

Gdańsk, 23.05.2022r.

Prof. dr hab. inż. Waldemar Świdziński
Instytut Budownictwa Wodnego PAN
80–328 Gdańsk–Oliwa
Kościerska 7
Email:waldek@ibwpan.gda.pl

ADMINISTRACJA
Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki
03 CZE. 2022
Wpłynęło dnia.....
Nr.....**856**..... szt.

RECENZJA PRACY DOKTORSKIEJ
mgr inż. Mateusza Richtera pt.:

„Stateczność ciężkich maszyn roboczych pracujących na podłożu słabonośnym”

Promotor: dr hab. inż. Aleksander Urbański, prof. PK

1. Uwagi wstępne i charakterystyka pracy

Niniejszą recenzję wykonałem na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Krakowskiej z dnia 23.03.2022r. (pismo nr ŚO.520-532/2022/SMR).

Rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Richtera poświęcona jest coraz bardziej istotnemu problemowi, jakim staje się ocena stateczności ciężkich maszyn budowlanych na podwoziu gąsienicowym wykorzystywanych do stworzenia warunków, aby móc w sposób bezpieczny posadawiać konstrukcje lądowe na podłożu słabonośnym (poprzez jego wzmocnienie lub konstrukcje posadowienia pośredniego na palach). W dużym uogólnieniu, korzystając z rozwiązania numerycznego dla przypadku jednej gąsienicy (model 3D ½) Autor konstruuje uproszczony model aproksymacyjny rozwiązania numerycznego, a następnie model analityczny z rozwiązaniami zamkniętymi. Rozszerzając przypadek symetryczny na pełny przypadek trójwymiarowy, doktorant za pomocą modelu analitycznego wyprowadzonego dla przypadku symetrycznego jednej gąsienicy otrzymuje nomogramy krzywych interakcji podłoże gruntowe – platforma robocza – maszyna – wyznaczające dopuszczalną przestrzeń pary mimośrodów e_x , e_y , która pozwala na zachowanie stateczności maszyny gąsienicowej. W konsekwencja proponuje algorytm wspomagający proces projektowania platform roboczych.

Przedstawiona mi do oceny praca liczy ogółem 176 stron (w tym 156 stron zasadniczego tekstu), 104 rysunki, 15 tabel, 102 pozycje literatury oraz aneks zawierający 3 załączniki. Pracę podzielono na 6 rozdziałów, z których każdy ma kilka podrozdziałów. Każdy z głównych rozdziałów pracy został uzupełniony podsumowaniem, które znajduje się również na końcu pracy wraz z wnioskami końcowymi oraz spisem literatury. Pracę uzupełniają streszczenia w języku polskim, angielskim i niemieckim.

Pierwsze 2 z 6 rozdziałów (około 75 stron tekstu) stanowi wprowadzenie do tematu rozprawy i do zasadniczych wyników pracy Autora.

W pierwszym rozdziale Autor charakteryzuje podjęty przez niego problem badawczy. Przedstawia genezę pracy wskazując na nasilający się problem posadawiania konstrukcji na podłożu słabonośnym i wynikającej z tego potrzeby

wykorzystywania ciężkiego sprzętu budowlanego pracującego w bardzo trudnych warunkach gruntowych zagrażających bezpieczeństwu pracy i nierzadko prowadzących do awarii i katastrof budowlanych. Zwraca przy tym uwagę na rolę platform roboczych mających na celu poprawę tych warunków oraz na uwidaczniający się brak stosownych zasad projektowania takich konstrukcji, które jako tymczasowe (pomocnicze) są traktowane przez projektantów i inwestorów z nieodpowiednią inżynierską starannością. Kolejno w rozdziale tym Autor formułuje cel rozprawy doktorskiej opisując krótko zakres pracy oraz wykorzystywane metody i narzędzia badawcze jak też etapy realizacji badań, które zostały tabelaryzowane (Tabela 1), z podaniem rodzaju prowadzonych badań w poszczególnych etapach (teoretyczny, obliczeniowy). Pierwszy rozdział wieńczy sformułowanie tezy pracy oraz zwięzłe omówienie jej struktury.

