

Recenzja spełniona wymagania formalne

Rzeszów, 09.11.2025

dr hab. inż. Izabela Skrzypczak, prof. PRz
Politechnika Rzeszowska
Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Julii Blazy

pt. *Synthetic FRC ground slabs subjected to a central concentrated force*

1. Podstawa formalna recenzji

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport z dnia 25.09.2025 r. (zgodnie z pismem Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Śląskiej prof. dr. hab. inż. Piotra Folęgi, z dnia 03.10.2025 r.).

2. Charakterystyka rozprawy

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska **mgr inż. Julii Blazy** pt. *Synthetic FRC ground slabs subjected to a central concentrated force*.

Praca napisana jest w języku angielskim, ma charakter teoretyczno-badawczy i składa się z 10 rozdziałów, w tym bibliografii, dwóch załączników oraz streszczenia w języku polskim i angielskim, a także poszerzonego streszczenia w języku polskim. Rozprawa liczy łącznie 406 stron, w tym 350 stron tekstu zasadniczego. Tak znaczna objętość, obejmująca tekst zasadniczy rozprawy, załączniki, bibliografię i streszczenia, świadczy o szerokim zakresie badań oraz wysokim stopniu szczegółowości opracowania. Bibliografia zawiera łącznie 250 pozycji, tym 39 publikacji polskojęzycznych, 186 angielskojęzycznych oraz 25 norm.

W rozdziale pierwszym zwrócono uwagę na interdyscyplinarny charakter inżynierii lądowej oraz znaczenie nowoczesnych materiałów w kształtowaniu trwałych i ekonomicznych konstrukcji. Szczególną uwagę poświęcono betonowym płytom na gruncie, które stanowią istotny element infrastruktury przemysłowej, magazynowej i komunikacyjnej. Wskazano, że mimo szerokiego zastosowania betonu zbrojonego włóknami stalowymi, w literaturze i normach projektowych wciąż brakuje kompleksowych opracowań dotyczących płyt z betonu zbrojonego włóknami syntetycznymi (SyFRC). Podkreślono, że stosowanie włókien syntetycznych w betonie niesie ze sobą szereg korzyści, takich jak uproszczenie procesu wykonawczego, redukcja kosztów zbrojenia, skrócenie czasu budowy, a także poprawę rysoodporności i zwiększenie trwałości konstrukcji. Mimo tych zalet, ich praktyczne wykorzystanie pozostaje ograniczone, głównie z powodu braku jednoznacznych wytycznych projektowych oraz niewystarczającej liczby badań dotyczących zachowania płyt gruntowych SyFRC pod obciążeniami skupionymi. W rozdziale tym wskazano również na znaczenie

Wpłynęło dnia 1.12.2025 r.

dalszych badań nad mechanizmem przebicia w płytach z betonu zbrojonego włóknami syntetycznymi, które może mieć kluczowe znaczenie dla zwiększenia bezpieczeństwa i niezawodności tego typu konstrukcji. Podjęta w pracy problematyka ma na celu uzupełnienie istniejącej luki badawczej oraz dostarczenie praktycznych wniosków wspierających racjonalne projektowanie i szersze stosowanie płyt gruntowych SyFRC w inżynierii budowlanej.

W rozdziale drugim przedstawiono tło, motywację oraz główne założenia badawcze pracy dotyczącej płyt gruntowych z betonu zbrojonego włóknami syntetycznymi (SyFRC). Podkreślono, że choć idea wzmocnienia materiałów włóknami ma bardzo długą historię, sięgającą czasów starożytnych, współczesne zastosowanie włókien w betonie rozwija się intensywnie dopiero od lat 60. XX wieku. Pomimo dużego postępu badań, beton zbrojony włóknami (FRC) wciąż budzi sceptycyzm, głównie ze względu na problemy z równomiernym rozproszaniem włókien w kompozycie, niepewność co do ich rzeczywistego wpływu na właściwości mechaniczne betonu oraz brak jednoznacznych zasad projektowania, szczególnie przy zastosowaniu włókien syntetycznych. Autorka w tym rozdziale podkreśliła, że dotychczasowe badania koncentrowały się głównie na próbkach małoskalowych (belkach, walcach, kostkach), które nie zawsze w sposób wierny odwzorowują rzeczywiste zachowanie elementów konstrukcyjnych. Zwróciła także uwagę na brak badań prowadzonych w skali rzeczywistej, w szczególności dotyczących płyt na gruncie, stanowiących jedno z podstawowych zastosowań betonu zbrojonego włóknami. W praktyce przemysłowej płyty te są narażone na obciążenia skupione od regałów czy wózków widłowych, które mogą prowadzić do zniszczenia przez przebicie. Problem ten, mimo znaczenia inżynierskiego, wciąż jest słabo rozpoznany, szczególnie w odniesieniu do płyt z betonu SyFRC. W odpowiedzi na tę lukę badawczą, Autorka pracy przeprowadziła kompleksowe badania eksperymentalne dotyczące płyt na gruncie (posadzek przemysłowych) z betonu zbrojonego włóknami syntetycznymi (SyFRC) obciążonych centralnie zlokalizowaną siłą skupioną. Celem badań było rozpoznanie mechanizmu przebicia, określenie wpływu rodzaju i ilości włókien na nośność konstrukcji oraz opracowanie zaleceń projektowych tego typu elementów. W rozdziale tym, przedstawiono również szczegółowe cele pracy obejmujące m.in.: analizę literatury, zalecenia normowe, badania materiałowe, opracowanie stanowiska badawczego, porównanie zachowania płyt podpartych i niepodpartych, ocenę wpływu rodzaju i ilości włókien na nośność na przebicie, a także weryfikację modeli analitycznych i opracowanie praktycznych rekomendacji projektowych.

W rozdziale tym, sformułowano także pięć tez badawczych, zakładających, że:

1. Odpowiedź konstrukcyjną betonowych płyt na gruncie zbrojonych włóknami syntetycznymi, obciążonych centralnie zlokalizowaną siłą skupioną, można wiarygodnie przewidzieć na podstawie wyników uzyskanych z badań próbek belkowych poddanych rozciąganiu przy zginaniu.
2. Odpowiedź konstrukcyjna betonowych płyt na gruncie zbrojonych włóknami syntetycznymi, centralnie zlokalizowaną siłą skupioną, różni się znacząco od zachowania płyt niepodpartych, szczególnie pod względem nośności i modelu zniszczenia.
3. Dodatek włókien syntetycznych korzystnie wpływa na pracę betonowych płyt na gruncie po ich zarysowaniu oraz prowadzi do bardziej plastycznego modelu zniszczenia w porównaniu do płyt bez dodatku włókien.

