

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Arkadiusza Kwaśniewskiego
nt. „Analiza stanu zagęszczenia ośrodków gruntowych w procesach
dynamicznego zagęszczania”**

wykonanej pod kierunkiem
dr. hab. inż. Jana Maciejewskiego, prof. uczelni

Podstawa wykonania opinii: pismo SIMR.521.24.2022 z dnia 29.07.2022
Prodziekana Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki
Warszawskiej dr. hab. inż. Jacka Dytały, prof. uczelni

1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

W budownictwie, w wielu procesach technologicznych związanych tzw. pracami ziemnymi, bardzo istotną rolę odgrywa proces zagęszczania ośrodka gruntowego. Dzięki zagęszczeniu podłoża (zmniejszeniu objętości porów gruntu) uzyskujemy odpowiednią jego szczelność na przenikanie wody i związku z tym większą odporność na czynniki atmosferyczne. W efekcie zapewniamy większą trwałość np. dróg, jak również, co jest istotne, większe bezpieczeństwo budowli.

W procesie zagęszczania gruntu kluczowym problemem jest zachowanie jednolitego, optymalnego dla danego podłoża, stopnia zagęszczenia najlepiej kontrolowanego online. Wymaganie te wymusiły na producentach urządzeń do zagęszczania gruntów zastosowanie tzw. inteligentnych systemów do kontroli tego procesu w czasie rzeczywistym. Przykładowo w zagęszczarkach płytowych takie rozwiązania stosuje firma WEBER MT z najnowszym systemem COMPATROL 2.0 zintegrowanym z aktywną ochroną silnika, firma AMMAN z systemem ACE (Amman Compaction Expert) czy też firma BOMAG. W procesie inteligentnego zagęszczania gruntu poprawność tego procesu weryfikowana jest dodatkowo, zgodnie z odpowiednimi normami, za pomocą dynamicznego płytowego urządzenia, np. ZFG 3000 firmy ZORN Instruments.

W październiku tego roku, Recenzent wraz z zespołem uczestniczył w Światowej

Wystawie Maszyn Budowlanych i Drogowych BAUMA 2022 w Monachium, prezentując tam innowacyjne rozwiązania Laboratorium Maszyn Roboczych i Pojazdów Przemysłowych Politechniki Wrocławskiej adresowane dla praktyki przemysłowej. Równocześnie była to znakomita okazja do zapoznania się z najnowszymi rozwiązaniami w tej klasie maszyn, w tym również z inteligentnymi systemami zagęszczarek płytowych. Zaprezentowane na BAUMIE systemy standardowo, za pomocą prostych wskaźników LED, informują operatora o osiągnięciu wymaganego zagęszczenia gruntu, co w efekcie powoduje redukcję ilości przejazdów zagęszczarki i związane z tym zużycie paliwa jak również zmniejsza zużycie samego urządzenia.

Reasumując zastosowanie tzw. inteligentnych systemów w procesie zagęszczania gruntów w efekcie podnosi istotnie produktywność tego procesu.

Omawiane tzw. inteligentne systemy oparte są na pomiarze w płycie zagęszczarki przyspieszenia za pomocą sensorów MEMS. Niestety firmy nie ujawniają w pełni algorytmów tych systemów identyfikujących stopień zagęszczenia gruntu.

Pan mgr inż. Arkadiusz Kwaśniewski, na podstawie własnych badań eksperymentalnych i rozważań teoretycznych podjął się próby zbudowania systemu monitoringu w czasie rzeczywistym gęstości ośrodka gruntowego.

Uważam, że tematyka rozprawy jest aktualna a przede wszystkim posiada, ze względu na swoją interdyscyplinarność, istotne walory poznawcze i utylitarne uzupełniające znany dorobek w tym zakresie.

2. OCENA MERYTORYCZNA ROZPRAWY I UWAGI DYSKUSYJNE

Rozprawa doktorska mgr. inż. Arkadiusza Kwaśniewskiego zajmuje 169 stron i składa się z 8 rozdziałów, streszczenia, abstraktu, spisu treści, wykazu symboli i skrótów oraz bibliografii.

