

Bydgoszcz, 30 lipca 2020

Dr hab. inż. Maciej Dutkiewicz, prof. uczelni
Uniwersytet Technologiczno - Przyrodniczy w Bydgoszczy
Katedra Konstrukcji Budowlanych,
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska,
Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Agnieszki Kocoń
pt. „Modelowanie zjawiska wywracania się wagonów towarowych przy wietrze
bocznym”

1. Podstawa opracowania

Recenzja została opracowana na prośbę Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej, dr hab. inż. Andrzeja Szaraty, prof. PK, wyrażoną w piśmie z dnia 15.06.2020 r., w którym przytoczono uchwałę Rady Naukowej Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej z dnia 10 czerwca 2020 r., powołującą mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Agnieszki Kocoń. Przesłana do oceny praca doktorska liczy wraz z załącznikami 239 stron.

2. Charakterystyka pracy

Praca liczy 14 rozdziałów, do których dołączono spis literatury i załączników, streszczenia w języku polskim i angielskim.

Rozdział 1 stanowi wstęp zawierający wprowadzenie do tematu pracy, w tym wpływu oddziaływania aerodynamicznego na dynamiczną odpowiedź pojazdu, co może doprowadzić do utraty jego stabilności. Kwestie stabilności nabierają dużego znaczenia w kontekście wysokich prędkości oraz nowoczesnych rozwiązań technologicznych pojazdów szynowych, co zwiększa ryzyko ich wywrócenia się. Przedstawione zostały przykłady wypadków kolejowych, których powodem były oddziaływania dużych sił aerodynamicznych.

DZIEKANAT	
Wydziału Inżynierii Lądowej	
Wpłynęło dnia	5.08.2020
L. dz.	10.510.3.4. 2020
podpis	5.08.2020

W **rozdziale 2** przedstawiony został cel i zakres pracy. Głównym celem pracy jest analiza zjawiska przewracania się wagonów towarowych pod wpływem silnego wiatru bocznego, przedstawiona przez Autorkę w trzech punktach:

1. Bezpośrednie wyznaczenie prędkości wiatru, przy której następuje przewrócenie się wagonu towarowego na podstawie badań modelowych w tunelu aerodynamicznym oraz obliczenie współczynnika aerodynamicznego momentu przewracającego pojazd na podstawie wyznaczonej prędkości krytycznej.
2. Sprawdzenie wpływu konfiguracji linii kolejowej, chropowatości terenu, liczby wagonów, kąta napływu wiatru, masy oraz położenia środka ciężkości pojazdu na zjawisko przewracania się wagonów towarowych przy silnym wietrze bocznym.
3. Porównanie metod oceny ryzyka przewrócenia się pojazdów szynowych pod wpływem wiatru bocznego określonego na podstawie prędkości krytycznej wyznaczonej bezpośrednio w badaniach w tunelu aerodynamicznym oraz określonego metodami stosowanymi w dokumentach normalizacyjnych.

Badania doświadczalne wykonane zostały w tunelu aerodynamicznym z warstwą przyścienną znajdującym się w Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej.

Rozdział 3 ograniczony został do prezentacji 3 tez:

- współczynnik aerodynamicznego momentu przewracającego pojazd może zostać wyznaczony na podstawie pomiaru prędkości krytycznej jego przewracania się, określonej w badaniach modelowych w tunelu aerodynamicznym,
- wystąpienie zjawiska przewracania się wagonów towarowych przy silnym wietrze bocznym zależy w dużym stopniu od konfiguracji linii kolejowej, chropowatości terenu otaczającego trasę pojazdu oraz prędkości, z jaką porusza się pojazd,
- ocena bezpieczeństwa wagonu towarowego ze względu na ryzyko przewrócenia się pod wpływem silnego wiatru bocznego powinna zostać przeprowadzona dla różnych konfiguracji linii kolejowej, z uwzględnieniem sytuacji najbardziej niekorzystnej.

W **rozdziale 4** przedstawiony został opis zjawiska przewracania się pojazdu szynowego pod wpływem wiatru bocznego w sytuacji krytycznej związanej z utratą stabilności pojazdu. Szczegółowo opisano model aerodynamiczny pojazdu szynowego, Omówiono także sposób badania zjawiska prezentując szeroki kontekst dotychczasowych analiz na świecie przeprowadzonych na obiektach rzeczywistych, w

skali oraz analiz numerycznych, podkreślając, iż metody analizy CFD nie są jeszcze wystarczająco dobrze opracowane, aby mogły służyć jako jedyne narzędzie przy projektowaniu pojazdów szynowych zgodnie z dokumentami normowymi.

