

Autoreferat

1. Imię i nazwisko: Karol Brzeziński
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

2013-2017: Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej – studia doktoranckie w Instytucie Dróg i Mostów. Uzyskanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych decyzją Rady Wydziału Inżynierii Lądowej z dn. 12.07.2017.

Temat pracy doktorskiej: „Ocena wpływu cyklicznego obciążenia na wytrzymałość statyczną mieszanek związanych cementem stosowanych w konstrukcjach nawierzchni drogowych”. Promotor: prof. dr hab. inż. Artur Zbiciak.

2011-2013: Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej – studia magisterskie na specjalności Inżynieria Komunikacyjna, specjalizacja: Technologia Budowy Dróg.

Temat pracy magisterskiej: „Analiza porównawcza procedur projektowania nawierzchni podatnych i półsztywnych na podstawie starego i nowego polskiego katalogu typowych konstrukcji”. Promotor: prof. dr hab. inż. Artur Zbiciak.

2007-2011: Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej – studia inżynierskie na specjalności Inżynieria Komunikacyjna.

Temat pracy inżynierskiej: „Projekt przebudowy skrzyżowania skanalizowanego drogi wojewódzkiej z drogą powiatową na rondo”. Promotor: dr inż. Andrzej Cielecki.

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

od 10.2017: Adiunkt naukowo-dydaktyczny w Instytucie Dróg i Mostów, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska – praca w wymiarze pełnego etatu.

10.2015-09.2017: Asystent naukowo-dydaktyczny w Instytucie Dróg i Mostów, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska – praca w wymiarze pełnego etatu.

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.

W zamieszczonym poniżej opisie osiągnięć odnoszę się do publikacji wymienionych w dokumencie „Wykaz osiągnięć naukowych albo artystycznych, stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny”, podając numer odpowiedniego rozdziału, np. pkt I.2 oraz numer publikacji, np. [1].

INFORMACJE OGÓLNE – omówienie głównych obszarów badawczych

Pracę naukową rozpocząłem w 2013 roku, podejmując studia doktoranckie pod kierunkiem prof. Zbiciaka. Początkowo kontynuowałem tematykę związaną z moją pracą magisterską, koncentrując się na zagadnieniach projektowania konstrukcji nawierzchni drogowych, w szczególności na ocenie trwałości zmęczeniowej oraz modelowaniu konstytutywnym materiałów. Okres studiów doktoranckich był dla mnie również czasem intensywnego poszerzania kompetencji badawczych. W szczególności zdobyłem doświadczenie w zakresie optycznych metod pomiarowych, z którymi miałem okazję zapoznać się dzięki prof. Kujawińskiej, oraz w zakresie statystyki, pogłębianej podczas zajęć prof.

Dembińskiej. Obie te umiejętności odegrały w dalszej części mojej kariery naukowej kluczową rolę.

W rozprawie doktorskiej badałem zjawisko wzmocnienia obserwowane w materiałach poddawanych cyklicznym obciążeniom o niewielkiej amplitudzie, zwykle nieco poniżej granicy zmęczenia. Efekt ten przejawia się zarówno wzrostem wytrzymałości doraźnej, jak i trwałości zmęczeniowej. W szczególności przeprowadziłem eksperymentalną ocenę zmian wytrzymałości doraźnej w mieszkankach stabilizowanych cementem, wykazując, że nawet w materiałach o charakterze kruchym możliwe jest zaobserwowanie efektu wzmocnienia. Oprócz identyfikacji samego zjawiska, zaproponowałem hipotezę zmęczeniową umożliwiającą powiązanie zmian wytrzymałości doraźnej z trwałością zmęczeniową. Przedstawiłem również interpretację mikrostrukturalną, popartą symulacjami z uwzględnieniem procesu pękania. Wyniki te zostały następnie opublikowane w renomowanych czasopismach naukowych (pkt. II.12 [15, 22]).

Zdobyta w tym okresie wiedza, zwłaszcza w zakresie statystyki, pozwoliła mi zaangażować się w grant dotyczący walidacji nowoczesnych metod rozpoznania podłoża gruntowego. Prowadziłem w nim analizy statystyczne wyników badań wykonanych z użyciem nowoczesnych technik diagnostycznych, współtworząc (w ramach procesu opiniowania) wytyczne, które następnie wprowadzono jako dokument obowiązujący na drogach krajowych (pkt. III.1 [1]).

Jeszcze przed obroną doktoratu rozpocząłem również prace nad zagadnieniem oceny równości nawierzchni drogowych na podstawie drgań rejestrowanych smartfonem wewnątrz pojazdu. W kolejnej fazie projektu (ASPEN2) byłem już członkiem kluczowego personelu badawczego. Wykorzystywałem zarówno wiedzę z zakresu modelowania mechanicznego, jak i optycznych metod pomiaru. Opracowywałem i kalibrowałem dyskretne modele mechaniczne odwzorowujące drgania pojazdów poruszających się po nierównościach, a także rozwiązywałem zadanie odwrotne polegające na wyznaczeniu profilu nawierzchni na podstawie zarejestrowanych drgań. Istotnym elementem mojego wkładu było opracowanie funkcji przeniesienia pozwalającej na przejście od pomiarów w wybranym punkcie modelu typu Half-Car do rekonstrukcji rzeczywistego profilu nawierzchni.

W zbliżonym okresie rozpocząłem również prace nad zastosowaniem metody optycznej *structure-from-motion* (SfM) do oceny objętości gruntu. Pierwsza publikacja związana z tą tematyką ukazała się w 2018 roku (pkt. II.12 [21]). Dalszy rozwój badań został jednak czasowo wstrzymany ze względu na możliwość odbycia stażu naukowego na University of Michigan.

W latach 2019–2020 odbyłem roczny staż na University of Michigan pod kierunkiem prof. Michałowskiego. Moim początkowym zadaniem było opracowanie urządzenia do badania właściwości kontaktowych geomateriałów w skali pojedynczego ziarna – obejmowało to pełen cykl od koncepcji, przez wykonanie aparatury, po pierwsze eksperymenty i analizę danych. Zaprojektowałem i wykonałem urządzenie przy współpracy z zespołem technicznym oraz przeszedłem szkolenie z zaawansowanych technik obrazowania (SEM, AFM). Badania miały na celu ilościową weryfikację hipotezy dojrzewania kontaktów ziarnowych prowadzącego do wzrostu sztywności i wytrzymałości zdeponowanego piasku. Wstępne testy aparatury zakończyły się tuż przed wprowadzeniem obostrzeń związanych z pandemią COVID-19, co wymusiło zmianę tematyki na badania teoretyczne i symulacyjne zjawiska przesklepiania (*arching*) w ośrodkach ziarnistych. Opracowywałem analizy redystrybucji obciążeń (np. w nasypach na kolumnach) poprzez wizualizację trajektorii naprężeń i identyfikację kluczowych cech mechanizmu. Wyniki tej pracy zostały opublikowane w czasopiśmie *Computers and Geotechnics* (pkt. II.12 [11]).

W trakcie stażu rozpocząłem również intensywną pracę z metodą elementów dyskretnych (*Discrete Element Method* – DEM). Po jego zakończeniu kontynuowałem rozwijanie kompetencji w tym zakresie, a także rozwój samego narzędzia, m.in. poprzez implementację nowych modeli i funkcjonalności w otwartym oprogramowaniu Yade (np. metodę modelowania kruszenia, czy implementację więzów lepko-sprężystych jako warunków brzegowych).

Obecnie moje zainteresowania badawcze koncentrują się przede wszystkim na procesach zagęszczania gruntów i kruszyw oraz na metodach oceny zagęszczenia. W ramach tej tematyki realizuję dwa nurty badawcze: (1) badania podstawowe dotyczące przebiegu procesu zagęszczania i towarzyszących mu mechanizmów (z wykorzystaniem DEM), oraz (2) badania aplikacyjne związane z wykorzystaniem metody SfM do oceny jakości zagęszczenia.