4. Zastosowanie oraz zwiększenie ilości włókien syntetycznych zwiększa nośność z uwagi na przebicie oraz wydłuża krytyczny obwód kontrolny płyt na gruncie.
5. Rodzaj zastosowanych włókien syntetycznych ma wpływ zarówno na nośność z uwagi na przebicie, jak i na długość krytycznego obwodu kontrolnego płyt na gruncie.

Na końcu rozdziału wskazano ograniczenia przeprowadzonych badań m.in. analiza tylko dwóch typów betonu (PC i SyFRC), jednego rodzaju obciążenia (siła skupiona zlokalizowana w środku płyty) oraz jednego typu/ rodzaju podłoża. Podkreślono także, że choć zakres badań jest ograniczony, pozwala on na sformułowanie istotnych wniosków i wskazanie kierunków dalszych badań nad płytami gruntowymi z betonu zbrojonego włóknami syntetycznymi.

Rozdział trzeci stanowi szerokie opracowanie przeglądowe, obejmujące analizę teoretycznych modeli, normowych zaleceń dotyczących prac badawczych oraz wytycznych projektowych dotyczących betonu zbrojonego włóknami (FRC), ze szczególnym uwzględnieniem posadzek przemysłowych z betonu zbrojonego włóknami syntetycznymi (SyFRC) oraz ich odporności na przebicie. W części teoretycznej tego rozdziału przedstawiono podstawy teoretyczne zachowania włókien w betonie. Omówiono mechanizm ząbienia rys, który odróżnia FRC od tradycyjnego betonu, a także opisano procesy pęknięcia i przenoszenia naprężeń rozciągających przez włókna. Zwrócono uwagę na różnice między zachowaniem osłabienia po zarysowaniu oraz wzmocnienia po zarysowaniu zależnego od rodzaju i ilości włókien. Przedstawiono także modele pęknięcia, takie jak model rysy rozmytej Hillerborga i model pasma zarysowania Bażanta wraz z charakterystyką krzywej naprężenie - szerokość rysy, będącej podstawą analitycznych opisów zachowania betonu z włóknami. Następnie zaprezentowano wybrane modele analityczne stosowane do oceny nośności płyt na gruncie: model Westergaarda, model Falknera i in., model Shentu i in. oraz model Meyerhofa-Losberga. Model Westergaarda opiera się na teorii sprężystości oraz modelu podłoża Winklera i służy do określania ugięć i naprężeń płyt obciążonych w środku, przy krawędzi lub w narożu. Model Falknera i in. uwzględnia zachowanie po zarysowaniu (model plastyczny), co czyni go bardziej adekwatnym do analizy FRC. Model Shentu i in. bazuje na analizie MES i umożliwia obliczenia nośności płyt obciążonych centralnie. Model Meyerhofa-Losberga wykorzystuje teorię linii uplastycznienia (tj. teorii przegubów plastycznych, teorii zniszczenia plastycznego płyt) i pozwala na obliczanie nośności płyt przy różnych schematach obciążenia. W odróżnieniu od wcześniej omówionych przez Autorkę modeli, model ten umożliwia uwzględnienie redystrybucji momentów oraz wyznaczenie pozostałej nośności po zarysowaniu, co ma kluczowe znaczenie przy analizie płyt z włóknami. Wszystkie modele porównano pod kątem ich dokładności i zgodności z wynikami eksperymentalnymi, wskazując, że obliczenia teoretyczne (zwłaszcza modelu Westergaarda) są zwykle konserwatywne, a przewidywana nośność jest 3 - 4,5 razy mniejsza od uzyskanej w badaniach laboratoryjnych. W rozdziale tym Autorka przedstawiła również modele i analizy dotyczące przebiccia. Szczegółowo omówiła zjawisko przebiccia w posadzkach przemysłowych, które występuje przy działaniu dużych sił skupionych (np. od nóg regałów magazynowych lub kół wózków widłowych). Wyjaśniła różnice między przebicciem w płytach podpartych na gruncie i w płytach stropowych, podkreślając wpływ podłoża sprężystego na rozkład naprężeń. Przeanalizowała również problem wyznaczania obwodu krytycznego (kontrolnego) oraz wpływ odległości a , mierzonej od krawędzi obszaru

obciążonego, oraz kąta nachylenia rysy przebiecia θ na nośność na przebiecie. Autorka odniosła się do wyników badań innych autorów (m.in. Gołdyna, Nepelskiego), wskazujących, że przyjmowanie stałej odległości $a = 2d$ (zalecanej w niektórych normach) może prowadzić do przeszacowania nośności. Wskazano również na uproszczone metody wyznaczania obwodu kontrolnego, m.in. opracowania European Concrete Platform ASBL oraz Knauffa i Knyziaka.

W dalszej części tego rozdziału omówiono aktualne normy i procedury badań FRC, skupiając się na ocenie właściwości mechanicznych betonu z włóknami. Autorka odniosła się do zaleceń norm:

- PN-EN 206 i PN-EN 12390 w odniesieniu do wytrzymałości na ściskanie i modułu sprężystości,
- PN-EN 14651 i metody trójpunktowego zginania belek z nacięciem do wyznaczania wytrzymałości resztkowej,
- RILEM TC 162-TDF, JSCE-SF4 (Japonia) oraz ASTM C496-96 (test rozłupywania) do badania zachowania betonu z włóknami metalicznymi,
- PN-EN 12390-5 i badania czteropunktowego zginania.

Omówiono również nowsze i bardziej odpowiednie metody, takie jak Wedge Splitting Test (WST), Montevideo Test (MVDT) oraz Double Edge Wedge Splitting Test (DEWST), umożliwiające pośrednie określenie wytrzymałości na rozciąganie przy kontrolowaniu rozwarcia rysy.

