Częstochowa, 7.06.2024

Recenzent:
Dr hab. inż. Przemysław Postawa, prof. PCz
Politechnika Częstochowska
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki
Katedra Technologii i Automatyzacji

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej
Mgr inż. Anety Skoratko
pt: „Kompozyty cementowe zbrojone przestrzennymi elementami plastikowymi wykonanymi za pomocą druku 3D”

Przygotowanej na Wydziale Geoinżynierii Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie w Instytucie Geodezji i Budownictwa, wykonanej pod kierunkiem i opieka naukową dr hab. inż. Jacka Katzera, prof. UWM

Podstawa formalna opracowania recenzji

Recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport, dr hab. inż. Jacka Rapińskiego, prof. UWM pismem G.IGIB.5201.1.2024 z dnia 26 marca 2024r.

Do oceny przedstawiono rozprawę doktorska, której podstawą jest jednotematyczny cykl sześciu publikacji naukowych, których autorem lub współautorem jest mgr inż. Aneta Skoratko. Są to publikacje wysokopunktowane. Trzy z nich o 140 punktach, jedna 100pkt. oraz jedna aż 200 pkt., gdzie doktorantka jest autorem wiodącym. Jedna z publikacji to materiały konferencyjne z wygłoszeniem referatu i adnotacją, że pełna wersja artykułu (A7) oczekuje na publikację. Z przedstawionych do oceny publikacji sumaryczny impact factor to IF= 28,319.

Recenzję opracowano zgodnie z przepisami określonymi w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity: Dz.U.2023.742 ze zm.).

Stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mieści się w dyscyplinie naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport, ponieważ zawarte w niej treści obejmują materiały i technologie stosowane w inżynierii lądowej i budownictwie.

Ogólna charakterystyka rozprawy i manuskryptu

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Anety Skoratko obejmuje 74 strony maszynopisu, zawiera 27 rysunków, 4 tabele. Autorka podzieliła ją na 10 rozdziałów.

W **pierwszym rozdziale** wskazano osiągnięcia naukowe będące podstawą oceny rozprawy, które stanowi publikacje oznaczone od A1 do A6, które ukazały się od 2021 do 2023 roku przy czym jedna z nich (pozycja oznaczona jako A5 stanowi referat wygłoszony na konferencji, natomiast publikacja oczekuje na publikację, którą załączono jako pozycję A7). W tym

rozdziale przedstawiono również pozostały dorobek publikacyjny doktorantki. Obejmuje on 7 pozycji z czego: 2 publikacje, 1 monografię i 4 materiały konferencyjne.

W rozdziale drugim przedstawiono cel i zakres pracy oraz, krótko scharakteryzowano każdą ze wskazanych jako osiągnięcie naukowe do oceny publikacji.

Rozdział trzeci stanowi przegląd literatury związany z przedstawiana tematyką gdzie zacytowano 46 publikacji związanych ze zbrojeniem mieszanek betonowych włóknami stalowymi SFRC. Scharakteryzowano podstawowe właściwości betonów, ich wady i zalety stosowania. Opisano funkcję włókien w matrycy betonowej i ich wpływ na zwiększenie odporności na pękanie i propagację pęknięć. Opisano możliwości stosowania wydruku 3D w tworzeniu nie tylko struktur stanowiących elementy pasywnego zbrojenia, ale również technologię drukowania betonu czy metali metodami przyrostowymi. Scharakteryzowano obszary stosowania druku 3D przy wznoszeniu budynków o złożonych kształtach oraz opisano cechy mieszanek stosowanych w tego typu aplikacjach. Dalej opisano metody druku tworzyw sztucznych metodą FDM, scharakteryzowano proces, możliwości i ograniczenia. Zwrócono uwagę na zastosowanie metod przyrostowych w prototypowaniu konstrukcji w celu wizualizacji przestrzennej i badaniu wpływu oddziaływania na środowisko lub inne budynki nowoprojektowanych i wznoszonych budynków. Prototypowanie z wykorzystaniem tych metod może przyczynić się również do minimalizowania błędów konstrukcyjnych co minimalizuje koszty i ryzyko dużych inwestycji.