Rozdział 1 stanowi **wstęp** pracy doktorskiej. Doktorant w sposób skondensowany prezentuje argumenty przemawiające za koniecznością zagęszczania gruntów w pracach ziemnych w budownictwie, informuje o znanych metodach laboratoryjnych i in situ pomiaru gęstości gruntów oraz wybranych inteligentnych systemach monitoringu stopnia zagęszczania tego ośrodka rozdrobnionego, głównie za pomocą walców drogowych/budowlanych. Pan mgr inż. Arkadiusz Kwaśniewski w podsumowaniu prezentuje pogląd, że w małych zagęszczarkach płytowych o masie do 300 kg systemy inteligentne nie są stosowane.

W tym miejscu Recenzent chciałby zwrócić uwagę, że np. firma AMMAN, na życzenie klienta, może w swój inteligentny system ACE (Amman Compaction Expert) wyposażyć również zagęszczarki płytowe z opatentowanym wibratorem trzywałowym serii APH o masie przekraczającej nieznacznie 300 kg.

W **rozdziale 2** stanowiącym wprowadzenie do rozprawy doktorskiej Doktorant, na początku rozdziału, przedstawia w sposób syntetyczny znane z literatury informacje na temat procesu zagęszczania ośrodka gruntowego i wpływ na ten proces istotnych czynników takich: jak wilgotność gruntu, jego uziarnienie czy też zawartość frakcji ilastej. Wpływ tych czynników, uzyskanych z unormowanych przykładowych badań eksperymentalnych, został zaprezentowany na rysunkach tego rozdziału.

W dalszej części rozdziału Autor na podstawie podręcznika: *Wiłun Z., Zarys Geotechniki. WKiŁ, 2000* prezentuje własne zestawienie metod wyznaczania gęstości gruntu z podziałem ich na metody pośrednie, bezpośrednie, polowe (in situ) i laboratoryjne, omawiając równocześnie przyrządy, wraz z ich wizualizacją, do realizacji takich badań. W związku z tym, że w praktyce budowlanej, w zależności od właściwości ośrodka gruntowego i maksymalnej grubości warstwy zagęszczanej, stosuje się różne metody zagęszczania - Doktorant omawia dalej różne urządzenia do statycznej bądź dynamicznej realizacji tego procesu, takie jak: walce drogowe/budowlane, zagęszczarki płytowe czy też ubijaki.

W końcowej części rozdziału 2 mgr inż. Arkadiusz Kwaśniewski koncentruje się na tzw. inteligentnym procesie zagęszczania gruntu. Omawia, na podstawie publikowanej literatury, w sposób chronologiczny, systemy dla walców drogowych/budowlanych różnych firm wraz z opatentowanymi sposobami identyfikacji online stopnia zagęszczenia ośrodka gruntowego za pomocą specjalnych wskaźników, jak na przykład: Compaction Meter Value (CMV), Resonant Meter Value (RMV), Compaction Control Value (CCV). Powyższe systemy, wyposażone w czujniki przyspieszeń, bazują na parametrach wymagających ustalenia głównej częstotliwości wymuszenia generowanej przez maszynę zagęszczającą i wartości ich amplitud. Następnie obliczane są kolejne składowe harmoniczne oraz wartości ich amplitud. Natomiast wskaźniki Roller-Integrated Stiffness (k_s) systemu firmy Amman czy też Vibratory Modulus (E_{VIB}) firmy Bomag identyfikują sztywność podłoża.

Na podstawie tego przeglądu literatury ustalono, że najlepsze rezultaty zmiany gęstości ośrodka od 0 do 400 mm głębokości warstwy obserwuje się dla częstotliwości 18 Hz.