W rozdziale drugim Autor dokonuje wszechstronnego przeglądu literatury dotyczącej dotychczasowych badań nośności podłoża gruntowego, zarówno jednowarstwowego jak i wielowarstwowego oraz stateczności ciężkich maszyn gąsienicowych (palownic, wiertnic, koparek, dźwigów, żurawi, itd.) pracujących na takim podłożu. Niezależnie w rozdziale tym Autor porusza takie tematy jak wymagania kwalifikacyjne operatorów ciężkich maszyn budowlanych, czy najczęstsze przyczyny awarii i katastrof budowlanych związanych z pracą ciężkiego sprzętu budowlanego. Najwięcej uwagi poświęcono jednak nośności podłoża gruntowego, przytaczając ogólnie znane w geotechnice rozwiązania osiągnięcia stanu granicznego w podłożu obciążonym fundamentem bezpośrednim, które dla podłoża jednowarstwowego bazują na propozycjach Prandtla i Terzagiego oraz ich kolejnych modyfikacjach. Przyjmuje przy tym założenie, że fundamentem bezpośrednim jest platforma robocza przekazująca obciążenia generowane przez ciężką maszynę budowlaną na gąsienicach. Podobne rozważania dotyczą podłoża wielowarstwowego, w ramach których Autor podaje znane rozwiązania szacowania nośności takiego podłoża o różnych konfiguracjach warstw słabych i mocnych bazujące na ogólnej metodzie stanów granicznych zarówno przy podejściu statycznym, jak i kinematycznym. Dodatkowo, dokonuje przeglądu wytycznych i poradników projektowania platform roboczych, stosowanych w różnych częściach świata. Zwraca przy tym uwagę na złożoność analizowanego problemu związanego z interakcją maszyna budowlana – platforma robocza – podłoże gruntowe i wynikającą stąd konieczność „...podjęcia próby zmierzającej do opracowania jednolitej teorii pozwalającej na stworzenie algorytmu projektowania platform roboczych”. Przedstawione w tym rozdziale znane metody obliczenia nośności podłoża gruntowego stanowiły dla Autora podstawę do sformułowań teoretycznych dotyczących nośności podłoża gruntowego pod obciążeniem gąsienicowej maszyny budowlanej. Rozdział ten jest bardzo szczegółowy i obszerny zajmując ponad jedną trzecią całości rozprawy.

W rozdziale trzecim Doktorant przedstawia teoretyczne podstawy zaproponowanego modelu analitycznego opisującego interakcję maszyny gąsienicowej – platformy roboczej i słabonośnego podłoża gruntowego bazując na rozwiązaniu numerycznym dla przypadku symetrycznego z jedną gąsienicą (Model 3D $\frac{1}{2}$), a następnie dla otrzymanego rozwiązania formułując upraszczające funkcje aproksymujące (tzw. Model aproksymacji), które stanowiły z kolei podstawę do opracowania podejścia analitycznego (tzw. Model analityczny). W konsekwencji wyniki modelu analitycznego zweryfikowano dla przypadku pełnego odpowiadającego rzeczywistej pracy maszyny budowlanej spoczywającej na platformie roboczej na dwóch gąsienicach (Model 3D).

Z kolei, w rozdziale czwartym zastosowano, omówioną w rozdziale trzecim, procedurę redukcji rozwiązania numerycznego do podejścia analitycznego dla rzeczywistej maszyny robocze reprezentowanej przez jedną z palownic firmy Bauer oznaczoną jako BG20H. Zagadnienie nośności podłoża gruntowego oraz stateczności maszyny rozwiązano dla dwóch modeli podłoża tj. tzw. modelu podłoża słabego składającego się z platformy roboczej spoczywającej na słabej warstwie glin, poniżej której znajdowała się warstwa piasku średniego oraz modelu podłoża mocnego bez warstwy gliny o niskich parametrach wytrzymałościowych.

Rozdział piąty został poświęcony przedstawianiu propozycji procedury projektowania platform roboczych w zależności od postawionego problemu: tj. znajomości właściwości podłoża gruntowego (nośności) i wyznaczania bezpiecznych wartości mimośrodów maszyny budowlanej nie powodujących utraty jej stateczności lub znajomości maksymalnych dopuszczalnych charakterystyk maszyny budowlanej i wyznaczania granicznej nośności podłoża gruntowego.

Z kolei rozdział szósty zawiera podsumowanie pracy wraz ze szczegółowymi wnioskami związanymi z informacją niezbędną do bezpiecznego projektowania platform roboczych.

2. Ogólna ocena pracy

2.1 Ocena aktualności tematyki

Gwałtowny rozwój budownictwa oraz infrastruktury drogowej i kolejowej obserwowany w ostatnich latach w naszym kraju wymusza sięganie po coraz to nowe tereny do zagospodarowania. W wielu przypadkach są to obszary, które wcześniej nie były rozpatrywane jako przydatne do lokalizacji w ich obrębie jakiegokolwiek infrastruktury budowlanej z uwagi na występujące tam grunty nieprzydatne do celów budowlanych tzw. grunty słabonośne (namuły, torfy, miękkoplastyczne gliny, itp.). Dotyczy to szczególnie obszarów silnie zurbanizowanych zlokalizowanych blisko centrów miast, gdzie ceny działek budowlanych są bardzo wysokie i potencjalnym inwestorom opłaca się ponieść duże koszty związane bądź to ze wzmocnieniem słabonośnego podłoża gruntowego bądź też z takim wyborem sposobu posadowienia, aby bezpiecznie przenieść obciążenia od projektowanych konstrukcji na podłoże gruntowe. W takich przypadkach wykorzystuje się ciężkie maszyny budowlane, których zadaniem jest np. instalacja pali w słabym podłożu, czy też jego wzmocnienie poprzez wykonanie np. kolumn żwirowych, zagęszczanie podłoża metodą wybuchów, czy też poprzez głębokie mieszanie gruntu (Deep Soil Mixing). Prace takie prowadzone są zazwyczaj z wykorzystaniem platform roboczych, które są niezbędnym elementem bezpiecznego przeniesienia obciążeń od ciężkiej maszyny budowlanej na słabe podłoże gruntowe, a zatem bezpiecznego wykonania zaplanowanych prac fundamentowych. Z uwagi na coraz trudniejszy dostęp do obszarów charakteryzujących się dobrymi właściwościami gruntów zalegających w podłożu gruntowym, takie podejście staje się coraz bardziej powszechne. Pomimo tego nie dopracowano się jednak głębszej analizy pracy układu ciężka maszyna budowlana - platforma robocza - słabonośne podłoże gruntowe. Jak słusznie zauważa Autor rozprawy, platformy robocze jako konstrukcje tymczasowe są często traktowane przez inwestorów, projektantów oraz generalnych wykonawców jako konstrukcje drugorzędne i poświęca się im mniej uwagi niż pozostałym konstrukcjom.