Rozdział czwarty to kontynuacja przeglądu literatury w zakresie Druku 3D betonu, metali i tworzyw sztucznych. Autorka w tej części skupia się tylko na przedstawieniu stanu wiedzy z zakresu aplikacji druku 3D jako technologii wytwarzania budynków i konstrukcji betonowych. Opisuje działanie drukarek stosowanych w budownictwie lądowym, wskazuje przykłady budynków wznoszonych tą metodą. Przedstawiono zdjęcia elementów budowlanych lub całych budynków. Opisano możliwości łączenia wydruków 3D wykonanych z metalu w złożone struktury hybrydowe. Kolejną metoda jakiej poświęcono ten rozdział były metody druku 3D z tworzyw sztucznych. Zdaniem doktorantki wykorzystanie technologii drukowania 3D tworzyw sztucznych pozwala na uzyskanie kształtów słupów o dowolnych kształtach z progresywną zmianą średnicy czy przekroju poprzecznego co jest niemożliwe do uzyskania tradycyjnymi metodami szalowania. Pozwoliłoby to na znaczące oszczędności czasu co przyczyniłoby się do ograniczenia kosztów materiałowych i osobowych w realizacji trudnych projektów. Ponadto zastosowanie wielkoformatowych wydruków dało by możliwość wykorzystania znacznych ilości tworzywa pochodzącego z recyklingu.

W rozdziale piątym opisano materiały wykorzystane w części badawczej w tym składniki zapraw cementowych stosowanych w badaniach oraz dodatków wzmacniających (włókna stalowe) oraz materiał z, którego wykonywano szalunki tracone. W tym przypadku zastosowano termoplastyczny terpolimer ABS (akrylonitryl-butadien-styren). Przedstawiono kształty uzyskanych metodą druku 3D szalunków oraz próbki wykonane z wykorzystaniem cementowych mieszanek.

Rozdział szósty poświęcony jest dyskusji uzyskanych wyników. W poszczególnych częściach opisano właściwości betonu zbrojonego włóknami stalowymi, wyniki badań słupów

betonowo-plastikowych, wyznaczono energię destrukcji w poszczególnych przedziałach odkształcenia. W jednym z podrozdziałów opisano właściwości mechaniczne belek zbrojonych elementami przestrzennymi z tworzywa sztucznego (gyroidy). Dla udziału 25% objętościowego wypełnienia przestrzennego uzyskano wartość wytrzymałości na zginanie 7 MPa przy wartości wytrzymałości samej matrycy 4 MPa.

Rozdział siódmy to uwagi końcowe i wnioski autorki dysertacji naukowej w którym odniosła się do całości prezentowanych wyników badań bez podawania konkretnych zestawień uzyskanych wartości.

W kolejnym rozdziale przedstawiła dalsze plany badawcze i rozpoczęte już próby z belkami wykonanymi z tworzyw polimerowych metodą druku 3D.

Przedostatnim rozdziałem jest literatura zaprezentowana w sposób alfabetyczny w liczbie 123 pozycji publikacji, książek, monografii i odsyłaczy do stron internetowych.

Za rozdziałem poświęconemu literaturze przedstawiono Spis rysunków i tabel.

Kolejną część dysertacji stanowią kopie publikacji będących podstawą oceny wraz z oświadczeniami współautorów.

Tematyka i znaczenie rozprawy doktorskiej

Tematyka rozprawy doktorskiej przedłożonej do oceny skupia się wokół zastosowania technologii drukowania 3D do wytwarzania niekonwencjonalnych rozwiązań dla wykonywania zbrojenia przestrzennego oraz wytwarzania szalunków traconych, których wytworzenie tradycyjnymi metodami jest bardzo trudne lub wręcz niemożliwe. Podczas realizowanego eksperymentu badawczego wytworzono modele różnych kolumn fraktalnych jako szalunku a następnie zbadano wytrzymałość wykonanych w nich słupów bazujących na mieszance betonowej oraz mieszance zbrojonej włóknami stalowymi. Rejestrowano i badano charakterystyki obciążeniowo-odkształceniowe różnych kształtów zastosowanych szalunków oraz testowano mieszanki betonowe zbrojone różnymi wypełniaczami funkcjonalnymi (np. włóknami stalowymi). Ważnym aspektem była ocena rozpraszania energii podczas testów ściskania, co informuje o postępie i kinetyce procesu destrukcji badanych struktur. Badaniom poddano również elementy belek zbrojonych przestrzennymi elementami wykonanymi z tworzyw sztucznych (gyroid structure) przygotowanych z wykorzystaniem drukowania 3D, których wykonanie jest niemożliwe w oparciu o klasyczne metody stosowane w budownictwie.

