

## **Załącznik 3**

### **Autoreferat dotyczący działalności naukowo-badawczej, dydaktycznej i organizacyjnej**

#### Zawartość:

1.	Imię i nazwisko	str. 1
2.	Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej	str. 1
3.	Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	str. 1
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	str. 2
4.a.	Tytuł osiągnięcia naukowego	str. 2
4.b.	Publikacje lub inne prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego	str. 2
4.c.	Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania	str. 3
5.	Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych	str. 13
6.	Działalność dydaktyczna	str. 19
7.	Działalność organizacyjna, współpraca naukowa i popularyzacja nauki	str. 20

## **1. Imię i nazwisko**

Ireneusz Marzec

## **2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej**

1. 23.10.2003. Magister inżynier, kierunek budownictwo (konstrukcje budowlane i inżynierskie). Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej.
2. 11.03.2009. Doktor inżynier, dziedzina: nauki techniczne, dyscyplina: budownictwo. Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska. Tytuł rozprawy: Zastosowanie modelu sprężysto-plastycznego betonu z degradacją sztywności i nielokalnym osłabieniem do modelowania elementów betonowych cyklicznie obciążonych. Promotor: prof. dr hab. inż. Jacek Tejchman. Recenzenci: dr hab. inż. Jerzy Pamin, prof. PK i dr hab. inż. Jarosław Górski.

## **3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych**

1. 15.11.2004-30.11.2005: Politechnika Gdańska. Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska – asystent (0.2 etatu).
2. 01.12.2005-31.08.2006: Politechnika Gdańska. Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska – asystent (0.5 etatu).
3. 01.09.2007-31.03.2009: Politechnika Gdańska. Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska – asystent (pełen etat).
4. 01.04.2009-31.03.2017: Politechnika Gdańska. Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska – adiunkt ze stop. nauk. doktora (pełen etat).
5. od 01.04.2017: Politechnika Gdańska. Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska – starszy wykładowca ze stop. nauk. doktora (0.5 etatu).

#### **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**

##### **a. Tytuł osiągnięcia naukowego**

Numeryczne modelowanie elementów żelbetowych i betonowych z zastosowaniem praw materiałowych dla betonu z nielokalnym osłabieniem

##### **b. Publikacje lub inne prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego**

1. **Marzec I.**, Tejchman J. 2012. Enhanced coupled elasto-plastic-damage models to describe concrete behaviour in cyclic laboratory tests: comparison and improvement. *Archives of Mechanics* 64(3), 227-259.
2. **Marzec I.**, Tejchman J. 2013. Computational modelling of concrete behaviour under static and dynamic conditions. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences* 61(1), 85-95.
3. **Marzec I.**, Skarżyński Ł., Bobiński J., Tejchman J. 2013. Modelling reinforced concrete beams under mixed shear-tension failure with different continuous FE approaches. *Computers and Concrete* 12(5), 585-612.
4. **Marzec I.**, Tejchman J. 2014. An elasto-plastic constitutive model with non-local softening and viscosity to describe dynamic concrete behaviour. *Computational Modelling of Concrete Structures*, 1, 127-137, CRC Press, Taylor and Francis Group, London, ISBN 978-1-138-00145-9.
5. **Marzec I.**, Tejchman J., Winnicki A. 2015. Computational simulations of concrete behaviour under dynamic conditions using elasto-visco-plastic model with non-local softening. *Computers and Concrete* 15(4), 515-545.
6. Skarżyński Ł., **Marzec I.**, Tejchman J. 2017. Experiments and numerical analyses for composite RC-EPS slabs. *Computers and Concrete* 20(6), 689-704.
7. Skarżyński Ł., **Marzec I.**, Drąg K., Tejchman J. 2018. Numerical analyses of novel prefabricated structural wall panels in residential buildings based on laboratory test in scale 1:1. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 1-33, doi: 10.1080/19648189.2018.1474382.

8. Suchorzewski J. **Marzec I.**, Tejchman J., Korol E. 2018. Investigations of strength and fracture in RC beams scaled along height. *Computational Modelling of Concrete Structures* 651-661, CRC Press, Taylor and Francis Group, London, ISBN 978-1-138-74117-1.
9. **Marzec I.**, Tejchman J., Mróz Z. 2019. Numerical analysis of size effect in RC beams scaled along height or length using elasto-plastic-damage model enhanced by non-local softening. *Finite Elements in Analysis and Design* 157, 1-20.

Razem 7 artykułów w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports.

**c. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania**

Beton jest materiałem quasi-kruchym. Zachowanie betonu może być traktowane jako liniowe jedynie w niewielkim zakresie odkształceń, w pozostałym zakresie jest silnie nieliniowe. Po osiągnięciu nośności, ma miejsce znaczny i nagły spadek naprężeń w przypadku ściskania i rozciągania. Temu zjawisku osłabienia towarzyszy koncentracja odkształceń w niewielkich strefach betonu (tworzą się cienkie strefy mikro-rys zwane strefami lokalizacji odkształceń lub strefami pękania (*ang. fracture process zone – FPZ*), które wraz z dalszym wzrostem deformacji przekształcają się w dyskretne makro-rysy. W ramach mechaniki ośrodków ciągłych jednym z podstawowych sposobów opisu rys jest ich opisanie w sposób rozmyty za pomocą stref lokalizacji o skończonej szerokości. Jako modele konstytutywne wykorzystuje się prawa sprężysto-plastyczne, prawa mechaniki uszkodzeń lub modele połączone. Stosowanie klasycznych praw konstytutywnych z osłabieniem w połączeniu z metodą elementów skończonych prowadzi do otrzymania niepoprawnych wyników. Uzyskane krzywe siła - przemieszczenie są zależne od przyjętej siatki MES, a odkształcenia koncentrują się w pasmach o szerokości jednego elementu skończonego. Aby temu zapobiec konieczne jest rozszerzenie klasycznych modeli konstytutywnych poprzez wprowadzenie tzw. regularyzacji. Jedną z możliwości jest zastosowanie teorii nielokalnej. Sprowadza się ona zasadniczo do zastąpienia lokalnych zmiennych modelu wyznaczonych w danym punkcie materialnym ich nielokalnymi odpowiednikami, otrzymanymi poprzez operację przestrzennego uśredniania w obszarze sąsiedztwa rozważanego punktu. W konsekwencji do równań konstytutywnych wprowadzona zostaje długość charakterystyczna odnosząca się do mikrostruktury materiału. Zastosowanie długości charakterystycznej zapewnia

uniezależnienie otrzymanych wyników numerycznych od przyjętej siatki elementów skończonych. Dodatkowo pozwala także na symulowanie deterministycznego efektu skali. Należy zauważyć, że tego typu zaawansowane techniki regularyzacji nie są dostępne w komercyjnych programach wykorzystujących metodę elementów skończonych (MES). Aby właściwie odzwierciedlić mechanizm zniszczenia elementów betonowych i żelbetowych, konieczne jest prawidłowe odzwierciedlenie powstania i rozwoju stref lokalizacji (ich kształtu, liczby, rozstawu i położenia). Przy modelowaniu elementów żelbetowych istotne jest uwzględnienie kontaktu między stalą zbrojeniową i betonem.

