

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Zabielskiego:

“Model symulacji propagacji naprężeń w glebie generowanych przez opony maszyn rolniczych”

Informacje ogólne

Rozprawa doktorska, wydana jest w formie książkowej o objętości 114 stron. Praca dotyczy ważnego, często podejmowanego przez badaczy, zagadnienia zagęszczania gruntu przez koła maszyn rolniczych. Jest to jeden z najistotniejszych problemów w technice rolniczej. Koła te są z reguły ogumione, ogumieniem pneumatycznym, stąd Autor ogranicza swą pracę do tego rodzaju kół. Zagęszczanie gruntu wywołane jest głównie obecnością naprężeń ściskających, stąd Autor zajął się właśnie problemem obliczania ich rozkładu i ich wglębną propagacją. Treść pracy podzielono na 8 rozdziałów, w ramach których Autor omawia kolejno: stan zagadnienia w świetle bogatej literatury, stawia problem badawczy i hipotezy z nim związane, a następnie ten problem rozwiązuje za pomocą nowoczesnych narzędzi CAD, weryfikując wyniki obliczeń teoretycznych w specjalnie konstruowanym eksperymencie.

Praca zawiera streszczenia w j. polskim i angielskim, spis oznaczeń, bogatą bibliografię oraz trzy załączniki z wynikami obliczeń teoretycznych.

Można stwierdzić, że układ pracy jest poprawny, typowy dla prac dysertacyjnych, a redakcja pracy i jej forma graficzna są zgodne z wymaganiami stawianymi pracom doktorskim a nawet w zakresie formy edytorskiej je przekraczają.

Także podejmowana w pracy problematyka zagęszczania gruntu przez maszyny rolnicze, pomimo dużej ilości dotąd wykonanych prac naukowych w tej dziedzinie jest wciąż aktualna gdyż ze względu na dużą złożoność i zmienność ośrodka gruntowego dotychczasowe rozwiązania teoretyczne są dalekie od doskonałości.

Szczegółowa analiza treści pracy

W rozdziale dotyczącym analizy dotychczasowego stanu zagadnienia przedstawiono na wstępie krótki rys historyczny rozwoju badań dotyczących zagęszczania gruntu przez koła maszyn. Wielki wkład tę dziedzinę wiedzy wnieśli tu polscy uczeni, tacy jak Sołtyński, Kanafojski, Bernacki czy Haman, a przede wszystkim pracujący za granicą uczonego polskiego pochodzenia, Bekker. Autor w wielkim skrócie przedstawia wybrane elementy teorii układu pojazd - teren. Niejasny jest tu dla mnie, przytoczony z literatury, podział odkształcenia gruntu na jakościowe i ilościowe. Zwykle odkształcenia dzieli się na postaciowe, liniowe i objętościowe, które mogą być sprężyste lub nieodwracalne. Jakościowy lub ilościowy może być jedynie opis jakiegoś procesu lub przedmiotu. Przyпускаjąc, że Autor pod nazwą odkształcenie jakościowe ma na myśli zmianę struktury gruntu pod wpływem naprężeń. Zmiana ta może być opisana jakościowo lub ilościowo. W części tej brak jest jednak informacji dotyczących najnowszych badań z wykorzystaniem metody elementów dyskretnych i brzegowych, które w ostatnich latach podjęło wielu autorów aby obejść ograniczenia metody elementów skończonych. Autor sięga natomiast dość głęboko w

przeszłość, m. in do prac już historycznych Frohlich'a, za którym cytuje rysunek 2. Na rysunku tym jako rozłączne kategorie występują: zagęszczenie i odkształcenie gleby. Jak wyżej sygnalizowano, zgodnie z terminologią przyjętą w mechanice ośrodków ciągłych, odkształcenie może być liniowe, postaciowe lub objętościowe. Zagęszczenie, którego istotą jest zmiana objętości właściwej gruntu może być zatem klasyfikowane jako odkształcenie objętościowe. Podatność na objętościowe odkształcenie gruntu jest określona przez tzw. edometryczny moduł ściśliwości. Z ogromnego dorobku mechaniki gruntu Autor cytuje - z konieczności ograniczenia objętości pracy - jedynie przykładowe wyniki eksperymentów, m. in krzywych konsolidacji wybranych gruntów. Warto byłoby też tutaj poszerzyć ważny dla pracy rozdział dotyczący modeli reologicznych gruntu. Autor ogranicza się w nim jedynie do podania powszechnie znanego modelu Coulomba Mohra. Cenne i pouczające jest natomiast dokonane w pracy syntetyczne zestawienie prostych modeli matematycznych rozkładu naprężenia normalnego w gruncie pod kołami maszyn, podawanych przez różnych autorów. Ta różnorodność wskazuje, że zagadnienie to nie zostało przez naukę jednoznacznie wyjaśnione. Wzory te jednak trudno odczytać, gdyż występują w nich oznaczenia nie wykazane w spisie oznaczeń na początku pracy ani nigdzie indziej. W kolejnej części pracy autor opisuje budowę ogumienia ciągników i maszyn rolniczych, koncentrując się na wyznaczaniu pola kontaktu opony z gruntem.

