

## Załącznik 2.

# Autoreferat

**1. Imię i nazwisko:** Adrian Róžański

## 2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

- a. 2005 r.: magister inżynier, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, kierunek Budownictwo, w zakresie Teoria Konstrukcji, tytuł pracy magisterskiej: *Nośność boczna pala sztywnego w ośrodku spójnym o cechach losowych*;
- b. 2011 r.: doktor, Université Lille I – Sciences et Technologies, Polytech Lille (Francja), nostryfikowany na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej jako doktor nauk technicznych w dziedzinie: *Nauki Techniczne* w dyscyplinie: *Budownictwo*, tytuł rozprawy doktorskiej: *Sur la représentativité, la taille minimale du VER et les propriétés effectives de transport des matériaux composites aléatoires* (Zał. I).

## 3. Przebieg zatrudnienia w jednostkach naukowych

- a. 01.10.2005 r. do 30.09.2009 r.: doktorant w Instytucie Geotechniki i Hydrotechniki na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej; równolegle od 01.10.2006 r. do 30.09.2009 r.: doktorant w Polytech Lille na Uniwersytecie Lille I we Francji;
- b. 01.10.2009 r. do 30.09.2011: asystent naukowo – dydaktyczny w Instytucie Geotechniki i Hydrotechniki na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej;
- c. 01.10.2011 do chwili obecnej: adiunkt w Katedrze Geotechniki, Hydrotechniki, Budownictwa Podziemnego i Wodnego na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej.

## 4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311):

### a. Tytuł osiągnięcia naukowego:

*Analiza wieloskalowa charakterystyki cieplnej wielofazowego ośrodka gruntowego*

## **b. Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego:**

Monografia:

Adrian Różański, *Analiza wieloskalowa charakterystyki cieplnej wielofazowego ośrodka gruntowego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2018; recenzenci wydawniczy: prof. dr hab. inż. Elżbieta Stilger-Szydło (Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej), dr hab. inż. Krzysztof Tajduś, prof. IMG PAN (Instytut Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk); Nr ISBN 978-83-7493-042-0.

## **c. Omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników:**

Problematyka wykorzystania budowli, lub poszczególnych elementów konstrukcyjnych, do pozyskiwania energii cieplnej z ośrodka gruntowego jest od co najmniej kilkunastu lat szeroko badana, zarówno w aspekcie praktycznym, jak i naukowym (np. [1, 2, 3, 4]). Od dłuższego już czasu szczególne zainteresowanie tą tematyką dotyczy krajów, takich jak np. Japonia, Stany Zjednoczone, Szwajcaria, czy Niemcy. W Polsce ta dziedzina budownictwa jest już również silnie zauważalna, ale wciąż jest jeszcze mało rozpoznana. Jednakże z racji niemal ciągłego zwiększania się kosztów energii konwencjonalnej należy spodziewać się wzrostu zainteresowania tą tematyką również przez krajowe instytucje naukowe, a zwłaszcza przez biura projektowe.

Stosowanie nowoczesnych rozwiązań w budownictwie, takich jak np. wyszczególnione w monografii termopale (lub inne konstrukcje wykorzystujące energię ciepłą z podłoża gruntowego, np. termokotwy skalne lub gruntowe, termoaktywne obudowy tuneli płytkich i głębokich [1, 3, 4]), wymaga od inżynierów nowego podejścia do projektowania. Poprawne zaprojektowanie konstrukcji, która łączy ze sobą klasyczne cechy posadowienia wraz z ideą odzysku ciepła z gruntu obliuguje do określania stanu deformacji wywołanego nie tylko obciążeniami mechanicznymi ale również obciążeniami termicznymi. Te drugie wynikają z cyklicznych wahań temperatury w konstrukcji, jak również w otaczającym go ośrodku gruntowym [5, 6]. W rezultacie, określenie pełnego stanu deformacji wywołanego wpływami termicznymi i mechanicznymi wymaga znajomości nie tylko parametrów mechanicznych betonu oraz gruntu, ale również ich charakterystyki cieplnej, zwłaszcza w zakresie przewodności cieplnej [3]. Poprawne określenie charakterystyki przewodności cieplnej ośrodka gruntowego jest więc niezwykle istotnym aspektem w przypadku projektowania konstrukcji, dla których otaczający je grunt stanowi źródło energii cieplnej. Stąd też, równoległe do rozwoju technologii konstrukcji energetycznych, w ostatnich latach dużą uwagę skupiono na zintensyfikowaniu badań naukowych nad udoskonalaniem metod określania parametrów cieplnych ośrodka gruntowego [np. 10, 11, 16, 21, 20, II.A.4, II.E.19, 22].

W rozdziale 3 monografii dokonano przeglądu dostępnych w literaturze przedmiotu modeli umożliwiających określanie przewodności cieplnej ośrodka gruntowego. Szczegółowo omówiono kilkanaście modeli, zarówno teoretycznych, jak i empirycznych. Dodatkowo w rozdziale tym przeprowadzono analizę krytyczną prezentowanych modeli, która wykazała że w tym momencie brak jest uniwersalnego podejścia do określania charakterystyki przewodności cieplnej gruntu. Przez pojęcie uniwersalnego podejścia rozumie się takie, które

poprawnie szacuje wartość przewodności cieplnej niezależnie od rodzaju gruntu, jego tekstury, składu mineralogicznego, stanu nasycenia, itp. Ponadto, brak jest w literaturze przedmiotu modeli, które uwzględniają zmienność współczynnika przewodności cieplnej [w skali mikro, tj. na poziomie struktury mineralogicznej szkieletu gruntowego. Wszystkie istniejące modele traktują bowiem szkielet gruntowy jako jednorodny, opisany zastępczym współczynnikiem przewodności cieplnej – takie podejście, jak sygnalizowano już we wcześniejszych pracach, których byłem współautorem, prowadzi do przeszacowania lub niedoszacowania przewodności cieplnej ośrodka gruntowego [II.A.3, II.A.4].

W rezultacie, głównym celem analiz zawartych w monografii było zaproponowanie oryginalnego rozwiązania do oceny charakterystyki przewodności cieplnej gruntu w funkcji: składu mineralogicznego szkieletu gruntowego, tekstury gruntu (rozumianej jako zawartość trzech głównych frakcji gruntowych), zawartości części organicznych oraz stanu nasycenia wodą. Determinowało to konieczność wyróżnienia w rozważaniach trzech przypadków dotyczących analizy przewodności cieplnej:

- i. szkieletu gruntowego,  $\lambda_s$  (**rozdział 6**),
- ii. gruntu nasyconego,  $\lambda^{\text{sat}}$  (**rozdział 7**), oraz
- iii. częściowo nasyconego ośrodka gruntowego,  $\lambda(S_r)$  (**rozdział 8**).

Rozważania zawarte w monografii umożliwiły stworzenie opisu teoretycznego charakterystyki przewodności cieplnej ośrodka gruntowego w ramach analizy wieloskalowej, tj. z uwzględnieniem niejednorodności struktury oraz zmienności parametrów cieplnych składników gruntu w różnych skalach obserwacji. W tym celu wykorzystano techniki homogenizacji, przy czym, w zależności od analizowanego problemu, wykorzystywano zwykle dwa metodologicznie różne podejścia: tzw. obliczeniową i analityczną mikromechanikę. Implikowało to konieczność przypisania dwóch odrębnych morfologii mikrostruktury ośrodka gruntowego, tj. w postaci wokselowej (obliczeniowa mikromechanika) oraz w formie morfologii polikrystalicznej/ziarnowej (analityczna mikromechanika). Ważnym elementem, który wprowadzono w monografii jest uwzględnienie lokalnej zmienności przewodności cieplnej w skali mikro będącej konsekwencją złożonej struktury mineralogicznej ośrodka gruntowego. W tym celu sformułowano w pracy pojęcie lokalnej zmienności przewodności cieplnej w obrębie szkieletu gruntowego, dla którego w opisach teoretycznych odwzorowano jego podstawowe cechy, tj. teksturę (skład ziarnowy) oraz morfologię czyli wzajemne, przestrzenne „upakowanie” poszczególnych składników. Dla przypadku gruntu częściowo nasyconego wprowadzono w pracy oryginalną koncepcję tzw. „hierarchii zapełniania”, która umożliwia ewolucję mikrostruktury ośrodka gruntowego wywołaną jego sukcesywnym nawadnianiem. Wykazano, że zastosowanie koncepcji „hierarchii zapełniania” w schemacie aproksymacji analitycznej prowadzi do poprawnego odwzorowania charakterystyki przewodności cieplnej w funkcji stopnia wilgotności  $S_r$ . Wszystkie uzyskane w monografii rezultaty, za każdym razem, weryfikowano względem wyników badań autora uzupełnionych o dane literaturowe. Dzięki temu, zawarte w pracy rozważania, a w szczególności uzyskane wyniki były weryfikowane doświadczalnie i cechują się możliwością zastosowania w praktyce inżynierskiej.

Wyszczególnione powyżej zagadnienia (i)–(iii), jak wspomniano wcześniej, dotyczą określania charakterystyki przewodności cieplnej ośrodka gruntowego, która jest niezbędna

na przykład do prawidłowego zaprojektowania konstrukcji, dla których ośrodek gruntowy stanowi źródło energii cieplnej. W rozdziale 9 wykazałem ponadto, że znajomość charakterystyki cieplnej gruntu może być wykorzystana również do innych celów. Dodatkowym zagadnieniem, które rozważano było wykorzystanie odpowiednio zrealizowanej charakterystyki przewodności cieplnej (w postaci tzw. funkcji makroskopowej odpowiedzi mikrostruktury) nasyconego ośrodka gruntowego w celu identyfikacji mikrostruktury ośrodka gruntowego. Zagadnienie to można również interpretować jako rekonstrukcję mikrostruktury, analogicznie do techniki tomografii komputerowej – zagadnienie „iv” (rozdział 9).

W dalszej części przedstawiono szczegółowy opis każdego z czterech rozważanych w monografii zagadnień.

#### **Ad. (i)**

Ze względu na fakt, iż przewodność cieplna szkieletu gruntowego,  $\lambda_s$ , jest parametrem „wsadowym” większości istniejących w literaturze (szeroko omawianych również w monografii) modeli, jej odpowiednie oszacowanie jest niezwykle istotne dla uzyskania poprawnych predykcji przewodności cieplnej gruntu, jako ośrodka wielofazowego. Podstawową trudnością w określaniu wartości  $\lambda_s$  jest fakt, iż w odróżnieniu od standardowych parametrów charakteryzujących dany grunt, przewodności cieplnej szkieletu gruntowego nie można wyznaczyć, w sposób bezpośredni, w badaniach laboratoryjnych. Zwykle, wartość  $\lambda_s$  szacuje się na podstawie istniejących wzorów empirycznych (dla, których brak jest oczywiście uzasadnienia naukowego) wyrażających wartość przewodności cieplnej szkieletu w funkcji charakterystycznych cech gruntu, takich jak np. skład mineralogiczny, zawartość poszczególnych frakcji gruntowych, zawartość minerałów kwarcowych, itp. [7, 8, 9, 10, 11]. W swojej monografii wykazałem jednak, że żadne z dostępnych w literaturze przedmiotu podejść nie może być określane mianem uniwersalnego, a więc takiego, które poprawnie szacuje wartość  $\lambda_s$ , niezależnie od rodzaju gruntu. Wynika to prawdopodobnie z faktu, iż każde z podejść uwzględnia inną, a jednocześnie zbyt ubogą, informację o szkielecie gruntowym.

Powyższe stało się motywacją do stworzenia oryginalnego podejścia, które w efekcie doprowadziło do sformułowania technik umożliwiających poprawne szacowanie wartości przewodności cieplnej szkieletu gruntowego. Zostało to zrealizowane poprzez wprowadzenie przeze mnie koncepcji tzw. lokalnej zmienności przewodności cieplnej do sformułowań analitycznej i obliczeniowej mikromechaniki. W przypadku obliczeniowej mikromechaniki koncepcję taką pierwotnie zaproponowałem już we wcześniejszej pracy [II.A.4], której byłem współautorem, a następnie wykorzystywałem ją i przeformułowałem w dwóch kolejnych wspólnych pracach, tj. [II.E.18] i [II.E.19]. Analizy i dociekania dotyczące koncepcji lokalnej zmienności przewodności cieplnej zostały w monografii usystematyzowane i sformułowane w inny sposób niż dotychczas. Odwołano się w tym przypadku do zmienności parametrów mechanicznych w skali mikro, którą można określić np. w badaniach nanoindentacji. Dodatkowo w monografii idea lokalnej zmienności przewodności cieplnej została przeze mnie zaaplikowana do podejścia bazującego na analitycznej mikromechanice. Należy jednak podkreślić, że rozważania prowadzone były równoległe w ramach dwóch metodologicznie różnych podejść – oprócz analitycznej, stosuje się również obliczeniową mikromechanikę.