W ramach mojej rozprawy doktorskiej dokonałem analizy istniejących modeli połączonych pod kątem ich zdolności do właściwego odzwierciedlenia przyrostu odkształceń plastycznych oraz postępującej degradacji sztywności pod obciążeniem cyklicznym oraz wzbogaciłem je o długość charakterystyczną mikrostruktury. W pracy zastosowano model połączony sprężysto-plastyczny z degradacją sprężystą wg Pamina i de Borsta (Pamin J., de Borst R., 1998. Simulation of crack spacing internal length parameter. Arch. App. Mech., 68(9), 613–625) oraz model połączony dwu-powierzchniowy z degradacją w formie warunku sprężysto-plastycznego wg Hansena i Wilama (Hansen E., 2000. A two-surface anisotropic damage/plasticity model for plain concrete. PhD Thesis, University of Colorado at Boulder, Boulder). Oba prawa zostały wzbogacone o długość charakterystyczną w celach regularyzacji problemu brzegowego. Podstawowym celem mojej pracy naukowej po uzyskaniu stopnia naukowego doktora był dalszy rozwój kontynualnych praw konstytutywnych dla betonu w obszarze obciążeń quasi-statycznych oraz dynamicznych. Przedstawiłem ulepszony model połączony sprężysto-plastyczny z degradacją sztywności i nielokalnym osłabieniem do opisu betonu obciążonego quasi-statycznie i cyklicznie. Jest to model sprzężony łączący izotropową degradację sztywności z prawem sprężysto-plastycznym zdefiniowanym w przestrzeni naprężeń efektywnych. Zaproponowałem także modyfikacje prawa sprężysto-plastycznego i sprężysto-lepko-plastycznego do opisu betonu w obszarze obciążeń dynamicznych. Wszystkie przedstawione i zaimplementowane przeze mnie modele betonu zostały zregularyzowane z wykorzystaniem podejścia nielokalnego typu całkowego. Wszystkie symulacje numeryczne zostały wykonane w programie ABAQUS. Z uwagi na charakter przeprowadzonych badań zaliczonych w skład osiągnięcia naukowego w okresie po uzyskaniu stopnia doktora, ich zakres podzielić można na 2 oddzielne zagadnienia:

A) ulepszony model połączony sprężysto-plastyczny z degradacją sztywności i nielokalnym

osłabieniem do modelowania elementów betonowych i żelbetowych pod obciążeniem quasi-statycznym monotonicznym i cyklicznym,

B) ulepszony model sprężysto-lepko-plastyczny z nielokalnym osłabieniem do modelowania elementów betonowych obciążonych dynamicznie.

***A) Ulepszony model połączony sprężysto-plastyczny z degradacją sztywności i nielokalnym osłabieniem do modelowania elementów betonowych i żelbetowych pod obciążeniem quasi-statycznym monotonicznym i cyklicznym***

Kontynualne prawa sprężysto-plastyczne z osłabieniem są w stanie prawidłowo odzwierciedlać powstanie i rozwój deformacji trwałych w betonie (odkształcenia plastyczne). Z kolei modele materiałowe kontynualnej mechaniki uszkodzeń wprowadzają do opisu materiału koncepcję naprężeń efektywnych oraz degradację sztywności wskutek rozwoju uszkodzeń. W przypadku betonu oba te zjawiska (odkształcenia plastyczne oraz degradacja sztywności) występują jednocześnie co jest podstawą stosowania modeli połączonych (uwzględnienie w jednym sformułowaniu cech charakterystycznych modeli sprężysto-plastycznych i modeli degradacji sprężystej). Na podstawie doświadczeń zgromadzonych na etapie tworzenia rozprawy doktorskiej oraz dalszej pracy badawczej nad modelami połączonymi zaproponowałem własny model połączony do opisu betonu pod obciążeniem quasi-statycznym monotonicznym i cyklicznym

W pierwszym artykule (poz.4.b.1) dokonałem porównania trzech różnych modeli połączonych, z których każdy reprezentował inne podejście do łączenia obu teorii. Pierwsza metoda, najczęściej spotykana, to zdefiniowanie warunku plastyczności w przestrzeni naprężeń efektywnych. W metodzie tej degradacja uzależniona jest od tensora odkształcenia i nie ma bezpośredniego wpływu na plastyczność. Pomimo prostoty modele zbudowane w ten sposób charakteryzują się dużą efektywnością. Druga metoda polega na definiowaniu degradacji w formie analogicznej do prawa sprężysto-plastycznego. Zazwyczaj mamy tutaj więc modele z dwoma powierzchniami plastyczności. W ścisaniu zwykle jest to klasyczna funkcja sprężysto-plastyczna, natomiast w rozciąganiu wprowadzona jest funkcja obciążenia z parametrem degradacji w formie prawa sprężysto-plastycznego. Ostatni sposób połączenia obu sformułowań polega na jawnym uzależnieniu degradacji od przyrostu tensora odkształceń plastycznych. Następnie, w tym samym artykule, przedstawiłem własną koncepcję modelu połączonych. Do opisu betonu w obszarze sprężysto-plastycznym zastosowałem powierzchnię

opisaną za pomocą kryterium Drucker-Pragera (ściskanie) oraz Rankine'a (rozciąganie). Przyjąłem, że plastyczność zdefiniowana jest w przestrzeni naprężeń efektywnych, a degradacja wprowadzona jest z wykorzystaniem teorii równoważności odkształceń. Założyłem degradację izotropową z miarą odkształceń zastępczych wg Mazarsa (1986). Rozwój degradacji w ściskaniu i rozciąganiu zdefiniowany został za pomocą dwóch różnych funkcji wykładniczych. Za aktywację degradacji (zarówno w ściskaniu jak i rozciąganiu) odpowiedzialny był jeden parametr kontrolujący. Dodatkowo do definicji degradacji wprowadziłem funkcje skalujące oraz funkcję wagową rozdziału naprężeń wg Lee i Fenvesa (1998). W konsekwencji przedstawione prawo materiałowe pozwala również na symulowanie efektów "odzyskiwania" sztywności (*ang. stiffness recovery*) podczas obciążeń znakozmiennych (rozciąganie/ściskanie). W celu regularyzacji zastosowałem teorię nielokalną w ujęciu całkowym: miara odkształceń efektywnych została zastąpiona jej nielokalnym odpowiednikiem. Do opisu wpływu punktów sąsiednich zastosowałem funkcję wagową Gaussa. Model został zweryfikowany w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych elementów betonowych: próbki ściskane oraz belki zginane. Wykorzystano badania jednoosiowego cyklicznego ściskania oraz trzy i cztero-punktowego cyklicznego zginania. Wyniki symulacji numerycznych charakteryzowały się dobrą zgodnością z danymi doświadczalnymi (poz.4.b.1 i 4.b.2). Poprawnie odwzorowana została siła krytyczna, kształt krzywej w obszarze osłabienia oraz rozwój degradacji i przyrost odkształceń plastycznych. Udało się także odwzorować w sposób realistyczny efekt skali w zginaniu dla belek betonowych (z nacięciem) o różnej wielkości.