W rozdziale tym Autorka przedstawiła także zasady projektowania konstrukcji z FRC według najważniejszych dokumentów międzynarodowych:

- RILEM TC 162-TDF (2003) – opisuje metodologię projektowania SFRC, z uwzględnieniem stanów granicznych nośności i użyteczności; dopuszcza pominięcie tradycyjnego zbrojenia poprzecznego, jeśli wytrzymałość resztkowa ≥ 1 MPa.
- Model Code 2010 (fib) – zawiera wytyczne dla FRC w oparciu o modele σ - ε i σ - w , dopuszczając częściowe zastąpienie zbrojenia prętowego włóknami pod warunkiem spełnienia relacji między wytrzymałościami resztkowymi.
- TR34 (Technical Report 34) – praktyczny dokument projektowy dotyczący płyt przemysłowych na gruncie, uwzględniający wkład włókien w nośność na zginanie oraz przebiecie.

W rozdziale tym przedstawiono również zależności empiryczne umożliwiające szacowanie wytrzymałości na rozciąganie i zginanie betonu na podstawie wytrzymałości na ściskanie i parametrów włókien (objętości, długości, smukłości). Autorka zaproponowała własną formułę (równanie 3.44) do oceny wytrzymałości na zginanie betonu SyFRC, dostosowaną do włókien syntetycznych o smukłości < 200 i zawartości do 1%.

Należy podkreślić, że rozdział 3 stanowi kompleksowe kompendium wiedzy teoretycznej i normatywnej dotyczącej płyt gruntowych z betonu zbrojonego włóknami syntetycznymi. Autorka w sposób bardzo szeroki i szczegółowy zgromadziła oraz porównała istniejące modele analityczne, przedstawiła aktualne normowe zalecenia badawcze i projektowe, a także omówiła metody oceny właściwości mechanicznych FRC. Wskazała również ograniczenia obowiązujących metod oraz brak jednoznacznych wytycznych dotyczących oceny nośności na przebiecie w płytach SyFRC. Rozdział ten, mimo wysokiej wartości merytorycznej, wydaje

się zbyt obszerny w stosunku do pozostałych części pracy, co powoduje, że proporcje między poszczególnymi rozdziałami nie są w pełni zachowane. Z punktu widzenia struktury pracy warto byłoby rozważyć jego częściowe skrócenie lub podział na dwie logicznie spójne części, co ułatwiłoby czytelnikowi odbiór i utrzymanie równowagi objętościowej całej dysertacji.

Wnioski sformułowane na podstawie przeglądu literatury oraz zaleceń normowych przedstawionych w rozdziale trzecim stanowiły podstawę opracowania programu badań eksperymentalnych oraz analiz opisanych w kolejnych częściach pracy, ukierunkowanych na weryfikację rzeczywistego wpływu włókien syntetycznych na nośność, deformacje i mechanizmy zniszczenia płyt gruntowych obciążonych siłą skupioną.

W rozdziale czwartym Doktorantka opisała kompleksowy program badań eksperymentalnych, którego celem było określenie wpływu rodzaju i ilości włókien syntetycznych na właściwości mechaniczne betonu oraz na zachowanie półskalowych (semi-full-scale/ semi-large-scale) posadzek przemysłowych SyFRC poddanych działaniu centralnie przyłożonego obciążenia skupionego. Badania przeprowadzono w celu weryfikacji założeń teoretycznych i sformułowanych tez rozprawy. W ramach programu badawczego przygotowano sześć mieszanek betonowych, w tym jedną referencyjną (PC) i pięć zbrojonych włóknami syntetycznymi różnego typu (PM, PD, FF) i dozowania (2 i 3 kg/m³). Wszystkie mieszanki zaprojektowano w klasie wytrzymałości C40/50 i konsystencji F5 zgodnie z zaleceniami PN-EN 206. Włókna o wysokiej odporności chemicznej i różnej geometrii dodawano w postaci luźnych włókien do mieszanek betonowych, celem uzyskania równomiernego rozproszenia zbrojenia w całej objętości kompozytu, co ma bezpośredni wpływ na końcowe parametry wytrzymałościowe i trwałość. Łącznie wykonano 36 próbek sześciennych, 18 belek i 18 płyt o wymiarach 1200 mm x 1200 mm x 200 mm.

Autorski program badań obejmował dwa etapy: badania materiałowe i badania konstrukcyjne. W pierwszym etapie określono właściwości świeżego i stwardniałego betonu, w tym konsystencję, moduł sprężystości, wytrzymałość na ściskanie, rozłupywanie i zginanie, a także energię pęknięcia. Pomiary prowadzono zgodnie z obowiązującymi normami PN-EN i ASTM, wykorzystując m.in. próby trójpunktowego zginania w celu wyznaczenia resztkowych wytrzymałości na rozciąganie po zarysowaniu. Wyniki pozwoliły ocenić wpływ rodzaju i ilości włókien na ciągliwość i zdolność betonu do przenoszenia naprężeń po zarysowaniu. Drugi etap obejmował badania płyt gruntowych poddanych obciążeniu skupionemu. W tym celu opracowano autorskie stanowisko badawcze odwzorowujące rzeczywiste warunki podparcia płyt przemysłowych. Płyty oparto na warstwie podłoża z kruszywa łamanego, którego sztywność kontrolowano przez testy płytą statyczną (VSS) i dynamiczną (LFWD) w celu określenia modułu reakcji podłoża k . Weryfikowano kilka wariantów zagęszczenia i przygotowania gruntu, by zapewnić powtarzalność warunków podparcia. W celu zweryfikowania uzyskanych wyników przebadano również płytę niepodpartą (swobodną). Podczas badań mierzono siłę, przemieszczenia oraz ugięcia i odkształcenia przy użyciu 16 czujników LVDT rozmieszczonych symetrycznie na powierzchni płyty. Obciążenie przykładano siłownikiem hydraulicznym o zakresie do 970 kN, przenosząc siłę przez stalowy stempel o wymiarach 100 mm x 100 mm. Na podstawie rejestrowanych krzywych $F-\delta$ wyznaczano siły zarysowania, nośność graniczną na przebicie oraz odkształcenia towarzyszące zarysowaniu. Po zakończeniu testów analizowano powierzchnię przebicia, określając kąt nachylenia stożkowej powierzchni zniszczenia (θ)

oraz charakter rozwoju rys. Należy podkreślić, że Autorka łącznie przebadła 18 płyt, co pozwoliło ocenić powtarzalność wyników i zminimalizować wpływ niejednorodności mieszanek. Uzyskane dane stanowią podstawę dalszej analizy porównawczej oraz weryfikacji modeli teoretycznych opisanych w kolejnych rozdziałach.