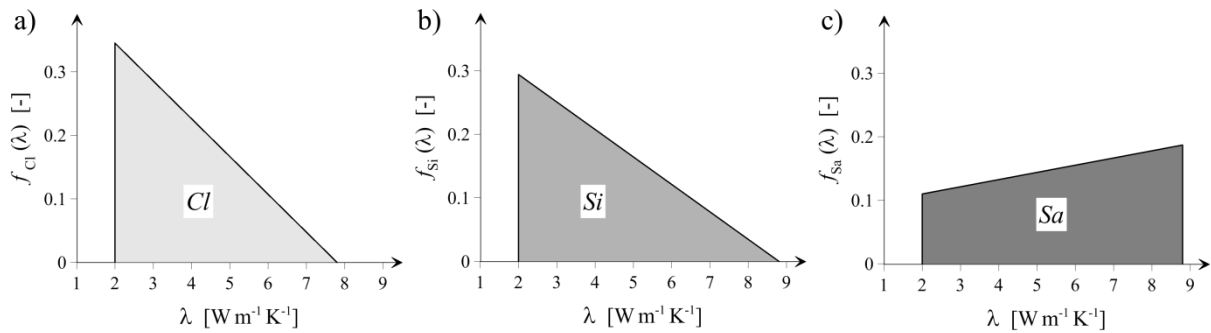
Koncepcja lokalnej zmienności przewodności cieplnej polega na założeniu, że w obrębie szkieletu gruntowego, w skali mikro, wartość współczynnika przewodności cieplnej podlega losowym fluktuacjom. Takie założenie jest konsekwencją tego, iż szkielet gruntowy utworzony jest z różnych minerałów, które charakteryzują się zróżnicowanymi wartościami przewodności cieplnej, a ponadto, nawet w obrębie poszczególnych minerałów istnieje pewna fluktuacja wartości przewodności cieplnej [12]. W rezultacie, zmienność wartości współczynnika  $\lambda$  w skali mikro została opisana za pomocą funkcji gęstości prawdopodobieństwa, które zostały stowarzyszone z głównymi frakcjami gruntowymi. Głównym celem analiz prowadzonych w ramach tego zadania było więc zidentyfikowanie optymalnych funkcji gęstości prawdopodobieństwa opisujących lokalną zmienność współczynnika  $\lambda$  w obrębie poszczególnych frakcji gruntowych.

W przypadku obliczeniowej mikromechaniki zaproponowano cyfrową reprezentację mikrostruktury w postaci trójwymiarowej morfologii wokselowej, generowanej w taki sposób, że tworzy ona trójwymiarowe pole losowe współczynnika przewodności cieplnej z długością korelacji zbiegającą do zera [13, II.E.19]. Do rozwiązania sekwencji zagadnień brzegowych wykorzystano autorski kod stworzony w języku programowania C++, bazujący na metodzie objętości skończonych. Program ten został napisany przeze mnie w trakcie tworzenia rozprawy doktorskiej [18]. Następnie, w ramach prac nad tym zagadnieniem kod ten został rozszerzony i uzupełniony o nowe funkcje, które umożliwiły zastosowanie proponowanej koncepcji lokalnej zmienności przewodności cieplnej. W obliczeniach numerycznych stosowane było ponadto podejście zaproponowane w mojej wcześniejszej pracy [II.A.2], które umożliwia prowadzenie obliczeń na względnie małych obszarach zagadnienia brzegowego (dotyczy to wielkości tzw. Reprezentatywnej Elementarnej Objętości – REO), a parametr makroskopowy określany jest wówczas jako estymator Monte–Carlo z odpowiednio określonej liczby losowych, niezależnych realizacji REO.

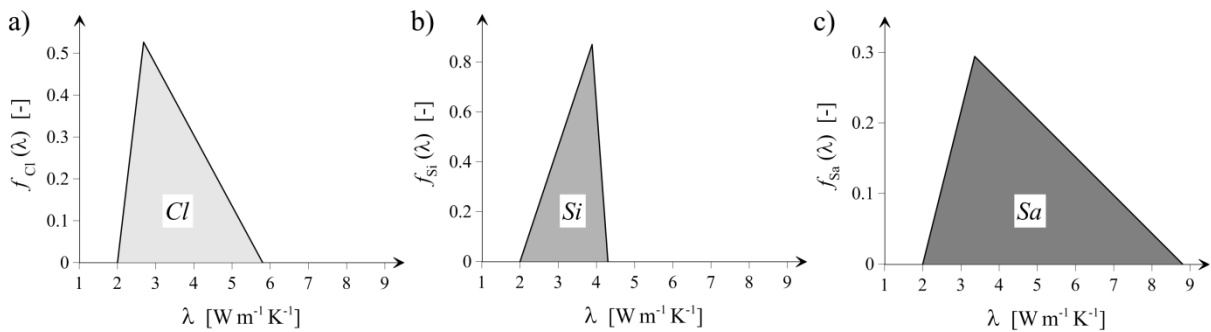
Analizy prowadzone w ujęciu analitycznej mikromechaniki przeprowadzono z wykorzystaniem schematu samouzgodnionego pola (ang. *Self-Consistent*) zakładającego polikrystaliczną/ziarnową morfologię mikrostruktury szkieletu gruntowego. Dodatkową trudnością w tym podejściu było to, iż oprócz identyfikacji optymalnych funkcji gęstości prawdopodobieństwa, należało również zidentyfikować optymalną mikrostrukturę ośrodka zastępczego wykorzystywaną w schemacie samouzgodnionego pola. Za każdym razem, w celu rozwiązywania niejawnego schematu samouzgodnionego pola, stosowano iteracyjną technikę poszukiwania rozwiązań równań nieliniowych z odpowiednim doбором punktu startowego, na podstawie górnego oszacowania Hashina–Shtrikmana [23].

W obu podejściach, tj. w przypadku obliczeniowej i analitycznej mikromechaniki, identyfikacji lokalnej zmienności przewodności cieplnej dokonano poprzez sformułowanie i rozwiązanie zagadnień odwrotnych teorii homogenizacji, w których jako dane traktowano pomiary laboratoryjne: przewodności cieplnej gruntów znajdujących się w stanie pełnego nasycenia –  $\lambda^{\text{sat}}$  (były to badania własne autora uzupełnione o dane literaturowe), porowatości gruntów oraz zawartości poszczególnych frakcji gruntowych. Sformułowano technikę rozwiązania zagadnień odwrotnych bazującą na metodzie stochastycznej optymalizacji, tj. metodzie symulowanego wyżarzania (ang. *simulated annealing*) [14, 15]. Na podstawie predykcji pomiarów laboratoryjnych oraz odniesienia się do danych literaturowych stwierdzono, że w obu podejściach uzyskano poprawne charakterystyki opisujące lokalną

zamiennosc przewodnosci cieplnej. Na podstawie analiz ilosciowych wykazano jednak, ze wyniki uzyskane w zakresie podjscia numerycznego nieco lepiej opisuja lokalna zmienosc wspolczynnika przewodnosci cieplnej w obrębie szkieletu gruntowego, w tym sensie, ze wykazuja one lepsza zgodnosc z powszechna wiedza w zakresie hierarchii oraz konkretnych wartosci dla usrednionych, w obrębie frakcji, wspolczynniki przewodnosci cieplnej. Na rys. 1 oraz 2 przedstawiono optymalne funkcje gęstości prawdopodobienstwa uzyskane dla podjscia bazujacego na, odpowiednio, obliczeniowej oraz analitycznej mikromechanice.



Rys. 1. Ciągłe funkcje gęstości prawdopodobienstwa uzyskane na podstawie analizy odwrotnej w ujęciu obliczeniowej mikromechaniki: (a) frakcja ilowa; (b) frakcja pyłowa; (c) frakcja piaskowa.

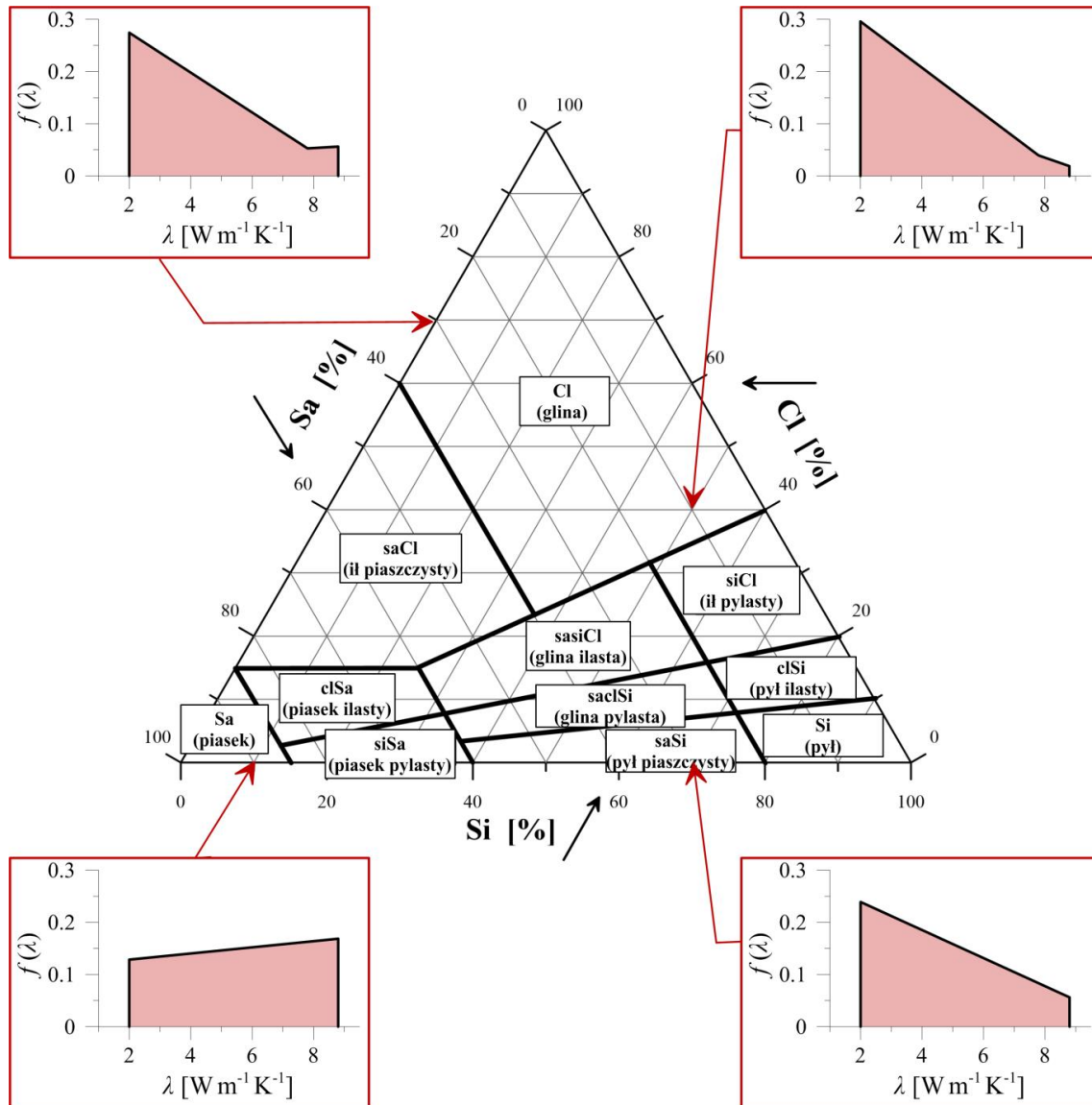


Rys. 2. Ciągłe funkcje gęstości prawdopodobienstwa uzyskane na podstawie analizy odwrotnej w ujęciu analitycznej mikromechaniki: (a) frakcja ilowa; (b) frakcja pyłowa; (c) frakcja piaskowa.