Kolejna praca (poz.4.b.3) przedstawiała wyniki symulacji numerycznych dla zginanych krótkich belek żelbetowych bez zbrojenia poprzecznego. Jako dane doświadczalne wykorzystano prace Walravena i Lehwaltera (1994), w których zbadano cztery geometrycznie podobne elementy o różnych wymiarach. Do opisu betonu zastosowano cztery różne prawa materiałowe wzbogacone o długość charakterystyczną mikrostruktury. Poza modelem połączonym zastosowano także klasyczne prawo sprężysto-plastyczne, izotropowe prawo mechaniki uszkodzeń oraz anizotropowy model rys rozmytych. Stal zbrojeniowa modelowana była jako materiał sprężysto-idealnie plastyczny. Poślizg między betonem a stalą zbrojeniową został opisany prawem zaproponowanym przez Dörra. Wszystkie zastosowane prawa konstytutywne wykazały się porównywalną, zadawalającą zgodnością w odniesieniu do obliczonych sił niszczących dla belek o różnych wysokościach. Wszystkie modele poprawnie odwzorowały również efekt skali zaobserwowany w doświadczeniach. Rozbieżności

między poszczególnymi prawami dotyczyły przede wszystkim obrazu zarysowania. Najlepsze wyniki uzyskano dla prawa sprężysto-plastycznego oraz modelu połączonego. W przypadku anizotropowego modelu rys rozmytych zgodność była średnia. Najgorsze wyniki otrzymano dla izotropowego prawa mechaniki uszkodzeń. Dodatkowo rozstawy stref lokalizacji uzyskane w symulacjach numerycznych (prawo sprężysto-plastyczne i model połączone) korespondowały ze średnimi rozstawami rys z badań i były jednocześnie znacznie mniejsze niż wartości obliczone na podstawie dostępnych wzorów analitycznych.

Następny etap (poz.4.b.6) dotyczył numerycznych symulacji 3D dla pełnowymiarowych prefabrykowanych płyt stropowych. Punktem wyjścia były badania doświadczalne elementów prefabrykowanego systemu budownictwa mieszkaniowego "Sewaco" przeprowadzone w Katedrze Budownictwa i Inżynierii Materiałowej pod kierownictwem prof. J. Tejchmana. Do opisu betonu wykorzystano nielokalny model połączonego oraz nielokalne prawo sprężysto-plastyczne. Stal zbrojeniowa modelowana była jako materiał sprężysto-idealnie plastyczny. Poślizg między betonem a stalą zbrojeniową został opisany prawem zaproponowanym przez Dörra. Wypełnienie styropianowe wymodelowano przy zastosowaniu prawa liniowo sprężystego. W obliczeniach analizowano wpływ energii pęknięcia oraz sztywności kontaktu pomiędzy stalą a betonem. Celem symulacji była szczegółowa analiza mechanizmu zniszczenia. Zbadano wpływ parametrów obu modeli na położenie i nachylenie krytycznej rysy ukośnej. Wyniki symulacji MES porównano także z wzorami analitycznymi. Osiągnięto dobrą zgodność między wynikami doświadczalnymi i numerycznym w odniesieniu do mechanizmu zniszczenia, obliczonej nośności a także położenia i kształtu krytycznej rysy ukośnej. Różnice pomiędzy obu modelami MES dotyczyły przede wszystkim kształtu i nachylenia krytycznej strefy ścinania oraz ogólnej ilości stref lokalizacji.

Kontynuacją prac przedstawionych w poz.4.b.6 były symulacje 3D pełnowymiarowych prefabrykowanych paneli ściennych (poz.4.b.7). Jako bazę doświadczalną ponownie wykorzystano wyniki badań elementów prefabrykowanego systemu budownictwa mieszkaniowego "Sewaco" wykonane w Katedrze Budownictwa i Inżynierii Materiałowej pod kierownictwem prof. J. Tejchmana. W symulacjach MES wykorzystano te same modele konstytutywne co w przypadku płyt stropowych. Parametry materiałowe przyjęto również w oparciu o wyniki wcześniejszych symulacji. Do analizy MES przyjęto najbardziej złożony typ prefabrykatu. Panel ścienny z otworem okiennym oraz drzwiowym. Model MES uwzględniał zarówno zbrojenie podłużne jak i strzemiona. Dodatkowo w symulacjach, do analizy nośności



różnych typów paneli ściennych zastosowano uproszczone modele obliczeniowe: model ramy portalowej oraz model tarczy prętowej. Obliczone maksymalne nośności charakteryzowały się dobrą zgodnością z danymi eksperymentalnymi. Dodatkowo zaawansowane modele MES (nielokalny model połączony oraz prawo sprężysto-plastyczne z nielokalnym osłabieniem) w sposób zadawalający odzwierciedliły obraz zarysowania. Uzyskane numerycznie obrazy stref lokalizacji pokrywały się w dużej mierze z rzeczywistym obrazem zarysowania. Z uwagi na złożoną geometrię i brak możliwości zastosowania uproszczeń (np. wykorzystanie symetrii) podstawowy problem symulacji numerycznych dotyczył liczby zastosowanych elementów skończonych i czasu symulacji. Jest to szczególnie istotne w przypadku modeli z nielokalnym osłabieniem. Algorytm całkowity w podejściu nielokalnym wymaga w ogólności zebrania informacji ze wszystkich elementów w każdym kroku obliczeniowym. W konsekwencji przy zastosowaniu tzw. pełnego całkowania czas obliczeniowy jednej symulacji wynosił około 3-4 tygodni. Zastosowanie tzw. zredukowanego całkowania (uwzględnienie punktów sąsiednich w odległości trzech długości charakterystycznych) pozwoliło skrócić czas obliczeniowy jednej symulacji do około 9 dni bez znaczącego wpływu na uzyskane wyniki. Dodatkowo w symulacjach sprawdziłem także inny rodzaj regularyzacji - poprzez skalowanie energii pęknięcia (*ang. crack band approach*). Zastosowanie tej metody pozwoliło na jeszcze większą redukcję czasu obliczeń. Uzyskano również dobrą zgodność w odniesieniu do obliczonej nośności. Natomiast układ stref lokalizacji był zdecydowanie gorszy w porównaniu z podejściem nielokalnym. Krytyczne strefy lokalizacji nie zostały poprawnie odwzorowane. Uzyskane wyniki potwierdziły wnioski innych badaczy, że wspomniana metoda regularyzacji (*ang. crack band approach*) nie pozwala na uzyskanie wyników w pełni niezależnych od zastosowanej siatki elementów skończonych dla elementów żelbetowych w przeciwieństwie do podejścia nielokalnego.