Równolegle angażuję się w projekty prowadzone pod kierownictwem innych badaczy, szczególnie te, w których wykorzystuję kompetencje z zakresu modelowania numerycznego. Jednym z takich obszarów są badania nad drganiami i hałasem w transporcie kolejowym. Jeszcze przed wyjazdem na staż uczestniczyłem w przygotowaniu wniosków grantowych BRIK, a w późniejszym okresie brałem udział w ich realizacji, modelując drgania elementów nawierzchni kolejowej odpowiedzialnych za generowanie hałasu.

Kolejnym obszarem mojej działalności jest projekt EUROfusion, w którym zajmuję się modelowaniem deformacji obudowy komory testowej w warunkach operacyjnych oraz podczas scenariuszy eksploatacyjnych i awaryjnych.

OPIS SZCZEGÓŁOWY – osiągnięcie pierwsze (wiodące)

Osiągnięciem naukowym stanowiącym podstawę niniejszego wniosku habilitacyjnego jest cykl pięciu powiązanych publikacji dotyczących modelowania procesów zagęszczania gruntów i kruszyw metodą elementów dyskretnych (DEM) (pkt I.2, poz. 1-5). Celem cyklu było opracowanie, rozwinięcie i zastosowanie nowych narzędzi numerycznych umożliwiających ilościową analizę mechanizmów zagęszczania ośrodków ziarnistych, ze szczególnym uwzględnieniem zjawisk pękania ziaren, ewolucji mikrostruktury oraz wpływu parametrów dynamicznych procesu.

Publikacje składające się na cykl obejmują:

- (1) opracowanie i implementację nowatorskiego algorytmu pękania brył wielosferycznych (clumps), umożliwiającego realistyczną symulację kruszenia ziaren;
- (2) rozwój lepko-sprężystych warunków brzegowych do pełnoskalowych symulacji dynamicznego zagęszczania;
- (3) badania nad kontrolowaną dywersyfikacją uziarnienia i fraktalną naturą rozdrabniania;
- (4) symulację dynamicznego zagęszczania w aparacie Proctora z jawnym modelowaniem pękania ziaren;
- (5) pełnoskalową symulację procesu zagęszczania gruntu uwzględniającą rzeczywiste parametry pracy maszyny vibracyjnej oraz ewolucję mikrostruktury zagęszczanej warstwy.

Cykl ten stanowi oryginalny i znaczący wkład w rozwój dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport ponieważ dostarcza nowych algorytmów i modeli numerycznych umożliwiających analizę procesów dotychczas trudnych do odtworzenia z użyciem dostępnych narzędzi, a także tworzy podstawy do praktycznej oceny i optymalizacji technologii zagęszczania. W ramach cyklu opracowano metody szeroko udostępnione społeczności naukowej (m.in. w oprogramowaniu Yade), potwierdzono ich poprawność analityczną i eksperymentalną oraz wykazano ich przydatność w analizie procesów mających kluczowe znaczenie w geotechnice i inżynierii drogowej.

Jednym z kluczowych obszarów mojej działalności badawczej jest proces zagęszczania gruntów i kruszyw oraz towarzyszące mu mechanizmy mikrostrukturalne. W praktyce inżynierskiej punktem odniesienia dla oceny stopnia zagęszczenia jest najczęściej badanie Proctora, definiujące maksymalną gęstość objętościową możliwą do uzyskania przy tzw. wilgotności optymalnej, dla zadanego poziomu energii zagęszczania. Należy jednak podkreślić, że wartość uzyskiwana w badaniu Proctora nie jest wartością graniczną z punktu widzenia możliwego zagęszczenia. W wielu zastosowaniach inżynierskich, w szczególności w podłożu

konstrukcji nawierzchni dróg wyższych klas, wymagany jest poziom zagęszczenia przewyższający wartości wynikające z klasycznego badania Proctora. Osiągnięcie tak wysokiego zagęszczenia wymaga zastosowania energii większej niż standardowa, co rodzi pytanie o wpływ tak intensywnego oddziaływania na strukturę ośrodka ziarnistego.

Zasadniczym problemem badawczym, który podjąłem, było zrozumienie, czy zwiększona energia zagęszczania prowadzi wyłącznie do poprawy upakowania i lepszego przylegania ziaren, czy też powoduje ich uszkodzenia i pękanie, a jeśli tak, to jakie znaczenie ma to pękanie dla dalszego przebiegu procesu zagęszczania oraz dla właściwości mechanicznych ośrodka. Poszukując odpowiedzi na to pytanie, rozpocząłem intensywne wykorzystanie metody DEM do modelowania procesów zagęszczania gruntów i kruszyw.

Już na wczesnym etapie tych prac zidentyfikowałem istotne ograniczenia standardowych modeli DEM stosowanych do odwzorowania ośrodków ziarnistych. Ze względu na jawny schemat całkowania w czasie metoda DEM jest bardzo kosztowna obliczeniowo, co wymusza liczne uproszczenia. W przypadku modelowania gruntów i kruszyw pomija się zazwyczaj najdrobniejsze frakcje uziarnienia, a kształt ziaren przybliża się cząstkami sferycznymi lub bryłami wielosferycznymi (ang. *clumps*). Uproszczenia te wpływają na dokładność odwzorowania zjawisk fizycznych, jednak przy odpowiednio dobranych parametrach mogą stanowić akceptowalny kompromis między realizmem modelu a kosztami obliczeniowymi. Przyjąłem zatem podejście, w którym kształt ziaren odwzorowywany jest właśnie za pomocą brył wielosferycznych.

Okazało się jednak, że dla takich brył brakowało w dostępnych implementacjach DEM wiarygodnej metody modelowania pękania w trójwymiarowych symulacjach. Implementacja takiej metody, wymagała rozwiązania szeregu problemów związanych z, m.in. brakiem oddziaływań pomiędzy członami tworzącymi bryłę (co wprowadza rozbieżności między oszacowaniem stanu naprężenia takich członów w porównaniu do samodzielnych cząstek sferycznych podlegających analogicznemu obciążeniu) oraz niespójnością w zakresie masy podczas podstawiania mniejszych elementów za fragment kruszonego ziarna (teoretyczna suma mas członów może być większa od masy samej bryły). Utrudniało to poprawne odtwarzanie zjawisk związanych z kruszeniem ziaren, które są kluczowe przy większych energiach zagęszczania.

W odpowiedzi na te problemy opracowałem i współautorsko zaprezentowałem nowy algorytm pękania brył wielosferycznych do zastosowania w symulacjach DEM kruszyw podatnych na kruszenie (publikacja 1 w pkt. I.2). W artykule tym przedstawiono algorytm, który rozwiązuje szereg istotnych problemów związanych z modelowaniem pękania sztywnych

brył wielosferycznych oraz zjawisk zbliżonych do ścierania. Na przykład zaproponowanie korekty tensora naprężeń Love'a–Webera, pozwoliło na szacowanie stanu naprężenia w poszczególnych członach bryły wielosferycznej tak aby uzyskany wynik był porównywalny ze stanem analogicznie obciążonej samodzielnej cząstki sferycznej. Dzięki temu możliwe stało się wiarygodne wyznaczanie lokalnych kryteriów zniszczenia wewnątrz ziarna reprezentowanego przez bryłę. Kolejnym kluczowym składnikiem algorytmu był opracowany schemat rozkruszania, który zachowuje bilans masy w układzie, a jednocześnie nie wprowadza nadmiernej energii potencjalnej wynikającej z nakładania się cząstek po pęknięciu. Dodatkowo zastosowano odpowiednio zaadaptowane kryterium wytrzymałościowe, umożliwiające uchwycenie efektu skali (zależności wytrzymałości od rozmiaru cząstki). Opracowany algorytm został zaimplementowany w otwartym oprogramowaniu Yade i udostępniony społeczności naukowej w sposób wolny, co umożliwia jego dalsze wykorzystanie oraz rozwój przez innych badaczy.