Praca pokazuje współdziałanie różnych materiałów w wyrobach i konstrukcjach betonowych i pokazuje jak ważna jest współpraca pomiędzy różnymi dziedzinami nauki i techniki. Zastosowanie tworzyw sztucznych w konstrukcjach betonowych może wydawać się kompletnie nieuzasadnione ze względu na ich znaczące różnice w zakresie prezentowanych właściwości fizycznych i termicznych oraz zróżnicowania technologii wytwarzania i przetwarzania. Jednak w tym przypadku sprawdza się klasyczna teoria kompozytów, która mówi, że właściwości kompozytów nie zawsze wynikają z bezpośredniego sumowania właściwości poszczególnych materiałów stanowiących osnowę i zbrojenie lub wypełnienie. Dlatego warto poszukiwać nowych zastosowań i struktur kompozytowych, warto badać ich zmienne właściwości w różnych aspektach, wytrzymałości, sprężystości, odkształcalności i innych, które mogą okazać się w przyszłości cenne w niestosowanych dotychczas aplikacjach przemysłowych.

Branża budowlana rozwija się bardzo dynamicznie, co powoduje ogromną dynamikę wzrostu stosowania nowych technologii, materiałów w wytwarzaniu materiałów budowlanych oraz konstrukcji. Tworzywa sztuczne również zwiększają swój udział w branży nie tylko w obszarach gdzie występują od wielu lat (instalacje sanitarne, wod-kan, stolarka okienna, izolacje ścian, dachów, geomembrany i inne) ale również w nowoczesnych rozwiązaniach inżynierskich i konstrukcyjnych. Okazuje się, że polimery mimo swoich wad mogą śmiało stanowić alternatywę dla wielu innych materiałów, a ich odporność na korozję, długa żywotność w połączeniu z bardzo wydajnymi technologiami przetwórstwa są nieocenione w budownictwie, gdzie koszty pracy stale się podnoszą.

Poszukiwanie nowych zastosowań tworzyw i konstrukcjach betonowych jest młodym i wciąż rozwijającym się kierunkiem w budownictwie mało i wielkoskalowym. Jednak w takich pracach konieczna jest konsultacja naukowa i technologiczna pomiędzy naukowcami. Polimery i procesy ich kształtowania wpływają na właściwości fizyczne uzyskanych finalnych produktów. Wystarczy zmienić długość włókna szklanego w elementach np. wtryskiwanych aby znacząco zmodyfikować właściwości wytrzymałościowe, cieplne, użytkowe, skurcz technologicznych, pełzanie i inne w wytworzonym kompozycie. Różnorodność dostępnych tworzyw (około 70-85 tyś. odmian i gatunków) daje nieograniczoną wręcz możliwości uzyskiwanych właściwości. Zastosowane wzmocnienie w kompozytach polimerowych, jego kształt, rozmieszczenie i metoda przetwórstwa wpływają na właściwości formowanych elementów, co przekłada się na ich stosowanie w technice budowlanej.

Doktorantka sformułowała trzy tezy naukowe. Dwie pierwsze dotyczą możliwości stosowania tworzyw sztucznych oraz technologii druku 3D do wytwarzania szalunków traconych słupów betonowych oraz zbrojenia wewnętrznego belek betonowych. Trzecia teza dotyczy możliwości kształtowania cech mechanicznych elementów kompozytowych wykonanych z wykorzystaniem przestrzennego zbrojenia z tworzyw sztucznych.

Ta ostatnia wydaje się niesłychanie ważna i powinna być kluczową dla tej rozprawy. Przedstawione wyniki realizowanych badań dowodzą, że kształt zbrojenia traconego polimerowego wpływa na quasi-plastyczne zachowanie się słupów betonowych oraz na charakter procesu pękania słupów podczas ściskania. Właśnie to zachowanie się badanych struktur kompozytowych wskazałbym jako najcenniejszą część pracy.