W niektórych rozwiązaniach inteligentnego zagęszczenia gruntu stosuje się regulator mikroprocesorowy PID Fuzzy, który w zależności od gęstości ośrodka gruntowego, aktywnie tłumia drgania szkodliwe dla operatora – nawet do 30 % oraz eliminuje częstotliwości drgań poniżej 4 Hz, które są najbardziej szkodliwe dla człowieka.

Zdaniem recenzenta w literaturze przedmiotu istnieje jeszcze szereg fundamentalnych prac (np. zagraniczne rozprawy doktorskie), które poszerzają prezentowany przez Doktoranta zakres wiedzy, na przykład:

1. Roland Anderegg and Kuno Kaufmann 1: „Intelligent Compaction with Vibratory Rollers – revised Version Feedback control systems in automatic compaction and compaction control“ Committee: A2K02-Transportation Earthworks Session Title: Intelligent Compaction Systems Submission date: 28.7.2003 Paper #04-295.
2. Wolfgang Lohr: „Untersuchungen zum Schwingungsverhalten von Vibrationsplatten mit Hilfe der Mehrkörperdynamik. Shaker Verlag Aachen 2005.
3. Roland Anderegg: „Nichtlineare Schwingungen bei dynamischen Bodenverdichter“ Fortschr.-Ber. VDI Reihe 4, Nr. 146. Düsseldorf: VDI Verlag 1998.
4. Robert V. Rinehart: „Characterizing soil stiffness measured by a vibratory roller compactor and its relationship to in-situ stress-strain response“. A Doctoral Thesis, Colorado School of Mines Golden, CO May, 2008.
5. Fritz Kopf und Peter Erdmann: „Numerische Untersuchungen der Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle“. Österreichische Ingenieur- und Architekten Zeitschrift, 150. Jg. Heft 4-5, 2005.

6. Wolfgang Kröber: „Untersuchung der dynamischen Vorgänge bei der Vibrationsverdichtung von Böden“. TU München. Schriftenreihe 11, 1988.

Szkoda, że Doktorant analizując inteligentne systemy tylko dla walców nie pokusił się chociaż o znalezienie wspólnych cech z procesem zagęszczania gruntu płytowymi zagęszczarkami. Można na przykład przyjąć w przybliżeniu w takich rozważaniach, że urządzenie płytowe jest walcem o nieskończonym promieniu.

W rozdziale 3 Doktorant zaprezentował cel i zakres pracy.

Celem głównym pracy doktorskiej jest opracowanie, zweryfikowanego doświadczalnie, systemu monitoringu w czasie rzeczywistym stopnia zagęszczenia ośrodka gruntowego.

Sformułowana teza przez brak precyzji brzmi jako oczywistość. Zdaniem recenzenta Doktorant miał na myśli tezę, że istnieje korelacja sygnału wibroakustycznego ze stopniem zagęszczenia dla maszyn o krótkim czasie kontaktu z podłożem takich jak: jak płytowa zagęszczarka czy też ubijak wibracyjny. Wiadomo natomiast, że istnieje taka korelacja dla maszyn, które mają długi czas kontaktu z podłożem – co było omawiane powyżej.

Dla realizacji celu pracy przyjęto następujące etapy:

- opracowanie metody pomiaru stopnia zagęszczenia ośrodków gruntowych wykorzystującej metody wibroakustyki i systemu pomiaru w czasie rzeczywistym,
- realizację symulacji numerycznych procesu zagęszczenia warstwy ośrodka gruntowego, przy zastosowaniu modelu ośrodka ze wzmocnieniem gęstościowym i dewiatorowym,
- wyznaczenie dokładnego ruchu płyty zagęszczarki, wykorzystując analizę po klatkową filmu slow - motion oraz zastosowanie czujników przyspieszeń.

Rozdziały 4 i 5 stanowią prezentację stanowiska laboratoryjnego oraz stanowiska tzw. polowego przy uwzględnieniu zastosowanych metod badawczych ośrodka gruntowego i samego procesu wibracyjnego zagęszczania gruntu zagęszczarką płytową - łącznie z zastosowanymi przetwornikami pomiarowymi i torami do rejestracji i akwizycji sygnałów pomiarowych.