Podsumowanie prac nad modelem połączonym stanowią dwie ostatnie publikacje (poz. 4.b.8 i poz. 4.b.9). Jako dane referencyjne wykorzystano wyniki badań doświadczalnych belek żelbetowych wykonanych w Katedrze Budownictwa i Inżynierii Materiałowej pod kierownictwem prof. J. Tejchmana. Cechą charakterystyczną badanych elementów było wykorzystanie belek żelbetowych o niezależnie skalowanej rozpiętości i wysokości. W konsekwencji badano belki o różnych wysokościach ścinania charakteryzujące się zupełnie odmiennymi mechanizmami zniszczenia. Mechanizm zniszczenia dla belek niskich to tzw. mechanizm zgięciowy (*ang. flexural failure*) charakteryzował się uplastycznieniem i płynięciem stali. Z kolei w przypadku belek wyższych wystąpiło zniszczenie kruche (*ang.*

*brittle shear*), charakteryzujące się powstaniem krytycznej rysy ukośnej prowadzącej do zniszczenia belki. Dodatkowo dla zniszczenia kruchego wyróżniono dwa odmienne typy: rysa ukośna z przeważającym przemieszczeniem normalnym do kierunku rysy (*ang. shear-tension failure mode*) oraz rysa ukośna z jednoczesnym przemieszczeniem stycznym i normalnym do kierunku rysy (*ang. shear-compression failure mode*). Pierwszy typ zniszczenia charakterystyczny jest dla belek o średniej wysokości strefy ścinania, z kolei drugi występuje dla belek najwyższych. Wyniki wstępnych symulacji z zastosowaniem nielokalnego modelu połączonego sprężysto-plastycznego z degradacją sztywności nie były do końca satysfakcjonujące. Uzyskane numerycznie strefy lokalizacji nie odzwierciedlały właściwie mechanizmów zniszczenia występujących w belkach średnio wysokich i bardzo wysokich. W celu poprawienia efektywności modelu wprowadziłem do niego modyfikacje w postaci uniezależnienia rozwoju degradacji w ściskaniu i rozciąganiu. Zamiast jednego parametru kontrolującego, zastosowałem dwie zmienne, które kontrolowały niezależnie degradację w ściskaniu i rozciąganiu. Obie zmienne obliczane są na podstawie parametru kontrolującego ( $\kappa$ ) przy wykorzystaniu funkcji wagowej rozdziału naprężeń. Modyfikacja nie spowodowała zatem zwiększenia liczby niezależnych parametrów materiałowych koniecznych do kalibracji. Dodatkowo w symulacjach MES zastosowano również bardziej zaawansowane prawo kontaktu pomiędzy stalą a betonem. Przyjęto zależność wprowadzoną przez CEB-FIP charakteryzującą się występowaniem wzmocnienia, płynięcia oraz osłabienia w relacji naprężenie przyczepności - poślizg. Wyniki MES z wykorzystaniem ulepszanego modelu połączonego pokazały bardzo dobrą zgodność z danymi doświadczalnymi. Poprawnie odzwierciedlone zostały wszystkie mechanizmy zniszczenia występujące w belkach. Dodatkowo model właściwie odwzorował efekt skali. W symulacjach przeanalizowałem także wpływ energii pęknięcia w rozciąganiu i ściskaniu a także różne sztywności kontaktu między stalą a betonem.

Stworzony i zaimplementowany przeze mnie model połączony został także z powodzeniem wykorzystany w obliczeniach belek betonowych ze zbrojeniem bazaltowym. Program badawczy obejmował eksperymentalną i numeryczną analizę efektu skali w belkach cztero-punktowo zginanych. Symulacje numeryczne wykonane były przez moje koleżanki z katedry: mgr inż. M. Ostaszewską oraz dr inż. E. Korol. Pomimo zastosowania uproszczonej kalibracji uzyskano zadawalającą zgodność w odniesieniu do wykresów siła-przemieszczenie oraz obrazów zarysowania.

Uzyskane wyniki zostały opublikowane w następujących czasopismach z listy JCR: *Archives of Mechanics* (poz.4.b.1), *Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences* (poz.4.b.2), *Computers and Concrete* (poz.4.b.3 i 4.b.6), *European Journal of Environmental and Civil Engineering* (poz.4.b.7), *Finite Elements in Analysis and Design* (poz.4.b.9) a także *Engineering Structures* (Korol E., Tejchman J., Mróz Z., 2017. Experimental and numerical assessment of size effect in geometrically similar slender concrete beams with basalt reinforcement. *Eng. Struct.*, 141, 272-291). Otrzymane rezultaty i wnioski zostały również zaprezentowane na konferencjach międzynarodowych: EURO-C 2010 (Załącznik 5, poz. II.L.11), CMM 2011 (Załącznik 5, poz. II.L.12), ECCOMAS 2012 (Załącznik 5, poz. III.B.3), EURO-C 2018 (Załącznik 5, poz. II.L.19).

### **B) Ulepszony model sprężysto-lepko-plastyczny z nielokalnym osłabieniem do modelowania elementów betonowych obciążonych dynamicznie**

Jak wspomniano we wstępie proces powstania i rozwoju rys jest jedną z najbardziej fundamentalnych cech betonu pod obciążeniem mechanicznym. Jednym z czynników w znacznym stopniu wpływającym na proces zarysowania jest prędkość przykładania obciążenia. W konsekwencji, beton jest materiałem, którego właściwości mechaniczne, a konkretnie wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie silnie zależą od prędkości odkształceń. Definiuje się tzw. dynamiczne współczynniki zwiększenia wytrzymałości w ściskaniu (*ang. CDIF - compressive dynamic increase factor*) oraz rozciąganiu (*ang. TDIF - tensile dynamic increase factor*). Według różnych badań dla bardzo dużych prędkości odkształceń ( $\dot{\epsilon} \geq 100$  1/s) wzrost wytrzymałości na ściskanie może być ponad 2.5-krotny, a wzrost wytrzymałości na rozciąganie nawet 10-cio krotny. W obu przypadkach obserwuje się silny wykładniczy przyrost nośności powyżej pewnej granicznej wartości prędkości odkształceń. Opisane efekty dynamiczne spowodowane są różnymi czynnikami wpływającymi na nośność na różnych poziomach prędkości. Przy małych prędkościach konieczne jest uwzględnienie efektów lepkich związanych z migracją wody w porach materiału. Przy średnich i dużych prędkościach obciążenia o wzroście nośności decyduje szybkość tworzenia się rys. Przy największych prędkościach konieczne jest dodatkowo uwzględnienie efektów strukturalnych w postaci sił bezwładności. Klasyczne kontynualne prawa sprężysto-plastyczne nie pozwalają prawidłowo odzwierciedlić efektów dynamicznych. Konieczna jest ich modyfikacja. W pracy (poz.4.b.2) zaproponowałem prosty model do opisu betonu w obszarze dynamicznym. Jako punkt wyjścia zastosowałem powierzchnię opisaną za pomocą kryterium Drucker-Pragera (ściskanie) oraz Rankine'a (rozciąganie). Do sformułowania wprowadziłem dodatkowy