Rozdział piąty zawiera szczegółową analizę wyników badań materiałowych i konstrukcyjnych przeprowadzonych na betonach zbrojonych włóknami syntetycznymi (SyFRC) oraz płytach gruntowych obciążonych siłą skupioną. Celem rozdziału było określenie wpływu rodzaju i ilości włókien na właściwości mechaniczne betonu oraz zachowanie płyt w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

W pierwszej części tego rozdziału Autorka omówiła wyniki badań betonu w stanie świeżym i stwardniałym:

- Badania konsystencji metodą stolika rozplýwowego wykazały znaczne zróżnicowanie urabialności mieszanek (od F3 do F5 wg PN-EN 12350-5), co wiążano z różnicami w wilgotności kruszywa oraz obecnością włókien zwiększających powierzchnię kontaktu z zaczynem cementowym.
- Dla każdego rodzaju betonu (PC, PM, PD, FF) przeprowadzono badania na próbkach sześciennych, walcach i belkach, określając wytrzymałość na ściskanie, rozciąganie przy rozłupywaniu, zginanie, moduł sprężystości oraz energię pęknięcia.
- Dla sześciu badanych typów betonu (1–6) uzyskano zróżnicowane wartości $f_{c,cube}$ i $f_{c,core}$. Największy wzrost wytrzymałości (ok. 50%) odnotowano dla betonów z włóknami PD, natomiast dla PM_3 zanotowano spadek wytrzymałości. Włókna nie wpływały znacząco na $f_{c,cube}$, lecz zmieniały charakter zniszczenia z kruchego (PC) na ciągliwy/ plastyczny (SyFRC). Badania rdzeni pobranych z płyt potwierdziły podobne tendencje, wartości $f_{c,core}$ były niższe o ok. 15% od $f_{c,cube}$, co jest zgodne z zaleceniami normy PN-EN 13791:2008 dotyczącymi różnic między wytrzymałością betonu określaną na rdzeniach i na próbkach sześciennych formowanych laboratoryjnie.
- Oznaczono na rdzeniach moduły pierwotne i wtórne na ($E_{c0,core}$, $E_{cs,core}$). Największe wartości uzyskano w przypadku betonów PD_2 i PD_3, natomiast najniższe dla PM_3. Wzrost zawartości włókien PD z 2 do 3 kg/m³ podniósł moduł o ok. 7–10%. Wyniki te skorelowano z wytrzymałością na ściskanie, a niższe wartości wyjaśniono zastosowaniem żwiru rzeczego o mniejszej przyczepności oraz możliwymi mikrouszkodzeniami podczas wiercenia rdzeni.
- Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu wykonano na połówkach rdzeni po badaniu modułu sprężystości. Włókna PD zwiększały $f_{spl,core}$ nawet o 50% w stosunku do betonu referencyjnego PC, natomiast zwiększenie ilości włókien PM z 2 do 3 kg/m³ powodowało spadek wytrzymałości o 8%. Stwierdzono, że stosunek $f_{ct}/f_{c,core}$ wynosił 8-9%, nieco poniżej wartości teoretycznych (10%).
- Wytrzymałość na zginanie wykonano na belkach (150 mm x 150 mm x 550 mm) wykonano metodą trójpunktowego zginania (3PBT). Beton referencyjny (PC) ulegał natychmiastowemu, kruchemu zniszczeniu, natomiast wszystkie betony SyFRC wykazywały ciągliwe zachowanie po zarysowaniu. Dodatek 2 kg/m³ włókien PM podnosił $f_{ct,L}$ o ok. 8%, a włókien PD nawet o 80–90% w wartościach pozostałych wytrzymałości

$f_{R,j}$. Zbyt duża ilość włókien PM (3 kg/m^3) obniżała zarówno urabialność, jak i wytrzymałość, co wiązano z tworzeniem się aglomeratów.

- Największą energię pęknięcia (ok. 1090 N/m) uzyskano dla PD_3, co potwierdziło znaczący wzrost ciągliwości SyFRC.

Autorka dysertacji wykonała również analizę porównawczą uwzględniającą wpływ rodzaju, ilości i typu włókien, na podstawie której stwierdziła, że:

- Dodatek włókien w ilości 2 kg/m^3 to optymalna ilość (PM_2), która poprawia wszystkie parametry mechaniczne i ciągliwość betonu.
- Nadmierna ilość włókien - 3 kg/m^3 (PM_3) powodowała spadek wytrzymałości i problemy z urabialnością.
- Zwiększenie ilości włókien PD podnosiła wytrzymałość po zarysowaniu i energię pęknięcia.
- Włókna FF poprawiały nośność w fazie przedzarysowaniem (wartości maksymalne momentu zginającego), lecz dawały niższe wartości naprężeń resztkowych niż włókna PM.

Natomiast badania płyt gruntowych obejmowały 18 płyt o wymiarach $1200 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ obciążanych centralnie. Wstępne próby na płytach typu FF_2 (z różnym podłożem) służyły do oceny wpływu podparcia. Parametry sztywności podłoża (moduł odkształcenia E_{vd} , E_{vt}) badano płytą VSS i lekkim deflektometrem (LFWD), uzyskując powtarzalne wartości ok. 139 MPa . Analizie poddano zależność między nośnością, deformacją i morfologią zarysowania. Stwierdzono, że włókna syntetyczne ograniczały zniszczenie kruche i umożliwiały zachowanie integralności płyty nawet po przebiciu. Określono siły zarysowania, nośności graniczne, kształt powierzchni przebicia i kąty stożków zniszczenia.

Wyniki uzyskane przez Doktorantkę na podstawie przeprowadzonego kompleksowego programu badań jednoznacznie wykazały, że dodatek włókien syntetycznych poprawia ciągliwość, odporność na zarysowanie i energię pęknięcia, choć efektywność zależy od typu włókien, ich ilości oraz urabialności mieszanki. Badania płyt gruntowych potwierdziły skuteczność SyFRC w zwiększaniu odporności na przebicie oraz w zachowaniu nośności po zarysowaniu, co stanowi istotny wkład w rozwój metod projektowania przemysłowych posadzek z betonu zbrojonego włóknami syntetycznymi.

