

dr hab. inż. Krzysztof Jamroziak, prof. PWr.  
Katedra Mechaniki i Inżynierii Materiałowej  
Wydział Mechaniczny  
Politechnika Wroclawska  
ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław

Wrocław 28.05.2019 r.

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej  
mgr. inż. Wojciecha Danka  
pod tytułem

**„Wpływ parametrów masowych słupa oświetleniowego na wartość współczynników bezpieczeństwa biernego pojazdów w trakcie zderzenia”**

### 1. Podstawa opracowania

Podstawę opracowania stanowi pismo Dziekana Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej nr RMT0-876/D/006/2018/2019 z dnia 28.03.2019, do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Damian Gąsiorek, prof. PŚ.

### 2. Ocena podjętej tematyki i założonego celu rozprawy

Rozprawa doktorska dotyczy wpływu wybranych parametrów masowych na wartość współczynników bezpieczeństwa biernego w trakcie zderzenia pojazdu ze słupem oświetleniowym. Tematyka ta jest związana z zapewnieniem większego bezpieczeństwa osób biorących udział w zdarzeniach drogowych z elementami infrastruktury drogowej. Jest ona od wielu lat tematem dyskusji wielu instytucji krajowych i zagranicznych, których celem jest ograniczenie ofiar takich zdarzeń drogowych. Wypadki drogowe z różnymi elementami infrastruktury drogowej, w tym takimi jak słupy oświetleniowe oraz znaki stanowią w Polsce około 1,5-2,0% wszystkich wypadków. Na podstawie statystyk policyjnych ginie w tego typu wypadkach drogowych ok. 70 osób rocznie, a prawie 800 zostaje rannych. Wielkość ta w porównaniu do ogólnej liczby poszkodowanych w wypadkach na polskich drogach w ujęciu rocznym nie jest zbyt wysoka, niemniej jednak jest to pewien problem poprawy

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 13.06.2019

nr 11510/000 zat. 2019

bezpieczeństwa biernego. Wymiar ten w aspekcie ekonomicznym i społecznym stanowi dość pokaźny oddźwięk na politykę poprawy bezpieczeństwa uczestników ruchu drogowego państwa. Wobec powyższego działania odpowiednich instytucji państwa muszą być ukierunkowane na poszukiwanie rozwiązań „bezpiecznej infrastruktury drogowej”. Działania zostały ukierunkowane na rozwiązaniach konstrukcyjnych między innymi słupów oświetleniowych o wyższych współczynnikach pochłaniania energii uderzenia. Nagminnie do niedawna stosowane słupy betonowe są zastępowane słupami wykonanymi z odpowiedniej stali, stopu aluminium lub innych materiałów kompozytowych. Słupy te zapewniają znacznie wyższy poziom bezpieczeństwa biernego pojazdu. Stosowanie słupów wykonanych z materiału kompozytowego to obecnie trend w poprawie bezpieczeństwa biernego.

Doktorant w swej pracy skoncentrował się na analizie słupów wykonanych z materiałów kompozytowych pod względem ich zdolności pochłaniania energii uderzenia w wyniku uderzenia pojazdu w tego typu przeszkodę. Zaznacza, że temat ten nie jest „dziewiczy”, ponieważ słupy oświetleniowe wykonane z materiału kompozytowego są przedmiotem wielu rozważań naukowych. Dodatkowo stwierdza na podstawie oceny stanu techniki, że wciąż nie w pełni rozpoznany jest wpływ różnych parametrów masowych na wartości współczynników bezpieczeństwa biernego badanych kompozytowych słupów oświetleniowych.

Autor zaznacza, że w następstwie tych badań zostanie zoptymalizowana konstrukcja słupa oświetleniowego w aspekcie poprawy współczynników biernych określanych w trakcie zderzenia pojazd-słup oświetleniowy. Podkreśla, że zasadniczymi współczynnikami są: intensywność zderzenia ASI (Acceleration Severity Index) oraz prędkości zderzenia teoretycznej głowy THIV (Theoretical Head Impact Velocity). W tym celu Doktorant postanowił przyjąć rozwiązanie problemu za pomocą metod numerycznych walidowanych w testach eksperymentalnych. Autor w zaproponowanym modelu numerycznym przyjął dwa zasadnicze parametry, a mianowicie grubość ścianki słupa oświetleniowego i położenie środka ciężkości słupa. Przeprowadzona identyfikacja modelu numerycznego dotyczyła optymalizacji określonych wartości współczynników bezpieczeństwa biernego ASI i THIV w funkcji grubości ścianki słupa oraz jego położenia środka ciężkości.