Uwagi krytyczne i dyskusyjne

1. W pracy nagminnie pojawia się słowo plastik, elementy plastikowe itp. Jako, że naukowo jestem związany z tworzywami sztucznymi i technologią ich przetwórstwa, chciałem zwrócić uwagę na stosowanie w słowa plastik, które w języku polskim jest synonimem czegoś o wątpliwych właściwościach, wręcz tandetnego. Słowo to przewija się w recenzowanej rozprawie bardzo często. Sugeruję w przyszłych publikacja polskojęzycznych stosować: materiał polimerowy, tworzywo sztuczne, kompozyt polimerowy, kompozyty na osnowie polimerów itp.
2. W spisie treści nie wykazano streszczenia ani wykazu skrótów zastosowanych w pracy
3. W wykazie skrótów nie wskazano polskich rozwinięć i tłumaczeń. Jest to ważny aspekt ponieważ w języku polskim często obowiązuje nazewnictwo, które nie wynika z bezpośredniego tłumaczenia z angielskiego.

4. Schemat przedstawiający poszczególne zadania programu badawczego pracy jest bardzo małych rozmiarów, przez co mało czytelny i ogranicza się do pokazania współzależności pomiędzy publikacjami. W pracy zabrakło blokowego schematu przedstawiającego poszczególne etapy realizacji pracy i zadań badawczych.
5. Przegląd stanu wiedzy jest bardzo, krótki i nie wprowadza czytelnika w zakres stosowanych rozwiązań. Pomimo zacytowanych 46 pozycji literaturowych zawiera zaledwie 3 strony maszynopisu. Bardzo dużo jest w nim cytowanych pozycji odnoszących się do technologii przyrostowych potocznie nazywanych drukiem 3D. Kolejny, czwarty rozdział to de facto kontynuacja tej samej tematyki druku 3D. Zatem rozdział 4 powinien być częścią przeglądu literatury (rozdział 3). Właściwie nie ma informacji na temat stosowanych szalunków ich budowy i funkcji oraz stosowanych technologii szalowania.
6. Przedstawione w przeglądzie literatury (rozdział 3 i 4) rysunki są nieczytelne ze względu na zastosowane filtry dając efekt artystyczny. Uważam, że w naukowej dysertacji ważne jest przekazanie szczegółów technicznych, tym bardziej, że w załączonych publikacjach przedstawiono te same rysunki (również rysunki przerobione graficznie).
7. Często rysunki nie znajdują się w części tekstu, która dotyczy danego rozwiązania a są zbiorczo zaprezentowane w dalszej części opisów.
8. Nie ukrywam, że trudno się odnaleźć w cytowanej literaturze. Znacznie lepszym rozwiązaniem jest stosowanie numerowanej bibliografii z cytowaniami w nawiasach kwadratowych. Łatwiej też sprawdzić czy wszystkie pozycje zostały przywołane w tekście dysertacji.
9. W przeglądzie literatury, jak również w załączonych publikacjach zabrakło pokazania schematu procesu drukowania z mieszanki cementowej, czy z tworzyw sztucznych metodą FDM. Nie opisano również zasadniczych różnic pomiędzy stosowanymi materiałami (mieszanka cementowa, metale i tworzywa sztuczne). Nie opisano właściwości stosowanych mieszanek betonowych w druku 3D budynków.
10. Stwierdzenie (strona 18), że *połączenie SFRC z drukowanym w 3D szalunkiem pozostającym na miejscu, który później pełniłby rolę zbrojenia potencjalnie umożliwiłby całkowite wyeliminowanie z placu budowy tradycyjnego zbrojenia stalowego* – w moim przekonaniu na dzień dzisiejszy jest bardzo śmiałym i odważnym, ale może przyszłe technologie druku 3D tworzyw wypełnionych włóknami węglowymi może dadzą takie możliwości. Na dzień dzisiejszy moduł sprężystości wzdłużnej przy rozciąganiu jest zbyt mały w porównaniu ze stalą, a możliwość stosowania włókien ciągłych (rowingu) w technologiach druku 3D metodą FDM niemożliwy. Ponadto trudno porównywać działanie włókien rozproszonych oraz zbrojenia w postaci belek.
11. Na tej samej stronie doktorantka pisze, że *zastosowanie polimerów termoplastycznych w druku 3D umożliwia kontrolę nad utwardzaniem*, co nie do końca jest prawdą bo jak sama nazwa mówi tworzywa termoplastyczne uplastyczniają się w danej temperaturze lub zakresie temperatury a przy ochładzaniu ich lepkość rośnie powodując ich usztywnienie. Utwardzanie zachodzi w tworzywach chemo- lub termoutwardzalnych.
12. W pracy nie podano danych (w publikacjach też ich nie znaleziono) maszyn, urządzeń, w tym drukarki 3D zastosowanych w pracach badawczych. W rozprawie doktorskiej, ale również publikacjach naukowych ważne jest z jednej strony uwiarygodnienie, ale i podzielenie się z

czytelnikami jaka aparatura została zastosowana, jakie oprzyrządowanie, uchwyty, stanowiska badawcze i wyposażenie. Doktorantka ograniczyła się tylko do podania maksymalnej wartości zastosowanego przetwornika siły w kN.