W kolejnym 6 rozdziale, Autorka pracy przeprowadziła szeroki przegląd i weryfikację analitycznych modeli obliczeniowych płyt gruntowych obciążonych centralnie siłą skupioną oraz dokonała porównania ich predykcji z wynikami swoich badań doświadczalnych. Analizy wykonała kolejno według metod: Westergaarda (analiza sprężysta), Falknera i in. (plastyczna analiza z uwzględnieniem pracy po zarysowaniu), Shentu i in. (MES/ analiza uogólniona z efektem membranowym), a także Meyerhofa-Losberga w ujęciu TR34 (nośność na zginanie i na przebicie z odwołaniami do PN-EN 1992-1-1). Dane materiałowe do obliczeń (moduł sprężystości, wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie i na zginanie) przyjęto z badań opisanych w rozdz. 5; moduł reakcji podłoża k uzyskano z badań polowych/ laboratoryjnych i korelacji. Celem analiz było odtworzenie sił zarysowania, nośności granicznych i mechanizmów zniszczenia oraz kwantyfikacja udziału: betonu, włókien i podparcia gruntem w nośności na przebicie. W przypadku zastosowania metody Westergaarda, opracowano formułę na siłę inicjacji zarysowania płyty $P_{cr,W}$ i zastosowano ją do wszystkich typów płyt (1–6). Jak oczekiwano, model sprężysty opisuje tylko pierwszą fazę pracy (inicjacja rysy) i zaniża nośność elementów SyFRC (brak resztkowej wytrzymałości rozciągającej po

zarysowaniu). Porównania tabelaryczne uzyskanych wyników analiz pokazały, że $F_{cr1}/P_{cr,W}$ mieściło się zwykle w przedziale ok. 1.1-1.4 (typowo $\sim 1.15-1.37$), co potwierdza konserwatywność metody.

W przypadku metody Falknera i in., Autorka zastosowała dwie postaci zależności: historyczną (z indeksem odporności na pękanie Re) oraz zastępczą formułę z resztkowymi wytrzymałościami na zginanie z 3PBT (zgodnie z aktualną praktyką). Wyznaczono wartość $P_{u,F}$ i zestawiono z wartościami nośności F_{cr1} , F_{cr2} i F_p . W większości przypadków wartość $P_{cr,W}$ była niższa od wartości F_{cr1} (średni zapas $\sim 23\%$), natomiast wartość $P_{u,F}$ często była znacząco większa od wartości F_{cr2} , ale mniejsza od wartości nośności F_p (z wyjątkami dotyczącymi pojedynczych płyt). Zastosowanie drugiego modelu poprawiało zgodność, lecz nadal nie oddawał w pełni obserwowanej nośności na przebicie.

Natomiast, wyznaczone wartości $P_{u,S}$ metodą Shentu i in. okazały się wielokrotnie wyższe od wartości uzyskanych z metod Westergaarda i Falknera oraz znacznie powyżej wyników eksperymentalnych. Rozbieżności te Autorka przypisała m.in. uwzględnieniu działania membranowego (poziomych sił rozciągających) w modelu Shentu, efektu nieaktywnych naroży (ograniczona geometria i brak skrępowania krawędzi).

Doktoranta zastosowała również w analizach model TR34 / model Meyerhofa-Losberga + EC2 (przebicie). Dla każdej płyty obliczono nośność na zginanie (moment dodatni/ujemny) i na przebicie przy dwóch lokalizacjach obwodu krytycznego: rekomendowanej $a = 2d$ (TR34) oraz rzeczywistej a z badań. W obu ujęciach zniszczenie przez przebicie było kryterium decydującym, co potwierdziło poprawność zaprojektowanych badań i analiz. Jednocześnie wykazano, że zastosowanie rzeczywistej a zwiększało przewidywaną nośność i lepiej odwzorowywało obserwacje doświadczalne.

W rozdziale 6 Autorka pracy przeprowadziła również analizy dotyczące udziału betonu, włókien i podłoża w nośności na przebicie (TR34). Przy $a = 2d$ typowy udział wyniósł średnio ok. beton 75%, włókna 10%, grunt 15% dla płyt SyFRC; ok. 83% beton + 17% grunt dla PC. Dla rzeczywistej (mniejszej) a udział betonu wzrósł (ok. 92%), a udział włókien i gruntu zmalał (ok. 5% i 4%). Wskazano, że TR34 zaniża wkład włókien (ostrożna formuła szacowania nośności v_f przy niewielkiej liczbie danych) i upraszcza/ ogranicza udział gruntu.

Autorka pracy, w rozdziale 6 przeprowadziła także weryfikację formuł na wytrzymałość v_f (udział włókien na przebicie). Aby poprawić zgodność, przeliczono wartość wytrzymałości v_f wg metod zalecanych w RILEM TC 162-TDF, PN-EN 1992-1-1:2024 i Model Code 2010. Największy udział włókien (i najlepszą zbieżność trendów) dał model MC2010 (wzrost wartości $P_{p,f,a} \geq 4.9x$ względem metody TR34); metoda zalecana w EC2:2024 dawała wartości o 22-51% mniejsze od wartości z modelu MC2010, ale istotnie wyższe niż w przypadku metody TR34; wartości z modelu RILEM były bliskie wartościom z modelu TR34. Mimo korekt zastosowanych przez Autorkę, analityczne wyznaczone wartości nośności F_p nadal były zaniżone (względem wartości z przeprowadzonych badań) o ok. 60% (metoda TR34), 57% (metoda RILEM), 43% (metoda EC2:2024) i 33% (model MC2010), co przypisano m.in. różnicom schematu statycznego i rozkładu nacisków gruntu względem założeń zdefiniowanych w modelu TR34.

W rozdziale tym, zaproponowano także modyfikację modelu rozkładu nacisku podłoża (odejście od stałych 85% na obwodzie, uwzględnienie rzeczywistej odległości b do zaniku nacisku oraz nacisków bezpośrednio pod płytą), co sformalizowano w równaniu korygującym

siłę $P_{p,g,a}$. Efekt korekty był niewielki (średni wzrost udziału gruntu z ok. 3.6% do 4.1%), co potwierdza, że uproszczenia w modelu TR34 w tym zakresie są wystarczająco dokładne, jednocześnie wykazano, że wzrost a zwiększa relatywny udział gruntu w przenoszeniu sił przebiccia.