Zdaniem recenzenta rozdziały te, ze względu na swoją obszerność i brak dostatecznej przejrzystości, można by było uporządkować, np. rozdział 5 poświęcić w sposób wyczerpujący zastosowanej metodyce badawczej wraz z opisem stanowisk badawczych a rozdział 5 wyników badań i ich naukowej interpretacji. Obecnie zagadnienia te nie są rozdzielone, co utrudnia śledzenie procesu badawczego realizowanego przez Doktoranta.

Mgr inż. Arkadiusz Kwaśniewski w swoich badaniach laboratoryjnych i polowych zastosował ośrodek gruntowy niespoisty. Dla tego ośrodka przeprowadził analizę sitową, zbadał gęstość właściwą gruntu, gęstość objętościową szkieletu, porowatość oraz wskaźnik porowatości. Ponadto prowadząc eksperymentalną identyfikację wilgotności i realizując badania Proctora, ustalił laboratoryjnie maksymalną gęstość badanego ośrodka gruntowego na poziomie $2,01 \text{ g/cm}^3$ dla wilgotności 10%, co zaprezentowano na rys. 4.4 na stronie 46. Ponadto Doktorant przeprowadził, zgodnie normową procedurą, badania wytrzymałości na ścinanie

w skrzynkowym aparacie bezpośredniego ścinania niespoistego ośrodka gruntowego: sypkiego i zagęszczonego dla wilgotności wynoszącej 10 %. Na podstawie badań przedstawiono w postaci graficznej kryterium Coulomba wyrażone równaniem (20) oraz rys. 4.10 na str. 50.

Doktorant na str. 48 pisze, że ... „odczytano wartości spójności i kąta tarcia wewnętrznego w stanie ustabilizowanym (ośrodek luźny i zagęszczony) oraz wartości maksymalne dla ośrodka zagęszczonego”. Z wykresu 4.10 nie wynika jednak, że zidentyfikowano spójność badanego ośrodka gruntowego. Należy nadmienić, że ośrodki gruntowe niespoiste nie posiadają kohezji (spójności właściwej), np. suchy piasek. Natomiast wilgotność takiego ośrodka powoduje, że zachowuje się on jakby posiadał kohezję – definiowaną w literaturze jako kohezja pozorna, która w istocie jest adhezją.

Ponadto należy mocno podkreślić, że kryterium Coulomba dotyczy procesów statycznych a Doktorant zajmuje się w swojej pracy doktorskiej procesem dynamicznym, co jest zdaniem recenzenta, istotnym naukowym uproszczeniem. Recenzent przy omawianiu rozdziału 6 szerzej naświetli ten problem.

Mgr inż. Arkadiusz Kwaśniewski, w celu określenia parametrów zagęszczanego ośrodka gruntowego, zastosował Szybką Transformatę Fouriera (FFT) do wykonania widma - uzyskanego z sygnałów rejestrowanych za pomocą czujników przyspieszeń zamocowanych na płycie pomiarowej lub maszynie. Do dokładnego opisu stanu zagęszczenia ośrodka gruntowego na podstawie danych uzyskanych z widma amplitudowo-częstotliwościowego wprowadził Doktorant kryterium opisane parametrem Q. Parametr ten jest całką z wybranego zakresu częstotliwościowego w przedziale a, b, czyli polem powierzchni pod uzyskanym wykresem widmowym na wybranym odcinku. W zależności od typu wymuszenia granice całkowania zmieniają się.