W opracowaniu tym mój wkład miał charakter wiodący i obejmował autorskie zaprojektowanie algorytmu pęknięcia bryły wielosferycznych, jego implementację w oprogramowaniu Yade, przygotowanie badań numerycznych wraz z walidacją oraz opracowanie pierwszej wersji manuskryptu wraz z rysunkami, wizualizacjami i większością wykresów.

Równolegle z pracami nad modelowaniem pęknięcia ziaren w ośrodkach ziarnistych pojawił się pomysł wykorzystania metody DEM do pełnoskalowej symulacji procesu zagęszczania gruntu. Celem było odwzorowanie rzeczywistych warunków pracy maszyn zagęszczających i zachowania się warstw podłoża przy wysokich energiach oddziaływania.

Nawet przy pominięciu zjawiska rozkruszania kruszywa, numeryczna symulacja dużych objętości gruntu poddanych długotrwałemu, dynamicznemu procesowi zagęszczania jest niezwykle czasochłonna i energochłonna obliczeniowo. W przeciwieństwie do analiz quasi-statycznych, nie ma tu możliwości bezkarnego stosowania silnie zawyżonych prędkości obciążania w celu przyspieszenia obliczeń, ponieważ prowadziłoby to do istotnego zafałszowania odpowiedzi dynamicznej układu.

W związku z tym skoncentrowałem się na poszukiwaniu sposobu redukcji kosztu obliczeniowego poprzez odpowiedni dobór warunków brzegowych. Zaproponowałem zastosowanie zdyskretyzowanego podłoża, którego elementy połączone są z ośrodkiem za pomocą więzów lepko–sprężystych.

Tak zdefiniowane podłoże ma dwie zasadnicze zalety:

- Niejednorodna deformacja podłoża – zdyskretyzowane, sprężyste podłoże może odkształcać się w sposób nierównomierny. Umożliwia to uzyskanie realistycznego rozkładu przemieszczeń i sił wewnątrz stosunkowo cienkiej warstwy modelowanego gruntu, bez konieczności wprowadzania dodatkowych warstw pośrednich pomiędzy obszarem zainteresowania a sztywnymi warunkami brzegowymi. W praktyce pozwala to znacząco ograniczyć rozmiar domeny obliczeniowej.
- Realistyczne tłumienie drgań – lepko–sprężysty charakter więzów powoduje tłumienie drgań, co znacznie lepiej odzwierciedla rzeczywistość, w której energia drgań rozchodzi się i rozprasza w półprzestrzeni gruntowej, a nie odbija idealnie od krawędzi skończonego obszaru.

W zaproponowanym podejściu lepko–sprężysty warunek brzegowy został zbudowany wykorzystując model reologiczny Burgersa. Odpowiedni dobór parametrów reologicznych umożliwia jednak jego uproszczenie do prostszego modelu Zenera lub czysto sprężystego modelu dyskretnego podłoża. W szczególności, w przypadku zastosowania wyłącznie parametrów sprężystych, zachowanie takiego zdyskretyzowanego podłoża sprężystego odpowiada klasycznemu modelowi podłoża Winklera, dobrze znanemu w geotechnice.

Mój indywidualny wkład obejmował opracowanie koncepcji lepko–sprężystego warunku brzegowego, jego pełną implementację w Yade, przygotowanie i realizację badań numerycznych wraz z walidacją na podstawie rozwiązania analitycznego przygotowanego przez prof. Zbiciaka oraz wykonanie wstępnej wersji manuskryptu i większości materiałów graficznych. Ponadto przedstawiłem przykład obliczeniowy, który w sposób czytelny ilustruje zalety zastosowanego warunku brzegowego zarówno w kontekście odwzorowania rozkładu przemieszczeń i sił, jak i w zakresie realistycznego tłumienia drgań w trakcie symulowanego procesu zagęszczania.

Zanim przystąpiłem do symulacji dynamicznego zagęszczania gruntu w skali laboratoryjnej i pełnoskalowej, skoncentrowałem się na analizie zjawisk zachodzących w znacznie prostszych, a jednocześnie dobrze kontrolowalnych warunkach: w układzie jednowymiarowej kompresji ośrodka ziarnistego skrzepowanego w pojemniku i poddawanego statycznemu zagęszczaniu. W tym zadaniu wykorzystałem opracowaną wcześniej metodę modelowania pękania, która pozwalała nie tylko na symulację kruszenia złożonych brył wielosferycznych, lecz także na efektywne modelowanie pękania prostych cząstek sferycznych.

Inspiracją do rozpoczęcia tych badań były obserwacje przedstawione w klasycznej pracy McDowella i de Bono (McDowell, G. R., & de Bono, J. P. (2013). *On the micro mechanics of*

one-dimensional normal compression. Géotechnique, 63(11), 895-908.), w której autorzy opisali mechanizmy mikromechaniczne związane z jednowymiarową kompresją kruszywa. Zauważyli oni, że w skrępowanych warunkach ściskania kruszywo ulega pękaniu w sposób prowadzący do powstania charakterystycznego fraktalnego rozkładu wielkości ziaren. W takim układzie większe ziarna podczas pękania wytwarzają fragmenty stopniowo wypełniające przestrzenie między cząstkami, co umożliwia dalsze dogęszczenie materiału. Mechanizm ten jest szczególnie efektywny, ponieważ dywersyfikacja ziaren (od dużych po bardzo małe) naturalnie prowadzi do zmniejszenia porowatości i zwiększenia gęstości układu.

Zjawisko to skłoniło mnie do postawienia pytania o to, czy możliwe jest kontrolowanie procesu dywersyfikacji ziaren poprzez ingerencję w lokalną wytrzymałość materiału. W metodzie DEM, dzięki pełnej kontroli nad właściwościami poszczególnych cząstek, takie eksperymenty są naturalnie możliwe. Jednak istotniejsze było dla mnie sprawdzenie, czy efekt ten można odtworzyć również w warunkach eksperymentalnych.

Wspólnie ze współautorami pracy (publikacja 3 w pkt. I.2) przeprowadziliśmy serię badań, w których próbki materiału kruchego (m.in. kulek szklanych oraz naturalnego kruszywa) mieszano z cząstkami o znacznie większej wytrzymałości, takimi jak kulki stalowe. Następnie tak przygotowane mieszanki poddawano jednowymiarowemu ściskaniu.

Analiza wyników, zarówno numerycznych, jak i eksperymentalnych, wykazała, że podczas ściskania, granulacja takiej mieszanki kieruje się podobną zasadą, co w przypadku materiału poddanego czystemu rozdrabnianiu. Oznacza to, że rzeczywista granulacja produktu, nie uwzględniając kulek stalowych, jest modyfikowana w określony sposób: niepękające cząstki o określonym rozmiarze zmniejszają liczbę łamliwych cząstek o tym samym rozmiarze w rozdrobnionej mieszance.

W szczególności udowodniliśmy, że typowa dla kruszenia fraktalna granulacja może zostać „oszukana” poprzez dodanie do materiału wybranej frakcji cząstek niepodatnych na pęknięcie. Po ściskaniu mieszanki zawierające takie cząstki wykazywały:

- strukturalną analogię do klasycznego rozdrabniania (fraktalność),
- ale z modyfikacją odpowiadającą wymuszonej „nieobecności” ziaren o rozmiarze zbliżonym do niepękających cząstek w rozdrobnionym produkcie.

Oznacza to, że zawartość niektórych frakcji uziarnienia w końcowym produkcie można kontrolować, manipulując składem mieszaniny początkowej. Wyniki te mają potencjalne zastosowania w technologii kruszenia surowców, przetwarzaniu skał i materiałów ziarnistych, optymalizacji procesów produkcyjnych, recyklingu, projektowaniu nowych metod

kontrolowanego rozdrabniania. Ze względu na swój aplikacyjny charakter, metoda ta została również przez nas opatentowana (patent [1] w pkt. III.3).