W konsekwencji powyższego, dowolny grunt charakteryzowany poprzez skład ziarnowy (teksturę) może być stowarzyszony z jego indywidualną lokalną zmiennością współczynnika przewodnosci cieplnej, co graficznie zobrazowano na rys. 3. Na rysunku tym przedstawiono przykładowe funkcje gęstości prawdopodobienstwa dla czterech gruntów wybranych na podstawie trójkąta ISO „krajowego”. Przedstawione funkcje opisują lokalną zmienosc wspolczynnika  $\lambda$  określoną dla rozwiązania uzyskanego w ramach obliczeniowej mikromechaniki.

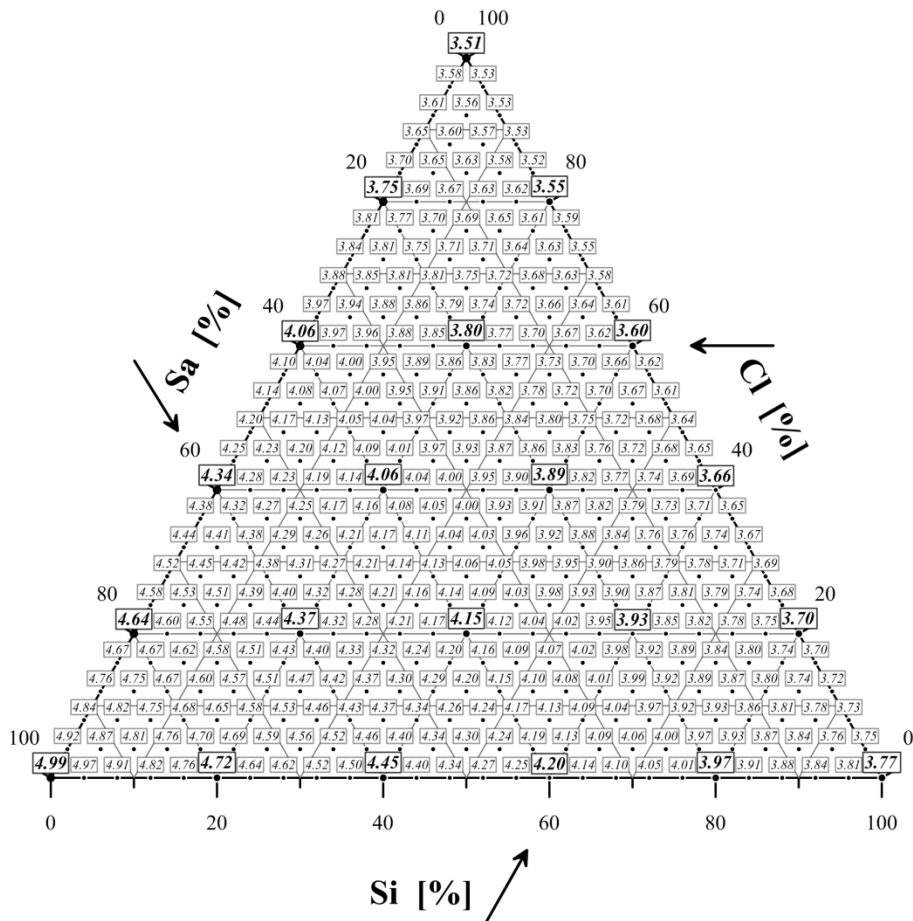
Na podstawie zidentyfikowanych z podjscia numerycznego funkcji gęstości prawdopodobienstwa (rys. 1) oraz sekwencji kilkuset obliczeń numerycznych stworzono dwa typy diagramów umożliwiajacych efektywne i szybkie szacowanie wartosci przewodnosci cieplnej szkieletu gruntowego,  $\lambda_s$ . Pierwszy z proponowanych diagramów umożliwia określanie dokładnej wartosci  $\lambda_s$  na podstawie informacji o procentowej zawartości poszczególnych frakcji gruntowych, tj. ilowej (Cl), pyłowej (Si) i piaskowej (Sa). Drugi rodzaj diagramu daje możliwość oszacowania przewodnosci cieplnej szkieletu gruntowego

jedynie na podstawie znajomości nazwy gruntu. Co ważne, diagram ten jako wykres trójkątny, jest spójny z trójkątem ISO „krajowym” zaproponowanym wg załącznika krajowego do normy PN-EN ISO 14688-2. Diagramy umożliwiają również określanie wartości  $\lambda_s$  w zależności od zawartości części organicznych.

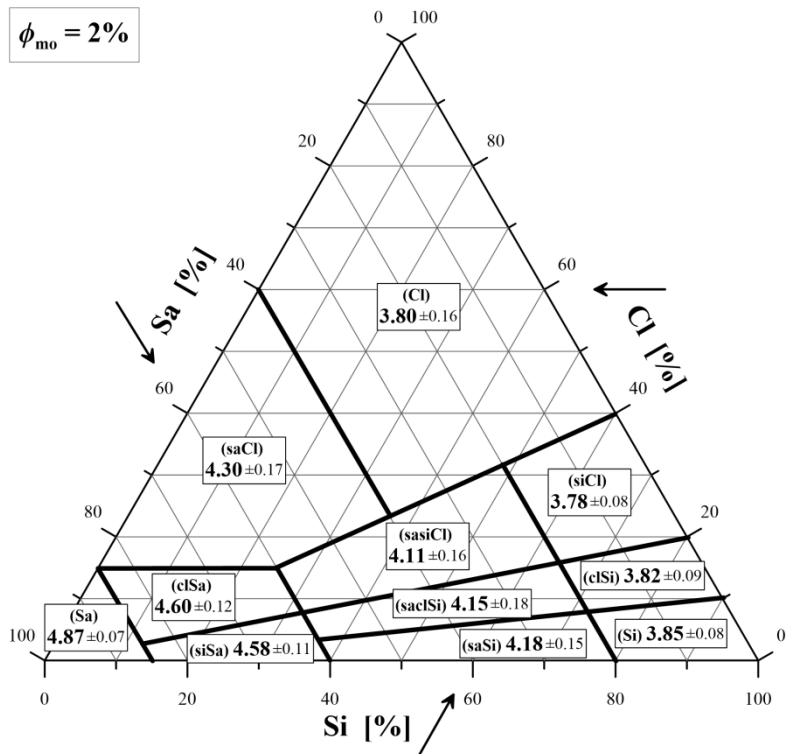


Rys. 3. Przykładowe optymalne funkcje gęstości prawdopodobieństwa w zależności od uziarnienia gruntu: obliczeniowa mikromechanika.

Opracowanie diagramów umożliwiających określanie wartości parametru  $\lambda_s$ , tak istotnego dla uzyskania poprawnego oszacowania przewodności cieplnej gruntu jako ośrodka wielofazowego, jest niezwykle ważnym osiągnięciem z punktu widzenia możliwych zastosowań w praktyce inżynierskiej. Warto tu nadmienić, że diagramy odpowiadają również czterem różnym zawartościom materii organicznej, która z racji relatywnie niskiej przewodności cieplnej, istotnie wpływa na wartość parametru  $\lambda_s$ . Diagramy te są uniwersalnym narzędziem umożliwiającym szacowanie wartości  $\lambda_s$  niezależnie od rodzaju gruntu. Przykładowe wykresy, dla 2% zawartości części organicznych, zestawiono na rys. 4 oraz 5.



Rys. 4. Szczegółowy diagram do „dokładnego” określania wartości  $\lambda_s$  [ $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ] wg % zawartości frakcji gruntowych; zawartość materii organicznej: 2%.



Rys. 5. Diagram do określania średniej wartości  $\lambda_s$  [ $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ] wg nazwy gruntu; zawartość materii organicznej: 2%.



## Ad. (ii)

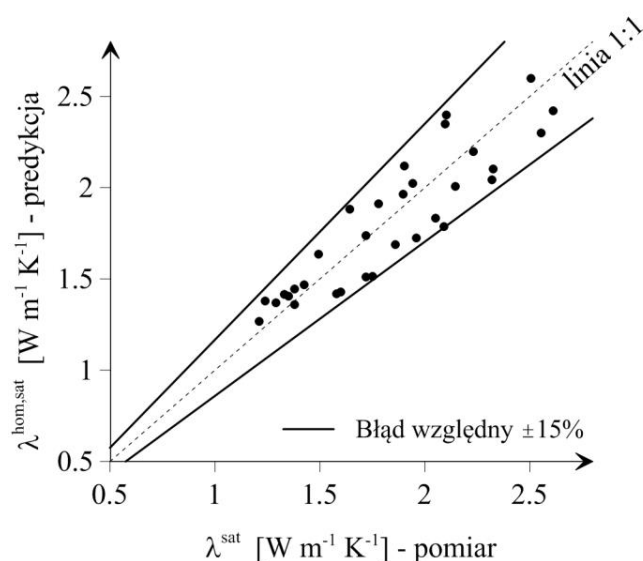
Przewodność cieplna gruntu w stanie pełnego nasycenia wodą,  $\lambda^{\text{sat}}$ , jest niezwykle istotnym parametrem z punktu widzenia poprawności oszacowania makroskopowej przewodności cieplnej ośrodka gruntowego, w niemal każdym stanie nasycenia [7, 10, 11, II.A.4]. Jest to spowodowane tym, iż większość dostępnych w literaturze przedmiotu modeli szacuje przewodność cieplną gruntu nienasyconego na podstawie informacji o przewodnościach cieplnych gruntu suchego,  $\lambda^{\text{dry}}$ , oraz gruntu nawodnionego,  $\lambda^{\text{sat}}$ . Wartość przewodności cieplnej gruntu suchego,  $\lambda^{\text{dry}}$ , zależy głównie od wielkości przestrzeni porowej i istniejące modele empiryczne dostarczają relatywnie dobrej predykcji wartości tego parametru [7, 11, 16]. Przeprowadzając liczne analizy wykazałem w swojej monografii, iż uzyskanie poprawnej predykcji wartości  $\lambda^{\text{sat}}$  jest zadaniem znacznie trudniejszym. Istniejące modele teoretyczne i empiryczne bardzo często, w zależności od typu gruntu, przeszacowują lub nie doszacowują wartości przewodności cieplnej gruntu nasyconego. Powyższe stało się więc motywacją do zaproponowania nowej techniki, która umożliwiłaby poprawne szacowanie wartości przewodności cieplnej nasyconego ośrodka gruntowego.

Ponownie analizy prowadzone były za pomocą dwóch metodologicznie odrębnych podejść, tj. w ramach obliczeniowej i analitycznej mikromechaniki. Oszacowania wartości przewodności cieplnej w stanie pełnego nasycenia,  $\lambda^{\text{sat}}$ , dokonano w innej skali obserwacji niż miało to miejsce w przypadku predykcji wartości  $\lambda_s$ , tj. w skali mezo, gdzie ośrodek gruntowy jest dwuskładnikowym „kompozytem”, w którym wyróżnia się jednorodny szkielet gruntowy oraz przestrzeń porową wypełnioną wodą. W przypadku metod numerycznych wykorzystałem dla skali mezo wokselową morfologię mikrostruktury w postaci tzw. trójwymiarowej losowej szachownicy [17] (ang. *3D random checkerboard*) zaproponowaną przeze mnie we wspólnej pracy [II.E.19]. W obliczeniach zakładano, że przewodność cieplna szkieletu gruntowego określona jest na podstawie analizy prowadzonej w skali mikro, a więc charakteryzowana jest zastępczym parametrem  $\lambda_s$  określonym w ramach omawianego powyżej zadania (i). Pełen proces rozwiązania wymagał więc podwójnej homogenizacji, tj. oddzielnie dla skali mikro oraz skali mezo. Analogicznie, jak w przypadku zadania (i), do rozwiązania zagadnień brzegowych wykorzystano autorski kod stworzony w języku programowania C++, bazujący na metodzie objętości skończonych. Celem zwiększenia efektywności obliczeń stosowano również podejście zaproponowane w mojej wcześniejszej pracy [II.A.2].