Niezależnie, analiza pracy rzeczywistej konstrukcji inżynierskiej poddanej złożonym stanom obciążenia, a szczególnie teoretyczna predykcja jej zachowania jest ciągle dużym wyzwaniem zarówno z naukowego jak i praktycznego punktu widzenia.

W chwili obecnej dysponujemy już bardzo zaawansowanymi narzędziami w postaci skomplikowanych modeli pracy materiału wraz z odpowiednimi kodami numerycznymi, które powinny stanowić dobrą bazę umożliwiającą nam prawidłowe odtworzenie pracy takich konstrukcji w warunkach in situ, choć czasami nie zawsze skutecznie. Jest to niezwykle ważne, gdyż pozytywny wynik konfrontacji predykcji teoretycznych z rzeczywistą odpowiedzią obiektu inżynierskiego umożliwia nam weryfikację poprawności przyjętych założeń i metod projektowych, zmierzając w konsekwencji do zapewnienia odpowiednich warunków bezpiecznej pracy takiego obiektu.

Nierzadko jednak, pomimo posiadania odpowiednich narzędzi numerycznych, skomplikowane zagadnienia pracy konstrukcji w warunkach rzeczywistych wymagają bardzo dużego nakładu obliczeniowego i związanego z nim czasu oraz kosztów, co uniemożliwia bezpośrednią implementację takiego podejścia do praktyki projektowej. Niezwykle cenne i efektywne dla projektantów stają się wówczas wszelkiego rodzaju nomogramy bazujące na rozwiązaniach teoretycznych oraz symulacjach numerycznych obejmujących szereg najbardziej typowych i powszechnych przypadków, z jakimi może zetknąć się projektant rozwiązując rzeczywiste zagadnienia.

Dlatego też należy jednoznacznie stwierdzić, że podjęta przez Doktoranta tematyka pracy jest jak najbardziej aktualna i ważna zarówno z poznawczego jak i praktycznego punktu widzenia, w szczególności w chwili obecnej, gdzie zarówno w krajowej jak i światowej praktyce projektowej brakuje zasad projektowania platform roboczych w oparciu o dobrze postawione zagadnienie teoretyczne.

2.2 Ocena pracy

W pracy Autor podjął się oryginalnego zadania oceny stateczności ciężkiej maszyny budowlanej na podwoziu gąsienicowym spoczywającej na platformie roboczej jako elementu przenoszącego obciążenia od maszyny na słabonośne podłoże gruntowe za pomocą trójwymiarowej symulacji komputerowej (wykorzystującą metodę elementów skończonych) uwzględniającą interakcję dwóch ośrodków: ciężkiej maszyny budowlanej oraz podłoża słabonośnego. Oceny tej dokonał poprzez początkowe rozprzęgnięcie problemu na składowe cząstkowe: maszyna budowlana (ocena wpływu mimośrodowo obciążenia na stateczność maszyny), platforma robocza (wyznaczenie nośności granicznej platformy), słabe podłoże (wyznaczenie nośności granicznej podłoża uwarstwionego). Po otrzymaniu indywidualnych rozwiązań dla zdekomponowanych elementów dokonał ich ponownej kompozycji.

Zgodnie z punktem 1.2 pracy, Autor rozprawy postawił sobie dwa główne cele: teoretyczny i praktyczny.

Cel teoretyczny związany był z rozpoznaniem mechanizmu utraty stateczności ciężkich maszyn gąsienicowych pracujących na gruntach słabonośnych. Natomiast cel praktyczny to weryfikacja możliwości zastosowania założeń i rozwiązań teoretycznych do praktycznego projektowania platform roboczych. Ten drugi cel Autor zdefiniował za pomocą dwóch zagadnień tj. znając podstawowe parametry maszyny budowlanej określenia dla niej maksymalnych wartości prędkości i przyspieszeń dla danego podłoża gruntowego oraz wyznaczania parametrów platformy roboczej. Niezależnie, w rozdziale 1.3 dotyczącym zakresu pracy Autor konkluduje, że „podstawowym wynikiem pracy jest stworzenie propozycji procedury projektowej”, co zdaniem recenzenta również było podstawowym celem podjętej tematyki badawczej.