W tej pracy wyszedłem od autorskiej hipotezy dotyczącej wpływu niepękających cząstek na ewolucję uziarnienia podczas ściskania. Na jej podstawie przygotowałem i przeprowadziłem serię symulacji DEM, a także współuczestniczyłem w planowaniu badań laboratoryjnych i wykonałem część pomiarów (przygotowanie próbek, nadzór nad testami). Odpowiadałem za analizę zarówno wyników numerycznych, jak i analiz sitowych, a także ich wspólne zestawienie. Przygotowałem pierwszą wersję manuskryptu oraz wykonałem rysunki i wykresy użyte w artykule.

Naturalnym rozwinięciem prowadzonych przeze mnie prac nad procesem zagęszczania ośrodków ziarnistych było zastosowanie metody DEM do analizy dynamicznego zagęszczania w aparacie Proctora, zarówno przy energii normalnej, jak i przy energii zmodyfikowanej. Właśnie w pracy (publikacja 4 w pkt. I.2), wróciliśmy do postawionego wcześniej pytania o wpływ pęknięcia ziaren na zagęszczenie.

W pracy tej efekt kruszenia analizowano z dwóch perspektyw. Pierwsze podejście polegało na symulowaniu zagęszczania materiału o zmienionym uziarnieniu, co umożliwiała ocenę, jak zmiana krzywej uziarnienia wpływa na osiąganą zagęszczenie przy różnych energiach oddziaływania. Drugie podejście (bardziej bezpośrednie i fizyczne) polegało na jawnym modelowaniu pęknięcia ziaren w trakcie procesu udarowego, z wykorzystaniem opracowanego przeze mnie wcześniej algorytmu pęknięcia brył wielosferycznych. W rezultacie uzyskano pierwszą w literaturze symulację DEM dynamicznego zagęszczania w aparacie Proctora z uwzględnieniem rozkruszania.

Do badań wybrano gruboziarniste kruszywo granitowe, które poddano zagęszczaniu z różnymi poziomami energii (25, 50, 75 i 125 uderzeń ubijaka na warstwę). Celem było określenie, w jakim stopniu pęknięcie ziaren wpływa na gęstość materiału intensywnie zagęszczanego oraz czy efekt ten jest koniecznym składnikiem wyjaśnienia wzrostu gęstości obserwowanego w praktyce laboratoryjnej.

Otrzymane wyniki pokazały, że symulacje pozwalają w sposób przejrzysty odseparować dwa współwystępujące mechanizmy: dopasowywanie się do siebie ziaren oraz zmiany krzywej uziarnienia wynikające z kruszenia. Oba te czynniki okazały się istotne przy modelowaniu wzrostu gęstości objętościowej w przypadku analizowanego, jednorodnego kruszywa. Należy zauważyć, że odseparowanie tych efektów było możliwe, dlatego, że parametry ziaren zostały tak dobrane, aby kruszenie nie wpływało znacznie na krzywą uziarnienia. Pęknięcie w tym wypadku nie było typowym rozkruszaniem, a miało charakter abrazyjny – pękały niewielkie

„wystające” fragmenty ziaren, co umożliwiało przemieszczanie i dogęszczanie zaklinowanych cząstek.

Zidentyfikowane różnice pomiędzy wynikami numerycznymi i laboratoryjnymi można przypisać przede wszystkim uproszczeniom przyjętym w modelowaniu: ziaren nie odwzorowywano w pełni realistycznie (zastępowano je bryłami wielosferycznymi), a najmniejsze frakcje poniżej 4 mm zostały pominięte z uwagi na ograniczenia obliczeniowe. Dodatkowo pokazano, że techniki stosowane w DEM w celu odwzorowania kanciastości ziaren, takie jak tarcie toczne, choć poprawiają realizm symulacji, nie są w pełni wystarczające, aby całkowicie odtworzyć złożoną geometrię i efekt zazębiania się ziaren.

Pomimo tych ograniczeń przeprowadzone badania jednoznacznie potwierdziły, że kruszenie ziaren jest istotnym mechanizmem umożliwiającym osiągnięcie wysokiego stopnia zagęszczenia materiałów ziarnistych przy intensywnym obciążeniu uderzeniowym. Wyniki uzyskane w projekcie tworzą silną podstawę do dalszego rozwijania numerycznych i empirycznych modeli zagęszczania, szczególnie w kontekście procesów wymagających dużej energii oraz oceny wpływu rozdrabniania na właściwości mechaniczne materiałów.

Mój wkład obejmował kluczowe elementy zarówno części eksperymentalnej, jak i numerycznej. Uczestniczyłem w projektowaniu programu badań laboratoryjnych oraz asystowałem przy ich wykonaniu: badania Proctora, analizy sitowe, pomiary wytrzymałości ziaren i pomiary kalibracyjne niezbędne do symulacji DEM. Wykonałem także analizę kształtu ziaren na podstawie modelowania 3D. Przygotowałem i przeprowadziłem serię symulacji numerycznych odpowiadających testom laboratoryjnym, a następnie opracowałem pierwszą wersję manuskryptu wraz z materiałem ilustracyjnym.

Finalnym punktem niniejszego cyklu publikacji jest moja samodzielna praca opublikowana w czasopiśmie *Granular Matter* (publikacja 5 w pkt. I.2) przedstawiająca pełnoskalową symulację zagęszczania gruntu. W pracy tej posłużyłem się wynikami eksperymentalnymi uzyskanymi w kierowanym przeze mnie grantie (grant [2] w pkt. II.10 na kwotę 159 756 zł). Dzięki doświadczeniom zdobytym w poprzednich etapach prac (w szczególności opracowaniu lepko-sprężystego zdyskretyzowanego podłoża oraz analizom dotyczącym dopuszczalnych uproszczeń w modelowaniu zagęszczania) możliwe było stworzenie numerycznego modelu, który odtwarza kluczowe aspekty rzeczywistego procesu zagęszczania dynamicznego.

Zaproponowany model pozwolił na rozdzielenie wpływu częstotliwości pracy urządzenia zagęszczającego od wpływu amplitudy siły odśrodkowej, co jest praktycznie niemożliwe w bezpośrednim eksperymencie. Umożliwiło to szczegółową analizę ewolucji mikrostruktury

ośrodka ziarnistego, w tym zmian anizotropii i przestrzennej zmienności gęstości. Wyniki pokazały, że w analizowanym zakresie częstotliwości (50–90 Hz) sama częstotliwość odgrywa jedynie marginalną rolę w poprawie efektywności zagęszczania. Kluczowym czynnikiem odpowiedzialnym za wzrost gęstości okazała się zależna od częstotliwości amplituda siły odśrodkowej, która decyduje o zdolności urządzenia do niszczenia wewnętrznej struktury gruntu i przewyższania rosnącej sztywności zagęszczanej warstwy.

Analiza doprowadziła do wniosku, że proces zagęszczania postępuje dopóty, dopóki siła oddziaływania jest wystarczająca, by inicjować mikroprzemieszczenia i lokalne zniszczenia struktury ziarnistej. Wraz z kolejnymi cyklami zagęszczania warstwa staje się jednak coraz sztywniejsza, a jej struktura bardziej stabilna. Po przekroczeniu pewnego poziomu zagęszczenia kontynuacja zagęszczania okazuje się nieefektywna, a nawet przeciwnie skuteczna: w górnych partiach warstwy pojawia się zjawisko lokalnego rozluźniania ziaren, które pogarsza jakość zagęszczenia i może prowadzić do niejednorodnej struktury materiału.

W tej publikacji byłem jedynym autorem – samodzielnie opracowałem koncepcję badawczą, przygotowałem i wykonałem komplet symulacji DEM, przeprowadziłem analizę wyników oraz przygotowałem cały manuskrypt, w tym rysunki, wizualizacje i wykresy.