Rozdział 5 poświęcony został analizie dokumentów normalizacyjnych, w szczególności normie PN-EN 14067-6, 2010, Technicznym Specyfikacjom Interoperacyjności (TSI) jako wytycznych nt wymagań technicznych i funkcjonalnych jakie powinny spełniać koleje europejskie oraz dokumentom o zasięgu lokalnym stosowanym w Wielkiej Brytanii i w Niemczech. Doktorantka przedstawiła szereg uwag dotyczących normy europejskiej (PN-EN 14067-6, 2010), podkreślając, iż znaczny stopień złożoności metody w niej zaprezentowanej utrudnia jej stosowanie, a duża liczba parametrów wejściowych zwiększa jej niepewność. Warstwa przyziemia, która ma istotny wpływ na prędkość wiatru i intensywność turbulencji na wysokości przejazdu pojazdów szynowych, zgodnie z tą normą nie powinna być symulowana. Nie zostały określone także graniczne wartości prędkości krytycznych wiatru, mogących spowodować przewrócenie się pojazdu, stąd ostateczny wniosek, iż norma jest zbyt skomplikowana lub niewystarczająca.

W **rozdziale 6** Doktorantka przedstawiła bogaty przegląd literatury grupując rozważania wg następujących zagadnień: rozkładu masy w wagonie, geometrii i położenia w ciągu pojazdów, konfiguracji linii kolejowej, chropowatości terenu, ruchu pojazdu, liczby Reynoldsa, przechyłki toru kolejowego, strony nawietrznej i zawietrznej oraz współczynników aerodynamicznych. Kluczowe dla dalszej analizy przedstawionej w pracy doktorskiej są wnioski podsumowujące przeprowadzoną analizę literatury zawarte w podrozdziale 6.10.

Kryteriom podobieństwa zjawiska przewracania się wagonów towarowych pod wpływem silnego wiatru bocznego poświęcony został **rozdział 7**. Przy wyznaczaniu zależności pomiędzy poszczególnymi skalami podobieństwa przyjęto, że: model wykonany był z tego samego materiału, co obiekt rzeczywisty (na etapie modelowania przyjęto jednak model z aluminium), badania przeprowadzone były w tunelu aerodynamicznym przy użyciu powietrza atmosferycznego, badania przeprowadzone były przy ziemskim przyspieszeniu grawitacyjnym, wszystkie istotne ze względów aerodynamicznych wymiary modelu wykonane zostały według jednej skali geometrycznej, wszystkie istotne ze względów aerodynamicznych elementy modelu wykonane były według jednej skali masy.

Rozdział 8 przedstawia charakterystyki rzeczywistego wagonu towarowego, modelu do badań w tunelu aerodynamicznym, do badań wg PN-EN 14067-6 oraz konfiguracji linii kolejowej. Zastosowane podczas wykonywania modelu uproszczenia i zmiany w jego konstrukcji, mimo że wpłynęły na parametry fizyczne modelu (masa, środek ciężkości, masowe momenty bezwładności), nie wpłynęły na jego charakterystyki aerodynamiczne. Kształt pojazdu został zachowany z należytą dokładnością, reprezentując rzeczywisty wagon towarowy. Zmianie uległy również zakładane skale podobieństwa. Mimo, że nie wszystkie skale podobieństwa zostały spełnione, to jednak kluczowe skale podobieństwa analizowanego problemu – skala geometryczna i skala masy – zostały zachowane z należytą dokładnością.

W pierwszej części **rozdziału 9** zawarty został opis tunelu aerodynamicznego z warstwą przyścienną. Wyniki przeprowadzonych badań profilu prędkości wiatru, intensywności turbulencji oraz skali długości korelacji potwierdzają, że symulacja warstwy przyściennej w tunelu aerodynamicznym została przeprowadzona właściwie. Przeprowadzono badania w 718 sytuacjach pomiarowych. Prace prowadzono w czterech etapach. Pomiary etapu I, II oraz III – pomiary prędkości krytycznej na termooanemometrach – były przeprowadzone po 5 razy dla każdej sytuacji pomiarowej, natomiast pomiary etapu IV – pomiary sił i momentów aerodynamicznych na wadze aerodynamicznej – po 3 razy dla każdej sytuacji pomiarowej. W trakcie badań w tunelu aerodynamicznym uwzględniono następujące elementy charakterystyczne dla zjawiska przewracania się pojazdów szynowych pod wpływem silnego wiatru bocznego:

- złożony przepływ powietrza – zmienne w czasie działanie wiatru, wpływ prędkości strumienia powietrza;
- warstwa przyziemna powietrza – wpływ kategorii terenu;
- działanie wiatru na pojazd pod różnymi kątami – wpływ kąta napływu wiatru;
- kontakt pomiędzy kołem pojazdu szynowego a szyną (jedynie w badaniach prędkości krytycznej);
- różna liczba pojazdów w składzie pociągu – wpływ liczby wagonów;
- stopień załadunku oraz sposób rozłożenia masy w wagonie (jedynie w badaniach prędkości krytycznej) – wpływ sytuacji obciążeniowej;
- niektóre odcinki linii kolejowej niebezpieczne ze względu na działanie wiatru (jedynie w badaniach prędkości krytycznej): nasyp, wiadukt, teren płaski,

zakrzywiony tor kolejowy (w postaci przechyłki toru jazdy) – wpływ konfiguracji linii kolejowej;

