie mazowieckim. Dla wszystkich założonych pojazdów i ładunków aplikacja wskazała propozycje tras z pośród których wybrano te po których mógłby odbywać się przewóz.

W ostatnim rozdziale pracy **Podsumowanie** przedstawione zostały wnioski ogólne i szczegółowe sformułowane przez Autora pracy oraz kierunki dalszych badań.

5. Merytoryczna ocena pracy

Autor rozprawy skoncentrował się na bardzo istotnej kwestii związanej z wyznaczaniem tras przejazdu pojazdów nienormatywnych biorąc pod uwagę minimalizację czasu przejazdu, kosztu oraz bezpieczeństwa. Dokonał przeglądu literatury związanej z omawianym tematem, opracował model matematyczny metody i zaimplementował go tworząc aplikację komputerową.

W pracy zaproponowane zostało oryginalne narzędzie, które ułatwić może w sposób bardzo istotny pracę osób zajmujących się planowaniem tras przejazdów pojazdów nienormatywnych. Uważam, że jest to główny i istotny dorobek naukowy Autora pracy. Opracowana aplikacja pozwala wyznaczyć trasę dla pojazdu nienormatywnego z punktu widzenia wielu kryteriów np. kosztu, bezpieczeństwa, czasu przejazdu, przejezdności. Istotnie skraca czas procesu planowania, optymalizuje przejazd w tzw. „oknie czasowym”, pozwala analizować infrastrukturę drogową pod kątem jej obciążenia dla zaproponowanego pojazdu oraz porównywać ze sobą różne warianty tras.

Dla tak zaproponowanego narzędzia przeprowadzona została także jego weryfikacja co wzbogaciło pracę o tak zwany aspekt praktyczny. Weryfikacja ta zakładała wybór trzech rodzajów ładunków: ładunek długi, ciężki i ponadgabarytowy specjalny. Każdy z tych zaproponowanych ładunków w istotny sposób wpływał na trudność zadania transportowego. Dla tak specyficznych ładunków dobrano także odpowiedni tabor który będzie realizował to zadanie. Założono także że przejazd będzie się odbywał w województwie mazowieckim na

kierunku północ – południe, wschód – zachód. Dla tak sprecyzowanych kryteriów aplikacja wskazała możliwe trasy przejazdu. Autor pracy kierując się swoim doświadczeniem w planowaniu tras takich ładunków każdą ze wskazanych tras przeanalizował i wybrał tą która jego zadaniem jest najbardziej odpowiednia.

Praca pana mgr inż. Igora Betkiera jest na wysokim poziomie merytorycznym i naukowym posiada także duży zasób wiedzy praktycznej oraz cechuje się profesjonalizmem w podejściu do modelowania zagadnień związanych z planowaniem tras pojazdów nienormatywnych. Warsztat naukowy przedstawiony w rozprawie świadczy o dużej dojrzałości naukowej Doktoranta, wiedzy oraz interdyscyplinarnego podejścia do rozwiązywanych zagadnień.

Uważam zatem, że opracowanie metody i na jej bazie aplikacji komputerowej do tak ważnych kwestii związanych z transportem ładunków nienormatywnych jest autorską propozycją pana mgr inż. Igora Betkiera.

6. Uwagi szczegółowe

Podczas czytania i analizy treści rozprawy zauważyłam kilka błędów edytorskich związanych przenoszeniem tabel na następną stronę oraz z brakiem opisu osi na rysunkach (rozdział 1). Są to jednak drobne uwagi, które nie wpływają na ocenę pracy i Doktorat nie musi się do nich odnosić.

Chciałbym także aby Autor pracy odpowiedział na kilka pytań, które nasunęły mi się podczas czytania Jego pracy:

1. Czy w opracowanym modelu są uwzględnione zjawiska związane z występowaniem kongestii drogowej lub zamknięcia pewnych odcinków dróg? Jeżeli tak to jak te parametry zamodelowano? Oraz jak rozwiązuje się takie problemy podczas projektowania tras przejazdów pojazdów nienormatywnych?
2. W jaki sposób w modelu odwzorowano parametr związany z natężeniem ruchu innych pojazdów drogowych?
3. Czy dokonano porównania dla wybranych w pracy wariantów weryfikacji (ładunek długi – stalowe przęsło mostowe, ładunek ciężki – czołg Leopard 2A5 i ładunek ponadgabarytowy specjalny – pionowy cylindryczny zbiornik na produkty ropopochodne) z innymi na rynku programami do projektowania tras pojazdów nienormatywnych aby sprawdzić czy opracowany model jest lepszy/gorszy od tych programów istniejących?
4. Prosiłabym o wskazanie kilku zalet opracowanego modelu i aplikacji, które będą powodować, że opracowana w pracy metoda jest lepsza od dostępnych na rynku innych programów do wyznaczania tras dla ładunków nienormatywnych?

7. Podsumowanie i konkluzja

Przedstawioną do recenzji pracę oceniam bardzo pozytywnie. Została ona wykonana na bardzo wysokim poziomie merytorycznym. Zawarte w niej treści dotyczą złożonych problemów związanych z projektowaniem tras pojazdów nienormatywnych. Doktorant bardzo dobrze orientuje się w poruszanych kwestiach. Zaprezentowane w pracy treści są oryginalnym dorobkiem naukowym Doktoranta a rezultaty pracy mogą zostać wykorzystane w praktyce. Pan mgr inż. Igor Betkier potrafił poprawnie zdefiniować, zaprojektować i rozwiązać postawiony za cel pracy problem naukowy.

Wskazane niedociągnięcia i uwagi nie umniejszają wartości merytorycznej pracy, którą oceniam bardzo pozytywnie. Na taką ocenę pracy ma również wpływ to, że zagadnienia którymi zajmował się Doktorant, są zagadnieniami niełatwymi, trudnymi od strony teoretycznej i badawczej a wyniki mają bardzo duże zastosowanie praktyczne.

Reasumując stwierdzam, że rozprawa mgra inż. Igora Betkiera pt „*Metoda komputerowego wspomagania procesu planowania przemieszczania pojazdów nienormatywnych*” spełnia warunki przewidziane w Ustawie a dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, Dz. U. Nr 65, poz. 595 (z późniejszymi zmianami) oraz Ustawy o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z 2018 r.

Stawiam więc wniosek o przyjęcie przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej Pan mgra inż. Igora Betkiera nt. *Metoda komputerowego wspomagania procesu planowania przemieszczania pojazdów nienormatywnych* na stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Lądowa i Transport i dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Warszawskiej w dyscyplinie: Inżynieria Lądowa i Transport.

Małgorzata Orcyf