Przedstawiony cykl publikacji stanowi spójny i kompletny program badawczy, obejmujący kluczowe aspekty modelowania procesów zagęszczania ośrodków ziarnistych metodą DEM: od rozwoju podstawowych algorytmów numerycznych, poprzez tworzenie realistycznych warunków brzegowych i analizę mikromechanizmów, aż po pełnoskalowe symulacje dynamicznego zagęszczania. W kolejnych etapach badań opracowałem nowy algorytm pękania brył wielosferycznych, wdrożyłem lepko-sprężyste warunki brzegowe umożliwiające odwzorowanie realistycznej deformacji podłoża przy ograniczonych wymiarach modelu, zweryfikowałem wpływ kontrolowanej dywersyfikacji uziarnienia oraz pokazałem, że pękanie ziaren stanowi istotny mechanizm umożliwiający osiągnięcie wysokich wskaźników zagęszczenia. Zwieńczeniem cyklu była pełnoskalowa symulacja dynamicznego zagęszczania, umożliwiająca odseparowanie wpływu częstotliwości od amplitudy siły zagęszczania i szczegółową analizę ewolucji mikrostruktury warstwy gruntowej. Osiągnięcie to wnosi istotny wkład w rozwój dziedziny inżynieria lądowa, geodezja i transport, dostarczając nowych narzędzi numerycznych i metod analitycznych, które pozwalają na ilościową ocenę procesów dotychczas trudnych do odtworzenia oraz stanowią podstawę do tworzenia lepiej uzasadnionych modeli obliczeniowych i efektywniejszych technologii zagęszczania.

OPIS SZCZEGÓŁOWY – osiągnięcie drugie (dodatkowe)

Drugim osiągnięciem naukowym przedstawionym w niniejszym wniosku jest cykl publikacji dotyczących rozwijania metod pomiaru gęstości i zagęszczenia kruszyw z zastosowaniem metody optycznej *Structure from Motion* (publikacje: pkt I.4 poz. 1-4). Celem cyklu było zastosowanie i walidacja optycznych metod przestrzennej rekonstrukcji powierzchni gruntów oraz zbadanie ich przydatności w pomiarach objętości, osiadania i jakości zagęszczenia w warunkach laboratoryjnych oraz polowych.

Publikacje składające się na cykl obejmują kolejno:

- (1) wstępną walidację pomysłu wykorzystania metody SfM do oceny zagęszczenia gruntów;
- (2) analizę dokładności metody SfM w pomiarze kształtu i objętości pojedynczych ziaren keramzytu oraz porównanie jej z tomografią komputerową;
- (3) zastosowanie SfM w eksperymentalnym wyznaczaniu wskaźnika zagęszczenia warstw gruntowych poprzez pomiar objętości dołków i osiadania powierzchni gruntu w trakcie zagęszczania;
- (4) wykorzystanie SfM w badaniach wpływu częstotliwości zagęszczania na rozkład gęstości po głębokości warstwy oraz ocenę przydatności parametrów dynamicznych jako wskaźników jakości zagęszczenia.

Cykl publikacji stanowi oryginalny i znaczący wkład w rozwój metod oceny zagęszczenia w inżynierii lądowej, geodezja i transport ponieważ prezentuje nowatorskie, nisko-kosztowe i wysoce dokładne narzędzia pomiarowe, które mogą zastąpić lub uzupełnić klasyczne, pracochłonne i obarczone dużą niepewnością metody terenowe (takie jak objętościomierze piaskowe i wodne). Prace te wykazały, że SfM umożliwia precyzyjny pomiar 3D powierzchni gruntu oraz objętości próbek, pozwala na ocenę zmian gęstości w trakcie zagęszczania i może stać się podstawą do tworzenia nowoczesnych standardów kontroli jakości robót ziemnych. Doświadczenia zdobyte w ramach cyklu zaowocowały również opracowaniem prototypu urządzenia pomiarowego, chronionego prawem własności przemysłowej, co podkreśla praktyczny charakter osiągnięcia.

Moje wcześniejsze doświadczenia z optycznymi metodami pomiarowymi naturalnie skierowały moje zainteresowania ku ich zastosowaniom w budownictwie, zwłaszcza w obszarze analiz zagęszczenia gruntów i kruszyw. W tym kontekście szczególnie obiecująca okazała się metoda SfM, która nie wymaga specjalistycznej aparatury, a przy odpowiednio zaplanowanej akwizycji zdjęć pozwala na bardzo dokładne odtworzenie trójwymiarowego kształtu obiektu, a tym samym jego objętości. SfM polega na rekonstrukcji geometrii 3D na podstawie zestawu zdjęć wykonanych z różnych perspektyw. Algorytmy automatycznie

identyfikują wspólne punkty na obrazach oraz odtwarzają ich wzajemne położenie w przestrzeni. W efekcie powstaje gęsta chmura punktów i model powierzchni o wysokiej dokładności, możliwy do dalszej analizy ilościowej.

Pierwsza publikacja z cyklu (publikacja 1 w pkt. I.4) stanowiła wstępną ocenę przydatności metody SfM w pomiarach objętości wykorzystywanych do wyznaczania wskaźnika zagęszczenia gruntów. W pracy przeprowadzono dwustopniowe badania laboratoryjne, w których rekonstrukcje 3D dołków po pobraniu próbek wykonywano z wykorzystaniem techniki SfM (wykorzystano komercyjne oprogramowanie Bentley ContextCapture służące do inwentaryzacji budowlanych). Uzyskane modele porównano z wynikami dwóch klasycznych metod terenowych: metody objętościomierza piaskowego oraz metody wodnej (przyjętej jako wzorcową, stanowiącą punkt odniesienia).

W pierwszej serii testów oceniono zachowanie metody SfM w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, wykonując pomiary objętości dziesięciu dołków i przeprowadzając analizę statystyczną uzyskanych wyników. Wykazano, że metoda optyczna charakteryzuje się znacząco mniejszym rozrzutem wyników oraz węższymi przedziałami ufności w porównaniu z metodą piaskową. W drugiej części testów skupiono się na dokładności i powtarzalności pomiaru, wykorzystując naczynie o znanej objętości imitujące dołek.

Wyniki pokazały, że pomiar metodą optyczną w stosunku do objętościomierza piaskowego charakteryzuje się zarówno większą precyzją (szerokość 90 % przedziału ufności wynosząca 0,3% wobec 4,6 %) jak i dokładnością (średni błąd 12 cm³ wobec 36 cm³). Analiza pokazała, że niepewność pomiaru objętości ma bezpośredni wpływ na błąd wyznaczanego wskaźnika zagęszczenia, a różnica rzędu 2% może przekładać się na zmianę klasy technicznej warstwy konstrukcyjnej. Z tego względu poprawa dokładności pomiaru objętości ma istotne znaczenie praktyczne. Dodatkową wartością metody optycznej była możliwość uzyskania pełnej rekonstrukcji 3D, co pozwala na dodatkową weryfikację jakości pomiaru w sposób niemożliwy dla metod tradycyjnych.

W tej pracy zaproponowałem zastosowanie metody optycznej do oceny zagęszczenia gruntu. Kierowałem badaniami wykonywanymi przez dyplomanta, który został później współautorem pracy. Nadzorowałem planowanie eksperymentu, asystowałem w badaniach laboratoryjnych oraz nadzorowałem analizy jakościowe i ilościowe (w tym statystyczne). Przygotowałem pierwszą wersję manuskryptu oraz wykonałem część rysunków koncepcyjnych i wykresów, a także jako autor korespondencyjny uczestniczyłem w procesie publikacji do końca.