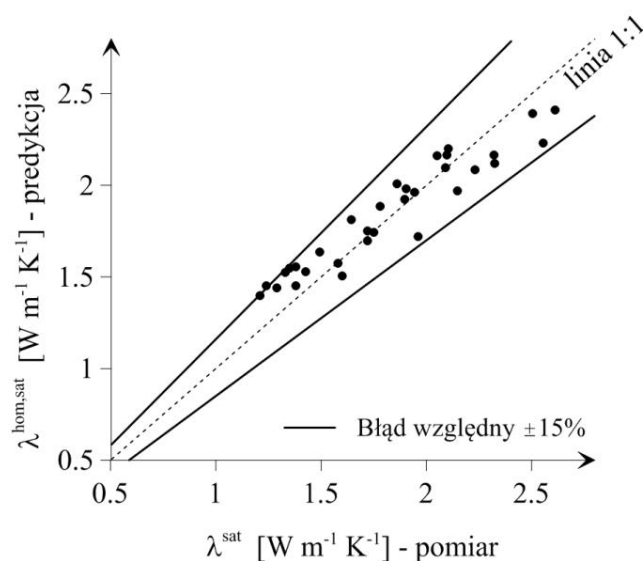
W ujęciu analitycznej mikromechaniki analizy prowadzone były z wykorzystaniem schematu aproksymacyjnego samouzgodnionego pola, który jak już wspomniano zakłada polikrystaliczną/ziarnową morfologię mikrostruktury. W tym przypadku, w analizie stosowano funkcje gęstości prawdopodobieństwa opisujące lokalną zmienność współczynnika przewodności cieplnej, które określone zostały w zadaniu (i) – rys. 2. Dodatkowo, rozwiązując sekwencję zagadnień odwrotnych zidentyfikowano optymalną mikrostrukturę ośrodka gruntowego w skali mezo, poprzez określenie optymalnych wartości parametrów opisujących kształty ziaren (cząstek tworzących poszczególne frakcje, materię organiczną oraz fazę wodną) dla morfologii mikrostruktury zastępczej stosowanej w analitycznym schemacie aproksymacyjnym. Określenia optymalnych parametrów kształtu, charakteryzujących geometrię poszczególnych składników nasyconego ośrodka gruntowego,

dokonano z wykorzystaniem autorskiego algorytmu bazującego na metodzie stochastycznej optymalizacji.

Porównując predykcje uzyskane za pomocą sformułowanych w monografii technik obliczeniowej i analitycznej mikromechaniki z wynikami pomiarów laboratoryjnych (w zakresie wartości  $\lambda^{\text{sat}}$ ) uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników. Obie zaproponowane metody szacowania wartości  $\lambda^{\text{sat}}$  okazały się bardzo skuteczne. Ponownie, przeprowadzając dodatkowe analizy ilościowe, wykazałem, że podejście bazujące na obliczeniowej mikromechanice zapewnia nieco lepsze oszacowanie wartości przewodności cieplnej nasyconego ośrodka gruntowego. Na rys. 6 oraz 7 przedstawiono porównanie uzyskanych rezultatów z danymi pochodzącymi z badań laboratoryjnych.



Rys. 6. Predykcja przewodności cieplnej nasyconego ośrodka gruntowego (obliczeniowa mikromechanika) względem wartości pomierzonych – rezultaty uzyskane z wykorzystaniem zidentyfikowanych optymalnych funkcji gęstości prawdopodobieństwa (zagadnienie (i) - rys. 1).



Rys. 7. Predykcja przewodności cieplnej nasyconego ośrodka gruntowego (schemat samouzgodnionego pola) względem wartości pomierzonych – rezultaty uzyskane z wykorzystaniem zidentyfikowanych optymalnych funkcji gęstości prawdopodobieństwa (zagadnienie (i) - rys. 2).

### Ad. (iii)

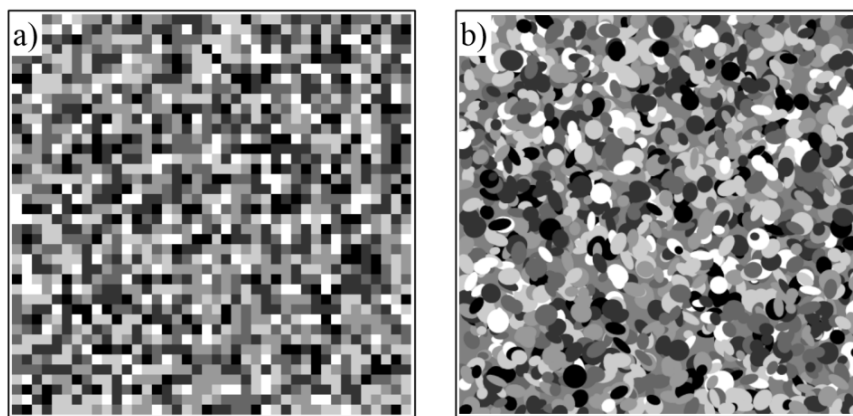
Analiza krytyczna modeli teoretycznych i empirycznych, przeprowadzona w rozdziale 3 monografii dowiodła, że większość istniejących modeli, nawet jeśli odpowiednio oszacowane są wartości  $\lambda^{\text{sat}}$  i  $\lambda^{\text{dry}}$ , nie jest w stanie poprawnie odwzorować typowej dla gruntów (zwłaszcza tych drobnoziarnistych) charakterystyki  $\lambda-S_r$  ( $S_r$ , jako stopień wilgotności jest miarą określającą zawartość wody w przestrzeni porowej). Z przeprowadzonych przeze mnie analiz wynika, że w zasadzie, jedynie model zaproponowany w pracy [16] dość dobrze oddaje charakterystykę termiczną gruntów drobnoziarnistych (zależność  $\lambda-S_r$ ), przede wszystkim w zakresie małych wartości stopnia wilgotności. Należy jednak mieć na uwadze fakt, iż predykcja uzyskana z tego modelu porównywana była z wynikami badań laboratoryjnych pochodzącymi z tej samej pracy [16], a więc z wynikami względem, których kalibrowano parametry tego modelu. Brak jest więc potwierdzenia poprawności predykcji tego modelu względem wyników laboratoryjnych pochodzących z innych źródeł.

Trzecie z wymienionych wyżej zagadnień rozwiązywanych w ramach mojej monografii dotyczyło więc stworzenia podejścia umożliwiającego określanie przewodności cieplnej gruntu częściowo nasyconego,  $\lambda(S_r)$ . W tym przypadku rozważania zawężono do analiz, w których stosowano jedynie aparat analitycznej mikromechaniki, rezygnując tym samym z podejścia bazującego na obliczeniowej mikromechanice. Jest to konsekwencją tego, iż grunt częściowo nasycony jest ośrodkiem, w którym jednocześnie występują trzy fazy, tj. ciało stałe (szkielet gruntowy), powietrze i woda. Oznacza to, że w porównaniu do wcześniejszych dociekań dotyczących określania przewodności cieplnej szkieletu gruntowego (zad. i) i gruntu nasyconego (zad. ii), w tym przypadku, mamy do czynienia ze znacznie większym kontrastem pomiędzy parametrami termicznymi składników, co powoduje, iż wyniki obliczeń numerycznych obarczone są większym błędem, a ich zbieżność jest wyraźnie gorsza. W takim przypadku, bardziej uzasadnionym było więc skorzystanie jedynie z technik aproksymacji analitycznej.

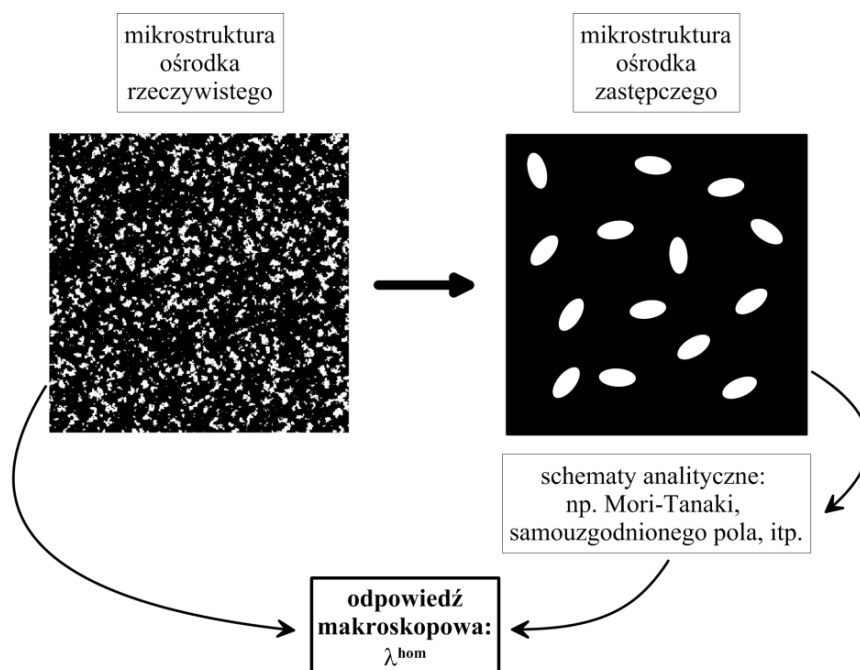
Analizy zawarte w rozdziale 8 wymagały znacznego rozszerzenia sformułowań proponowanych wcześniej, zwłaszcza w odniesieniu do geometrii mikrostruktury ośrodka gruntowego. Proponowane we wcześniejszych analizach modele morfologii mikrostruktury ośrodka gruntowego, a więc jej dyskretna reprezentacja w postaci mikrostruktury wokselowej (rys. 8a) czy też polikrystaliczna/ziarnowa morfologia mikrostruktury (rys. 8b), są zbyt „ubogie” do uzyskania poprawnej charakterystyki cieplnej gruntu częściowo nasyconego. Wynika to z faktu, iż jak wskazałem w rozdziale 2 monografii, sukcesywne nawadnianie gruntu powoduje niejako ewolucję mikrostruktury ośrodka gruntowego. W konsekwencji, morfologia mikrostruktury gruntu jest nie tylko funkcją rodzaju gruntu (grubo- lub drobnoziarnisty) ale przede wszystkim jest funkcją zawartości wody w przestrzeni porowej, charakteryzowanej np. wartością stopnia wilgotności,  $S_r$ .

Dociekania zawarte w rozdziale 8 rozpoczęto od analiz, w których zaprezentowano zastosowanie oryginalnych sformułowań schematów Mori–Tanaki i samouzgodnionego pola do szacowania przewodności cieplnej częściowo nasyconego ośrodka gruntowego. Na podstawie uzyskanych rezultatów stwierdzono, że największą trudnością w określaniu makroskopowej przewodności cieplnej gruntu za pomocą analitycznych schematów aproksymacyjnych jest przyjęcie poprawnego założenia dotyczącego geometrii

poszczególnych składników tworzących ośrodek, tj. morfologii ośrodka zastępczego. W celu ominięcia tej niedogodności zaproponowano zastosowanie w schematach aproksymacji analitycznej koncepcji ekwiwalentnej mikrostruktury, wprowadzonej w mojej wcześniejszej pracy [II.A.6]. Mówiąc bardzo ogólnie, ekwiwalentna mikrostruktura to pewna zastępcza/wirtualna mikrostruktura, której geometria może być zupełnie odmienna od morfologii ośrodka rzeczywistego (ważne jest to, aby geometria ośrodka ekwiwalentnego była na tyle prosta, aby możliwe było zastosowanie do niej schematów analitycznych), przy czym jej odpowiedź makroskopowa, w zakresie przewodności cieplnej, jest tożsama odpowiedzią ośrodka rzeczywistego. Koncepcję mikrostruktury ekwiwalentnej przedstawiono graficznie na rys. 9.