Autorka pracy stwierdzała, że w przeprowadzonych doświadczeniach pierwsze zarysowania były zginające, zweryfikowano hipotezę niepełnego kontaktu z gruntem i/lub niejednorodnego oparcia na obwodowych podporach przegubowych. Policzone nośności zginania płyt swobodnie podpartych na dwóch i czterech krawędziach (metody: Starosolski, Timoshenko i in., Niezgodziński i in.) wykazały systematyczne niedoszacowanie względem wartości F_{cr1} (średnio do 73%, 72%, 61% i 43% wartości F_{cr1}), a także niespójność trendu (4 krawędzi podparcia dawały wyniki gorsze od schematu 2 krawędzie podparte), co wskazuje na ograniczenia tych wzorów w rozważanych schematach podparcia. Autorka sformułowała więc wniosek, że w początkowej fazie płyty miały częściowy kontakt z gruntem (stąd wartości F_{cr1} są większe niż w prostych schematach podparcia).

W rozdziale 6, Autorka dysertacji zaproponowała nowe ujęcie: płyta na gruncie z liniowym podparciem krawędzi. Ponieważ literatura nie podaje rozwiązań dla płyt jednocześnie wspartych sprężysto podłożem i liniowo na krawędziach, Autorka przygotowała uproszczone modele inżynierskie. W programie ABC Płyta (Profsoft Gliwice, 2025) zasymulowano płytę 1200×1200×200 mm na podłożu Winklera, z różnymi wariantami podparcia krawędzi (2 przeciwległe, 3 krawędzie, 2 sąsiednie, 4 krawędzie), obciążoną jednorazowo $P=1$ kN na 100×100 mm. Z modeli wyprowadzono bezwymiarowe parametry α i β do obliczania momentów M_x , M_y i odpowiadających nośności na zginanie. Wykazano, że większa liczba podparć krawędziowych zwiększa dopuszczalne obciążenie, a dodanie podłoża do układu „płyta na 4 krawędziach podparta” podnosi progowe wartości P nawet o ~45% względem klasycznego ujęcia - płyta swobodnie podparta (Starosolski). Autorka porównała uzyskane wartości z wartością F_{cr1} , wskazując, że ujęcie „płyta na gruncie + krawędzie” lepiej opisuje fazę inicjacji zarysowań niż proste schematy swobodnego podparcia.

W rozdziale tym, Doktorantka sformułowała także kluczowe wnioski praktyczne, stwierdzając, że:

- Udział włókien w nośności na przebiccie płyt SyFRC jest wyraźny i zauważalny w przeprowadzonych w doświadczeniach (np. +47% dla 2 kg/m³ PM), a zastosowanie metody TR34 zaniża go, stąd wniosek, że metody zalecane w EC2:2024 i MC2010 lepiej szacują wartość wytrzymałości v_f i wykazują większą zbieżność z wartościami uzyskanymi z eksperymentu ($5 > 4 > 2 > 3$).
- Udział gruntu w przebicciu jest umiarkowany i wrażliwy na a ; korekty rozkładu nacisków nie zmieniają zasadniczo wniosków.
- Rzeczywiste położenie obwodu krytycznego istotnie poprawia zgodność obliczeń z wynikami badań laboratoryjnych.
- Mimo szeregu udoskonaleń, pełna zgodność obliczenia analitycznego a eksperyment nie została osiągnięta z uwagi na różnice schematu statycznego i ograniczenia geometryczne stanowiska, ale zastosowane modele z poprawkami (a , v_f , reakcja gruntu), zachowują bezpieczny margines i dostatecznie opisują nośność na przebiccie płyt SyFRC.

W rozdziale siódmym przeprowadzono kompleksową dyskusję wyników badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych, zestawiając uzyskane dane z literaturą

i obowiązującymi normami. Celem było zintegrowanie wniosków z całej pracy oraz ocena wiarygodności zastosowanych modeli obliczeniowych w odniesieniu do zachowania płyt gruntowych z betonu zbrojonego włóknami syntetycznymi (SyFRC). W pierwszej części potwierdzono, że SyFRC wykazuje wyraźnie większą ciągliwość i zdolność przenoszenia sił po zarysowaniu w porównaniu z betonem zwykłym (PC). Zależności między siłami zarysowania płyt (F_{cr1} , F_{cr2}) a resztkowymi wytrzymałościami na rozciąganie z prób belek (3PBT) wykazały dobrą korelację – szczególnie dla $f_{R,1}$ i $f_{R,3}$.

Stwierdzono, że wyniki z prób belek mogą stanowić wiarygodny wskaźnik zachowania płyt, mimo że nie uwzględniają interakcji grunt-płyta. Porównanie modeli analitycznych wykazało, że metody Westergaarda i Falknera znacznie niedoszacowują nośność płyt (o 1,4–3,8 razy), natomiast metoda Shentu przeszacowuje wyniki, co wiąże się z uwzględnieniem efektu membranowego niewystępującego w badanych płytach. W odniesieniu do analizy przebiegu potwierdzono, że przyjęcie obwodu krytycznego w odległości $a = 2d$ (wg TR34) prowadzi do zaniżenia nośności o ok. 68%. Zastosowanie rzeczywistego położenia obwodu z badań oraz uwzględnienie wkładu włókien syntetycznych (v_f) według Model Code 2010 lub PN-EN 1992-1-1:2024 znacząco poprawia dokładność obliczeń. Eksperymentalnie potwierdzono, że zwiększenie ilości włókien syntetycznych powoduje wzrost nośności na przebiegu, zmianę geometrii stożka zniszczenia z prostopadłościowej (PC) w ścięto-stożkową (SyFRC) oraz przesunięcie obwodu krytycznego bliżej środka obciążenia ($a = 0.64\text{--}0.98d$). Wyniki te są zgodne z nowymi zapisami normy PN-EN 1992-1-1:2024, w której przyjęto $a = 0.5d$. Zidentyfikowany mechanizm zniszczenia wszystkich płyt gruntowych miał charakter przebiegu, poprzedzony powstaniem jednej lub dwóch rys zginających. Zarysowania rozwijały się głównie w kierunku osi symetrii, zgodnie z obserwacjami literaturowymi i wytycznymi CNR-DT 204/2006. W części krytycznej rozdziału podkreślono, że praca stanowi pierwsze kompleksowe opracowanie dotyczące wpływu rodzaju i ilości włókien syntetycznych na nośność, odkształcalność i mechanizm zniszczenia płyt gruntowych. Wskazano jednocześnie ograniczenia badań: trudności w zapewnieniu jednorodnych warunków podparcia i rozkładu włókien, ograniczoną wielkość próbek, uproszczony model podłoża Winklera oraz brak walidacji numerycznej (MES). Pomimo tych ograniczeń, eksperymenty dostarczyły spójnych, powtarzalnych danych i potwierdziły zasadność stosowania SyFRC w płytach przemysłowych. Rozdział kończy się rekomendacjami dotyczącymi dalszych badań, obejmującymi potrzebę testów płyt odlewanych bezpośrednio na gruncie, zastosowanie metod optycznych do monitoringu rys oraz rozwój modeli numerycznych celem wierniejszego odwzorowania interakcji płyta-podłoże.