parametr lepkości wykorzystując koncepcję Duvaut-Lions'a. Koncepcja ta zakłada podział tensora przyrostu odkształceń na część sprężystą oraz lepko-plastyczną. Dodatkową zaletą jest stosunkowo prosta implementacja, która sprowadza się do modyfikacji przyrostów naprężeń oraz mnożnika plastycznego. W pierwszym etapie otrzymujemy klasyczne rozwiązanie przyrostowe jak dla sformułowania sprężysto-plastycznego. Następnie, obliczamy uaktualnione przyrosty naprężeń oraz przyrosty parametru wzmocnienia uwzględniające krok czasowy oraz parametr lepkości. Aby uzyskać wyniki niezależne od przyjętej siatki ES w obszarze małych prędkości wprowadziłem do modelu długość charakterystyczną wykorzystując ponownie regularyzację nielokalną. Efektywność modelu sprawdziłem na próbkach betonowych poddanych jednoosiowemu ściskaniu i rozciąganiu. Symulacje dynamiczne MES wykonane były w szerokim zakresie prędkości obciążeń ( $10^{-5} 1/s \leq \dot{\epsilon} \leq 10^2 1/s$ ). Wyniki porównano z danymi doświadczalnymi oraz z normowymi krzywymi opisującymi współczynniki CDIF oraz TDIF. Uzyskane wyniki pokazały, że sformułowanie sprężysto-lepko-plastyczne jest w stanie odzwierciedlać efekty dynamiczne jedynie dla stosunkowo dużych prędkości ( $\dot{\epsilon} \geq 10^{-1} 1/s$ ). W obszarze małych i średnich prędkości efekty wzmocnienia były niewystarczające. W celu rozwiązania tego problemu, w dalszych pracach (poz.4.b.4 i 4.b.5) zaproponowałem również inny sposób modyfikacji klasycznego sformułowania sprężysto-plastycznego z nielokalnym osłabieniem. Bazując na tzw. teorii aktywacji energii przedstawionej przez Bażanta wprowadziłem funkcję modyfikującą naprężenie, uzależnioną od tensora prędkości odkształceń. Wprowadzona modyfikacja wpłynęła na poprawę efektywności, szczególnie w obszarze małych i średnich prędkości. Obliczone numerycznie współczynniki CDIF oraz TDIF dla jednoosiowego ściskania i rozciągania wykazały dobrą zgodność z danymi doświadczalnymi. Natomiast wyniki symulacji 3D dla betonowych belek zginanych wykazały dla największych prędkości obciążeń znaczne przeszacowanie nośności w porównaniu z eksperymentem. Efekt ten związany był z tzw. zjawiskiem fragmentacji, którego model kontynualny nie był w stanie właściwie odwzorować. Aby uwzględnić efekty fragmentacji zaproponowałem dodatkowo metodę "usuwania" elementów skończonych, dla których przekroczone zostały graniczne wartości energii pęknięcia. Zastosowana metoda wpłynęła na poprawę zgodności obliczonych nośności w porównaniu z danymi doświadczalnymi.

Wyniki analiz numerycznych elementów betonowych pod obciążeniem dynamicznym zostały opublikowane w czasopismach z listy JCR: *Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences* (poz.4.b.2) i *Computers and Concrete* (poz.4.b.5) Otrzymane rezultaty i

wnioski zostały również zaprezentowane na kilku konferencjach międzynarodowych: ECCOMAS 2012 (Załącznik 5, poz. II.L.14), FraMCoS-8 2013 (Załącznik 5, poz. II.L.16) i EURO-C 2014 (Załącznik 5, poz. II.L.18).

### ***Podsumowanie***

Zaprezentowane wyniki licznych symulacji numerycznych MES potwierdziły zdolność zaimplementowanych przeze mnie praw konstytutywnych do prawidłowego odzwierciedlenia zachowania się rzeczywistych elementów żelbetonowych oraz betonowych w złożonych stanach naprężeń. Zaproponowane prawa konstytutywne wzbogacone o długość charakterystyczną pozwoliły uzyskać obiektywne wyniki numeryczne, tj. niezależne od siatki elementów skończonych.

Najważniejsze osiągnięcia będące rezultatem prowadzonych badań są następujące:

- 1) sformułowanie oraz implementacja do programu ABAQUS ulepszonego modelu sprzężonego dla betonu łączącego izotropową degradację sztywności z prawem sprężysto-plastycznym i nielokalnym osłabieniem do opisu zachowania się elementów betonowych i żelbetonowych w zakresie obciążeń quasi-statycznych (monotonicznych i cyklicznych) z uwzględnieniem lokalizacji odkształceń,
- 2) sformułowanie/modyfikacja oraz implementacja do programu ABAQUS ciągłych praw konstytutywnych z nielokalnym osłabieniem do opisu betonu w zakresie obciążeń dynamicznych (z uwzględnieniem lokalizacji odkształceń oraz fragmentacji),
- 3) zastosowanie wyżej wymienionych modeli materiałowych do wykonania dużej serii symulacji numerycznych MES dla elementów żelbetonowych i betonowych dla szerokiego spektrum warunków brzegowych i początkowych oraz uzyskanie rezultatów numerycznych zgodnych z wynikami doświadczalnymi.

Przedstawione modele materiałowe dla betonu mogą być z powodzeniem zastosowane do:

- 1) obliczeń numerycznych MES dla różnego rodzaju elementów żelbetonowych, dla których istotne jest właściwe odzwierciedlenie rzeczywistego mechanizmu zniszczenia w złożonych stanach naprężenia,
- 2) obliczeń numerycznych MES dla różnych elementów betonowych poddanych

działaniu obciążeń cyklicznych oraz dynamicznych,

3) symulowania powstania i ewolucji lokalizacji odkształceń w elementach żelbetowych i betonowych oraz analizy wpływu poszczególnych parametrów geometrycznych i materiałowych na zachowanie się tych elementów.

Zastosowane modyfikacje działania programu ABAQUS związane w szczególności z implementacją teorii nielokalnej wykraczają daleko poza standardowo stosowane rozszerzenia, takie jak definiowanie własnych elementów skończonych lub praw materiałowych.

## **5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych**

### Przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora

Kontakt z działalnością naukową zawdzięczam prof. dr hab. inż. Jackowi Tejchmanowi z Politechniki Gdańskiej, który był promotorem mojej pracy magisterskiej. Po ukończeniu studiów (październik 2003) zostałem uczestnikiem Studium Doktoranckiego przy Wydziale Inżynierii Lądowej i Środowiska. Moim promotorem został ponownie prof. J. Tejchman, z którym rozpocząłem trwającą do dziś współpracę naukową oraz zawodową (od 2004 roku jako asystent a potem adiunkt w katedrze kierowanej przez prof. J. Tejchmana).