Druga publikacja z cyklu (publikacja 2 w pkt. I.4) pokazuje, że wyniki pomiarów kształtu uzyskane metodą SfM są bardzo dokładne (punktem odniesienia były skany wykonane metodą tomografii komputerowej). Praca ta odnosiła się do problemu analizy zagęszczenia keramzytu. W przypadku wykorzystania keramzytu, jako zasypki w budownictwie zwykle nie stosuje się typowych miar zagęszczenia takich jak wskaźnik zagęszczenia czy wskaźnik porowatości. Stosuje się zwykle uproszczone kryterium, polegające na określeniu czy zagęszczona warstwa zmniejszyła swoją grubość czyli również objętość o co najmniej 10%. Materiał ten znacznie różni się od typowych kruszyw stosowanych w budownictwie i różne czynniki stają na przeszkodzie stosowania klasycznych miar zagęszczenia. Na przykład badanie Proctora mogłoby znacznie rozkruszyć taką próbkę, a do wyznaczenia wskaźnika porowatości trzeba byłoby dokładnie znać gęstość ziaren, co nie jest takie proste w przypadku bardzo porowatych kruszyw wywierających również pory otwarte. Właśnie w celu rozwiązania tego ostatniego problemu przeprowadzono analizy gęstości ziaren keramzytu różnymi metodami w tym także SfM. W pracy tej zastosowałem SfM do pomiaru kształtu, objętości i w konsekwencji gęstości ziaren. Wyniki uzyskane metodą SfM porównano z pomiarami tomografii komputerowej, która stanowiła punkt odniesienia. Uzyskano bardzo wysoką zgodność: średnia różnica gęstości wyniosła 0,33%, co odpowiada jedynie 0,0016 g/cm³, a różnice kształtu, mierzone odległością między powierzchniami modeli 3D (95. percentyl), nie przekraczały 129 μm. Wyniki te potwierdziły, że SfM może być precyzyjną alternatywą dla tradycyjnych technik pomiarowych, szczególnie w przypadku materiałów porowatych i nasiąkliwych.

W tej pracy zaproponowałem hipotezę badawczą i zaplanowałem eksperyment dotyczący zastosowania SfM do wyznaczania gęstości ziaren keramzytu. Wykonałem pomiary optyczne oraz rekonstrukcje 3D, a także przeprowadziłem ilościowe porównania modeli SfM ze skanami tomografii komputerowej, w tym opracowałem metodę wyznaczania obwiedni ziaren z otwartymi porami. Przygotowałem pierwszą wersję manuskryptu oraz większość rysunków i wizualizacji.

Trzecia praca z cyklu (publikacja 3 w pkt. I.4) dotyczyła wykorzystania metody SfM do bezpośredniej oceny wskaźnika zagęszczenia warstwy piasku zagęszczanej w kanale gruntowym za pomocą zagęszczarki płytowej. Między kolejnymi przejazdami urządzenia wykonywano pomiary osiadania powierzchni gruntu (niwelatorem), pomiary modułów dynamicznych oraz akwizycję zdjęć do rekonstrukcji SfM. Przed i po zagęszczeniu pobierano również próbki gruntu, przy czym objętość powstałych dołków mierzono metodą SfM. W stosunku do dostępnych na rynku metod SfM ma liczne zalety. Na przykład daje dużo większą swobodę co objętości mierzonej próbki. Zwykle objętościomierze piaskowe lub wodne są

produkowane w różnych wariantach dostosowanych do wąskich zakresów pomiaru objętości. Ponadto wymagają one dodatkowej kalibracji: objętościomierz jest piaskowy kalibracji gęstości piasku, a objętościomierz wodny ogólnej kalibracji pomiaru, gdyż bezpośrednio uzyskiwany nim wynik istotnie różni się od faktycznej objętości dołka. Zaletą tradycyjnych metod jest jednak możliwość uzyskania wyniku od razu, podczas gdy zdjęcie z metody SfM wymagają przetworzenia. Zwykle jednak nie jest to problem gdyż najbardziej czasochłonnym elementem pomiaru gęstości objętościowej szkieletu gruntowego jest pomiar wilgotności.

Wyniki wykazały bardzo wysoką dokładność: średni błąd osiadania względem klasycznego niwelatora wyniósł 0,36 mm, a błąd średniokwadratowy – 1,19 mm. Ponadto na podstawie pomiarów osiadania możliwa była estymacja zmiany gęstości warstwy, pod warunkiem przyjęcia, że odkształcenia dotyczą głównie górnej warstwy poddawanej zagęszczeniu. Różnica pomiędzy gęstością zmierzoną bezpośrednio a oszacowaną z wykorzystaniem SfM wyniosła zaledwie 0,002 g/cm³.

Mój wkład w tę publikację obejmował zaproponowanie koncepcji wykorzystania SfM jako metody pośredniej oceny zagęszczenia poprzez pomiar osiadań. Opracowałem plan eksperymentu i nadzorowałem jego realizację, wykonując również pomiary optyczne wykorzystane do rekonstrukcji 3D. Przeprowadziłem analizę modeli SfM oraz ocenę dokładności metody, w tym analizę statystyczną wyników. Opracowałem wstępną wersję artykułu oraz część materiału graficznego.

Ostatnia praca z cyklu (publikacja 4 w pkt. I.4) dotyczyła oceny wpływu częstotliwości pracy zagęszczarki na skuteczność zagęszczania pospółki. Tym razem metoda SfM stanowiła przede wszystkim element metodyki pomiarowej, a nie przedmiot odrębnej analizy, przy czym jej wcześniejsza walidacja umożliwiła dokładne monitorowanie zmian objętości warstwy i różnic zagęszczenia na różnych głębokościach. Pomiar objętości dołka wykonywano dwuetapowo – najpierw wykonywano i mierzono płytki dołek, a następnie go pogłębiano i mierzono ponownie, co pozwoliło przeanalizować zmienność zagęszczenia w przekroju pionowym. Dzięki zastosowaniu SfM możliwe było również szacowanie zmian gęstości w trakcie procesu zagęszczania, co znacząco poszerzyło możliwości interpretacji wyników. Badania wykazały, że w analizowanym zakresie zmiana częstotliwości nie miała istotnego wpływu na osiągnięcie wymaganego stopnia zagęszczenia, natomiast wpływała na rozkład gęstości w przekroju pionowym warstwy. Wyższa częstotliwość pracy urządzenia generowała większą dynamiczną siłę nacisku, co prowadziło do intensywniejszego zagęszczania materiału na większej głębokości. Interesującym wnioskiem praktycznym okazała się również obserwacja, że sam pomiar modułu dynamicznego nie jest wystarczającym kryterium oceny

jakości zagęszczenia, co stanowi istotną informację w kontekście obecnych tendencji do zastępowania metod bezpośrednich metodami pośrednimi. Rozwój technik optycznych, takich jak SfM, może w przyszłości uzupełnić tę lukę, tworząc bardziej kompleksowe i precyzyjne narzędzia kontroli jakości robót ziemnych.

W tej publikacji odpowiadałem za sformułowanie hipotezy badawczej, przygotowanie planu eksperymentu, nadzór nad badaniami oraz wykonanie pomiarów SfM, analizę modeli 3D i danych pomiarowych oraz koordynowanie przygotowania i częściowo pisanie manuskryptu (w zakresie przetwarzania i analizy wyników oraz formułowania wniosków).