- strona nasypu lub wiaduktu, po której znajduje się pojazd szynowy względem kierunku działania wiatru (jedynie w badaniach prędkości krytycznej) – wpływ strony nasypu lub wiaduktu;
- długość modelu nasypu lub wiaduktu przy niskich kątach napływu wiatru (jedynie w badaniach prędkości krytycznej) – wpływ długości nasypu.

Rozdział 10 zawiera wyniki badań. Zaproponowano sposób ustalenia wartości prędkości krytycznej opierający się na jej bezpośrednim pomiarze w tunelu aerodynamicznym. Jako prędkość krytyczna uznana została prędkość średnia z ostatniej sekundy pomiaru V_m^{1s} wyznaczona na wysokości referencyjnej $z_{ref} = 40$ cm, która w rzeczywistości odpowiada wysokości 10m, biorąc pod uwagę skalę geometryczną modelu $k_h = 1/25$. W przeprowadzonych badaniach w tunelu aerodynamicznym nie uwzględniano ruchu pojazdu szynowego. W zamian zastosowane zostało uproszczenie polegające na tym, że symulowany w tunelu aerodynamicznym kąt napływu wiatru jest w rzeczywistości względnym kątem napływu wiatru uwzględniającym prędkość wiatru oraz prędkość ruchu pojazdu. Pomiary na wadze aerodynamicznej wykonywane były przy ustalonej prędkości strumienia powietrza w tunelu aerodynamicznym. Różniły się one od pomiarów prędkości krytycznej, przy których prędkość wiatru w tunelu aerodynamicznym była stopniowo zwiększana w trakcie pomiaru. Należy zwrócić uwagę na to, że aerodynamiczna siła boczna mierzona była z użyciem wagi aerodynamicznej, natomiast prędkość wiatru z użyciem termoanemometrów. Użycie różnego rodzaju aparatury pomiarowej mogło mieć wpływ na prezentowane wyniki badań.

Rozdział 11 poświęcony został ocenie bezpieczeństwa wagonu towarowego przy działaniu silnego wiatru bocznego. Obliczenia krytycznej prędkości wiatru wykonane zostały wg normy PN-EN 14067-6, 2010, zgodnie z procedurą obowiązującą w Wielkiej Brytanii oraz na podstawie badań w tunelu aerodynamicznym.

W konkluzji Doktorantka proponowała wyznaczanie prędkości krytycznej wiatru na podstawie bezpośrednich pomiarów w tunelu aerodynamicznym, podkreślając, iż metoda ta jest najbardziej pewna i niesie ze sobą najmniejsze ryzyko wyznaczenia zbyt wysokiej prędkości krytycznej, co wiązałoby się z sytuacją niebezpieczną ze względu na ryzyko przewrócenia się pojazdu szynowego pod wpływem wiatru bocznego.

W **rozdziale 12** omówiony został wpływ prędkości poruszania się pojazdu na jego bezpieczeństwo, natomiast **rozdział 13** dotyczy propozycji określenia prędkości krytycznej. Zaproponowano, aby do wartości współczynnika aerodynamicznego momentu przewracającego pojazd wyznaczonego na podstawie pomiarów prędkości krytycznej dopasować krzywe współczynnika C_m opisane równaniem kwadratowym (13.3). W wyniku analizy stwierdzono, iż różnica między prędkościami krytycznymi wyznaczonymi z badań w tunelu aerodynamicznym oraz prędkościami krytycznymi oszacowanymi na podstawie krzywej współczynnika C_m określonej zgodnie ze wzorem (13.3) jest niewielka. Biorąc to pod uwagę, proponowany sposób wyznaczenia prędkości krytycznej na podstawie współczynnika C_m określonego w formie równania kwadratowego, zależnego od kąta β , konfiguracji linii kolejowej i chropowatości terenu, może być używany w ocenie działania wiatru bocznego na analizowany wagon towarowy.

Rozdział 14 jest podsumowaniem wyników przeprowadzonej analizy oraz zawiera wnioski, m.in. że bezpośrednie pomiary prędkości krytycznej są metodą odpowiednią, bardziej dokładną niż pośrednie wyznaczenie prędkości krytycznej na podstawie procedury przedstawionej w PN-EN 14067-6, 2010 z użyciem równania szacującego lub współczynników wyznaczonych na wadze aerodynamicznej, zwracając uwagę, iż metodologia wyznaczania prędkości krytycznej proponowana w PN-EN 14067-6, 2010 dostosowana jest jedynie do terenu o bardzo niskiej turbulencji, a podstawową konfiguracją linii kolejowej jest tor pojedynczy. Przedstawione zostały rekomendacje do dalszych badań.