W celu identyfikacji korelacji sygnału wibroakustycznego ze stanem zagęszczenia ośrodka gruntowego oraz wyboru odpowiedniego toru pomiarowego i inteligentnego sytemu zagęszczania Doktorant przeprowadził badania na :

- stanowisku laboratoryjnym w formie zasobnika o wymiarach 1,2 x 0,6 x 0,6 metra, w którym wysokość warstwy zagęszczanego gruntu wynosiła 0,5 metra. Natomiast kontrolowana wilgotność oscylowała w granicach 10% a gęstość ośrodka luźnego wynosiła 1,78kg/cm³ i odpowiednio ośrodka zagęszczanego 2,01 kg/cm³,
- stanowisku polowym w formie kanału glebowego znajdującego się obok budynku Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej o wymiarach: długość 12 m, szerokość 1,8 m przy wypełnieniu kanału ośrodkiem gruntowym na głębokość 1 m.

Na stanowisku laboratoryjnym przeprowadzono trzy typy testów:

- a) wymuszenie impulsem siły z czujnikami przyspieszeń zamocowanymi na płycie pomiarowej o grubości 20 mm i wymiarach 500mm x 500 mm w odległości 400 mm i 800 mm od osi siły impulsu. Badania te powtarzano również dla płyty o grubości 5mm,
- b) wymuszenie przy użyciu ubijaka wibracyjnego o wymiarach stopy 230 x 280 mm z czujnikami zamocowanymi na tej samej płycie pomiarowej w odległości 450 i 850 mm od osi ubijaka,
- c) wymuszenie przy użyciu ubijaka wibracyjnego z czujnikami usytuowanymi bezpośrednio na jego stopie.

Główne wyniki badań uzyskane na stanowisku laboratoryjnym wykazały, że zmiana stopnia zagęszczenia ośrodka gruntowego powoduje zmianę charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych, a mianowicie: amplituda jest silnie uzależniona od energii impulsu i grubości płyty pomiarowej (cieńsza płyta wpada w drgania własne, przez co widmo jest rozmyte), luźny ośrodek gruntowy odpowiadał znacznie słabiej i posiadał kilka składowych harmonicznym do wartości 500 Hz. Ośrodek zagęszczony natomiast ma więcej składowych harmonicznym w szerszym spektrum. Dla czujników umieszczonych na płycie pomiarowej wartość parametru Q dla ośrodka zagęszczonego wzrosła dwukrotnie w stosunku do wartości Q uzyskanej dla ośrodka luźnego. Dla czujników umieszczonych na stopie ubijaka wibracyjnego, wraz ze wzrostem zagęszczenia ośrodka gruntowego, parametr Q zmieniał się od wartości od 400 g.Hz do 1900 g.Hz.

Zdaniem recenzenta geometria stanowiska laboratoryjnego w stosunku do geometrii płyty pomiarowej i stopy ubijaka wibracyjnego jest z dużym prawdopodobieństwem za mała, co może być przyczyną tzw. efektu ściany. Doktorant nie wspomina o możliwości wystąpienia tego zjawiska ale przykładowo na rysunku 5.53 na str. 4 zaprezentował wyniki zmiany parametru Q podczas przejazdu zagęszczarki nad stalową płytą o wymiarach 600 x 400 x 8 mm umieszczoną w gruncie na głębokości 200 mm. Wyniki te jasno pokazują nagły spadek parametru Q podczas wjazdu zagęszczarki na grunt z płytą umieszczoną pod nim na głębokości 200 mm.

Jak wiadomo energia drgań rozchodzi się dynamicznie w warstwach gruntu w postaci fal przestrzennych (ściskających i ścinających) oraz fal powierzchniowych lub ich kombinacji. Przy istniejących przeszkodach mechanicznych swobodny proces zostaje zaburzony i efekty procesu zagęszczania zostają zniekształcone – potwierdza to też praktyka na placach budowy. Przy braku weryfikacji tego problemu, na przykład w badaniach polowych, należy wyniki uzyskane w laboratorium traktować jako wstępne i pilotujące.