Od samego początku moje badania koncentrowały się wokół modelowania zachowania elementów betonowych i żelbetowych z wykorzystaniem praw konstytutywnych w ramach mechaniki ośrodka ciągłego. Prawa te wymagają z reguły zdefiniowania osłabienia a w związku z tym konieczne jest stosowanie metody regularyzacji dla otrzymania wyników niezależnych od zastosowanej siatki elementów skończonych. Podstawową techniką regularyzacji było w moim przypadku podejście nielokalne typu całkowego. Stosowanie tej metody zapoczątkował w naszej katedrze dr hab. J. Bobiński. Współpraca z dr J. Bobińskim przybliżyła mi problematykę implementacji modeli nielokalnych, a także przyspieszyła pracę nad tworzeniem moich własnych procedur nielokalnych w środowisku programu ABAQUS. Program ten wykorzystywałem od samego początku jako bazę dla wszystkich swoich algorytmów obliczeniowych a także jako preprocesor, postprocesor oraz globalny solver w symulacjach MES.

Tytuł mojej rozprawy doktorskiej brzmiał: „Zastosowanie modelu sprężysto-plastycznego betonu z degradacją sztywności i nielokalnym osłabieniem do modelowania elementów betonowych cyklicznie obciążonych”. Pracę obroniłem w dniu 09.03.2009. Podstawowym celem pracy było zastosowanie różnego typu modeli sprzężonych sprężysto-plastycznych z degradacją sztywności wzbogaconych o długość charakterystyczną mikro-struktury do numerycznego modelowania elementów betonowych obciążonych cyklicznie.

Cele szczegółowe pracy można zdefiniować jako:

- weryfikacja poprawności i efektywności nielokalnego modelu sprężysto-plastycznego oraz nielokalnego prawa mechaniki uszkodzeń w obszarze numerycznego modelowania elementów żelbetowych,
- implementacja do komercyjnego programu ABAQUS/Standard różnych koncepcji sprzężonych praw konstytutywnych dostępnych w literaturze wraz z ich wzbogaceniem o regularyzację metodą nielokalną typu całkowego,
- analiza parametryczna zaimplementowanych modeli i określenie wpływu poszczególnych parametrów na otrzymywane wyniki, szczególnie w odniesieniu do kształtu krzywej w obszarze osłabienia oraz kształtu i rozmiarów stref lokalizacji.

W pracy dokonałem przeglądu istniejących kontynualnych modeli do opisu betonu. Opisałem problem regularyzacji oraz teorię nielokalną i jej podstawy termodynamiczne. Przedstawiłem szczegółowe algorytmy nielokalnych modeli: sprężysto-plastycznego, izotropowej degradacji sztywności (mechaniki uszkodzeń), połączonego oraz degradacji w formie prawa sprężysto-plastycznego. Modele zostały następnie zweryfikowane w oparciu o dostępne w literaturze testy dla obciążeń statycznych: jednoosiowe rozciąganie (próbki typu *dog-bone*), jednoosiowe ściskanie, trzy-punktowe zginanie (belki z nacięciem) oraz cztero-punktowe zginanie (belki z nacięciem). Z kolei, modele połączone zweryfikowano na podstawie: trzy-punktowego cyklicznego zginania (belki z nacięciem) oraz cztero-punktowego cyklicznego zginania (belki z nacięciem). Ostatni aspekt tych prac stanowiły symulacje numeryczne elementów żelbetowych. Obliczenia wykonano nielokalnym modelem sprężysto-plastycznym oraz nielokalnym modelem izotropowej degradacji sztywności. Wykorzystano badania trzech typów belek żelbetowych o skalowanej wysokości i rozpiętości i różnym stopniu zbrojenia (Walraven (1978)). Wykonano szereg symulacji, w których analizowano wpływ wielu czynników. Badano wpływ energii pęknięcia, długości charakterystycznej, wytrzymałości na rozciąganie, stopnia zbrojenia a także prawa kontaktu między stalą i betonem. Analizowano

nośność elementów oraz kształt, rozstaw i szerokość stref lokalizacji.

Wyniki prac obejmujące ww. zagadnienia zostały opublikowane w czasopismach z listy JCR: *Mechanics Research Communications* (Załącznik 5, poz. II.A.1) i *Computers and Concrete* (Załącznik 5, poz. II.A.2). Otrzymane rezultaty i wnioski zostały również zaprezentowane na konferencjach międzynarodowych: WCCM 2006 (Załącznik 5, poz. III.B.1), CMM 2005 (Załącznik 5, poz. II.L.1), CFRAC 2007 (Załącznik 5, poz. II.L.3), CMM 2007 (Załącznik 5, poz. II.L.4), ECCOMAS 2008 (Załącznik 5, poz. II.L.7) oraz krajowych: SolMech 2006 (Załącznik 5, poz. II.L.2), AMCM 2008 (Załącznik 5, poz. II.L.6) i SolMech 2008 (Załącznik 5, poz. III.B.2).

#### Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora

Poza osiągnięciami opisanymi w punkcie 4.c, moja aktywność naukowo badawcza po uzyskaniu stopnia doktora koncentrowała się na dwóch obszarach:

A) badania zmęczeniowe elementów betonowych i zbrojonych ze zbrojeniem stalowym oraz bazaltowym

B) numeryczna analiza efektu skali w belkach betonowych

#### ***A. Badania zmęczeniowe elementów betonowych i zbrojonych ze zbrojeniem stalowym oraz bazaltowym***

W ramach grantu POIG "Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju" (Załącznik 5, poz. II.J.) zaplanowałem i przeprowadziłem program badawczy obejmujący badania trwałości zmęczeniowej elementów betonowych ze zbrojeniem niestalowym. Podstawowym celem badań było określenie przydatności zastosowania zbrojenia elementów betonowych w postaci prętów bazaltowych w kontekście trwałości zmęczeniowej takich elementów. Program badawczy obejmował badania zmęczeniowe belek betonowych oraz belek zbrojonych poddanych trzypunktowemu cyklicznemu zginaniu. Łącznie przebadłem ponad 110 belek. W pierwszym etapie badania zmęczeniowe przeprowadziłem dla belek betonowych z nacięciem. Wykonałem dwie serie badań dla belek wykonanych z betonów o różnym uziarnieniu. Zastosowano dwa typy mieszanki betonowej. Beton na kruszywie otoczkowym o drobnej frakcji ( $d_{\max}=2$  mm,  $d_{50}=0,5$  mm) oraz beton na kruszywie otoczkowym o standardowej frakcji ( $d_{\max}=16$  mm,  $d_{50}=2$  mm). Każda seria liczyła po 15 belek. Badania wykonywano z częstotliwością 2 Hz, stopień wyężenia wynosił od  $S=0,65$  do