3. Merytoryczna ocena pracy

Tematyka podjęta w pracy ma istotne znaczenie naukowe i praktyczne. Analiza zjawiska przewracania się wagonów towarowych pod wpływem silnego wiatru bocznego jest przedmiotem badań wielu uczonych i zagadnienie należy do grupy aktualnych problemów inżynierii wiatrowej. Doktorantka znalazła rozwiązanie problemów trudnych i potrzebnych mających znaczenie w praktyce projektowej, a związanych z bezpośrednim wyznaczeniem w tunelu aerodynamicznym prędkości wiatru, przy której następuje przewrócenie się wagonu towarowego, z określeniem współczynnika aerodynamicznego momentu przewracającego pojazd, a także ze

sprawdzeniem wpływu konfiguracji linii kolejowej na badany problem. Przeprowadzono badania w 718 sytuacjach pomiarowych.

Uzyskane rezultaty pozwoliły na porównanie metod oceny ryzyka przewrócenia się pojazdów szynowych pod wpływem wiatru z rezultatami określonymi metodami stosowanymi w dokumentach normalizacyjnych. Doktorantka wykazała się umiejętnościami, które były niezbędne do przygotowania modelu badanego w tunelu aerodynamicznym. Badania przeprowadzone zostały poprawnie, a wykonana analiza teoretyczna oraz analiza uzyskanych w badaniach rezultatów są prawidłowe. Uzyskane rezultaty zostały przedstawione na szczegółowych wykresach, a sformułowane wnioski są trafne i zrozumiałe. Mogą być one dalej wykorzystywane w pracach studialnych i projektowych pojazdów i linii kolejowych. Biorąc pod uwagę powyższe, niniejszą pracę należy ocenić jako ważną oraz posiadającą wysokie walory poznawcze i naukowe.

Warto zwrócić uwagę, iż aerodynamiczna siła boczna mierzona była z użyciem wagi aerodynamicznej, natomiast prędkość wiatru z użyciem termoanemometrów. Użycie różnego rodzaju aparatury pomiarowej mogło mieć wpływ na prezentowane wyniki badań.

Praca doktorska jest napisana zrozumiale, poprawnie pod względem edytorskim i językowym. Do wymagających wyjaśnienia należą następujące kwestie:

a) strona 10

„W procedurze przedstawionej w (PN-EN 14067-6, 2010) istnieje również wiele niepewności, które przechodzą do następnych etapów obliczeń (Baker, 2013).”

Przedstawione zdanie niewiele wnosi i jest zbyt ogólne.

b) strona 31

„...a zwiększając jedynie połowę jego powierzchni o 10%”

Niejasne są motywy odniesienia się w tym zdaniu do połowy powierzchni pojazdu przy opisywaniu zwiększenia tej powierzchni o 10%. Należałoby ten wątek rozwinąć, żeby zdanie było zrozumiałe.

c) strona 32 i dalsze strony

W rozdziale 6 pt. ” Przegląd literatury analizowanego zjawiska” wystarczające byłoby omówienie i ustosunkowanie się Autorki do istniejących opracowań dotyczących danego zagadnienia bez zamieszczania ilustracji, czy też wykresów pochodzących z

tych opracowań, np. rysunki 6.3 do 6.5. Praca powinna bowiem ogniskować się na przedstawieniu oryginalnego wkładu Autorki w rozwój zagadnienia. Przywołanie w rozdziale dotyczącym przeglądu literatury tytułów analizowanych opracowań jest wystarczające i pozwoli osobom zainteresowanym na zapoznanie się w całości z tymi opracowaniami.

d) strona 70

„W tab. 8.4 zestawiono poprawione (zredukowane) skale podobieństwa uwzględniające parametry wykonanego modelu wagonu, które będą użyte przy analizie danych pomiarowych”.

W zdaniu tym nieprawidłowo oznaczono numer tabeli. W istocie zdanie dotyczy tabeli 8.5

4. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Agnieszki Kocoń pt. „Modelowanie zjawiska wywracania się wagonów towarowych przy wietrze bocznym” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i potwierdza wiedzę Autorki w dziedzinie aerodynamiki obiektów oraz modelowania obciążenia wiatrem. Doktorantka posiada wysokie umiejętności w prowadzeniu badań oraz analizie ich wyników. Rozprawa spełnia wymagania wynikające z przepisów prawa.

Wnioskuje o przyjęcie rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Agnieszki Kocoń, dopuszczenie do publicznej obrony oraz do ubiegania się o uzyskanie stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport.