Na podstawie przyjętej procedury badawczej oraz założonych metod i narzędzi badawczych związanych wyłącznie z pracą studialną (rozważania teoretyczne oraz symulacje numeryczne) Autor starał się udowodnić postawioną we wstępie rozprawy podstawową tezę pracy zakładającą, że „...zapropozowany algorytm projektowania platform roboczych może być wykorzystany przez projektantów w celu projektowania platform roboczych, które bezpośrednio wpłynę na zwiększenie bezpieczeństwa na placach budowy poprzez zapobieganie awariom i katastrofom związanych z utratą stateczności ciężkich maszyn roboczych”.

Analiza recenzowanej pracy doktorskiej skłania do generalnego wniosku, że dla osiągnięcia obu celów pracy oraz udowodnienia jej tezy Autor opracował bardzo szczegółową i wyczerpującą metodykę z trafnie zidentyfikowanymi i zdefiniowanymi celami cząstkowymi.

Należy w tym miejscu jednak wyraźnie zaznaczyć, że praca ma charakter wybitnie teoretyczno-numeryczny bez jakiegokolwiek elementu fizycznego eksperymentu. Co prawda, w rozdziale 1.4 omawiającym bardzo krótko zastosowane przez Autora metody i narzędzia badawcze pisze on, że najlepszym sposobem oceny stateczności ciężkich maszyn budowlanych byłoby przeprowadzenie serii eksperymentów w warunkach rzeczywistych dla różnych maszyn i rodzajów podłoża gruntowego, niemniej jednak z uwagi na wysokie koszty oraz rodzaj testów (katastrofa kontrolowana) odstąpiono od takiej próby. Brak części eksperymentalnej nie umniejsza jednak znacząco wartości merytorycznej pracy.

Rozdziały od 1 do 2

Jak już pisano we wstępnym rozdziale recenzji, pierwsze dwa rozdziały poświęcone zostały zdefiniowaniu i omówieniu postawionego we wstępie pracy problemu stateczności ciężkiej maszyny budowlanej pracującej na słabonośnym podłożu gruntowym oraz przyjętym przez Autora podejściu do rozwiązania tego problemu. Najwięcej uwagi doktorant poświęcił szczegółowemu przeglądowi literatury zawartemu w najobszerniejszym rozdziale drugim. Przeglądu tego dokonał dekomponując wszystkie trzy elementy układu: maszyna budowlana, platforma robocza oraz podłoże gruntowe, których interakcję starał się opisać zaproponowanymi przez siebie modelami. W przypadku maszyny budowlanej Autor poprawnie identyfikuje podstawowe obciążenia powstałe podczas pracy tego urządzenia definiując jego model fizyczny przyjęty do dalszych rozważań jak też potencjalne mechanizmy utraty stateczności maszyny (jej wywrócenia). Podaje przy tym wymagania kwalifikacyjne jakie powinni mieć operatorzy ciężkich maszyn budowlanych, co wydaje się być zbędne na tym etapie pracy. Podobnie definiuje platformę roboczą oraz podaje zalety jej stosowania dla wszystkich aktorów procesu budowlanego. Przy tej okazji omawia szczegółowo podstawowe przyczyny występowania awarii i katastrof podczas robót budowlanych związanych z pracą ciężkich maszyn przytaczając przykłady rzeczywistych katastrof.

Najbardziej szczegółowo i obszernie zostały omówione metody obliczania nośności granicznej podłoża gruntowego, zarówno jednorodnego jak też zbudowanego z kilku warstw gruntu o różnych właściwościach wytrzymałościowych. Autor przyjął przy tym, że z uwagi na niewielką ilość zidentyfikowanych mechanizmów zniszczenia dla platformy roboczej lub znajdującego się pod nią podłoża słabonośnego, do dalszej analizy zostaną przyjęte standardowe rozwiązania jak dla fundamentu bezpośredniego (ława lub stopa fundamentowa). **Takie podejście należy uznać, choć przeprowadzenie prostych badań modelowych odzwierciedlających**

rzeczywistą pracę platformy roboczej byłoby cennym uzupełnieniem stanu wiedzy w tym temacie, jak też znacznie wzbogaciłoby samą pracę i wkład Autora.

Niemniej jednak, pomimo tego, że przytoczone rozwiązania są ogólnie znane i powszechnie stosowane w świecie geotechniki należy podkreślić dużą staranność Autora w ich przytaczaniu, uwzględnienie zarówno rozwiązań bazujących na podejściach empirycznych jak też rozwiązaniach numerycznych, analizie i przytoczeniu rozwiązań stosowanych dla celów wojskowych i logiczny układ opisywania poszczególnych metod. Na plus należy również odnotować analizę poszczególnych rozwiązań dla fundamentu bezpośredniego w odniesieniu do pracy platformy roboczej.