Publikacje składające się na osiągnięcie dodatkowe tworzą spójny cykl badawczy, w którym metoda SfM została kolejno zwalidowana, zastosowana i wykorzystana w analizach pełnoskalowych. W pierwszym etapie wykazałem wraz ze współautorami, że metoda SfM ma potencjał do zastosowania w analizach zagęszczenia gruntu, uzyskiwane tą metodą wyniki były wystarczająco dokładne i charakteryzowały się małym rozrzutem. W kolejnej pracy wykazaliśmy, że SfM pozwala na bardzo precyzyjny pomiar objętości i kształtu (na przykładzie pojedynczych ziaren), uzyskując zgodność z tomografią komputerową na poziomie błędów rzędu ułamków procenta. W trzecim etapie, opierając się na tej walidacji, zastosowałem SfM do monitorowania osiadań i pomiaru objętości dołków po pobraniu próbek, potwierdzając, że technika ta może służyć jako pośrednia i dokładna metoda oceny zmian zagęszczenia warstw gruntowych. W czwartym etapie wykorzystałem oba powyższe zastosowania w badaniach pełnoskalowych, pokazując, że kontrola zagęszczenia powinna być prowadzona niezależnie od pomiarów parametrów dynamicznych, a optyczne techniki rekonstrukcji 3D mogą skutecznie uzupełnić lukę pomiarową występującą w praktyce inżynierskiej. Uzyskane wyniki stanowią podstawę do dalszego rozwoju metody SfM w kierunku jej wdrożenia terenowego. Prowadzone są prace nad standaryzacją procedury pomiarowej oraz nad opracowaniem zautomatyzowanego urządzenia terenowego, którego pierwszy prototyp został już objęty prawem ochronnym w formie wzoru użytkowego (pkt III.3 [2]).

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

[1] Staż roczny na University of Michigan (2019–2020)

W latach 2019–2020 odbyłem roczny staż naukowy w Civil and Environmental Engineering Department, Geotechnical Engineering Group, University of Michigan w Ann Arbor (stypendium Dekaban Fellowship). Staż realizowałem pod opieką prof. Radosława L. Michałowskiego.

Tematyka stażu obejmowała badania oddziaływań kontaktowych między geomateriałami oraz analizy numeryczne prowadzone metodą elementów skończonych (MES), w szczególności dotyczące zjawiska *archingu*. Prace nad oddziaływaniami kontaktowymi wprowadziły mnie w zagadnienia mechaniki kontaktu, a równolegle rozpocząłem naukę metody elementów dyskretnych (DEM), która w kolejnych latach stała się jednym z kluczowych narzędzi w mojej działalności badawczej.

W pierwszej części stażu realizowałem prace eksperymentalne dotyczące ilościowego pomiaru sił działających w kontakcie dwóch ziaren piasku. W tym celu opracowałem kompletną koncepcję nowego urządzenia laboratoryjnego, od projektu układu pomiarowego po konstrukcję mechaniczną, korzystając z oprogramowania SolidWorks. Zaprojektowałem także system sterowania i akwizycji danych w środowisku LabView, a następnie samodzielnie zmontowałem urządzenie. Zespół techniczny wspierał projekt poprzez zamawianie elementów i wykonywanie pojedynczych części na zlecenie, przy stałych konsultacjach technicznych. Aparatura wykorzystywała cyfrową korelację obrazu (DIC), co pozwalało na bezkontaktowy pomiar przemieszczeń, eliminując wpływ dodatkowych sił na badany układ i umożliwiając precyzyjną ocenę przemieszczeń.

Pierwsze testy aparatury wykonano tuż przed wprowadzeniem ograniczeń związanych z pandemią COVID-19, która uniemożliwiła kontynuację planowanych badań eksperymentalnych i wymusiła zmianę tematyki. W dalszej części stażu skupiłem się na badaniach teoretycznych i numerycznych z wykorzystaniem MES i narzędzi do wizualizacji trajektorii naprężeń (opracowanych przeze mnie w środowisku Python), analizując zjawisko przesklepiania (*arching*) w nasypach podpartych kolumnami. Prace te zostały podsumowane w artykule opublikowanym w czasopiśmie *Computers and Geotechnics* (pkt. II.12 [11]), a ich kontynuacja zaowocowała dalszymi wspólnymi referatami konferencyjnymi (pkt. II.13 [3,4,6]) oraz długotrwałą współpracą z ośrodkiem w Michigan.

Staż umożliwił mi zdobycie zaawansowanych kompetencji w zakresie badań mikrostruktury geomateriałów, projektowania aparatury badawczej, metod pomiarowych SEM/AFM, numerycznego modelowania geotechnicznego oraz zjawisk mikromechanicznych. Odegrał również kluczową rolę w ukierunkowaniu mojej późniejszej działalności badawczej na rozwój i stosowanie metody DEM.

[2] Staż naukowy na Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona (2024)

W 2024 roku odbyłem tygodniowy staż naukowy na Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) w Barcelonie w ramach projektu MINIATURA NCN, pod opieką prof. Ignacio Carola. Celem stażu było pogłębienie wiedzy z zakresu modelowania numerycznego ośrodków ziarnistych, w szczególności zjawisk pękania ziaren.

W trakcie pobytu uczestniczyłem w konsultacjach dotyczących wyników moich wcześniejszych badań oraz prezentowałem własne prace przed zespołami badawczymi UPC. Prowadziłem również szczegółowe dyskusje z prof. Carolem oraz innymi specjalistami w dziedzinie geomechaniki, m.in. Marcio Arroyo, na temat bilansu energetycznego i efektu skali w procesach pękania. Realizowałem ponadto wstępne symulacje DEM z wykorzystaniem modelu *bonded-particle* (BPM), w tym symulacje testu WST (*wedge splitting test*) w dwóch wariantach skalowania próbek. Prace te umożliwiły mi porównanie podejścia BPM z wcześniej stosowaną przeze mnie metodą FRM (*fragment replacement method*) i przeanalizowanie efektu skali w kontekście energii pękania.

Staż przyniósł efekty w postaci pogłębienia kompetencji w zakresie modeli DEM dla materiałów kruchych, nawiązania kontaktów z zagranicznymi badaczami oraz określenia nowych kierunków rozwoju moich badań, w szczególności w obszarze walidacji energetycznej modeli pękania i wpływu skali na zachowanie ośrodków ziarnistych.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

Osiągnięcia dydaktyczne

W ramach działalności dydaktycznej na Wydziale Inżynierii Lądowej prowadziłem i przygotowywałem zajęcia z zarówno z przedmiotów teoretycznych (na przykład *Wybrane Działy Matematyki II* – poświęcone probabilistyce i statystyce), projektowych (np. *Elementy Komputerowego wspomagania projektowania dróg szynowych*), technologicznych (*Roboty i budowę ziemne*), jak i ogólnouniwersyteckich (*Ochrona własności intelektualnej*).

Za swoje największe osiągnięcie dydaktyczne uważam wypromowanie osiemnastu dyplomantów (dziewięć dyplomów inżynierskich i dziewięć magisterskich), którzy

niejednokrotnie potwierdzili mi, że wiedza i umiejętności nabyte podczas pracy nad dyplomem przydają im się w karierze zawodowej.

Poza moimi regularnymi obowiązkami dydaktycznymi, swoje wysiłki skupiam na nauczaniu narzędzi służących komputerowemu wspomaganie projektowania dróg szynowych. Przykładem może być organizacja i moderowanie wirtualnego szkolenia *Virtual session on OpenRail Designer and Power Rail Track* (18.01.2019) dedykowanego dla studentów Wydziału Inżynierii lądowej PW. Szkolenie prowadził instruktor z firmy Bentley. Ponadto jestem reprezentantem wydziału ds. kontaktów z CPK w zakresie kształcenia kadry projektującej, a w przyszłości zarządzającej infrastrukturą kolei dużej prędkości. W ramach programu OMNIS2, przygotowałem również do przedmiotu *Komputerowe wspomaganie projektowania dróg szynowych*, elektroniczny skrypt z elementami interaktywnymi. Narzędziem nauczaniem w ramach tego przedmiotu będzie Civil 3D firmy Autodesk. Skrypt jest obecnie w fazie recenzji, a wkrótce zostanie opublikowany w otwartym dostępie.

Miałem również okazję prowadzić gościnne zajęcia dla odbiorców spoza studentów PW. W 2024 roku, na zaproszenie grupy FRASCAL (zrzeszającej młodych naukowców z Uniwersytetu w Erlangen zainteresowanych zagadnieniami pękania), poprowadziłem wykład dotyczący modelowania pękania w symulacjach DEM. Natomiast w latach 2018 i 2026 prowadziłem zajęcia z uczniami technikum architektoniczno-budowlanego, na których prezentowałem zalety korzystania z narzędzi do komputerowego wspomaganie projektowania dróg szynowych.