W dalszej części rozdziału Autor przedstawia wyniki badań trajektorii płyty zagęszczarki za pomocą dwóch niezależnych metod, a mianowicie: po-klatkowej analizy obrazu filmu slow-motion oraz analizy sygnałów czujników przyspieszeń. Otrzymane trajektorie analizowano w zależności od kierunku ruchu maszyny, gdyż testy wykazały odmienne charakterystyki dla tych faz ruchu. Podczas ruchu do przodu, przód maszyny drga z amplitudą przemieszczeń 2,5 mm a tył maszyny z amplitudą 4,5 mm. Zmiana kierunku ruchu powoduje zmianę wartości amplitud przemieszczeń na 4 mm z przodu oraz 2 mm z tyłu. Zastosowane obie metody do pomiaru trajektorii płyty zagęszczarki wykazały zbliżone wyniki.

Doktorant wykonał też analizę procesu interakcji zagęszczarki płytowej z podłożem. Do tego celu zastosowano dwa czujniki zamocowane na płycie maszyny oraz jeden umieszczony w ośrodku gruntowym. Wyniki badań wykazały, że czas kontaktu płyty maszyny z podłożem w trakcie jednego okresu wynosił tylko 2 milisekundy a więc badana maszyna podczas pracy w tak krótkim czasie ma kontakt z podłożem co powoduje, że efektywność zagęszczania nie jest zadowalająca.

Doktorant nie wspomina o tym, że jest to problem zagęszczarek z wibratorem dwuwalowym. Istnieją rozwiązania, na przykład szwajcarskiej firmy Amman, które posiadają opatentowany wibrator z trzema wałkami (technologia 3W), które zapewniają dłuższy kontakt i dodatkowo większą powierzchnią płyty zagęszczarki z podłożem. W efekcie uzyskuje się istotny wzrost efektywności zagęszczania takiej maszyny na dowolnych gruntach, w szczególności spoistych, jak również lepszą trakcję przy pokonywaniu wzniesień.

W rozdziale 6 mgr inż. Arkadiusz Kwaśniewski podjął się próby modelowania procesu zagęszczania warstwy ośrodka gruntowego. Zaprezentował symulacje numeryczne tego procesu przy zastosowaniu sprężysto-plastycznego modelu ośrodka spełniającego warunek Coulomba ze wzmocnieniem gęstościowym i dewiatorowym. Model ośrodka gruntowego został skalibrowany na podstawie testów w aparacie bezpośredniego ścinania. Model bazuje na eliptycznej powierzchni plastyczności o wzmocnieniu gęstościowym. Wzmocnienie dewiatorowe opisano poprzez obrót powierzchni plastyczności skorelowanych z kierunkiem deformacji. Na tej podstawie wykonano symulacje numeryczne zagęszczania warstwy gruntu poddanej cyklicznemu ścinaniu przy zadanym naprężeniu normalnym. Na podstawie tych symulacji przeanalizowano również wpływ naprężenia normalnego, amplitudy drgań oraz początkowej gęstości na efekt zagęszczenia.

Zdaniem recenzenta zaprezentowany model jest modelem czysto teoretycznym, bez weryfikacji eksperymentalnej, opartym na dyskusyjnych założeniach w kontekście zastosowań praktycznych. Nie wnosi więc on, na tym etapie, istotnej wartości dodanej do przedstawionej tematyki pracy doktorskiej. Zapewne mgr inż. Arkadiusz Kwaśniewski zamierza kontynuować swoje prace badawcze w tym zakresie i jest to interesująca intelektualna próba tych planowanych przyszłych działań naukowych.

Należy podkreślić, że w rozważaniach teoretycznych w mechanice, niezbędna jest znajomość pomiędzy stanem naprężenia i stanem odkształcenia. Modelami matematycznymi tych związków fizycznych są równania konstytutywne, nazywane również równaniami stanu. Niestety w mechanice gruntów brak jest dotychczas uniwersalnego prawa konstytutywnego. Wynika to przede wszystkim z losowego charakteru struktury i cech fizycznych rzeczywistego ośrodka gruntowego. Dodatkowo właściwości gruntu zależą też istotnie od chwilowych warunków atmosferycznych. Stanowi to bodaj największą przeszkodę w rozwoju teorii gruntu. Natomiast próby zaadaptowania dla mechaniki gruntów równań innych ośrodków - nazywane często przez autorów (lokalnymi) równaniami konstytutywnymi - nie dały dotychczas zadowalających efektów praktycznych.