Przegląd literatury wieńczy analiza prowadzonych aktualnie w Polsce i na świecie prac badawczych dotyczących platform roboczych oraz wytycznych zawartych zarówno w obowiązujących standardach budowlanych (Eurokody, Geoguides) jak też promowanych przez różne organizacje i stowarzyszenia techniczne. Podsumowując ten rozdział Autor konkluduje, że nie ma jednolitej, ogólnodostępnej i sprawdzonej na przestrzeni lat metody projektowania platform roboczych, co rodzi konieczność opracowania teorii pozwalającej na sformułowanie takiej metody, a więc realizacji celu i tezy pracy. W tym miejscu należy również podkreślić bardzo wnikliwe przeanalizowanie istniejących podejść do projektowania platform roboczych, które argumentują podjęcie tematyki badawczej recenzowanej rozprawy.

Należy jeszcze raz podkreślić, że pomimo, iż zawarte w omawianym rozdziale informacje oraz przytaczane związki są znane i dobrze opisane w literaturze tematu, porządkujący sposób ich przedstawienia oraz wyczerpujący charakter świadczą o tym, że Doktorant sprawnie porusza się w podstawach podjętej przez siebie tematyki.

Rozdziały od 3 do 6

Rozdział 3 pracy rozpoczyna zasadniczą część rozprawy, gdzie Autor szczegółowo opisuje procedurę jaką przyjął, aby osiągnąć postawiony przez siebie cel tj. zastąpienia czasochłonnych obliczeń numerycznych do oceny stateczności ciężkiej maszyny budowlanej na gąsienicach pracującej na słabonośnym podłożu gruntowym przez formy analityczne reprezentowane przez nomogramy, łatwe do wykorzystania w praktyce projektowej. Procedura to polega na rozwiązaniu numerycznym zagadnienia symetrycznego (układu maszyny z jedną gąsienicą zakładając symetryczność zagadnienia względem osi podłużnej maszyny – tzw. Model 3D 1/2), aproksymacji wyników rozwiązania za pomocą funkcji aproksymacyjnych (tzw. Model aproksymacji), a następnie rozwiązania analitycznego problemu interakcji maszyna - podłoże gruntowe (zwanego dalej „Modelem analitycznym”). Końcowym efektem jest opracowanie krzywych interakcji dla momentów w dwóch kierunkach i ciężaru maszyny.

Model analityczny został opracowany zamieniając rzeczywisty model maszyny gąsienicowej na model fizyczny zarówno dla podejścia statycznego jak i kinematycznego. Oceniając ten fragment pracy należy stwierdzić, że założenia przyjęte przez Autora zarówno dotyczące samej maszyny budowlanej (traktowanej jako bryła sztywna) oraz podłoża gruntowego obejmujące całe spektrum jego reakcji od sztywnej, poprzez sprężystą, sztywno-plastyczną, a na sprężysto-plastycznej kończąc, jak też przyjęcie elementów typu „interface contact” dla modelowania odrywania się gąsienicy od podłoża, są właściwe.

Należy również podkreślić, że pomimo dość prostych schematów statycznych i kinematycznych opisujących model analityczny pracy maszyny

budowlanej doktorant sprawnie radzi sobie z teoretycznym sformułowaniem zagadnienia jak też z układami równań równowagi oraz ruchu trafnie je formułując i rozwiązując.

Kolejno, Autor rozwiązuje zagadnienie numeryczne przypadku interakcji pojedynczej gąsienicy z podłożem gruntowym (Model 3D $\frac{1}{2}$), a wyniki poddaje procesowi aproksymacji otrzymując przybliżenia wyników symulacji w postaci zamkniętych wzorów na funkcję kąta obrotu gąsienicy i przemieszczenie pionowe jej środka. Kolejno, korzystając z równań modelu analitycznego Autor tworzy krzywe interakcji dla różnych wartości kąta obrotu gąsienicy będące przestrzenią wartości mimośrodków wzdłużnego i poprzecznego powstałych podczas pracy maszyny budowlanej, wyznaczające przy tym dopuszczalny zakres bezpiecznej pracy maszyny. Tutaj również należy uznać właściwe podejście, choć niektóre fragmenty nie są wystarczająco jasno opisane i przedstawione, gdzie chociażby spore utrudnienie w zrozumieniu postępowania Autora sprawia bardzo duża ilość symboli o podobnym charakterze (np. opisy różnego rodzaju mimośrodków z różnymi indeksami i wyróżnikami), czy też np. interpretacja Rys. 57, który wymaga dodatkowego objaśnienia.