W przypadku miękkiego podłoża zagadnienie jest skomplikowane, gdyż nie można tu pomijać trzeciego wymiaru, czyli głębokości i rozkładu nacisków na tym polu. Jest to zatem nie płaska figura geometryczna, ale złożona powierzchnia 3D. Dalej Autor omawia klasyczną, szeroko cytowaną w literaturze metodę obliczania rozkładu naprężeń w gruncie opartą na superpozycji rozkładów naprężeń od sił skupionych wyznaczanych według przybliżonej metody opracowanej przez Boussinesq'a.

W kolejnej części Autor przechodzi do krótkiego opisu historii rozwoju metody FEM, która obecnie jest dominującą uniwersalną metodą analizy rozkładów pól tensorowych wektorowych i skalarnych w dowolnie złożonych obszarach. Dzięki doskonałemu rozwojowi oprogramowania komputerowego do obliczeń konstrukcji, metoda ta stała się dostępna dla szerokiego grona inżynierów nie posiadających szczególnego przygotowania teoretycznego w zakresie obliczeń MES. Ta część zawiera jedynie powszechnie znane fakty i mogła być pominięta w pracy dyplomowej. Metoda MES może być i jest też często stosowana w mechanice gruntu, jakkolwiek jej ograniczenia powodują, że cieszy się ona ograniczonym zaufaniem wśród konserwatywnych specjalistów z tej branży. Specjalistyczne oprogramowanie do odpowiedzialnych obliczeń MES w zakresie konstrukcji ziemnych, wykorzystujące zaawansowane modele gruntu rozwijane jest od wielu lat przez firmę PLAXIS, która oferuje na rynku pakiet oprogramowania o tejże nazwie. W literaturze, można natrafić na prace dotyczące zgęszczania gruntu pod kołami maszyn, których autorzy ten pakiet stosowali w swych badaniach. Autor korzysta jednak w swej pracy z uniwersalnego oprogramowania CAD firmy Autodesk o nazwie „Inventor” z modułem do obliczeń konstrukcji mechanicznych. Jest ono obecnie dość powszechnie wykorzystywane przez konstruktorów maszyn do wszelkich obliczeń wytrzymałościowych z wykorzystaniem modelu bryłowego konstrukcji.

W tego rodzaju oprogramowaniu jego autorzy koncentrują się na maksymalnym ułatwieniu jego stosowania przez mniej znających metody obliczeniowe inżynierów, dzięki daleko posuniętej automatyzacji generacji siatki MES i formułowania algorytmu obliczeniowego. Szczegóły techniczne tego skomplikowanego procesu i stosowane metody analizy MES są w tym oprogramowaniu ukryte przed użytkownikiem. Jest to zarówno zaleta jak i wada takich systemów.

Mankamentem tej części pracy jest brak szczegółowej analizy specyfiki algorytmów MES stosowanych w mechanice gruntu i analizy modeli reologicznych gruntu stosowanych a analizach MES. Pominięto też omówienie zarysowującego się nowego kierunku badań symulacyjnych w zakresie mechaniki gruntu z zastosowaniem metod konkurencyjnych dla FEM a głównie metody DEM. DEM pozwala pokonywać klasyczne ograniczenia metody elementów skończonych przez uwzględnienie nieciągłej, ziarnistej struktury gruntu. W zakresie dużych odkształceń i przemieszczeń ziaren gruntu na styku opony z gruntem bywa to niezbędne.