W tym kontekście dobór tematu pracy uważam za prawidłowy i aktualny mieszczący się w obszarze bezpieczeństwa użytkowników ruchu drogowego. Opiniowana praca doktorska jest opracowaniem naukowym, mieszczącym się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Cel pracy został sformułowany poprawnie i ma charakter twórczy. Dysertacja cechuje się dużymi walorami użytkowo-poznawczymi z ukierunkowaniem na numeryczne metody identyfikacji optymalnych rozwiązań infrastruktury drogowej.



### 3. Zakres rozprawy

Rozprawa doktorska mgr. inż. Wojciecha Danka składa się z dwóch zasadniczych części, a mianowicie części teoretycznej odniesionej do analizy i oceny stanu literatury, stosowanych modeli materiałowych oraz analizy norm dotyczących badania konstrukcji wsporczych (np. słupy oświetleniowe itp.). Druga część poświęcona jest badaniom numerycznym i eksperymentalnym. W części tej Autor przeprowadził badania materiałowe celem pozyskania stałych do modeli numerycznych, budowę modeli numerycznych, zasadnicze badania symulacyjne dla zadanych warunków zderzeń pojazdu z przeszkodą oraz badań eksperymentalnych dla słupa oświetleniowego wykonanego ze stopu aluminium. Łącznie praca liczy dziewięć rozdziałów, zawartych na 110 stronach, spisu materiałów źródłowych, liczącego łącznie 107 pozycji, wliczając strony internetowe. Układ tekstu rozprawy doktorskiej jest podzielony na logiczne i przejrzyste rozdziały.

Rozdział *pierwszy* jest wstępem, w którym Autor zamieścił wprowadzenie do pracy. W rozdziale tym Doktorant przedstawił opracowaną na podstawie raportów policji statystykę dotyczącą zderzeń pojazdów z elementami infrastruktury drogowej oraz krótki rys historyczny. W rysie historycznym ujął ewoluowanie się materiałów konstrukcyjnych z przeznaczeniem na budowę słupów oświetleniowych.

W rozdziale *drugim* Autor dokonał przeglądu literatury dotyczącej słupów oświetleniowych. Doktorant opisuje w nim normy dotyczące badania słupów oświetleniowych wraz z algorytmami umożliwiającymi wyznaczenie współczynników bezpieczeństwa biernego oraz przegląd pozycji literaturowych dotyczących modelowania, badań doświadczalnych oraz weryfikacji modeli przy zderzeniu pojazdu ze słupem oświetleniowym. Przegląd ten został ograniczony do meritum, czyli metodyki badań słupów oświetleniowych z pominięciem innych elementów infrastruktury drogowej.

W rozdziale *trzecim* Doktorant zawarł cel i zakres pracy. Za cel w pracy przyjął określenie wpływu grubości ścianki oraz położenia środka ciężkości słupa oświetleniowego na wartość współczynników bezpieczeństwa biernego w trakcie zderzenia pojazdu ze słupem oświetleniowym. Dodatkowo w tym rozdziale Autor określił zakres prac, jakie zostały zrealizowane oraz scharakteryzował narzędzia badawcze (oprogramowanie), jakimi się posługiwał w osiągnięciu założonego celu.

Rozdział *czwarty* odnosi się do obiektu badań. W niniejszym rozdziale Autor scharakteryzował geometrię słupa oświetleniowego oraz dokonał krótkiej charakterystyki struktury jego budowy wraz przypisaniem do określonej klasy prędkości zderzeniowej.