Główną część rozprawy będącą podstawowym elementem realizacji celu jakim było opracowanie przybliżonej metody opisu interakcji maszyny budowlanej i podłoża gruntowego stanowi rozdział 3.4. W rozdziale tym, korzystając z rozwiązania Modelem 3D $\frac{1}{2}$ i przybliżeniu analitycznym charakterystyk Autor poszukuje analitycznych rozwiązań dla statycznego schematu pracy gąsienicy na podłożu gruntowym opisanym różnymi modelami w zależności od charakteru kontaktu gąsienicy z podłożem (reakcji sprężystej i sprężysto-plastycznej z odrywaniem lub bez). Ostatecznie otrzymuje zamknięte wzory opisujące zależność kąta obrotu gąsienicy oraz przemieszczenia pionowego w funkcji nośności podłoża gruntowego dla danej wartości mimośrodu i siły działającej na gąsienicę. Kolejno, rozszerzając rozwiązanie przypadku jednej gąsienicy na współdziałanie obu gąsienic, Autor otrzymuje krzywe interakcji maszyna budowlana – podłoże gruntowe dla różnych wartości tzw. współczynnika wykorzystania całkowitej nośności podłoża gruntowego. Zwieńczeniem tej części jest analiza przypadku pracy obu gąsienic w różnych warunkach gruntowych, charakteryzujących się różną nośnością podłoża i krzywe interakcji taki przypadek odzwierciedlające.

Podsumowując tę część pracy Recenzent nie zgłasza większych zastrzeżeń, choć pomimo dużej staranności w wyprowadzaniu kolejnych zależności tu również zdarzają się Autorowi miejsca, które z uwagi na brak definicji coraz to nowo wprowadzanych oznaczeń, stają się mało czytelne patrz np. wzór 163 i wprowadzony parametr N).

Kolejny rozdział pracy (Rozdział 4) poświęcony został weryfikacji przyjętych założeń oraz zaproponowanej procedury uproszczenia modelowania interakcji: maszyna budowlana - podłoże gruntowe dla przypadku rzeczywistej pracy maszyny reprezentowanej przez palownicę firmy Bauer o symbolu BG20H/BT60 w przestrzeni trójwymiarowej (Model 3D). Do analizy Autor przyjął dwa rodzaje podłoża gruntowego oznaczając je jako tzw. słabe (z wkładką warstwy w pełni nasyconej gliny znajdującą się w warstwie piasków średnich) oraz tzw. mocne – bez wkładki glin. Dla parametrów geometrycznych i masowych takiej maszyny Autor wykonał obliczenia modelem 3D $\frac{1}{2}$ wyznaczając krzywe aproksymacji (obrót gąsienicy i przemieszczenie pionowe) i porównując je z wynikami otrzymanymi z symulacji numerycznych. Następnie, stosując model analityczny bazujący na wyznaczonych krzywych aproksymacyjnych otrzymane wyniki skonfrontował z wynikami uzyskanymi modelem numerycznym 3D $\frac{1}{2}$. W obydwu przypadkach zgodność podejścia przybliżonego z symulacjami

numerycznymi, zarówno pod względem jakościowym jak i ilościowym, była dobra, miejscami bardzo dobra. Wyznaczone podejściem uproszczonym zależności funkcji kąta obrotu oraz przemieszczenia pionowego środka gąsienicy maszyny od wartości mimośrodowo dobrze aproksymowały wyniki obliczeń numerycznych, choć dało się zaobserwować lepsze dopasowanie w przypadku podłoża słabego niż mocnego. Prosiłbym Autora o próbę wyjaśnienia tych różnic.

Weryfikacji poprawności zaproponowanej procedury Autor dokonał porównując dotychczasowe wyniki z wynikami symulacji numerycznych przeprowadzonymi pełnym modelem trójwymiarowym (model 3D). Symulacje te przeprowadził dla trzech rodzajów podłoża gruntowego: słabego, mocnego i bardzo słabego oraz siedmiu wariantów wielkości par momentów wynikających z kąta obrotu nadwozia palownicy. Na tej podstawie wyznaczył krzywe interakcji maszyny i podłoża gruntowego zakładając osiągnięcie maksymalnego momentu wywracającego odpowiadające stanowi granicznemu podłoża gruntowego (uplastycznieniu). Analiza porównawcza wskazuje na dobrą zgodność jakościową krzywych iteracji otrzymanych na podstawie podejścia analitycznego w porównaniu z krzywymi uzyskanymi pełnym modelem trójwymiarowym, ale nieco gorszą – ilościową. Ta druga pogarsza się wraz ze „słabością” podłoża gruntowego. Należy żałować, że Autor nie pokusił się o próbę wytłumaczenia takiego stanu rzeczy, jak również o próbę oceny błędu. Recenzent będzie oczekiwał ustosunkowania się do powyższych uwag.

Cennym elementem pracy jest propozycja praktycznej procedury projektowej platform roboczych, którą Autor rozprawy opisał zwięźle w 5 rozdziale pracy. Propozycja ta ma charakter wariantowy w zależności od tego, co jest celem projektu tj. dopuszczalne wartości mimośrodków dla danej nośności podłoża gruntowego i maszyny budowlanej, czy też jaka powinna być nośność podłoża przy założonych maksymalnych momentach i masie maszyny.