13. Zabrakło również dokumentacji fotograficznej procesu drukowania i zbliżenia struktury wydruku uzyskanej po procesie drukowania 3D.
14. W tabeli 3 na stronie 28 podano kluczowe właściwości filamentu ABS stosowanego w wydrukach 3D podane przez producenta. Nie wskazano producenta ani typu filamentu. Błędna jednostka gęstości 1100 kg/dm^3 zamiast kg/m^3. Podano temperaturę topnienia 225^{o}C, a materiał ten nie posiada temperatury topnienia, a ze względu na swoją budowę amorficzną posiada aż 3 temperatury zeszklenia Tg. Wskazana temperatura może być temperaturą procesu FDM.
15. Ponieważ praca bazuje na publikacjach dlatego dla pełnego zobrazowania i wyjaśnienia zabrakło rozbudowanego schematu realizacji poszczególnych zadań badawczych i przypisanych im publikacji.
16. Bardzo rozbudowany eksperyment na wielu płaszczyznach i przy różnych materiałach powoduje często brak możliwości porównania i skorelowania wzajemnie uzyskanych wyników. Z pewnością analiza i wpływu długości włókien stalowych i ich zawartości była by bardzo cenną informacją.
17. Brakło również ważnego aspektu dla materiałów kompozytowych jakim jest analiza mikroskopowa popękanych próbek, nawet gdyby ją ograniczyć tylko do skali makro uzyskanych przełomów podczas destrukcji. Jedną z najważniejszych w analizie struktur kompozytowych jest wzajemne oddziaływanie pomiędzy osnową (matrycą) a zbrojeniem. W szczególności jest to ważne przy stosowaniu materiałów o słabej zwilżalności zaprawą cementową powierzchni jakimi są polimery. Odziaływanie i siły adhezji są kluczowe dla wytrzymałości, przenoszeniu obciążeń i propagacji pęknięć w kompozytach.

Szczegółowe uwagi edycyjne i językowe

Str. 23 – niezrozumiałe zdanie *Grubsze próbki z wypukłościami wykazywały twardość przy odkształcaniu.*

Str. 26$_7$ – czy zastosowane ilości włókien stalowych dotyczyły udziału wagowego czy objętościowego.

Str. 27$_6$ – napisano, że próbę zginania przeprowadzono aparatem o maksymalnej sile obciążenia 10kN. Nie podano nazwy producenta, maszyny wytrzymałościowej. Ponadto podejrzewam, że dla maksymalnej siły 10kN minimalna rejestrowana wartość wynosi 100N przy dokładności maszyny 1% a nie 1N.

Str. 34$_{13}$ – mieszanka charakteryzowała się najbardziej gęstą konsystencją (potoczne stwierdzenie) – powinno być gorszą płynnością.

Str. 35$_1$ – autor pisze – *Żaden z **okazów** nie został ostatecznie zniszczony w tym momencie.*

W publikacji A1 użyto słowa specimen (próbka) co jest bardziej poprawne w pracy.

Str. 52$_{15}$ – autor pisze – *Po początkowej **awarii** wypełnienia SFRC szalunek z tworzywa sztucznego utrzymywał w całości* - awaria raczej kojarzy się z urządzeniami mechanicznymi lub elektrycznymi.

Str. 52[4] – autorka bardzo często używa kreślenia *geometria i geometria 3D* w odniesieniu do kształtu zastosowanych szalunków czy próbek badawczych. Jest to bardzo częsty błąd językowy wprowadzający nieprecyzyjne nazewnictwo. Powinno się pisać kształt geometryczny lub przestrzenny kształt wydruku 3D. Natomiast geometria to dziedzina matematyki zajmujące się badaniem figur geometrycznych oraz związków, jakie między nimi zachodzą.

Str. 54 – brak opisu wymiarów stosowanych próbek i fotografii, co dałoby wyobrażenie o ich strukturze.