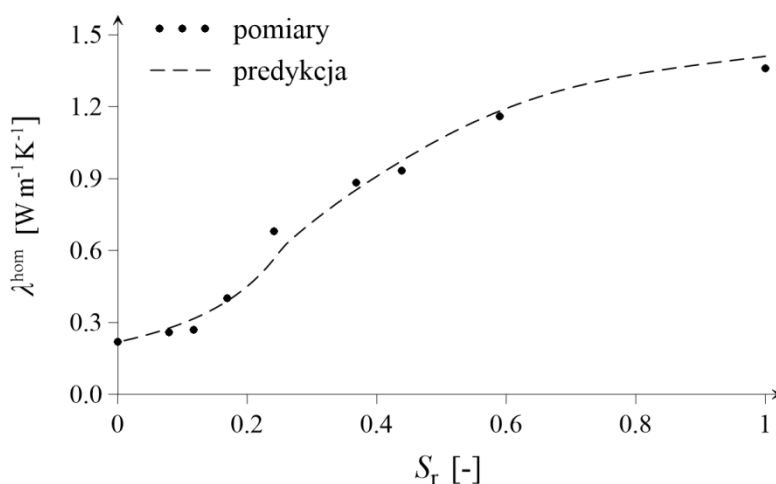
Rys. 8. Morfologia mikrostruktury stosowana w podejściu bazującym na: (a) obliczeniowej mikromechanice; (b) analitycznej mikromechanice.



Rys. 9. Koncepcja ekwiwalentnej mikrostruktury – zamiana ośrodka rzeczywistego na wirtualny/uproszczony, który zapewnia tę samą odpowiedź makroskopową.

Przeprowadzone przeze mnie szerokie analizy zawarte w dalszej części rozdziału 8 doprowadziły jednak do wniosku, iż nie jest możliwe uzyskanie poprawnej charakterystyki  $\lambda-S_r$ , nawet z zastosowaniem koncepcji ekwiwalentnej mikrostruktury. Jest to efektem m.in. tego, iż pierwotnie idea ekwiwalentnej mikrostruktury została wprowadzona dla nasyconego ośrodka porowatego, a więc dwufazowego medium przez co idea ta nie uwzględnia ewolucji mikrostruktury wywołanej sukcesywnym nawadnianiem gruntu [II.A.6].

W rezultacie, w niniejszej monografii zaproponowałem nowe podejście, które istotnie modyfikuje pierwotną ideę ekwiwalentnej mikrostruktury [II.A.6] poprzez wprowadzenie do schematów aproksymacji analitycznej tzw. „hierarchii zapełniania”. Sformułowana przeze mnie idea „hierarchii zapełniania” daje możliwość uwzględnienia w schematach aproksymacji analitycznej ewolucji mikrostruktury będącej konsekwencją sukcesywnego nawadniania gruntu. Innymi słowy, zaproponowane w monografii podejście uwzględnia zmianę mikrostruktury spowodowaną zapełnianiem przestrzeni porowej gruntu przez cząstki wody. Poprzez porównanie predykcji  $\lambda(S_r)$  uzyskanych z modelowania schematem aproksymacyjnym Mori-Tanaki z wynikami pomiarowymi (dane literaturowe) można stwierdzić, że niezwykle trudna do odtworzenia, specyficzna charakterystyka  $\lambda-S_r$ , zwłaszcza dla relatywnie niewielkich wartości  $S_r$ , została bardzo dobrze odwzorowana (rys. 10).

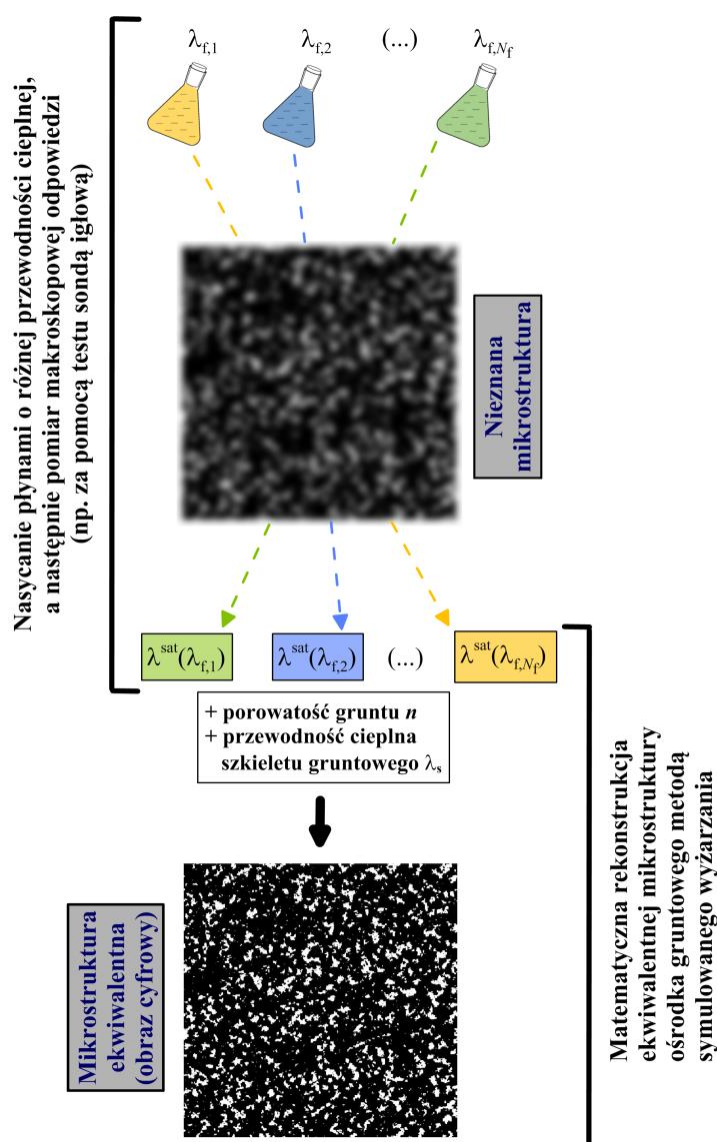


Rys. 10. Predykcja makroskopowej przewodności cieplnej częściowo nasyconego gruntu drobnoziarnistego.

Koncepcja ekwiwalentnej mikrostruktury wraz z wprowadzoną w monografii „hierarchią zapełniania” może posłużyć, jako efektywne narzędzie umożliwiające uzyskanie poprawnej predykcji makroskopowej przewodności cieplnej ośrodka gruntowego, w różnych stanach nasycenia. Co istotne w tym podejściu, dla danego gruntu, ekwiwalentna mikrostruktura pozostaje niezmiennicza względem zmiany wartości stopnia wilgotności. Innymi słowy, dla całego zakresu możliwych wartości  $S_r$ , istnieje jedna ekwiwalentna mikrostruktura, która zastosowana w schemacie Mori–Tanaki prowadzi do bardzo dobrego oszacowania wartości przewodności cieplnej dla dowolnego stopnia wilgotności. Powyższe jest oczywiście konsekwencją zaproponowanej koncepcji „hierarchii zapełniania”.

### Ad. (iv)

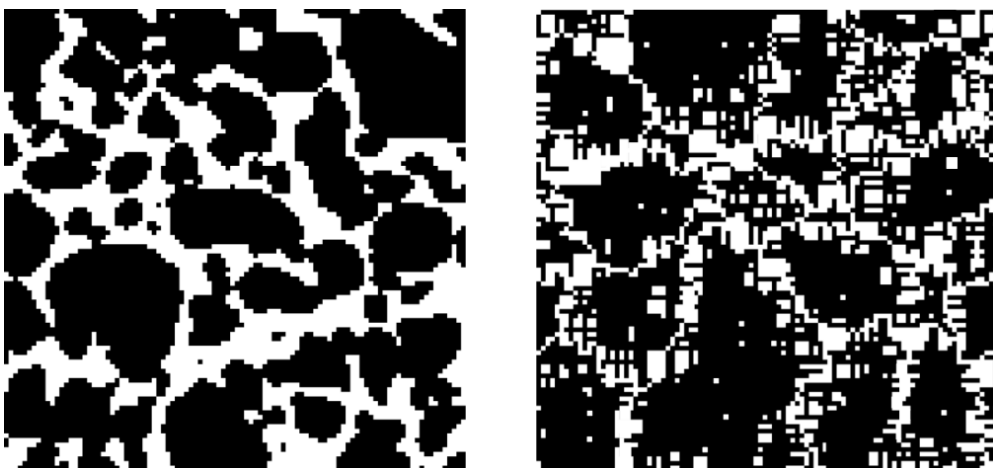
Wszystkie trzy wcześniejsze zagadnienia dotyczyły niejako określania charakterystyki cieplnej ośrodka gruntowego, w różnych stanach nasycenia oraz w różnych skalach obserwacji. W ramach zadania (iv) prezentowanego w rozdziale 9 mojej monografii wykazałem natomiast, że na podstawie znajomości charakterystyki przewodności cieplnej gruntu można rekonstruować mikrostrukturę ośrodka gruntowego. Innymi słowy, na podstawie analizy odwrotnej wykazałem, że znajomość charakterystyki przewodności cieplnej – przy czym charakterystyka ta określona jest w odpowiednio zrealizowanych badaniach laboratoryjnych – prowadzi do identyfikacji cyfrowej reprezentacji mikrostruktury gruntu, analogicznie jak w przypadku mikrotomografii komputerowej. Koncepcję identyfikacji mikrostruktury przedstawiono graficznie na rys. 11.



Rys. 11. Koncepcja rekonstrukcji mikrostruktury ośrodka gruntowego.

Zaproponowana koncepcja rekonstrukcji mikrostruktury gruntu bazuje więc na połączeniu badań laboratoryjnych z technikami obliczeń numerycznych stosowanych do rozwiązywania zagadnień bezpośrednich i odwrotnych teorii homogenizacji. W szczególności, rekonstrukcja wymaga przeprowadzenia kilku pomiarów współczynnika przewodności cieplnej dla próbek badanego gruntu w stanie pełnego nasycenia, przy czym za każdym razem grunt nasycany jest cieczą charakteryzującą się odmienną przewodnością cieplną. Dane konieczne do rekonstrukcji mikrostruktury gruntu uzupełnia informacja o porowatości gruntu oraz o przewodności cieplnej szkieletu gruntowego, którą określać można za pomocą techniki sformułowanej w ramach zadania (i). W celu rekonstrukcji obrazu cyfrowego mikrostruktury gruntu zaproponowałem numeryczny algorytm bazujący na metodzie stochastycznej optymalizacji. Jest to procedura iteracyjna, w której obraz cyfrowy, w każdej iteracji, „ewoluuje” w kierunku rozwiązania optymalnego. W każdej iteracji wartość przewodności cieplnej określa się stosując technikę zaproponowaną w ramach zadania (ii).

Na podstawie analizy piasku średniego wykazałem, że zaproponowana przeze mnie koncepcja prowadzi do satysfakcjonujących rezultatów w zakresie identyfikacji mikrostruktury ośrodka gruntowego. Uzyskany obraz cyfrowy mikrostruktury porównałem z cyfrową reprezentacją mikrostruktury otrzymaną z obrazowania w mikrotomografii komputerowej (rys. 12). Na tej podstawie można stwierdzić, że w sensie jakościowym, oba obrazy są do siebie bardzo podobne. W obu przypadkach zidentyfikowana została wyraźna struktura ziarnowa badanego ośrodka gruntowego, a wielkości ziaren są porównywalne. Oczywistym jest, że w przypadku obrazu uzyskanego ze skanowania w mikrotomografii komputerowej, struktura przestrzeni porowej ma zdecydowanie bardziej „wygładzony” przebieg. Jest to konsekwencją, m. in., przeprowadzonej procedury segmentacji oraz zastosowania filtrów graficznych. Obraz cyfrowy uzyskany na podstawie procedury sformułowanej w mojej monografii nie został poddany żadnej dodatkowej obróbce graficznej – jest to „oryginalna” konfiguracja pikseli uzyskana wprost z rekonstrukcji bazującej na algorytmie symulowanego wyżarzania.



Rys. 12. Zrekonstruowana mikrostruktura piasku średniego. Z lewej: obrazowanie uzyskane w mikrotomografii komputerowej. Z prawej: mikrostruktura ekwiwalentna określona na podstawie algorytmu zaproponowanego w monografii.

W tym kontekście, zaproponowany przeze mnie algorytm, jeśli uzupełniony o dedykowane techniki obróbki obrazów cyfrowych, może stanowić narzędzie do rekonstrukcji rzeczywistej mikrostruktury ośrodka gruntowego, dając rezultaty co najmniej tak dobre jak obrazowanie w mikrotomografii komputerowej.