Podsumowując należy stwierdzić, że przyjęte w pracy cele główne tj. teoretyczne rozpoznanie mechanizmu utraty stateczności ciężkich maszyn gąsienicowych pracujących na gruntach słabonośnych, jak też weryfikacja możliwości zastosowania założeń i rozwiązań teoretycznych do praktycznego projektowania platform roboczych **zostały przez Doktoranta zrealizowane, a wynikająca z nich teza pracy, udowodniona.**

3. Uwagi krytyczne

Jak już wcześniej pisałem praca została wykonana kompleksowo, ujmując w zasadzie wszystkie te elementy, które powinny posłużyć do realizacji postawionych celów i udowodnienia tezy pracy. Czytając ją gruntownie nie znalazłem większych uchybień zarówno w przedstawieniu tematyki pracy, podejściu teoretycznym, jak też w obszarze szczegółowej realizacji celów.

Niemniej jednak pozostaje u mnie niedosyt związany z praktycznie całkowitym pominięciem sfery eksperymentalnej. Argumentacja Autora o tym, że przeprowadzenie kompleksowych testów w warunkach rzeczywistych wykorzystując różne maszyny budowlane pracujące na różnych rodzajach podłoża gruntowego i doprowadzając je do utraty stateczności byłaby najbardziej miarodajna, jest niezwykle naiwna, gdyż kompletnie nierealna. Jak już wspominałem, w zamian tego, zdecydowanie bardziej pożądanym byłoby przeprowadzenie prostych badań modelowych odzwierciedlających rzeczywistą pracę platformy roboczej. Wówczas weryfikacja

przyjętej procedury upraszczającej ocenę stateczności maszyny budowlanej byłaby znacznie pełniejsza.

Mam też spore zastrzeżenia do sformułowania samej tezy pracy, która oryginalnie brzmi: tezą pracy jest założenie, że zaproponowany algorytm projektowania platform roboczych może być wykorzystany przez projektantów w celu projektowania platform roboczych, które bezpośrednio wpłynę na zwiększenie bezpieczeństwa na placach budowy poprzez zapobieganie awariom i katastrofom związanych z utratą stateczności ciężkich maszyn roboczych. Z formalnego punktu widzenia założenie nie może być tezą pracy. Założenie jest założeniem, a teza pracy powinna być konsekwencją przyjętego celu, w postaci jego udowodnienia, zanegowania lub wniosku płynącego z jego realizacji (np. zasadności wykorzystywanych narzędzi do rozwiązania jakiego problemu badawczego). Czasami rozprawy nie muszą mieć tezy. W tym przypadku znacznie lepiej teza ta brzmiałaby: zaproponowany algorytm projektowania platform roboczych może być skutecznym narzędziem do ich projektowania znacznie ograniczając niebezpieczeństwo wystąpienia awarii i katastrof na placach budów związanych z utratą stateczności ciężkich maszyn roboczych.

Kolejna uwaga krytyczna dotyczy ostatniego fragmentu pracy poświęconego weryfikacji przyjętej procedury poprzez porównanie wyników z modelu analitycznego z wynikami pełnej trójwymiarowej symulacji komputerowej dla warunków pracy rzeczywistej maszyny budowlanej. Zwieńczeniem tego porównania jest Rys. 95, na którym Autor przedstawia porównanie krzywych interakcji otrzymanych dwiema metodami. Choć jak pisałem zgodność jakościowa jest dobra zarówno co do kształtu krzywych, jak też ich położenia w zależności od rozpatrywanego podłoża gruntowego, to jednak ilościowa już taka dobra nie jest. Niestety, pomimo że jest to w zasadzie najważniejszy rysunek w całej pracy, pokazujący na ile udało się Autorowi osiągnąć założony cel pracy, to nie znalazłem w niej dokładniejszej analizy porównawczej oraz próby wytłumaczenia powstałych różnic, które są największe dla podłoża najslabszego, a takie szczególnie wymaga odpowiedniego podejścia, z punktu widzenia zapewnienia bezpiecznej pracy maszyny roboczej. Na plus w tym przypadku należy uznać, że podejście analityczne prognozuje mniejsze wartości dopuszczalnych mimośrodów, a więc jest bardziej konserwatywne zawężając obszar bezpiecznej pracy.

Zastanawia mnie również, dlaczego jako grunt słaby została przyjęta warstwa gliny nienasyconej charakteryzowana wartością wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez drenażu, a nie np. namuł, czy torf, który jest typowym reprezentantem podłoża słabonośnego wymagającego wzmocnienia, a który ma znacznie niższy moduł odkształcenia oraz parametry wytrzymałościowe. Czy i w takim przypadku proponowana procedura byłaby pozytywnie zweryfikowana?