Wobec tego do zastosowań praktycznych, do identyfikacji właściwości gruntów, stosowane są wskaźniki testowe, tak zwane analogi procesu. Wskaźniki te uzyskuje się w wyniku badań eksperymentalnych gruntu za pomocą różnorodnych urządzeń pomiarowych, które można podzielić na urządzenia tzw. pośrednie, np. aparat trójosiowego ściskania lub bezpośrednie, np. aparat bezpośredniego ścinania. Należy dodać, że testery te różnią się istotnie budową, wymiarami geometrycznymi, kinematyką procesu ścinania oraz prędkością ścinania. W efekcie uzyskane wyniki badań dla tego samego gruntu mogą różnić się nawet o kilkaset procent. W stanie wiedzy znane są prace, które wykazują, że wzrost prędkości ścinania gruntów, szczególnie w gruntach kohezyjnych, istotnie wpływa na wzrost ich wytrzymałości na ścinanie, tzw. umocnienie. Natomiast dla gruntów niekohezyjnych (piasków) wpływ ten jest niewielki.

Standardowe prędkości ścinania aparatów bezpośredniego ścinania, stosowane w laboratoriach na świecie, zawierają się z reguły w przedziale $0,813 \times 10^{-8}$ [m/s] do $0,203 \times 10^{-4}$ [m/s] czyli służą do badań quasi-statycznych. Natomiast realne prędkości ścinania w praktyce wynoszą około 0,2 - 10 [m/s]. W tym przedziale znajdują się prędkości płyty wibracyjnej a więc musimy się spodziewać umocnienia gruntu. Zastosowanie testu bezpośredniego ścinania przez Doktoranta do kalibracji zaprezentowanego modelu symulacyjnego, ze względu na brak zapewnienia dynamiki procesu ścinania, małą i wymuszoną powierzchnią ścinania stawia ten model, już w tym względzie, jako wątpliwy do zaakceptowania jest dla praktyki.

Zdaniem recenzenta Doktorant, w dalszych swoich pracach naukowych w tym zakresie, powinien uwzględnić wiedzę, którą w sposób skondensowany, wraz z rozszerzeniem statycznego kryterium Coulomba o dynamikę procesu ścinania, można znaleźć w literaturze, na przykład w pracach:

1. Dudziński, P.A.: *Method for predicting dynamic strength in soils – Part I: Proposal for a new criterion. Journal of Terramechanics* 86(2019) 13-37
2. Dudziński, P.A, and Stefanow, D.: *Method for predicting dynamic strength in soils – Part II: Validation of the new criterion using an innovative test device. Journal of Terramechanics* 86(2019) 39-46
3. Stefanow, D. and Dudziński, P.A.: *Soil shear strength determination methods – State of the art. Soil & Tillage Research* 208(2021) 104881

Rozdział 7 to podsumowanie i wnioski końcowe w zakresie zaprezentowanej przez mgr. inż. Arkadiusza Kwaśniewskiego rozprawy doktorskiej.

3. OCENA POZIOMU EDYTORSKIEGO

Praca, zdaniem recenzenta, jest zredagowana w sposób, który nie ułatwia recenzentowi śledzenia naukowego wkładu własnego Doktoranta. W pracy zaprezentowano szereg interesujących wyników badań ale Autor oszczędnie posługuje się naukową interpretacją tych wyników czego wymaga się od prac kwalifikacyjnych - brakuje odpowiedzi na pytanie DLACZEGO? Dopiero bezpośrednia dyskusja z Autorem znacznie wyjaśniła szereg zagadnień.