Wymienione powyżej zagadnienia (od (i) do (iv)) zawarto w rozdziałach 6–9 omawianej monografii. Ponadto monografia zawiera też rozdziały o charakterze przeglądowym poświęcone opisowi:

- czynników wpływających na przewodność cieplną ośrodka gruntowego (**rozdział 2**),
- istniejących modeli teoretycznych i empirycznych wykorzystywanych do określania przewodności cieplnej gruntów (**rozdział 3**); w tym rozdziale przeprowadzono również analizę krytyczną istniejących modeli, dokonano ich zestawienia w formie tabelarycznej wskazując przy tym na ich zalety, wady oraz zakres stosowalności,
- wybranych technik homogenizacji (**rozdział 4**), przy czym głównie skupiono się na problemie określania wielkości Reprezentatywnej Elementarnej Objętości (REO) oraz na technikach obliczeniowej i analitycznej mikromechaniki umożliwiających szacowanie makroskopowych parametrów ośrodków losowych.

Dodatkowo **rozdział 5** monografii poświęcony jest technice laboratoryjnego określania przewodności cieplnej gruntów z wykorzystaniem tzw. sondy igłowej. W pierwszej kolejności zaprezentowano podstawy teoretyczne metody. Opisano, w sposób szczegółowy, procedurę określenia współczynnika przewodności cieplnej na podstawie odczytów z sondy, według standardów ASTM. Wskazano na możliwe błędy w interpretacjach w zależności od podejścia stosowanego do analizy odczytów wartości temperatury uzyskanych w trakcie badania. Przedstawiono również analizy dotyczące możliwości stosowania sondy igłowej do określania przewodności cieplnej ośrodków niejednorodnych. Na tej podstawie, oraz dodatkowo bazując na wieloletnim doświadczeniu w zakresie badań laboratoryjnych z wykorzystaniem sondy igłowej, sformułowano wytyczne dotyczące przeprowadzania i interpretacji pomiarów w odniesieniu do ośrodków gruntowych. W rozdziale tym zaprezentowano również wyniki pomiarów przewodności cieplnej dla wybranych gruntów uzyskane na podstawie badań przeprowadzonych przez autora. Rezultaty te były w dalszej kolejności wykorzystywane w analizach zawartych w rozdziałach 6–9, m. in., do weryfikacji proponowanych modeli teoretycznych oraz jako dane „wsadowe” do analizowanych w pracy zagadnień odwrotnych.

W tym miejscu należy wspomnieć, że tylko niektóre wyniki prezentowane w monografii były publikowane wcześniej w pracach, których jestem autorem lub współautorem (szczegółowy wykaz tych prac zawarto w załączniku 4; analizy zawarte w tych pracach opisano również w kolejnym punkcie autoreferatu). Większość dociekań i rozważań zawartych w monografii to oryginalne, nigdy wcześniej nie publikowane analizy i rezultaty. W tym kontekście pozwala mi to przedstawić omawianą monografię jako niezależne, oryginalne osiągnięcie naukowe.



## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

W trakcie swojej wieloletniej pracy naukowej zajmowałem się kilkoma, zasadniczo różniącymi się od siebie, tematami badawczymi. Poniżej przedstawiam je w osobnych podpunktach, wraz ze stosownym opisem osiągnięć naukowych oraz przedstawieniem prac naukowych, w których te osiągnięcia zostały opublikowane.

### a. Określanie charakterystyki przewodności cieplnej ośrodków porowatych

Po obronie doktoratu był to temat wiodący w mojej pracy naukowej. W pierwszej kolejności zająłem się problemem laboratoryjnego określania przewodności cieplnej ośrodków niejednorodnych, głównie gruntów. Skupiłem się na jednej z najbardziej popularnych obecnie technik laboratoryjnych służących do pomiaru przewodności cieplnej, tj. na teście sondą igłową. W pracy [II.E.13] wykazano, że w zależności od podejścia stosowanego do wykonania pomiaru (np. uwzględnienie wyłącznie części wyników pochodzącej z fazy grzania sondy igłowej lub jednoczesne uwzględnienie wyników z obu faz) może prowadzić to do wyraźnych różnic w uzyskanych rezultatach. Dla analizowanych próbek gruntów ilastych znajdujących się w stanie pełnego nasycenia wodą uzyskano względne różnice w oszacowaniu sięgające od 3 do 27%. W artykule [II.E.16], na podstawie pomiarów laboratoryjnych oraz symulacji numerycznych testu sondą igłową wykazano, że nieodpowiednio wykonany pomiar przewodności cieplnej kompozytów o morfologii matryca – wtrącenie (zwłaszcza gdy oba składniki cechują się dużym kontrastem przewodności cieplnej) może prowadzić do błędnych interpretacji współczynnika  $\lambda$ . W pracy tej sformułowano wytyczne dotyczące przeprowadzania badania i interpretacji wyników dla ośrodków mikroniejednorodnych.

Dalsze analizy prowadzone w ramach tego tematu badawczego skupiały się na formułowaniu technik obliczeniowych (głównie w ramach obliczeniowej mikromechaniki) umożliwiających określanie przewodności cieplnej szkieletu gruntowego lub nasyconego ośrodka gruntowego. Na podstawie badań laboratoryjnych przewodności cieplnej gruntów ilastych w stanie suchym i w pełni nasyconym w pracy [II.E.17] podjęto próbę określenia przewodności cieplnej szkieletu gruntowego. Rozwiązywano w tym celu zagadnienia odwrotne w ramach dwóch schematów aproksymacji analitycznej, tj., Mori-Tanaki i samouzgłodnionego pola. W pracy [II.A.3] zaproponowano nowy model do określania wartości przewodności cieplnej szkieletu gruntowego na podstawie informacji o powierzchni właściwej gruntów. Techniki numerycznego określania przewodności cieplnej gruntów nasyconych oraz przewodności cieplnej szkieletu gruntowego sformułowano w pracach [II.A.4, II.E.18, II.E.19].

W artykule [II.E.22], na podstawie obliczeń numerycznych, rozważano zmiany temperatury w sąsiedztwie „termicznie” obciążonej konstrukcji zanurzonej w ośrodku gruntowym. Obciążeniem termicznym były cykliczne wahania temperatury. Analizowano wpływ czynników takich jak: uziarnienie gruntu, zawartość części organicznych i zawartość wody w przestrzeni porowej (jako wynik zmienności w czasie położenia zwiędniętej wody gruntowej) na rozkład temperatury wokół konstrukcji. Stwierdzono istotny wpływ w/w czynników na uzyskiwane rozkłady pola temperatury. Obliczenia prowadzono w ujęciu Metody Elementów Skończonych.

Ostatnia z prac dotycząca tego tematu badawczego to artykuł [II.A.6]. W pracy tej sformułowano technikę określania tzw. ekwiwalentnej mikrostruktury dla nasyconego ośrodka porowatego. Mikrostruktura ekwiwalentna to pewna wirtualna/zastępcza mikrostruktura, której geometria, w ogólnym przypadku, jest odmienna od morfologii ośrodka rzeczywistego, ale jej odpowiedź makroskopowa, w zakresie makroskopowej przewodności cieplnej, jest tożsama z odpowiedzią ośrodka rzeczywistego. W odniesieniu do propozycji istniejących w literaturze przedmiotu, koncepcja zaproponowana w pracy [II.A.6] jest bardziej wyrafinowana, gdyż tak określona mikrostruktura zastępcza pozostaje niezmiennicza względem parametrów termicznych składników ośrodka porowatego.

#### **b. Modelowanie numeryczne mechanicznego zachowania konstrukcji geotechnicznych**

W ramach tego tematu badawczego zajmowałem się dwoma wiodącymi zadaniami, tj. modelowaniem numerycznym zachowania się konstrukcji gruntowo-powłokowej poddanej działaniu obciążeń ruchomych oraz oceną stateczności zapór ziemnych zbiorników przeciwpowodziowych. Ten temat badawczy w całości realizowałem po obronie doktoratu. W szczególności, w pracach [II.E.21, II.E.20] rozwiązywano w sposób numeryczny problem oceny możliwości użytkowania mostu gruntowo-powłokowego zlokalizowanego w czasie suchego zbiornika przeciwpowodziowego. Modelowano fazy budowy oraz użytkowania obiektu przy różnych stanach piętrzenia: zbiornik suchy, maksymalne piętrzenie, opadanie wody w zbiorniku. Analizowano zmiany sił wewnętrznych i naprężenia w powłoce wywołane kilkoma cyklami ruchomego, quasi-statycznego obciążenia taborem samochodowym. Uzyskane rezultaty wykazały, że podczas powodzi maksymalne naprężenie w powłoce stalowej znacznie wzrasta – w stosunku do sytuacji, gdy zbiornik nie jest wypełniony wodą. Ponadto zaobserwowano, że niektóre z efektów nieliniowych, typowe dla takich konstrukcji, np. efekt histerezy, stają się bardziej wyraźne w porównaniu do stanu „normalnego” (zbiornik suchy) użytkowania mostu.

W pracy [II.E.26] analizowano metodykę oceny stateczności skarp i zboczy budowli hydrotechnicznych, która w myśl aktualnych przepisów podlega dwóm różnym rozporządzeniom. Z jednej strony obowiązują zasady projektowania geotechnicznego, podane w Eurokodzie 7, z drugiej (równolegle) zapisy rozporządzenia ws. warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie. W artykule [II.E.26] podjęto próbę udzielenia odpowiedzi na pytanie, w jakim stopniu wybór pomiędzy wymienionymi podejściami wpływa na uzyskiwane wyniki analizy stateczności zapór suchych zbiorników przeciwpowodziowych na przykładzie zbiornika zlokalizowanego w Roztokach Bystrzyckich. Wykonano symulacje numeryczne, w których określano wartość wskaźnika stateczności dla różnych chwil czasowych odpowiadającym różnym stanom piętrzenia wody w zbiorniku. Uzyskane wartości względnego zapasu bezpieczeństwa wskazały na dużą zbieżność pomiędzy obydwoma podejściami. Jedyne różnice wystąpiły w przypadku, gdy stateczność określana była dla podstawowego układu obciążeń (wg rozporządzenia „ministerialnego”) – otrzymane wartości wskaźników różniły się o około 10%. Z punktu widzenia zastosowań w praktyce inżynierskiej, otrzymane rezultaty są niezwykle cenne i istotne.

### **c. Ocena właściwości strukturalnych materiałów mikroniejednorodnych z wykorzystaniem zaawansowanych technik laboratoryjnych**

Ze względu na fakt, iż większość materiałów niejednorodnych cechuje się zmiennością swoich właściwości mechanicznych w zależności od skali obserwacji, w ostatnim czasie wzrosło zainteresowanie rozwojem nowoczesnych technik laboratoryjnych. Do takich metod zaliczyć można obrazowanie w mikrotomografie komputerowym czy też testy nanoindentacji. Pierwsza z wymienionych technik dostarcza informacji o morfologii mikrostruktury badanego materiału. Dzięki drugiej możliwe jest określenie tzw. mechanicznej morfologii materiału, gdzie przez pojęcie mechanicznej morfologii rozumie się przestrzenny rozkład parametrów mechanicznych, np. nanotwardości czy modułu indentacji (lub wprost modułu sprężystości), w rozważanym kompozycie.

Najczęściej metody obrazowania w mikrotomografii lub testów nanoindentacji wykonuje się oddzielnie a uzyskiwanych rezultatów w żaden sposób nie „koreluje się” ze sobą. W zakresie tego tematu badawczego podjęto więc próbę stworzenia hybrydowej techniki do analizy właściwości strukturalnych materiałów niejednorodnych będącej połączeniem dwóch omawianych powyżej metod. W pracach [II.E.40, II.E.38, II.E.37, II.E.25, II.E.23] sformułowano metody dające możliwość oceniania właściwości strukturalnych oraz ich ewolucję (wywołaną np. przyrostem obciąża próbki materiału) z jednoczesnym użyciem nanoindentacji i mikrotomografii. Techniki formułowano dla materiałów mikroniejednorodnych, takich jak beton oraz materiał skalny. Na szczególną uwagę zasługuje zaproponowanie zupełnie nowej techniki przeprowadzania testów nanoindentacji. W pracy [II.E.24] sformułowano technikę tzw. „sekwencyjnej nanoindentacji”, polegającą na stosowaniu oryginalnej kinetyki obciążenia próbki dla ustalonej pozycji wgłębnika. Jak wykazano na przykładzie materiału skalnego, takie podejście umożliwia w prosty sposób obserwować zmienność parametrów mechanicznych mikrostruktury, np. modułu sprężystości, w zależności od skali obserwacji.