Str. 58 – rozdział 7 uwagi końcowe i wnioski raczej powinien wybrzmieć Podsumowanie i wnioski, ponieważ doktorantka odnosi się w niej do wielu publikacji własnych i obcych

W tym rozdziale duży nacisk położyła na ponowny opis możliwości stosowania struktur drukowanych z materiałów polimerowych i zalet ich stosowania, zamiast odnieść się do uzyskanych wyników i postawionych na początku pracy tez. Każda z nich w zakończeniu powinna zostać umotywowana krótką analizą

Str. 61[9] -Dopiero w podsumowaniu znalazły się informacje o znaczącym wpływie szeregu parametrów materiałowych i technologicznych na zachowanie się struktur drukowanych. Doktorantka pisze, że *Mechanizm zniszczenia przedstawionych zbrojeń nie zostały jeszcze w pełni przetestowane i wymodelowane (chyba powinno być zamodelowane) ani opisane. Oprócz wielu parametrów związanych z procesem drukowania 3D takich jak rdzeń, druku, wysokość warstwy, szerokość linii wypełnienia, optymalizacja drukowania ścian, zastosowany wzór wypełnień, temperatura drukowania, prędkość i chłodzenie podczas drukowania wpływają na właściwości drukowanego elementu* - to bardzo dobre podsumowanie, że doktorantka zdaje sobie sprawę ile czynników ma jeszcze wpływ na właściwości samych struktur polimerowych 3D. I to stwierdzenie powinno znaleźć się w rozdziale 8 – Dalsze plany badawcze.

Ocena merytoryczna pracy

Na plus oceniam przygotowanie eksperymentu i samych próbek badawczych. Przedstawione wykresy i charakterystyka zmiany siły podczas testów ściskania bardzie wiele mówią o charakterze zmian, ale i dynamice procesów pękania testowanych kolumn. Jest to bardzo cenna wiedza. Niedosyt budzi jej dokumentacja fotograficzna i zgłębienie zachowania się materii wypełnienia o czym już wspominałem.

Zagłębienie się w materiałową stronę zachowania się materiału kompozytowego jakim jest beton i zastosowane wypełnienia SFRC lub inne, którymi może być wypełniany beton (np. włókna polimerowe) znacząco wzbogaciło by tą pracę od strony poznawczej zasad i mechanizmów jakie rządzą skomplikowanymi procesami pękania.

Kolejnym aspektem byłoby odniesienie się do procesów pękania samego szalunku polimerowego. Badania tego materiału (wytworzonego z wykorzystaniem metod druku 3D) pozwoliłyby na modyfikację samych wydruków (z punktu widzenia procesu i zastosowanych parametrów) i ich wpływ na uzyskane właściwości.

Pomimo znaczących różnic w modułach sztywności polimerów i związanego betonu, w pracy udowodniono możliwość współistnienia tak różnych materiałów w jednej konstrukcji i znaczącej modyfikacji charakterystyk ich pękania.

Czytając prace dokonał bym zmiany tezy postawionej na jej początku na mniej oczywistą a udowodnioną w przeprowadzonych badaniach. Mianowicie, że stosowanie szalunków o rozwiniętej powierzchni znacząco wpływ na zmianę charakterystyki pękania słupów betonowych z kruchego na quasi-plastyczne.

Szkoda, że nie realizowano prób przy dalszych wartościach odkształceń nawet do 20% w celu obserwacji charakterystyki uzyskanych wartości siły i jej przebiegu. Może zachowanie się tego typu struktur miałoby zastosowanie w terenach sejsmicznych w celu mniej dynamicznych katastrof budowlanych.

Czasem ciekawe wyniki autorka nie do końca umiała wyjaśnić w sposób naukowy, stosując bądź zbyt trywialne wyjaśnienia, bądź potoczne nazewnictwo zachowania badanych próbek. Możliwe, że wynika to z dość złożonej problematyki dotyczącej nie tylko betonów i konstrukcji betonowych ale i udziału w nich struktur polimerowych, które to dają zachowanie quasi-plastyczne materiału, który nie wykazuje takich cech.

Rozdział 6.4 bazujący na publikacja A4 i dotyczący struktur polimerowych wydruków przestrzennych stanowiących zbrojenie daje bardzo ciekawe wyniki. Różna gęstość objętościowa zastosowanego zbrojenia polimerowego przy zachowaniu jednakowej struktury daje bardzo zróżnicowane przebiegi krzywych obciążenie/ugięcie podczas prób zginania trójpunktowego.