Rozdział *piąty* dotyczył identyfikacji parametrów modeli materiałowych. W części

wstępnej rozdziału Doktorant zaprezentował badania materiałowe celem określenia podstawowych charakterystyk materiału kompozytowego stosowanego do budowy słupów oświetleniowych. Badania realizował na maszynie wytrzymałościowej MTS Criterion Model 43 wraz z systemem cyfrowej korelacji obrazu 3D. Efektem tych badań było wyznaczenie krzywych w jednoosiowym stanie rozciągania materiału kompozytowego dla trzech kierunków ułożenia włókien (wzdłuż kierunku włókien, prostopadle do kierunku włókien oraz pod kątem 45°). Na podstawie badań doświadczalnych Autor wyznaczył parametry wytrzymałościowe układu kompozytowego, które w dalszej części pracy wykorzystał w modelach numerycznych. Pozostałe stałe materiałowe (materiał gruntu i charakterystyki stopu aluminium) dla modeli numerycznych zaczerpnął z literatury. W kolejnych częściach tego rozdziału przedstawił opis bibliotek materiałowych stosowanych modeli wraz z parametrami. Opis ten Autor odniósł dla następujących materiałów:

- grunt (MAT\_005 MAT\_SOIL\_AND\_FOAM),
- słup oświetleniowy aluminiowy (MAT\_024 PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY),
- słup oświetleniowy kompozytowy (MAT\_054 MAT\_ENHANCED\_COMPOSITE\_DAMAGE).

Dodatkowo przy opisie modelu materiałowego gruntu Doktorant przedstawił wpływ zagęszczenia gruntu na wartość współczynników bezpieczeństwa biernego w trakcie zderzenia pojazdu ze słupem oświetleniowym.

W rozdziale *szóstym* Doktorant zaprezentował sposób modelowania zderzenia pojazdu ze słupem oświetleniowym. Autor przedstawił modele dyskretne pojazdu i słupa oświetleniowego wraz z ich parametrami masowymi i podziałem na elementy skończone. Model pojazdu został zaadoptowany z biblioteki pojazdów udostępnionej przez National Crash Analysis Center (NCAC), który zmodyfikowano na potrzeby symulowania testów zderzeniowych. Słup oświetleniowy został zamodelowany ze wszystkimi jego elementami, a do jego dyskretyzacji zastosowano elementy powłokowe prostokątne. W celu dokładnego odwzorowania sytuacji zderzenia pojazdu ze słupem oświetleniowym, Autor osadził słup w gruncie, który dyskretyzował za pomocą elementów hexagonalnych. Dodatkowo w rozdziale tym przedstawił wyniki symulacji numerycznych zderzenia pojazdu ze słupem dla dwóch prędkości najazdu pojazdu 35 i 50km/h. Wyniki symulacji dla prędkości najazdu pojazdu 50km/h były porównywane z wynikami uzyskanymi z badań doświadczalnych. Zestawienie to przedstawił w postaci analizy ilościowej bazującej na porównaniu współczynnika bezpieczeństwa biernego ASI uzyskanego na podstawie badań doświadczalnych i symulacji numerycznych. W ujęciu jakościowym Autor porównał poszczególne chwile czasowe zderzenia. Dodatkowo Autor w celu przeprowadzenia dodatkowej weryfikacji



modelu numerycznego sprawdził wpływ zagęszczenia siatki elementów skończonych w strefie kontaktu na uzyskiwane wyniki.

W rozdziale *siódmym* Doktorant zawarł wyniki obrazujące zmianę wartości współczynników bezpieczeństwa biernego ASI oraz funkcji grubości ścianki słupa. W pierwszej części tego rozdziału Autor przedstawił sposób wyznaczania charakterystyk obciążeniowych konstrukcji słupa oświetleniowego. W tym rozdziale dokonał wyznaczenia minimalnej grubości ścianki słupa z wykorzystaniem symulacji numerycznej, z ogólnie przyjętą metodyką badań. Wartości współczynników bezpieczeństwa biernego w funkcji grubości ścianki analizował dla dwóch różnych prędkości najazdu pojazdu, tj. 35km/h i 50km/h. Obliczenia te Doktorant zrealizował na autorskim oprogramowaniu napisanym w środowisku MATLAB, które umożliwiło zmianę parametrów pliku wsadowego do oprogramowania LS-Dyna oraz uruchamianie solvera obliczeniowego w pętli.