### **d. Identyfikacja efektu skali w kompozytach o morfologii „matryca-wtrącenie”**

Istnienie efektu skali w licznych zagadnieniach fizycznych było raportowane w wielu pracach naukowych. Problemem identyfikacji tego efektu oraz czynników istotnie wpływających na ten efekt dla przypadku kompozytów o morfologii „matryca-wtrącenie” zająłem się w całości po obronie doktoratu. W pracy [II.E.39] analizowano efekt skali w dwóch odrębnych ujęciach. Po pierwsze, rozpatrywano istnienie efektu skali w odniesieniu do skali czasu poprzez analizę (laboratoryjną i numeryczną) testu igłowego, którym dokonuje się pomiaru przewodności cieplnej. Wykazano, że odpowiedni czas pomiaru jest silnie zależny od wielkości wtrąceń zanurzonych w ciągłej matrycy kompozytu. Po drugie, analizowano efekt skali rozumiany jako wpływ wielkości próbki na uzyskaną w badaniach (lub symulacjach numerycznych) odpowiedź mechaniczną kompozytu. Rozważano zarówno wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie oraz moduł Young’a. Ponownie problem rozważano w ujęciu badań laboratoryjnych i obliczeń numerycznych. Wykazano na podstawie badań, że wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie stabilizuje się (wraz ze wzrostem wymiaru inkluzji) wyraźnie szybciej niż wartość modułu Younga.

Wyniki dalszych dociekań w ramach tego zadania badawczego opublikowałem w pracy [II.A.5], w której analizowano wpływ niejednorodności mikrostruktury na efekt skali w odniesieniu do wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie oraz wartość modułu Young'a. Wykonano badania laboratoryjne (testy wytrzymałościowe i obrazowanie w mikrotomografii komputerowej) na sekwencji specjalnie w tym celu wykonanych próbek. Rozważano dwa odrębne materiały – gips oraz zaprawę cementową. W obu przypadkach wykazano istnienie efektu skali. Jednocześnie wskazano na fakt, iż efekt ten jest bardziej wyraźny w przypadku materiału o bardziej niejednorodnej mikrostrukturze [II.A.5].

#### **e. Numeryczne określanie wielkości REO oraz parametrów efektywnych kompozytów losowych**

Ze względu na duże możliwości obliczeniowe współczesnych komputerów bardzo często do rozwiązywania zagadnień teorii homogenizacji wykorzystuje się metody numeryczne. Zagadnienia postawione z wykorzystaniem metod numerycznych rozwiązywane są na obszarze Reprezentatywnej Elementarnej Objętości (REO), która najczęściej rozumiana jest jako najmniejsza objętość analizowanego ośrodka zawierająca wszystkie informacje o strukturze i własnościach całego materiału. Wyznaczenie parametrów efektywnych kompozytów losowych z wykorzystaniem REO skutkuje znaczną redukcją czasu obliczeń ponieważ objętość ta zawiera wyraźnie mniejszą liczbę niejednorodności aniżeli objętość całego materiału.

W trakcie przygotowywania pracy doktorskiej zajmowałem się zagadnieniem sformułowania numerycznej metody określenia wielkości REO równolegle prowadząc rozważania w zakresie stworzenia efektywnej metody numerycznej umożliwiającej określanie parametrów efektywnych kompozytów losowych. Rezultatem analiz było sformułowanie metody umożliwiającej określanie wielkości REO jedynie na podstawie statystycznej miary mikrostruktury jaką jest tzw. prawdopodobieństwo dwu-punktowe. Zaproponowałem również niezwykle skuteczną metodę szacowania parametrów efektywnych na podstawie próbkowania Monte-Carlo. W metodzie tej parametry efektywne określa się rozpatrując dużą ilość losowych realizacji REO, o relatywnie małych wymiarach (ale większych od dopuszczalnie małego), a następnie analizowany parametr określa się jako wartość uśrednioną po wszystkich losowych realizacjach. Wyniki analiz oraz sformułowanie technik obliczeniowych zawarto głównie w rozprawie doktorskiej [18], a także w następujących artykułach i referatach konferencyjnych: [II.E.1, II.E.2, II.E.5, II.E.6, II.E.8, II.E.10, II.E.30, II.E.32, II.E.33, II.E.34, II.E.44, II.E.45].

Po obronie doktoratu w dalszym ciągu moje zainteresowania naukowe związane były z tym tematem badawczym. W artykule [II.E.15] zaproponowałem metodę określenia wielkości REO dla zagadnienia liniowej sprężystości. Warunek na minimalny wymiar REO sformułowano na podstawie statystycznej miary mikrostruktury, tj. funkcji „*lineal-path*”. Liczne przykłady obliczeniowe wykazały poprawność przyjętych założeń.

Za najważniejszą pracę z zakresu omawianego tematu badawczego uznaję artykuł [II.A.2]. W pracy tej podano nieco zmodyfikowany względem doktoratu warunek na minimalną dopuszczalną wielkość REO. Rozważano, zarówno zagadnienie przepływu ciepła, jak i problem liniowej sprężystości. Otrzymane rezultaty porównano z podejściem zaproponowanym w pracy [19], które w tamtym okresie uznawano za przełomowe, jeśli

chodzi o określanie wielkości REO. Uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników. Na uwagę zasługuje jednak fakt, że zaproponowana w pracy [II.A.2] metoda jest obliczeniowo bardziej wydajna. W celu określenia wielkości REO nie oblicza się, jak ma to miejsce np. w metodzie Kanita i in. [19], parametrów makroskopowych; wielkość REO określa się jedynie na podstawie zaproponowanych statystycznych miar mikrostruktury.

#### **f. Niezawodność konstrukcji geotechnicznych**

Swoje zainteresowania naukowe koncentrowałem również wokół zagadnień związanych z niezawodnością konstrukcji geotechnicznych. Po raz pierwszy z tą tematyką zetknąłem się już w trakcie przygotowywania przeze mnie pracy magisterskiej nt. nośności bocznej pala sztywnego w ośrodku spoiwym o cechach losowych. Swoje zainteresowanie tym tematem badawczym kontynuowałem zarówno w trakcie studiów doktoranckich, jak i po obronie doktoratu. W pracach [II.E.27, II.E.28, II.E.31] sformułowane zostały techniki umożliwiające szacowanie prawdopodobieństwa awarii sztywnego pala obciążonego siłą poziomą zlokalizowanego w uwarstwionym ośrodku gruntowym o cechach losowych. W tym celu wykorzystywano różne metody teorii niezawodności, m.in., metody pierwszego i drugiego rzędu, tj. FORM i SORM czy też symulacje Monte-Carlo. Zainteresowanie tymi zagadnieniami miało także wyraźny aspekt praktyczny z uwagi na fakt stosowania pojedynczych pali jako fundamentów dla słupów sieci trakcyjnych modernizowanych linii kolejowych. Najważniejsze rezultaty dotyczące niezawodności sztywnych pali fundamentowych obciążonych siłą poziomą opublikowałem w pracy [II.A.1], gdzie sformułowano metodę określania prawdopodobieństwa awarii oraz indeksów niezawodności m.in. dla przypadku gruntów spoiwanych.

Dalsze analizy i badania w zakresie tego tematu badawczego dotyczyły sformułowania podejścia niezawodnościowego do projektowania konstrukcji geotechnicznych zlokalizowanych w gruntach o mikrostrukturze warstwowej, tj. łałach warwowych. Wyniki analiz opublikowano w pracach [II.E.4, II.E.7].

Ostatnim problemem jakim zajmowałem w ramach tego tematu badawczego było sformułowanie metody umożliwiającej szacowanie prawdopodobieństwa awarii zabezpieczenia głębokiego wykopu wykonanego w uwarstwionym ośrodku skalnym [II.E.36]. W ramach tego zadania sformułowano procedurę geometrycznego określania wartości prawdopodobieństwa awarii. Metodę zastosowano do analizy rzeczywistego przypadku, w którym wystąpiła awaria na skutek nieprawidłowo wykonanych prac zabezpieczających ściany głębokiego wykopu na budowie Muzeum Śląskiego w Katowicach [II.E.36].

#### **g. Optymalizacja kształtu geotechnicznych konstrukcji inżynierskich**

W ramach tego tematu badawczego zajmowałem się optymalizacją kształtu wyrobisk podziemnych zlokalizowanych w jednorodnym masywie skalnym. Problemem tym zająłem się jeszcze w trakcie odbywania przeze mnie studiów doktoranckich. W pracy [II.E.3], której jestem współautorem, zaproponowano energetyczny warunek optymalizacji kształtu wyrobisk podziemnych. Rozpatrywano tam eliptyczne i pół-eliptyczne kształty wyrobisk podziemnych. Uzyskano satysfakcjonujące rezultaty, co zostało potwierdzone porównaniem wyników analiz numerycznych ze znanym w literaturze tematu rozwiązaniem analitycznym.

Po obronie doktoratu, w dalszym ciągu zajmowałem się tym tematem badawczym, czego efektem było opublikowanie trzech kolejnych prac naukowych [II.E.14, II.E.9, II.E.35]. W szczególności, w pracach [II.E.9, II.E.35] dla różnych wartości stosunku naprężeń poziomych do pionowych poszukiwano optymalnych stosunków półośi minimalizujących zaciskanie się tunelu, energię odkształcenia objętościowego rdzenia oraz maksymalne naprężenie normalne w obudowie. W analizie uwzględniano także wpływ sztywności obudowy na optymalny kształt wyrobiska. W artykule [II.E.14], gdzie zajmowano się po raz kolejny optymalizacją kształtu wyrobisk z obudową tunelową, zaproponowano nową iteracyjną metodę optymalizacji bazującą na algorytmie stochastycznym, tzw. symulowanym wyżarzaniu. Określono optymalne kształty wyrobisk podziemnych dla różnych wartości naprężeń pierwotnych w górotworze. Analizy prowadzono w ujęciu metod numerycznych w środowisku Flac.

#### **h. Ewolucja parametrów mechanicznych oraz przyczyny pęknięcia betonów w masywnych konstrukcjach inżynierskich**

Powyższym tematem badawczym zacząłem się zajmować jeszcze przed obroną doktoratu. W 2006 roku ukazał się referat konferencyjny [II.E.29], w ramach którego zajmowałem się ewolucją mikrostruktury betonu wywołaną destrukcyjnym procesem ługowania. Referat ten prezentuje, na przykładzie procesu ługowania betonu, procedurę matematycznego traktowania materiałów z ewolucją mikrostruktury. W szczególności, sformułowano równanie ewolucji parametru mikrostruktury; przyjęto najprostszą miarę mikrostruktury, tj. udział frakcyjny defektów występujących w matrycy betonowej. Wpływ udziału frakcyjnego defektów na parametry sprężystości betonu analizowano z zastosowaniem techniki homogenizacji, tj. metody samouzgodnionego pola. Wyprowadzono analityczną zależność umożliwiającą szacowanie zmiany porowatości betonu, jako funkcji czasu procesu ługowania, dla betonowej próbki poddanej chemicznej degradacji.

Po obronie doktoratu zajmowałem się również tematyką określania przyczyn pęknięcia betonów w masywnych konstrukcjach hydrotechnicznych [II.E.11, II.E.41]. W przytoczonych artykułach analizowano, w sposób numeryczny, problem wpływu wahań temperatury wody na pęknięcie betonów elektrowni wodnej. Na przykładzie rzeczywistej konstrukcji (elektrowni wodnej) wykazano, że główną przyczyną pęknięć masywnych konstrukcji hydrotechnicznych mogą być wahania temperatury wody przepływającej przez budowlę.