Jeśli chodzi o drobniejsze uwagi, to na str. 78 podając założenia Autor pisze, że „W przypadku podłoża przepuszczalnego (niespoistego) stosowany jest model, który charakteryzują dwa parametry wytrzymałościowe: kąt tarcia wewnętrznego i spójność. Proszę wyjaśnić, o jaką spójność w tym przypadku chodzi?. Z kolei na str. 120 współczynnik parcia bocznego w spoczynku (K_0) dla platformy roboczej przyjęto równy 2.0. Czy rzeczywiście w przypadku zagęszczonego piasku możemy mówić o dwa razy większych naprężeniach bocznych w stosunku do pionowych?.

Szereg innych uwag i wątpliwości zawarłem w komentarzach dołączonych do tekstu rozprawy, który przekazałem Autorowi.

Jeśli chodzi o układ pracy to rzuca się przede wszystkim w oczy mocne „przeładowanie” w rozdziale związanym z przeglądem literatury. Jest to tym bardziej dokuczliwe, że przegląd ten dotyczy dobrze znanych od wielu lat metod wyznaczania

nośności granicznej podłoża gruntowego. Natomiast w zasadniczej części pracy zawartej w rozdziałach 3 i 4, czytelny jej układ jest zaciemniany mieszaniami opisów teoretycznych, czasami nazywanych analitycznymi, z rozważaniami opartymi na symulacjach numerycznych. Nie pozwala to na płynne śledzenie przyjętej koncepcji pracy, opisanej we wstępie.

Dodatkowo, ilość stosowanych oznaczeń, symboli i zmiennych, czasami się dublujących uniemożliwia swobodne śledzenie wyprowadzeń i wywodów Autora. Jednym z przykładów mogą być tutaj podobne do siebie oznaczenia definiujące różnego rodzaju kąty (symbol Φ używany jako funkcja kąta obrotu, symbol φ jako wartość kąta obrotu, natomiast symbol ϕ opisujący kąt tarcia wewnętrznego materiału niespoistego), czy też mimośrodę opatrzone różnego rodzaju indeksami oraz dodatkowymi oznaczeniami (tylda, daszek, kreska, itd.).

4. Uwagi natury redakcyjnej, drobne uchybienia

Praca jest napisana poprawnym pod względem stylistycznym językiem, komunikatywnym, dobrze przekazującym uporządkowane myśli Autora, który sprawnie porusza się w realizowanej tematyce. Co jednak najbardziej kuleje w sferze redakcyjnej, to gramatyka związana ze zdecydowanym brakiem stawiania przecinka, przed wszelkiego rodzaju odmianami zaimka przymiotnego „który”. Ilość miejsc, gdzie tego znaku brakuje jest tak duża, że odstąpiłem od ich przytaczania w recenzji, natomiast umieściłem je w poprawionym tekście, który załączam do niemniejszej recenzji w wersji elektronicznej. Nie zmienia to wartości merytorycznej pracy, aczkolwiek w dużym stopniu utrudnia jej płynne czytanie.

W tekście jest bardzo niewiele drobnych uchybień językowych. Poprawki i uwagi, w formie komentarzy, również zamieściłem w tekście pracy.

Nie ma odniesienia w tekście pracy do cytowanej pracy de Borst i Groen, która ma oznaczenie pozycji [8]. Pod tą pozycją jest natomiast Polska Norma PN-EN 16228-2.

5. Wniosek końcowy

Mgr inż. Mateusz Richter przedstawił jako rozprawę doktorską pracę zawierającą oryginalne wyniki i poszerzającą wiedzę na temat potencjalnych mechanizmów utraty stateczności maszyny budowlanej na podwoziu gąsienicowym pracującej na platformie roboczej usytuowanej na słabonośnym podłożu gruntowym oraz zaproponował uproszczoną procedurę projektowania takiej platformy w oparciu o opracowane przez siebie nomogramy, które mogą być użyteczne w praktyce projektowej. Lektura pracy wskazuje na dobre predyspozycje Autora w zakresie wykonywania samodzielnych prac naukowych o charakterze głównie teoretycznym oraz modelowania numerycznego. Wyniki przedstawione w rozprawie są bardzo interesujące zarówno z naukowego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia. Na podkreślenie zasługuje szczególnie ten drugi aspekt, gdyż opracowana przez doktoranta procedura umożliwi unikanie czasochłonnych i skomplikowanych, a zarazem kosztownych obliczeń numerycznych, a tym samym mało efektywnych przy projektowaniu platform roboczych.

Wobec powyższego stwierdzam, że **recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Mariusza Richtera spełnia w pełni wymogi stawiane pracom doktorskim w myśl Ustawy 595 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w**

zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z dnia 14 marca 2003 roku z późniejszymi zmianami).

Rozprawa stanowi oryginalną propozycję rozwiązania i rozwinięcia problemu naukowego oraz wykazuje dostateczny poziom wiedzy teoretycznej kandydata w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Tym samym wnoszę o dopuszczenie jej Autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized initial 'S' followed by a horizontal line and a small circle at the end.

Waldemar Świdziński