$S=0,95$ , a trwałość zmęczeniowa oscylowała w przedziale od  $N=12$  do  $N=2000000$  cykli. Podczas badań rejestrowana była liczba cykli jak również przyrost przemieszczeń towarzyszący kolejnym cyklom obciążenia. W celu śledzenia rozwoju strefy lokalizacji zastosowałem technikę cyfrowej korelacji obrazów (*ang. DIC - digital image correlation*). Dzięki temu uzyskałem obrazy stref koncentracji odkształceń poprzedzającej powstanie makro-rysy. Zebrane na tym etapie badań informacje stanowiły punkt wyjścia do właściwych badań elementów zbrojonych. Dodatkowo stanowiły one bazę do kalibracji modelu numerycznego betonu. W drugim etapie wykonałem badania dla belek zbrojonych. Program badań obejmował łącznie cztery serie (80 belek). Badano belki ze zbrojeniem z prętów stalowym oraz ze zbrojeniem z prętów bazaltowych. Podobnie jak w pierwszym etapie zastosowano dwa różne typy mieszanki betonowej. W obu przypadkach zastosowany duży stopień zbrojenia gwarantował zniszczenie elementów przez beton. Belki obciążano z częstotliwością 2 Hz, stopień wyężenia wynosił ponownie od  $S=0,65$  do  $S=0,95$ , a trwałość zmęczeniowa oscylowała w przedziale od  $N=20$  do  $N=4000000$  cykli. W badaniach rejestrowano ilości cykli oraz przyrosty przemieszczeń. Na podstawie wyników badań otrzymano zależności  $S-N$  (tzw. krzywe zmęczeniowe) dla wszystkich typów badanych belek. Analiza krzywych pozwoliła sformułować wnioski dotyczące zasadności stosowania zbrojenia z prętów bazaltowych. Elementy ze zbrojeniem bazaltowym wykazały niewiele gorszą trwałością w porównaniu z elementami ze standardowym zbrojeniem. Co ciekawe elementy ze zbrojeniem bazaltowym charakteryzowały się w tym względzie lepszą efektywnością w porównaniu ze zbrojeniem na bazie włókien szklanych, aramidowych czy węglowych. Podstawowy problem w zamiennym stosowaniu prętów bazaltowych sprowadza się do innej charakterystyki pracy takiego elementu. Z uwagi na niskie moduły sprężystości, elementy betonowe zbrojone prętami bazaltowymi wykazują zdecydowanie większe deformacje (ugięcia i szerokości rozwarcia rys).

Równoległe do badań eksperymentalnych prowadziłem prace nad stworzeniem modelu numerycznego do opisu betonu pod działaniem obciążeń wielokrotnie zmiennych. Jako punkt wyjścia przyjąłem standardowy model mechaniki uszkodzeń zaproponowany przez Mai i innych (Mai S.H., Le-Corre F., Foret G., Nedjar B., 2012. A continuum damage modeling of quasi-static fatigue strength of plain concrete. *International Journal of Fatigue* 37, 79-85), który zakłada że powierzchnia zniszczenia opisana jest funkcją zależną od parametru degradacji. W przypadku obciążeń zmęczeniowych obserwujemy przyrost degradacji pomimo obciążenia elementu poniżej jego nośności granicznej. Aby rozwiązać ten problem konieczne

jest wprowadzenie modyfikacji do klasycznego sformułowania oraz zastosowanie innego kryterium aktywacji degradacji. W modelu przyjąłem rozszerzenie zaproponowane pierwotnie przez Marigo, (Marigo J.J. 1985. Modelling of brittle and fatigue damage for elastic material by growth of microvoids. Eng. Fract. Mech. 21(4), 861-74) polegające na uzależnieniu wzrostu degradacji od dodatkowej funkcji potęgowej. Dodatkowo w modelu wprowadziłem długość charakterystyczną stosując podejście nielocalne. Model został wstępnie pozytywnie zweryfikowany w oparciu o wyniki badań belek betonowych.

Ostatni aspekt badań zmęczeniowych dotyczył wykorzystania mikro-tomografii komputerowej do analizy procesu zarysowania w elementach betonowych pod obciążeniem zmęczeniowym. Zaproponowałem koncepcję polegającą na ocenie rozwoju uszkodzeń narastających w elemencie betonowym w trakcie testu zmęczeniowego z wykorzystaniem mikro-tomografii. W badaniach wykorzystano próbki betonowe jednoosiowo cyklicznie ściskane. Metodologia badań polegała na skanowaniu struktury próbki na różnych etapach testu (po 10 000, 30 000, 60 000 i 70 000 cykli). Dzięki zastosowaniu wysokiej rozdzielczości skanowania uzyskano dokładny obraz mikrostruktury próbki. Zastosowana technika pozwoliła nie tylko na jakościową ale także na ilościową ocenę rozwoju uszkodzeń w poszczególnych fazach testu. Na podstawie ilościowej analizy ilości porów otwartych i zamkniętych oszacowano procentowy przyrost objętości rys w próbce betonowej. Uzyskane wyniki wskazują na silny nieliniowy przyrost uszkodzeń w końcowej fazie testu poprzedzającej osiągnięcie wytrzymałości zmęczeniowej. Rezultaty i wnioski z badań zmęczeniowych zostały wykorzystane w raporcie podsumowującym grant. Częstkowe wyniki badań prezentowane były na konferencjach organizowanych w ramach grantu (Zał.5, poz.II.L.13, II.L.15 i II.L.17) oraz na 2 konferencjach międzynarodowych: FraMCoS-8 2013 (Zał.5, poz.II.L.16) i EURO-C 2014 (Zał.5, poz.II.L.18). Część wyników badań została także opublikowana w czasopiśmie z listy JCR: *International Journal of Fatigue* (Zał.5, poz. II.A.3).

### **B. Numeryczna analiza efektu skali w belkach betonowych**

Jak pokazały moje wcześniejsze doświadczenia, wprowadzenie długości charakterystycznej i właściwe zregulowanie prawa konstytutywnego pozwala na poprawne odzwierciedlenie efektów skali w elementach betonowych i żelbetowych. Okazuje się jednak, że istnieje szereg czynników wpływających na dokładność tego odwzorowania. Celem moich prac w tym aspekcie była analiza wpływu energii pęknięcia (a także rodzaju zastosowanej krzywej w