Rozdział *ósmym* recenzowanej rozprawy doktorskiej podzielony został na dwa podrozdziały. W podrozdziale pierwszym Autor przedstawił wyniki badań doświadczalnych uzyskanych na stanowisku badawczym, opracowanym na potrzeby pracy. Badania doświadczalne realizował dla trzech obciążeń konstrukcji, celem uzyskania zmiany położenia środka ciężkości słupa oświetleniowego. Wyniki rejestrował z wykorzystaniem metod optycznych, które następnie poddał obróbce w oprogramowaniu TEMA Automotive. Badania ograniczył jedynie do pomiarów obciążeń na słupie wykonanym ze stopu aluminium. W podrozdziale drugim Autor zajął się optymalizacją położenia środka masy w korelacji współczynników bezpieczeństwa biernego ASI i THIV. Podał informację odnośnie stosowanych w dalszej części tego podrozdziału algorytmów genetycznych, niezbędnych do uruchamianie solvera obliczeniowego LS-Dyna. Dla określenia wpływu przyjętych zmiennych projektowych na wartości współczynników bezpieczeństwa biernego Doktorant przeprowadził analizę wrażliwości i na jej podstawie określił funkcję celu. Optymalizacji poddał słupy oświetleniowe wykonane ze stopu aluminium oraz z materiału kompozytowego.

W rozdziale *dziewiątym* rozprawy doktorskiej Autor dokonał podsumowania i sformułował wnioski. Dodatkowo wskazał część nowatorską i innowacyjną pracy oraz nakreślił dalsze kierunki badań.

#### **4. Ocena merytoryczna wyników pracy**

Praca pod względem merytorycznym przygotowana została prawidłowo. Materiał symulacyjny i doświadczalny jest obszerny. Kompozycja pracy jest logiczna, a kolejne rozdziały tworzą spójną i zwięzłą całość. Autor stopniowo wprowadza czytelnika w problematykę, od zagadnień podstawowych dotyczących badania konstrukcji

wsporczych, przygotowania modelu numerycznego wraz z opisem stosowanych modeli materiałowych, aż po zagadnienia bardziej złożone, takie jak wpływ grubości ścianki słupa, czy wpływ położenia środka ciężkości na wartości współczynników bezpieczeństwa biernego. Treść pracy jest podporządkowana wyznaczonemu celowi naukowemu.

Do głównych zalet i osiągnięć opiniowanej rozprawy należy zaliczyć:

- Na podstawie analizy istniejących rozwiązań konstrukcyjnych Doktorant określił parametry, które mogą wpływać na wartość współczynników bezpieczeństwa biernego oraz sprawdził, w jakim stopniu parametry przez niego wytypowane rzeczywiście wpływają na ich wartości.
- Autor dokonał obszernej analizy wpływu położenia środka ciężkości słupa oświetleniowego, w tym z wynikami uzyskanymi na stanowisku badawczym mającym symulować rzeczywiste zderzenia pojazdu ze słupem oświetleniowym, co jest ciekawym uzupełnieniem badań symulacyjnych, jednak jak zauważa sam Autor stanowisko to wymaga modyfikacji, aby uzyskane wyniki były bardziej zbliżone do rzeczywistych.
- Biegłe posługiwanie się przez Doktoranta nowoczesnymi narzędziami do prowadzenia symulacji numerycznych zjawisk dynamicznych, czego przykładem jest opracowanie autorskiego algorytmu umożliwiającego połączenia dwóch środowisk do obliczeń numerycznych (MATLAB i LS-Dyna).
- Umiejętne planowanie i prowadzenie badań doświadczalnych w tym zakresie.
- Bogaty dobór rysunków i zestawień uzyskanych wyników w postaci odpowiednich wykresów.
- Prawidłowe zestawienie wniosków i ich interpretacja zarówno z modeli numerycznych, jak i badań doświadczalnych.
- Możliwość wykorzystania wyników w praktyce.