Za cel pracy, podany w krótkim rozdziale 3, Autor stawia sobie sprawdzenie hipotezy, że za pomocą MES można uzyskać wiarygodną ocenę propagacji naprężenia w glebie pod kołami pojazdu rolniczego. Nie jest to jednak sformułowanie nazbyt precyzyjne, gdyż współcześnie rozwijane metody MES pozwalają na stosowanie różnorodnych, mniej lub bardziej zaawansowanych modeli gruntu i bardzo zróżnicowanych metod obliczeniowych, z których niektóre są rozwijane specjalnie na potrzeby analizy gruntu. Można zatem te cel uściślić, podając, że chodzi o wykazanie przydatności uproszczonego modelu ciała idealnie sprężystego na jakim bazuje system INVENTOR, do analizy rozkładu naprężeń pod kołami jeźdnymi maszyn rolniczych, gdyż, z parametrów gruntu podanych w dalszej części pracy jako dane wejściowe do obliczeń (moduł sprężystości E i liczba Poissona) można wnioskować, że obliczenia oparte są na takim właśnie modelu gruntu. Brak tu takich typowych dla gruntu parametrów jak współczynnik (ką) tarcia wewnętrznego, oporu spójności, moduł ściśliwości, współczynnik dylatacji czy współczynnik filtracji. Tym samym w obliczeniach pomija się zjawisko odkształcenia nieodwracalnego, pełzania i filtracji wody charakterystyczne dla ośrodka gruntowego. Oczywiście, modele ciała sprężystego są też chętnie stosowane w mechanice gruntu dla obszarów gdzie wpływ tych zjawisk można pomijać, co pozwala na znaczne przyspieszenie i uproszczenie obliczeń bez utraty ich dokładności.

W kolejnych rozdziałach Autor przedstawia użyty do obliczeń model geometryczny opony rolniczej i gruntu w kanale glebowym utworzony za pomocą wspomnianego systemu CAD. Z analizy przedstawionych modeli wynika, że do modelowania gruntu wykorzystano siatkę elementów czworościennych. Brak informacji jak wymodelowano oponę, która ogólnie składa się z różnych gatunków kauczuku i warstw kordu. Jest to struktura laminarna, anizotropowa, bardzo trudna do modelowania MES. Brak w pracy danych co do parametrów mechanicznych materiału opony.

W kolejnych rozdziałach Autor porównuje wyniki swoich obliczeń z wynikami pomiarów na kanale glebowym, wykonanych za pomocą specjalnie skonstruowanych czujników ciśnienia. Autor nie podaje jednak wyraźnie, czy te trudne badania wykonał sam, czy też zaczerpnął je z prac innych autorów podanych w literaturze. Pomiar naprężeń wewnątrz gruntu jest niezwykle trudnym problemem, jako że każdy umieszczony w nim czujnik ciśnienia zakłóca ciągłość struktury gruntu a szczególnie gdy mamy go umieścić w gruncie naturalnym, nie nasypanym. W kanale glebowym mamy co prawda do czynienia z gruntem sztucznym, jednak jego właściwości zależą od całej historii obciążenia i odkształcenia. Autor uzyskuje mimo to bardzo dobrą zgodność wyników obliczeń z danymi empirycznymi, co można uznać za najważniejsze osiągnięcie pracy.

W ostatnim rozdziale Autor przedstawia wyniki badania wrażliwości modelu na zmiany jego parametrów. Z przedstawionych wykresów wynika, że obliczone naprężenia w niewielkim stopniu zależą od parametrów modelu, takich jak moduł Younga, moduł Poissona czy ciśnienie napompowania gumienia. Dużą wrażliwość na wartość modułu Younga

zauważono jedynie w warstwie najwyższej, w której należy się spodziewać odkształceń plastycznych, przez co prosty model ciała Hooke'a jest tu nieadekwatny.

W podsumowaniu Autor podkreśla oczywiste zalety stosowania metod obliczeniowych w porównaniu z eksperymentalnymi i dużą zgodność wyników obliczeń, wykonanych na stosunkowo prostym modelu MES, z danymi empirycznymi.

Dołączony spis literatury obejmuje szeroki horyzont czasowy i zawiera zarówno pozycje specjalistyczne z zakresu mechaniki układu pojazd teren jak i popularne pozycje dotyczące systemów CAD.