obszarze osłabienia), z uwzględnieniem efektu tzw. warstwy brzegowej (obszar przy zewnętrznych krawędziach elementów o zmienionych parametrach materiałowych). Analizowałem również wpływ zastosowanej metody nielokalnego uśredniania w sformułowaniu sprężysto-plastycznym. Symulacje numeryczne przeprowadziłem dla serii geometrycznie podobnych belek betonowych bez nacięć oraz z nacięciami poddanych trzypunktowemu zginaniu. Jako dane referencyjne wykorzystałem wyniki badań eksperymentalnych przedstawione przez Hoovera i innych (Hoover C.G., Bažant Z.P., Vorel J., Wendner R., Hubler M.H., 2013. *Comprehensive concrete fracture tests: Description and results*. Eng. Fract. Mech. 114, 92-103). Zbadali oni belki o różnej wielkości (cztery rodzaje) oraz o różnej wielkości nacięcia (pięć wielkości). Łącznie symulacje numeryczne wykonałem dla 18 typów belek. Obliczenia numeryczne efektu skali wykonano dla dwóch typów opisu rys: modelu rysy rozmytej oraz rysy dyskretnej. W pierwszym etapie zastosowałem rozszerzoną metodę elementów skończonych (XFEM). W metodzie tej rysy opisano z wykorzystaniem elementów kohezyjnych z biliniową funkcją osłabienia. Alternatywnie stosowałem także funkcję wykładniczą oraz modyfikację funkcji biliniowej z zastosowaniem krzywej Béziera. Równolegle obliczenia wykonałem modelem sprężysto-plastycznym z kryterium Rankine'a ze stowarzyszonym prawem płynięcia, biliniowym osłabieniem oraz standardowym i zmodyfikowanym uśrednianiem nielokalnym. Wyniki symulacji pokazały, że zastosowanie modelu sprężysto-plastycznego prowadziło generalnie do przeszacowania nośności. Zastosowanie zmodyfikowanej operacji uśredniania tylko w niewielkim stopniu poprawiło otrzymane wyniki. Potrzebne są zatem dalsze badania w celu poprawy zgodności. Z drugiej strony wyniki uzyskane podejściem XFEM charakteryzowały się bardzo dobrą zgodnością z doświadczeniami. Dodatkowo warstwa brzegowa miała duży wpływ na redukcję błędów w obliczonych naprężeniach. Wyniki dotychczasowych prac w tym obszarze zostały opublikowane w czasopiśmie z listy JCR: *Polish Maritime Research* (Załącznik 5, poz. II.A.4) oraz w wydawnictwie recenzowanym *MATEC Web of Conferences* (Załącznik 5, poz. II.E.5). Wyniki zostały również zaprezentowane na 64 Konferencji Naukowej Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB (Załącznik 5, poz. III.B.4).

W sumie jestem współautorem 11 artykułów w czasopismach JCR: *Archives of Mechanics* (1), *Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences* (1), *Computers and Concrete* (4), *European Journal of Environmental and Civil Engineering* (1), *Mechanics Research Communications* (1), *Finite Elements in Analysis and Design* (1), *International Journal of Fatigue* (1) i *Polish Maritime Research* (1).

Sumaryczny impact factor według listy Journal Citation Reports (JCR) zgodnie z rokiem opublikowania dla wszystkich przedstawionych publikacji (punkty 4 i 5) wynosi 13,523, a sumaryczna ilość punktów (wg listy MNiSW z 26.01.2017) 330.

Doświadczenia wynikające z pracy badawczej nad zaawansowanym modelowaniem MES wykorzystuje dodatkowo w praktyce inżynierskiej. Równolegle z aktywnością naukową prowadzę działalność ekspercką i projektową w zakresie konstrukcyjno budowlanym. Jestem autorem lub współautorem szeregu opracowań projektowych (Załącz.5, poz. II.B) a także ekspertyz i opinii technicznych (Załącz.5, poz. III.M).

## **6. Działalność dydaktyczna**

Od początku mojego zatrudnienia w Politechnice Gdańskiej (listopad 2004) prowadzę zajęcia dydaktyczne na studiach stacjonarnych kierunku budownictwo (w przeszłości także na kierunku inżynieria środowiska). W chwili obecnej prowadzę zajęcia na następujących przedmiotach (Załącz.5, poz. III.J):

1. Budownictwo Przemysłowe I (studia I stopnia) – wykład (w przeszłości również ćwiczenia/projektowanie),
2. Budownictwo Ogólne I (studia I stopnia) – ćwiczenia i projektowanie,
3. Budownictwo Ogólne II (studia I stopnia) – ćwiczenia i projektowanie,
4. Projektowanie Zaawansowanych Konstrukcji Inżynierskich (studia II stopnia) – wykłady, ćwiczenia i projektowanie,
5. Complex Concrete Structures (studia II stopnia) – ćwiczenia i projektowanie (zajęcia prowadzone w języku angielskim).

Współtworzyłem treści programowe przedmiotów: Projektowanie Zaawansowanych Konstrukcji Inżynierskich oraz Budownictwo Przemysłowe I. W przeszłości prowadziłem zajęcia z Konstrukcji Drewnianych (projektowanie) a także z Budownictwa Ogólnego na kierunku Inżynieria Środowiska.

Od roku 2009 r. byłem promotorem 40 i recenzentem 53 prac dyplomowych inżynierskich oraz promotorem 22 i recenzentem 37 prac dyplomowych magisterskich na studiach stacjonarnych i niestacjonarnych (Załącznik 5, poz. III.J).

Byłem współautorem materiałów pomocniczych do przedmiotów Budownictwo Ogólne oraz ćwiczenia z Budownictwa Przemysłowego I, które stanowią uzupełnienie treści programowych przekazywanych w ramach ww. przedmiotów.

## **7. Działalność organizacyjna, współpraca naukowa i popularyzacja nauki**

Aktywnie angażuję się w obowiązki wykonywane na rzecz katedry. W ramach Laboratorium Katedry jestem osobą odpowiedzialną za aparaturę pomiarowo-badawczą w zakresie badań cyklicznych i zmęczeniowych. Jestem także jednym z administratorów serwerów obliczeniowych będących w posiadaniu naszej katedry.

Biorę aktywny udział w konferencjach naukowych (Załącznik 5, poz. II.L i III.B). Uczestniczyłem w 11 konferencjach krajowych oraz 10 konferencjach zagranicznych, na których wygłosiłem 19 referatów. Do najważniejszych konferencji cyklicznych, w których biorę udział, należą: Computational Modelling of Concrete Structures EURO-C (2010, 2014, 2018), Conference on Computer Methods in Mechanics CMM (2005, 2007, 2009, 2011). Byłem także uczestnikiem innych konferencji cyklicznych m.in.: Solid Mechanics Conference SolMech (2006, 2008) oraz European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering ECCOMAS (2008, 2012).

Uczestniczyłem w kursie numerycznego modelowania lokalizacji odkształceń "Modeling of Localized Inelastic Deformation" prowadzonym przez prof. M. Jiráka w Uniwersytecie Technicznym w Pradze (Załącznik 5, poz. III.L.1).

W latach 2016-2018 brałem czynny udział w Bałtyckim Festiwalu Nauki. W ramach tego wydarzenia przygotowywałem wykłady i zajęcia tematyczne.

Jestem także autorem recenzji dla czasopism międzynarodowych, m.in.: "Structures" - Research Journal of the Institution of Structural Engineers (Załącznik 5, poz. III.P).