Na uwagę zasługuje bardzo duża powtarzalność przebiegów w zakresie ugięcia od 0 do 1% a w przypadku udziału objętościowego wypełnienia 25% nawet do 2% ugięcia.

Zrealizowane badania pokazują jak wiele jeszcze w tym obszarze jest do zrobienia i zbadania, zarówno od strony technologicznej, materiałowej jak i samego eksperymentu.

Pytania do doktorantki:

1. Czym doktorant wytłumaczy tak różne zachowanie się słupów SFRC-plastik (praca A3) z punktu widzenia rozrzutu wyników dla próbki na rysunku 18a i 19b a bardzo dużą powtarzalnością próbek 19c, d i e.
2. Czy przeskalowanie jest możliwe na duże konstrukcje szalunków i jakie niebezpieczeństwa Pani dostrzega?
3. Jakie było kryterium wyboru włókien stalowych do eksperymentu i czy zastosowana długość nie była zbyt mała dla uzyskania zadowalających wyników dla próbek w postaci belek o długości 160mm?
4. Czy dane mechanicznych właściwości filamentu ABS przedstawione w tabeli 3 dotyczą samego filamentu czy materiału ABS, z którego został wykonany. Czy wytrzymałość na zginanie wyznaczono na włókna filamentu?
5. Jaka jest wydajność wytwarzania elementów szalunków z wykorzystaniem wielkoformatowego druku 3D?
6. Czy przeniesienie uzyskanych w pracy wyników jest możliwe na wielkoformatowe elementy szalunków (efekt skalowania),
7. Co z logistyką tego typu rozwiązań? Wydruki w których nie będzie zastosowana struktura plastra miodu będą miały bardzo małą sztywność co utrudni znacząco transport i magazynowanie?
8. Czy i jaki wpływ na uzyskane właściwości będzie miała bardzo mała zwilżalność, a tym samym adhezja, mieszanki betonowej do elementów wykonanych z tworzyw sztucznych. Czy konieczna będzie preparatyka powierzchni tego typu elementów w celu jej rozwinięcia?

Wnioski końcowe:
W oparciu o przeprowadzoną ocenę pracy doktorskiej stwierdzam, że:

1. Praca z pewnością nie jest przełomowa jednak stanowi ciekawą eksplorację dotychczas rzadko stosowanych technologii i metod wytwarzania szalunków traconych. W pracy przebadano bardzo zróżnicowane kształty słupów i uzyskano równie zróżnicowane wyniki, co pozwala stwierdzić, że są to zagadnienia warte dalszych badań. Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną doktoranta w Dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport na poziomie zadowalającym.
2. Doktorantka posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, wykorzystuje różne narzędzia badawcze, ale i technologiczne z pogranicza różnych metod wytwarzania i różnych materiałów, co z pewnością okazało się trudnością interpretacyjną w ocenianej pracy, choć na minus przemawia brak wykorzystania bardziej zaawansowanych badań materiałowych, które dały by pole do dyskusji naukowej, tak ważnej w dysertacji w obszarze nauk technicznych.
3. Warto podkreślić oryginalność rozwiązania w zakresie zastosowania szalunków traconych wytworzonych z tworzyw sztucznych z wykorzystaniem metod druku 3D. Rozwój technologii drukowania 3D powoduje, że drukarki przestały być małymi urządzeniami o powierzchni wydruku do kilkuset cm kwadratowych, ale przy zastosowaniu robotów pięcioosiowych i zamontowanych na nich ekstruderów mogą drukować obiekty przestrzenne o kubaturze kilku lub kilkunastu metrów sześciennych. To faktycznie otwiera nowe możliwości w branży budowlanej w co bardzo dobrze wpisuje się tematyka zrealizowanych badań i przygotowanych publikacji.

W związku z powyższym uważam, że przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska Pani mgr inż. Anety Skoratko pt.: „***Kompozyty cementowe zbrojone przestrzennymi elementami plastikowymi wykonanymi za pomocą druku 3D”*** spełnia kryteria stawiane pracom doktorskim, zgodnie z artykułem 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity: Dz. U.2023.742 ze zm.), dlatego wnioskuję do Rady Dyscypliny Wydziału Geoinżynierii Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie o dopuszczenie Doktorantki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