Uwagi dyskusyjne dotyczące redakcji pracy i przyjętej terminologii

Jak stwierdzono we wstępnej części recenzji, praca jest na ogół napisana poprawnie, zgodnie z przyjętymi standardami prac naukowych. Zajmę się tutaj nieco bardziej szczegółowo, w kontekście ogólnym, wielce dyskusyjnym problemem zamiennego używania terminów "grunt" i "gleba". autor na ogół używa w swej pracy określenia gleba, Recenzent woli natomiast określenie grunt. Obydwa terminy dotyczą tu tego samego ośrodka, jednak uważam, że w pracach z zakresu mechaniki, powinno się raczej używać określenia grunt. Gleba, zgodnie z określeniem Kowdy, to wierzchnia warstw skorupy ziemskiej zmieniona przez procesy glebotwórcze. Termin ten akcentuje głównie biologiczne aspekty tego ośrodka, jako ośrodka życia organizmów i z tego punktu widzenie ocenia się jego właściwości, także te mechaniczne, głównie strukturę. Grubość gleby może być różna i zmienia się, w zależności od miejsca, od zera (na pustyni) do kilkunastu metrów (w lesie tropikalnym). Jak zatem interpretować wyniki obliczeń dotyczące warstwy tzw. podglebia? Czy z punktu widzenia mechaniki gleby stają się one nieważne, bo dotyczą gruntu? Określenie "grunt" ma znaczenie szersze i akcentuje wyłącznie mechaniczne aspekty ośrodka polidispersyjnego. Nie każdy grunt jest glebą, każda gleba zaś jest warstwą (organogeniczną) gruntu. Rozważania z zakresu mechaniki stanowiące istotę ocenianej pracy, w żadnym stopniu nie dotyczą aspektów biologicznych. Gleba jest tu traktowana jak idealnie sprężyste kontinuum (to założenie MES) stąd rozważania te są aktualne dla każdego ośrodka spełniającego te założenia, np. betonu lub kruszywa żwirowego. Wielu autorów akcentujących rozróżnienie pomiędzy mechaniką gruntu i gleby, opiera się w całości na metodach rozwijanych w ramach klasycznej mechaniki gruntu, podkreślając, że właściwości mechaniczne gleby powinny być jednak inne niż gruntu budowlanego. Jednakże, ubita kołami maszyn warstwa gleby ma podobne właściwości mechaniczne jak warstwa podbudowy drogi, czy droga gruntowa. Świeżo nasypyany grunt budowlany ma podobne właściwości mechaniczne jak uprawiona gleba. Operacje technologiczne takie jak spulchnianie, mieszanie i zgęszczenie są takie same zarówno w budownictwie jak i rolnictwie stąd ich podstawy teoretyczne są tożsame. W nauce przyjmuje się zasadę redukcjonistyczną, zwaną brzytwą Ockhama, która zakazuje mnożenia teorii ponad potrzebę. W kontekście tej zasady równoległe rozwijanie mechaniki gleby i mechaniki gruntu jest niepotrzebnym mnożeniem tej samej teorii.

Drobne potknięcia stylistyczne czy ortograficzne pomijam tutaj, powinny one być przedmiotem redakcji wydawniczej. Zwracam tylko uwagę na powszechnie występujący w pracach składanych metodą komputerową błąd polegający na stosowaniu różnej wysokości pisma i zniekształceniach skali cytowanych rysunków, których autor też nie uniknął.

Osiągnięcie naukowe kwalifikujące Autora do stopnia naukowego doktora nauk technicznych

Zasadniczym osiągnięciem naukowym autora jest empiryczne wykazanie adekwatności modelu gruntu opartego na modelu ośrodka sprężystego w zakresie wyjaśnienia propagacji wglębnej naprężenia normalnego pod kołami pojazdu, co w praktyce daje uzasadnienie stosowania tej metody do obliczeń skutków działania pojazdów poruszających się po gruncie rolniczym (glebie).

Można zatem stwierdzić, że Autor zrealizował w pełni cel swojej pracy podając oryginalne rozwiązanie problemu naukowego z wykorzystaniem współczesnych metody mechaniki komputerowej, a tym samym wzbogacił wiedzę naukową w zakresie mechaniki układu pojazd-teren oraz wykazał dobre opanowanie współczesnych metod badań naukowych w dziedzinie nauk technicznych.

Tym samym uznaję, że praca spełnia wymagania stosownych przepisów dotyczących nadawania stopnia naukowego doktora, zawartych w Ustawie o Stopniach i Tytułach Naukowych i może być podstawą do ubiegania się o nadanie stopnia doktora nauk technicznych.

Zawarte w niniejszej recenzji uwagi krytyczne należy traktować jako niezbędny element dyskusji naukowej, której celem jest doskonalenie warsztatu naukowego i poszukiwania dalszych dróg rozwoju teorii układu pojazd-grunt. Nie podważają one wiarygodności ani znaczenia osiągniętych rezultatów naukowych.

Poznań, dn. 8 lipca 2015r