Opisane w rozprawie doktorskiej oryginalne badania naukowe wskazują na dobrą znajomość przez Autora problematyki związanej z projektowaniem, modelowaniem jak i optymalizacją konstrukcji wsporczych urządzeń drogowych. Przedstawiony w pracy problem badawczy jest interesujący poznawczo i ważny ze względu na zastosowanie praktyczne. Dotyczy, bowiem istotnych zagadnień, związanych z poprawą bezpieczeństwa na drogach. Na korzyść Autora przemawia umiejętne omówienie i cytowanie bibliografii. Jej dobór przekonuje mnie o dużej dojrzałości naukowej autora, jego samodzielności i biegłym poruszaniu się w prezentowanym, w rozprawie zagadnień z obszaru poprawy bezpieczeństwa biernego infrastruktury drogowej.



## 5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne oraz redakcyjne

Po zapoznaniu się z treścią dysertacji przedłożonej do recenzji, chciałbym zwrócić uwagę na pewne uwagi krytyczne i kwestie dyskusyjne, do których Autor powinien się ustosunkować:

- Autor w swej rozprawie doktorskiej analizował materiał kompozytowy z przeznaczeniem na słupy oświetleniowe. W tabeli 3 s. 27 zestawiał charakterystykę właściwości mechanicznych wzmocnienia w postaci włókna szklanego typu E i osnowy na bazie żywicy poliestrowej. Natomiast w tabeli 4 s. 31 zestawiał uzyskane wyniki z badań eksperymentalnych materiału kompozytowego. Wyniki znacznie się różnią, co jest zrozumiałe. Niemniej zabrakło uszczegółowienia, w jaki sposób zostały przygotowane próbki (np.: ilość warstw, orientacja ułożenia warstw, gramatura, rodzaj osnowy, przesycenie wzmocnienia). Wymaga to komentarza.
- Na wykresie (rys. 26) s. 40 została zestawiona charakterystyka naprężenie-odkształcenie dla aluminium stosowanego na słupy oświetleniowe. Nie bardzo ta krzywa koreluje z charakterystyką uzyskaną w teście jednoosiowego rozciągania aluminium. Dla wartości naprężenia 200 MPa występuje nieciągłość. Skąd taka charakterystyka?
- Przedstawione porównanie wyników badań doświadczalnych i symulacji numerycznych (s. 49-50) dla poszczególnych chwil zderzenia zostało ujęte w orientacji z określonego profilu. Testy zderzeniowe są analizowane w profilu bocznym, co ułatwia późniejszą analizę wielkości kinematycznych. Czym było to podyktowane?
- Autor przedstawił w swojej pracy informację odnośnie modelu pojazdu opracowanego przez NCAC, który jest często adoptowany przez różnych autorów i w zależności od potrzeb bądź to upraszczany lub uszczegóławiany. Doktorant także posłużył się tym modelem wprowadzając jego modyfikację ze względu na specyfikę testów zderzeniowych. W dalszej analizie numerycznej zderzenia pojazdu ze słupem oświetleniowym zabrakło oceny wpływu uproszczeń modelu na uzyskane wyniki. Wymaga to komentarza.
- Doktorant przeprowadził dodatkową weryfikację modelu numerycznego poprzez zagęszczenie siatki elementów skończonych w strefie kontaktu. Na wykresie (rys. 32 s.48) przedstawiającym uzyskane wyniki jest informacja o zagęszczeniu siatki dwukrotnie lub czterokrotnie. Jak wykazał poprawia to współczynnik korelacji r-Pearsona. Rodzi się pytanie, przy jakiej wielkości zagęszczenia siatki elementów skończonych w strefie kontaktu wyniki będą satysfakcjonujące?

- W podsumowaniu (s. 107), ostatni akapit przed wnioskami Autor komentuje to w sposób następujący „Pomimo uzyskania wyników, które umożliwiają redukcję wartości współczynników bezpieczeństwa biernego, takie działania są nieopłacalne pod względem technologicznym, ponieważ będą zwiększały koszty transportu i późniejszego montażu w stopniu nieporównywalnie większym niż korzyści wynikające ze wdrożenia przedstawionego rozwiązania”. Wymaga to komentarza.
- W ostatnim wniosku (s. 109) Autor odnosi się do porównania wyników z symulacji a wynikami uzyskanymi na stanowisku badawczym, gdzie stwierdza, że stanowisko badawcze jest dużym uproszczeniem stąd wyniki są pięciokrotnie niższe. W takim przypadku, w jakim stopniu zaprojektowane stanowisko badawcze do optymalizacji położenia środka ciężkości słupa oświetleniowego może być wiarygodne?