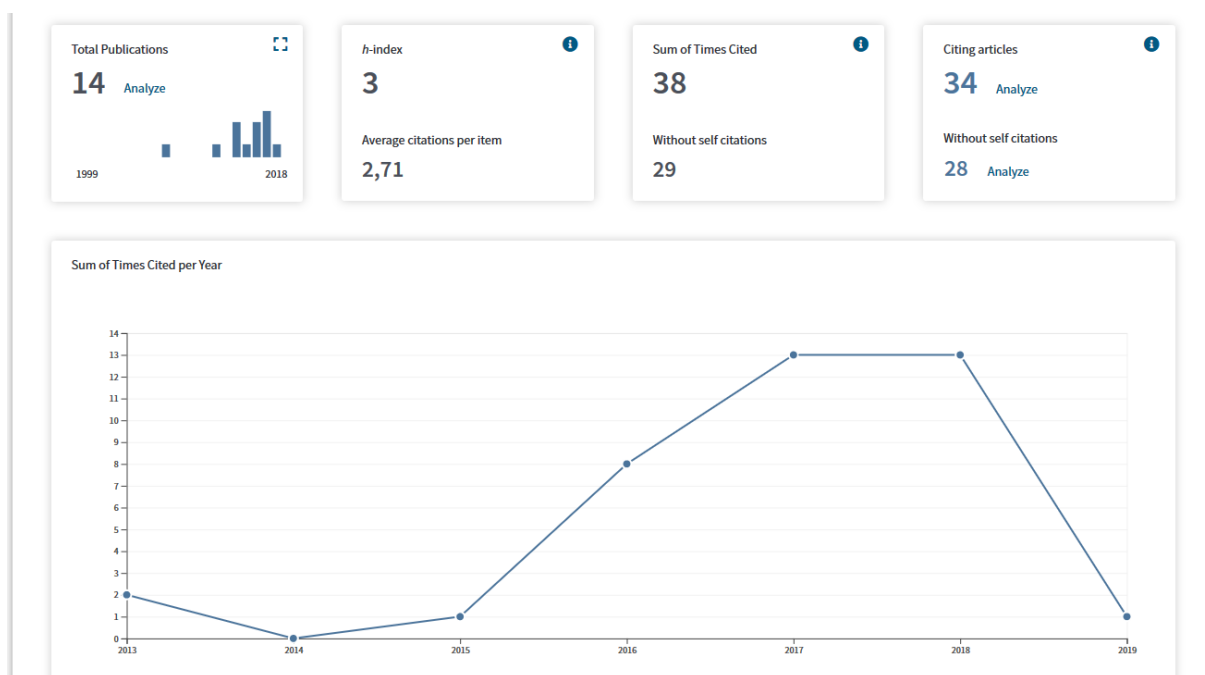
## **6. Podsumowanie dorobku naukowego**

Na mój dorobek naukowy po uzyskaniu stopnia doktora składa się: 1 monografia, 6 artykułów w czasopismach z części A listy MNiSW, 18 artykułów w czasopismach z części B listy MNiSW, 4 publikacje konferencyjne uwzględnione w bazie WoS, 1 rozdział w książce oraz 8 referatów konferencyjnych. W tym okresie, swoje wyniki prezentowałem również na wielu konferencjach krajowych i międzynarodowych. Zestawienie dorobku naukowego, z podziałem na poszczególne lata prezentuje tab. 1.

Tabela 1. Zestawienie dorobku naukowego (po obronie doktoratu, tj. w latach 2011-2018) z podziałem na poszczególne lata.

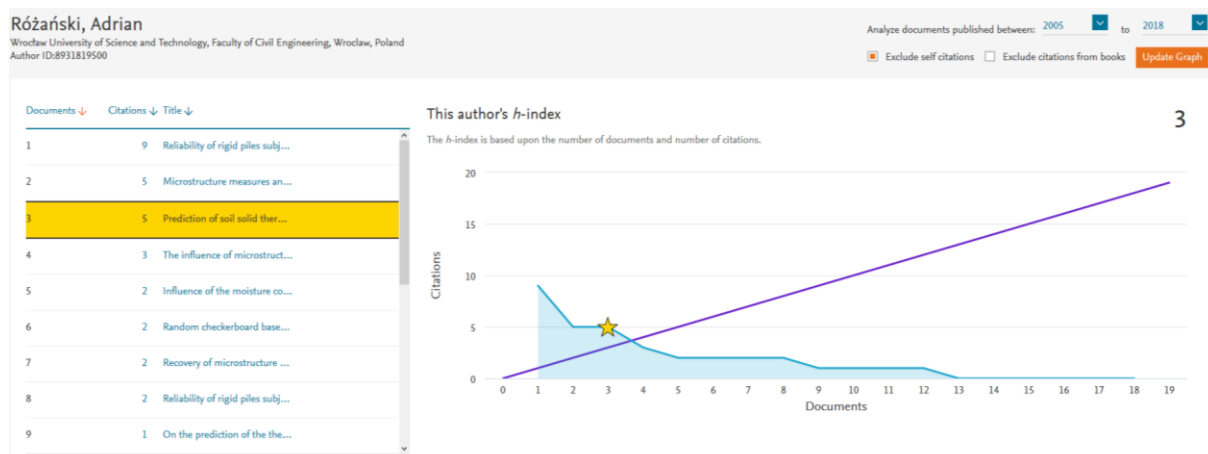
Rok	Impact Factor	Punktacja wg listy MNiSW
2011	–	20
2012	0,963	20
2013	–	44
2014	1,068	62
2015	–	15
2016	4,174	72
2017	0,619	74
2018	7,023	40
<b>RAZEM</b>	<b>13,847</b>	<b>347</b>

Na dzień 20.11.2018 r., w bazie Web of Science, zaindeksowanych jest 14 spośród wszystkich moich prac naukowych, cytowanych łącznie 29 razy (bez samocytowań). Według tej bazy mój indeks Hirscha wynosi 3 (rys. 13). Sumaryczny Impact Factor według bazy Web of Science wynosi natomiast 13,847.

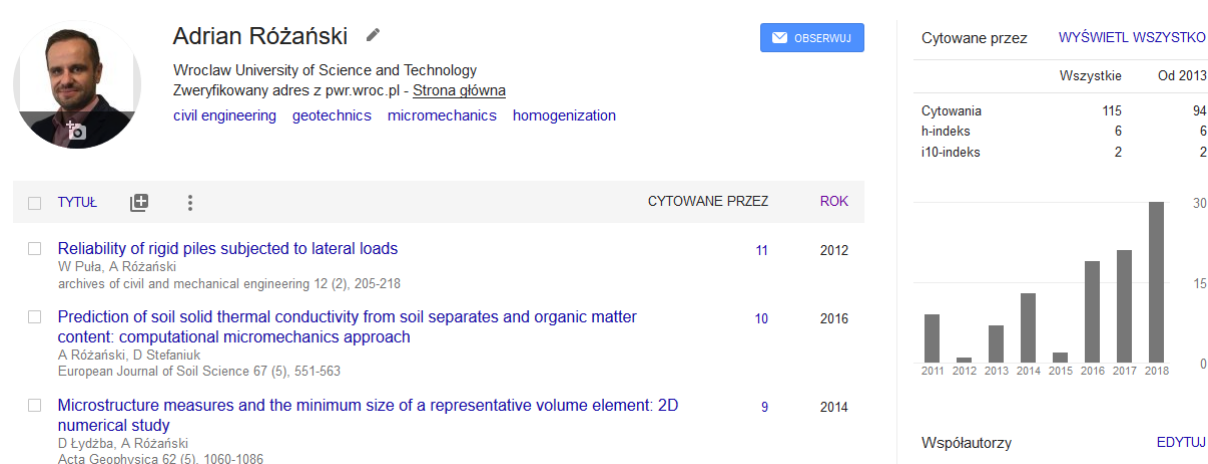


Rys. 13. Analiza dorobku naukowego według bazy Web of Science – stan na 20.11.2018 r.

Na ten sam dzień, w bazie Scopus, zaindeksowanych jest 18 spośród wszystkich moich prac naukowych. Według tej bazy moje prace były cytowane łącznie 34 razy (bez samocytowań), a indeks Hirscha wynosi 3 (rys. 14). Według bazy Google Scholar (stan na dzień 20.11.2018 r.) moje prace były cytowane łącznie 115 razy, a indeks Hirscha wynosi 6 (rys. 15).



Rys. 14. Analiza dorobku naukowego według bazy Scopus – stan na 20.11.2018 r.



Rys. 15. Analiza dorobku naukowego według bazy Google Scholar – stan na 20.11.2018 r.

## Literatura

- [1] BRANDL, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Geotechnique*, 56(2), 81-122.
- [2] LALOU, L., NUTH, M., VULLIET, L. (2006). Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30(8), 763-781.
- [3] BRANDL, H., ADAM, D. MARKIEWICZ, R. (2006). Energy geocomposites for tunnels. Proceedings of 8ICG 8th International Geosynthetics Conference. Yokohama, Japan, September 18-22, 2006.
- [4] MIMOUNI, T., DUPRAY, F., MINON, S., LALOU, L. (2013). Heat exchanger anchors for thermo-active tunnels (No. EPFL-REPORT-190673). Swiss Association of Road and Transportation Experts.
- [5] MURPHY, K. D., MCCARTNEY, J. S., HENRY, K. S. (2015). Evaluation of thermo-mechanical and thermal behavior of full-scale energy foundations. *Acta Geotechnica*, 10(2), 179-195.
- [6] KHOSRAVI, A., MORADSHAHI, A., MCCARTNEY, J. S., KABIRI, M. (2016). Numerical analysis of energy piles under different boundary conditions and thermal loading cycles. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 9, p. 05005). EDP Sciences.
- [7] JOHANSEN, O. (1975). Thermal conductivity of soils (No. CRREL-TL-637). Draft English Translation 637. Rozprawa doktorska. University of Trondheim, Norwegia. Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH.
- [8] GEMANT, A. (1952). How to compute thermal soil conductivities. *Heating, Piping, and Air Conditioning*, 24(1), 122-123.
- [9] FAROUKI, O. T. (1981). *Thermal properties of soils* (No. CRREL-MONO-81-1). Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH.
- [10] CÔTÉ, J., KONRAD, J. M. (2005). Thermal conductivity of base-course materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(1), 61-78.



- [11] CÔTÉ, J., KONRAD, J. M. (2005). A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(2), 443-458.
- [12] HORAI, K. I. (1971). Thermal conductivity of rock-forming minerals. *Journal of Geophysical Research*, 76(5), 1278-1308.
- [13] VANMARCKE, E. H. (1977). Probabilistic modeling of soil profiles. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(11), 1227-1246.
- [14] KIRKPATRICK, S., GELATT, C. D., & VECCHI, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671-680.
- [15] ČAPEK, P., HEJTMÁNEK, V., BRABEC, L., ZIKÁNOVÁ, A., KOČÍŘÍK, M. (2009). Stochastic reconstruction of particulate media using simulated annealing: Improving pore connectivity. *Transport in Porous Media*, 76(2), 179-198.
- [16] LU, S., REN, T., GONG, Y., HORTON, R. (2007). An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature. *Soil Science Society of America Journal*, 71(1), 8-14.
- [17] TORQUATO, S. (2002). *Random heterogeneous materials: microstructure and macroscopic properties*. Springer Verlag, New York.
- [18] RÓŽAŃSKI, A. (2010). *Random composites: representativity, minimum RVE size, effective transport properties* (Rozprawa doktorska, USTL, LML (UMR CNRS 8107)).
- [19] KANIT, T., FOREST, S., GALLIET, I., MOUNOURY, V., JEULIN, D. (2003). Determination of the size of the representative volume element for random composites: statistical and numerical approach. *International Journal of Solids and Structures*, 40(13-14), 3647-3679.
- [20] LU, Y., LU, S., HORTON, R., REN, T. (2014). An empirical model for estimating soil thermal conductivity from texture, water content, and bulk density. *Soil Science Society of America Journal*, 78(6), 1859-1868.
- [21] HAIGH, S. K. (2012). Thermal conductivity of sands. *Geotechnique*, 62(7), 617.
- [22] HE, H., ZHAO, Y., DYCK, M. F., SI, B., JIN, H., LV, J., WANG, J. A. (2017). A modified normalized model for predicting effective soil thermal conductivity. *Acta Geotechnica*, 1-20.
- [23] HASHIN, Z., SHTRIKMAN, S. (1963). A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 11(2), 127-140

Adrien Róžański