W przedłożonej monografii doktorskiej występują też potknięcia stylistyczne, jak na przykład „walcy” zamiast „walców”, „najbardziej optymalny” i redakcyjnych, jak na przykład brak wymiarów w „Wykazie użytych symboli i skrótów”, str.45 numer wzoru powinien być 18 a nie 13. Prac, w dużej jej części, jest pracą eksperymentalną a brak jest analizy błędów pomiarowych.

Inne uwagi z zakresu redakcji pracy i jej stylistyki oraz interpunkcji zostały przekazane bezpośrednio Doktorantowi.

4. KONKLUZJA

Reasumując stwierdzam, że w recenzowanej rozprawie doktorskiej mgr inż. Arkadiusz Kwaśniewski podjął istotny, a zarazem złożony problem, identyfikacji w czasie rzeczywistym stanu dynamicznego zagęszczania ośrodków gruntowych.

Doktorant wykazał, że potrafi sformułować zadanie naukowe, zrealizować szeroki wachlarz pracochłonnych interdyscyplinarnych badań eksperymentalnych i symulacyjnych. Na podkreślenie zasługują bardzo dobre umiejętności Autora pracy w zakresie symulacji procesów dynamicznych.

Do najważniejszych osiągnięć, zdaniem recenzenta, Pana mgr. inż. Arkadiusza Kwaśniewskiego należy zaliczyć:

- zrealizowanie imponującego programu interdyscyplinarnych badań eksperymentalnych (w laboratorium i in situ) jak również badań symulacyjnych z zakresu mechaniki i terramechaniki – wprowadzonej do „obiegu” naukowego przez prof. M.G Bekker’a, absolwenta Politechniki Warszawskiej.
- wprowadzenie, do dokładnego opisu stanu zagęszczenia ośrodka gruntowego, kryterium opisane parametrem Q . Kryterium to zostało sformułowane na podstawie danych eksperymentalnych uzyskanych z widma amplitudowo – częstotliwościowego, które to kryterium jest całką amplitudy drgań w dziedzinie częstotliwości. W zależności od typu wymuszenia granice całkowania zmieniają się,
- zrealizowanie system monitoringu, działający w trybie real-time, do obsługi systemu kontroli gęstości ośrodka. System ten pozwala na kalibrację parametru Q z danym ośrodkiem gruntowym i typem maszyny. Obecnie system ten przetestowano tylko dla ośrodków niespoistych.
- badania i analiza czasu kontaktu rewersyjnej płyty zagęszczarki z wibratorem dwuwąłowym niezbędnej do oceny efektywności procesu zagęszczania,
- realizacja symulacji numerycznych procesu zagęszczania warstwy ośrodka gruntowego za pomocą modelu ośrodka z wzmocnieniem gęstościowym i dewiatorowym. Model ten jest interesującym kierunkiem dalszych badań naukowych ale wymaga jeszcze działań rozwojowych w aspekcie jego aplikacji w praktyce zagęszczania gruntów.

Recenzowana rozprawa zawiera szereg nowych interdyscyplinarnych wyników poznawczych, uzupełniając w tym zakresie stan wiedzy oraz wnosi przede wszystkim praktyczne wnioski do praktyki wdrożeniowej.

Przytoczone, do dyskusji, uwagi recenzenta świadczą o interesującej zawartości pracy oraz jej wielowątkowości.

Recenzent jest pełen uznania dla Doktoranta za włożony Jego trud w realizację przedłożonej rozprawy doktorskiej, która stanowi wartościowy wkład do **dyscypliny Budowa i Eksploatacja Maszyn/Inżynierii Mechanicznej**

Wobec powyższego stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Arkadiusza Kwaśniewskiego nt. „Analiza stanu zagęszczenia ośrodków gruntowych w procesach dynamicznego zagęszczania” spełnia warunki dla rozpraw doktorskich określone w art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r. nr 65 poz. 595 ze zmianą w Dz. U. z 20005 r. nr 164 poz. 1365) i może być przedmiotem publicznej obrony.