Pod względem redakcyjnym praca zredagowana jest z właściwą systematyką rozwiązywanych zagadnień. W niektórych częściach pracy przyjęto styl żargonowy (jako naturalny w danej dziedzinie wiedzy), zastosowane skróty myślowe lub górnolotne sformułowania, podobieństwa oraz pewne fragmenty zapisów hermetycznych utrudniają właściwy odbiór treści. Czytając rozprawę często w niej występuje powtarzanie słów. Praca zawiera w swej kompozycji sporą ilość skrótów i wzorów matematycznych. Brak jest wykazu ważniejszych oznaczeń i skrótów, który powinien zostać umieszczony po spisie treści. Kolejna zasadnicza uwaga dotyczy redagowania wzorów matematycznych, co do których Autor powinien zastosować ogólnie przyjęte zasady, a mianowicie zmienne pisze się kursywą, natomiast stałe prosto. Pozostałe drobne uwagi i błędy redakcyjne zostały zaznaczone w tekście pracy i przekazane Autorowi, natomiast uwagi dyskusyjne pozwolę sobie przytoczyć:

- zapis na s. 63 „częstotliwość drgań własnych” należy zastąpić „częstość drgań własnych”,
- na rys. 22 s. 35 brakuje na osiach jednostek,
- w tabeli 7, s. 37 występuje błąd w nazwisku, powinien być „Moduł Kirchhoffa”, a nie jak napisał Autor „Moduł Kirkchoffa”,
- na rys. 24, s. 38 brak jest polskich znaków diakrytycznych w opisie wykresów oraz w słowie zagęszczony wkradła się literówka,
- na rys. 62, s. 79 można zaobserwować, że wykres nie zaczyna się w punkcie 0, tylko  $6e-16$ ,
- wykres rys. 84, s. 97 jest bez opisu osi układu współrzędnych,
- spis literatury powinien być wykonany jednolicie przyjmując określony styl bibliograficzny.



## 6. Ocena końcowa

Przedstawione przeze mnie uwagi krytyczne w ocenie merytorycznej mają jedynie charakter dyskusyjny, a uwagi redakcyjne wyłącznie charakter korektorski. Uwagi te w żadnym stopniu nie pomniejszają osiągnięć Doktoranta, co do uzyskanych bardzo wartościowych wyników naukowych i badawczych, lecz mają zwrócić uwagę na dalszą pracę i wyrobienie warsztatu naukowego, szczególnie w zakresie publicystycznym.

Oceniając ogólnie przedstawioną rozprawę doktorską, należy podkreślić aktualność jej tematyki wynikającą z ciągłego dążenia do zmniejszania liczby śmiertelnych wypadków na drogach. Zawiera ona elementy, które można uznać za oryginalny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna, a zwłaszcza w zakresie projektowania, symulowania oraz optymalizacji elementów infrastruktury drogowej.

Uważam, że opiniowana praca Pana mgr. inż. Wojciecha Danko cechuje się interdyscyplinarnym podejściem do symulacji oraz optymalizacji złożonych układów, w których występują zjawiska szybkozmiennne, zawiera oryginalne rozwiązanie sformułowanego problemu oraz ma duży potencjał aplikacyjny. Opracowane podczas realizacji niniejszej rozprawy algorytmy i programy komputerowe, a także sposób realizacji symulacji numerycznych i badań doświadczalnych świadczą o odpowiednim przygotowaniu doktoranta do prowadzenia samodzielnej działalności naukowo-badawczej.

Recenzowana praca spełnia wymogi odnośnie do przewodu doktorskiego, określone w **Ustawie z 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 późn. zm).**

Biorąc powyższe pod uwagę, wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.



.....