Osiągnięcia organizacyjne

W ramach osiągnięć organizacyjnych pełniłem i pełnię przede wszystkim różne funkcje organizacyjne na Wydziale Inżynierii Lądowej:

- Pełniłem funkcję koordynatora do spraw zamówień publicznych w Zespole Dróg Szynowych (od 2015 r. do 2017 r.)
- Po uzyskaniu stopnia doktora kierowałem pracą statutową Zespołu Dróg Szynowych do czasu połączenia zespołu z Zakładem Mostów (w 2017 roku).
- Jako członek komitetu organizacyjnego konferencji *XXVI R-S-P Seminar 2017 Theoretical Foundation of Civil Engineering* (sierpień 2017 r.) współorganizowałem międzynarodową konferencję, która w 2017 roku odbyła się w murach Politechniki Warszawskiej.

- Jako pełnomocnik Dziekana do spraw polityki informacyjnej Instytutu Dróg i Mostów (od listopada 2017 r. do września 2019) byłem odpowiedzialny za komunikację osiągnięć instytutu poprzez publikacje na stronie internetowej.
- Od grudnia 2020 roku pełnię funkcję sekretarza w Komisji Dziekańskiej ds. Nagród i Odznaczeń, która wstępnie opiniuje wnioski pracowników wydziału o medale i odznaczenia państwowe, Nagrody Naukowe Politechniki, Nagrody Jego Magnificencji Rektora za działalność naukową, dydaktyczną lub organizacyjną.

W ramach osiągnięć organizacyjnych należałoby również wymienić moje starania o pozyskanie funduszu na badania pochodzące ze środków zewnętrznych. W okresie mojej działalności naukowej wielokrotnie aplikowałem w konkursach krajowych i międzynarodowych, obejmujących m.in. programy NCN, FNP, ERC, NCBR, FENG, Horyzont Europa oraz NExProjects. W ostatnich latach złożyłem wnioski dotyczące m.in. technologii whitetopping zbrojonej GFRP (NExProjects 2025), numerycznego modelowania efektu ząbienia w warstwach stabilizowanych georusztami (OPUS 2025), optymalizacji procesów przeróbki skaleni do ceramiki i szkła (Horyzont Europa 2024, wniosek wysoko oceniony, w którym pełniłem rolę inicjatora konsorcjum i kierownika projektu na PW), opracowania optycznego objętościomierza (FENG Proof of Concept 2023), badań nad krytyczną wielkością cząstek powodującą kohezję w gruntach (SONATA, SONATA BIS 2020–2023), modelowania kohezji w ujęciu cyfrowego bliźniaka (ERC Starting Grant 2021) oraz długą serię wniosków PRELUDIUM związanych z mechaniką zmęczeniową mieszanek związanych cementem (2014–2017).

Jeżeli chodzi o osiągnięcia wykraczające poza działalność na Politechnice Warszawskiej, to współpracuję w ramach różnych grup i organizacji o zasięgu międzynarodowym, których działalność służy zarówno środowisku naukowemu jak i zawodowemu w dyscyplinie inżynierii lądowej, geodezji i transportu:

- Będąc członkiem RILEM współpracuję, w ramach komitetu technicznego 305-PCC: *Pumping of concret*, nad raportem o stanie techniki w obszarze pompowania betonu. Przyłączyłem się do tego komitetu, aby wnieść moje kompetencje z dziedziny modelowania numerycznego. Jestem autorem podrozdziału dotyczącego modelowania numerycznego, a także koordynuję pracę nad rozdziałem opisującym zagadnienia reologii mieszanki betonowej.
- Od 2023 roku uczestniczę w europejskim programie *COST Action CA22132 Open Network on DEM Simulations* (ON-DEM), w ramach którego jestem członkiem

grup roboczych nr 1, 4 i 5, zajmujących się m.in. walidacją modeli i oprogramowania DEM, opracowaniem standardów i dobrych praktyk oraz promowaniem zastosowań DEM w przemyśle. Od 2024 roku wspieram również prace *Grant Awarding Committee*, opiniując regulaminy i recenzując wnioski grantowe, w tym dotyczące krótkoterminowych misji naukowych. W 2025 roku zorganizowałem lokalne, dwudniowe posiedzenie grupy roboczej w Warszawie.

- Od 2023 roku jestem członkiem zespołu deweloperskiego oprogramowania Yade. Jest to otwarte oprogramowanie implementujące metodę DEM. Mój wkład jest nie tylko naukowy (opracowanie i implementacja nowych metod algorytmów), ale też organizacyjno-dydaktyczny. Razem z innymi deweloperami dbam o utrzymanie działania istniejącego kodu, naprawianie wykrytych błędów, pisanie przejrzystej dokumentacji oraz pomoc użytkownikom.

Popularyzacja nauki

Moim najciekawszym doświadczeniem dotyczącym popularyzacji nauki była możliwość wystąpienia w roli eksperta w popularno-naukowej audycji programu pierwszego Polskiego Radia pt. *Pan od przyrody*. Audycja została wyemitowana na żywo w 2019 roku i opowiadałem w jej trakcie o zagadnieniach projektowania dróg, w tym konstrukcji nawierzchni drogowych, co było zbieżne z tematyką mojego doktoratu.

Poza tym, razem z współautorami, staramy się na bieżąco komunikować i objaśniać nasze osiągnięcia (w tym publikacje) szerszemu gronu odbiorców publikując krótkie wpisy na stronie internetowej (<https://zmtimnk.il.pw.edu.pl>), czy filmy wideo na w serwisie YouTube, na przykład film pt. *How to obtain characteristic values of soil shear strength parameters?* (<https://youtu.be/72TCImtbvOc>).

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

Udział w rozwoju młodej kadry naukowej

Chociaż nie sprawuję bezpośredniej opieki naukowej nad doktorantami (np. w roli promotora pomocniczego), to brałem udział w działaniu Szkoły Doktorskiej PW, pełniąc funkcję sekretarza w komisjach ds. oceny śródkresowej doktorantów w latach 2023-2024.

Nagrody i wyróżnienia:

W dotychczasowej działalności naukowej otrzymałem za swoją pracę różne nagrody i wyróżnienia, w tym m.in. nagrodę Best Paper Politechniki Warszawskiej (2023) oraz wielokrotnie przyznawane nagrody JM Rektora PW za osiągnięcia naukowe: nagrody

zespołowe I stopnia (2015, 2017, 2019, 2023, 2025) oraz nagrodę zespołową II stopnia (2021). Ponadto uhonorowano mnie nagrodą zespołową III stopnia JM Rektora PW za osiągnięcia organizacyjne (2018).

Udział w szkoleniach:

- Kurs dokształcający *First Manager Skills od specjalisty do menedżera*. Kurs obejmował 80 godzin szkolenia stacjonarnego w okresie od kwietnia do czerwca 2023 r. Miał na celu przygotowanie mnie do zarządzania zespołem badawczym.
- Akademia Managera programu UE Horyzont Europa. Program Akademii Managera objął 21 spotkań w okresie 21.09 - 08.12.2022 r. Szkolenie przygotowało mnie do składania wniosków w programie Horyzont Europa.
- Szkolenie Agile Business Consortium Scrum Master – lipiec 2022 r. Jest to metodyka samozarządzania w niewielkich, dynamicznych, zespołach opracowujących innowacyjne rozwiązania.
- Szkolenie z zastosowania oprogramowania inżynierskiego w projektach Internet of Things (Matlab, PW, 27.03.2017 r.)
- *Modeling Fracture and Failure with Abaqus* (16–18.03.2015 r., Poznań)

.....
Karol Brzeziniński
(podpis wnioskodawcy)