Rozdział ósmy stanowi podsumowanie całej dysertacji, obejmując syntetyczne wnioski z badań eksperymentalnych, analiz teoretycznych oraz ocenę postawionych tez. Autorka dokonała kompleksowej oceny wpływu rodzaju i ilości włókien syntetycznych (SyFs) na właściwości betonu zbrojonego włóknami (SyFRC) oraz na nośność na przebiegu posadzek przemysłowych obciążonych siłą skupioną. W części wprowadzającej zestawiono główne cele pracy i potwierdzono ich pełną realizację. Następnie przedstawiono najważniejsze osiągnięcia badawcze i wnioski praktyczne:

- Dodatek włókien syntetycznych znacząco poprawił zachowanie betonu po zarysowaniu, zwiększając ciągliwość, wytrzymałość resztkową na zginanie i zdolność pochłaniania

energii. W płytach gruntowych SyFRC uzyskano wzrost nośności na zginanie o 4-28%, a na przebicie o 18–47% w porównaniu z betonem niezbrojonym.

- Zwiększenie ilości włókien z 2 do 3 kg/m³ powodowało dalszy wzrost nośności (średnio o ok. 15%), jednak zbyt wysoka zawartość obniżała urabialność i jednorodność mieszanki.
- Włókna zmieniały mechanizm zniszczenia z kruchego na bardziej ciągliwy oraz wpływały na kształt powierzchni przebicia z prostopadłościenną (PC) do nieregularnie ścięto-stożkowej (SyFRC).
- Dla płyt z SyFRC określono rzeczywistą lokalizację obwodu krytycznego w zakresie $a = 0.64-0.98d$, co jest zgodne z nową normą PN-EN 1992-1-1:2024, zalecającą $a = 0.5d$.

Autorka podkreśliła, że porównanie z modelami analitycznymi wykazało, że metody Westergaarda i Falknera znacznie zaniżają nośność, a Shentu ją przeszacowuje. Najlepsze wyniki uzyskano stosując wytyczne TR34 z poprawkami uwzględniającymi rzeczywistą wartość a oraz udział włókien według zaleceń Model Code 2010 lub PN-EN 1992-1-1:2024.

Wnioski praktyczne sformułowane przez Doktorantkę podkreślają, że zbrojenie włóknami syntetycznymi jest szczególnie zalecane w posadzkach przemysłowych narażonych na obciążenia skupione, gdy wymagana jest zwiększona odporność na zarysowanie, przebicie oraz zachowanie integralności po uszkodzeniu. Za najskuteczniejsze uznano włókna w ilości ok. 2 kg/m³, przy zachowaniu odpowiedniej urabialności mieszanki. Autorka wskazała również, że metoda sformułowana w TR34 pozostaje najbardziej użytecznym dokumentem projektowym płyt SyFRC, ale wymaga uzupełnienia o nowe zapisy normy PN-EN 1992-1-1:2024 dotyczące obwodu krytycznego i udziału włókien w nośności na ścinanie. Na podkreślenie zasługuje, że Autorka samodzielnie odniosła się do weryfikacji postawionych tez badawczych. Jak wskazano w zakończeniu pracy, z pięciu sformułowanych tez cztery zostały potwierdzone w pełni, natomiast pierwsza i piąta częściowo, co wynikało głównie ze zmienności właściwości mieszanek betonowych oraz ograniczonej liczby przebadanych próbek. Rozdział kończy się zaleceniami dalszych badań, obejmujących wpływ interakcji płyta - grunt oraz różne typy i konfiguracje włókien.

Rozdział dziewiąty wskazuje kierunki dalszych badań, które mogą poszerzyć i uogólnić wnioski uzyskane w ramach pracy. Autorka podkreśla, że mimo szerokiego zakresu badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych, przeprowadzone studium obejmowało jedynie ograniczony zestaw warunków, materiałów i geometrii próbek, co pozostawia przestrzeń do dalszych, bardziej zaawansowanych analiz. W pierwszej kolejności zaproponowano wykorzystanie metod numerycznych (MES) do odwzorowania rzeczywistej pracy płyt PC i SyFRC zarówno niepodpartych, jak i opartych na gruncie. Modele te powinny umożliwić analizę wpływu niepełnego kontaktu płyty z podłożem, zróżnicowanych warunków podparcia oraz rodzaju i ilości włókien na siły zarysowania, nośność na przebicie i rozwój pęknięć. Modelowanie komputerowe pozwoliłoby również na ocenę zjawisk trudnych do obserwacji eksperymentalnej, jak uplastycznienie naroży czy odrywanie krawędzi płyty od gruntu. Kolejny kierunek badań dotyczy rozszerzonych analiz materiałowych z uwzględnieniem szerszej gamy makrowłókien syntetycznych, systemów hybrydowych (np. włókna makro + mikro lub syntetyczne + stalowe), różnych dawek włókien i klas betonu. Porównanie płyt SyFRC, SFRC i tradycyjnie zbrojonych pozwoliłoby jednoznacznie określić wpływ rodzaju zbrojenia na mechanizm przebicia. Autorka zwraca również uwagę na potrzebę badań płyt przy różnych schematach obciążenia:

mimośrodowych, wielopunktowych, liniowych oraz dynamicznych i zmęczeniowych, które lepiej odzwierciedlałyby rzeczywiste warunki pracy posadzek przemysłowych. Istotny kierunek według Autorki stanowią także badania nad wpływem podłoża, jego modułu reakcji, rodzaju gruntu, grubości i stopnia zagęszczenia. Analiza pracy płyt na niejednorodnych podłożach (np. częściowo zagęszczonych) umożliwiłaby ocenę wrażliwości konstrukcji na warunki rzeczywiste. Autorka, w tym rozdziale zaproponowała również badania w skali rzeczywistej, prowadzone na płytach wykonywanych bezpośrednio na naturalnym podłożu, co pozwoliłoby ocenić wpływ efektu skali i rozkładu nacisków gruntu na nośność i deformacje. Wreszcie, Autorka rekomenduje wprowadzenie zaawansowanych metod pomiarowych i monitoringu, takich jak emisja akustyczna, czujniki odkształceń, korelacja obrazu (DIC) czy światłowodowe systemy tensometryczne, które umożliwią dokładne śledzenie procesu zarysowania i deformacji w czasie rzeczywistym. Podsumowując, rozdział dziewiąty stanowi plan dalszego rozwoju badań nad SyFRC, ukierunkowany na pogłębienie wiedzy o interakcji płyta–grunt, walidację wyników eksperymentalnych oraz opracowanie uniwersalnych zasad projektowania i wymiarowania płyt gruntowych z betonu zbrojonego włóknami syntetycznymi.

3. Ocena merytoryczna pracy

Recenzowana rozprawa doktorska ma charakter eksperymentalno-analityczny, łącząc w sobie badania laboratoryjne, analizy porównawcze oraz opracowanie autorskich modeli obliczeniowych. Temat pracy – dotyczący nośności na przebicie płyt betonowych zbrojonych włóknami syntetycznymi (SyFRC) podpartych na gruncie – należy uznać za aktualny i istotny, zarówno z naukowego, jak i praktycznego punktu widzenia. Problematyka ta wpisuje się w światowe trendy rozwoju zrównoważonego budownictwa, a jednocześnie odpowiada na lukę badawczą związaną z brakiem wiarygodnych wytycznych projektowych posadzek przemysłowych z SyFRC.

Zakres merytoryczny pracy jest spójny z przyjętymi celami i tezami badawczymi. Autorka zaprojektowała i przeprowadziła kompleksowy program badawczy, obejmujący badania właściwości mechanicznych mieszanek oraz pełnoskalowe testy płyt podpartych na gruncie. Przeprowadzone eksperymenty wykonano z dużą starannością metodologiczną, przy wykorzystaniu autorskiego stanowiska badawczego odwzorowującego rzeczywiste warunki pracy płyt posadzkowych. Wyniki badań zostały szczegółowo przeanalizowane, a następnie skonfrontowane z obliczeniami wykonanymi według modeli teoretycznych i wytycznych normowych (TR34, MC2010, RILEM, PN-EN 1992-1-1).

Na szczególne podkreślenie zasługuje autorski wkład Doktorantki w rozwój wiedzy w dyscyplinie Inżynieria lądowa, geodezja i transport tj. opracowanie metody walidacji modeli analitycznych, wprowadzenie koncepcji zastępczego obwodu kontrolnego stożka przebicia oraz analityczne rozróżnienie wpływu betonu, włókien i podłoża na całkowitą nośność płyty. Autorka trafnie zidentyfikowała ograniczenia istniejących procedur obliczeniowych oraz zaproponowała modyfikacje zwiększające ich dokładność.

Wyniki pracy mają znaczenie aplikacyjne, mogą być wykorzystane przy projektowaniu i ocenie trwałości płyt przemysłowych z betonu zbrojonego włóknami syntetycznymi. Jednocześnie opracowanie to stanowi wartościowy wkład poznawczy,

poszerzający dotychczasowy stan wiedzy o mechanizmach przebicia płyt na gruncie.

Z merytorycznego punktu widzenia rozprawa jest kompletna, logicznie ustrukturyzowana i oparta na solidnych podstawach teoretycznych i eksperymentalnych. Zrealizowane badania i analizy potwierdzają postawione tezy, a uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę dalszych, pogłębionych badań numerycznych i normowych.

Według recenzenta, główne osiągnięcia rozprawy to:

- ✓ opracowanie autorskiego stanowiska badawczego umożliwiającego prowadzenie pełnoskalowych badań płyt gruntowych obciążonych centralnie siłą skupioną,
- ✓ zaprojektowanie i realizacja kompleksowego programu eksperymentalnego, obejmującego zarówno badania materiałowe, jak i konstrukcyjne,
- ✓ opracowanie metodyki analizy nośności na przebicie płyt z betonu zbrojonego włóknami syntetycznymi (SyFRC), z uwzględnieniem wpływu rodzaju włókien, ich dawki oraz sztywności podłoża,
- ✓ krytyczna ocena i weryfikacja istniejących modeli analitycznych i normowych (Westergaard, Falkner, Shentu, TR34, MC2010, PN-EN 1992-1-1) w odniesieniu do rzeczywistych wyników badań,
- ✓ określenie udziału betonu, włókien i podłoża w całkowitej nośności na przebicie oraz identyfikacja zmian w mechanizmie zniszczenia w zależności od rodzaju włókien syntetycznych.

Natomiast za najważniejszy oryginalny dorobek poznawczy Autorki należy uznać:

- ✓ opracowanie nowego podejścia do analizy przebicia płyt gruntowych SyFRC, uwzględniającego rzeczywiste położenie obwodu krytycznego i wpływ włókien syntetycznych,
- ✓ empiryczne potwierdzenie korelacji między wynikami z prób belkowych (3PBT) a nośnością płyt, co stanowi istotny krok w kierunku uproszczenia procedur projektowych,
- ✓ sformułowanie praktycznych zaleceń projektowych dotyczących stosowania SyFRC w posadzkach przemysłowych,
- ✓ wniesienie znaczącego wkładu w rozwój wiedzy na temat mechanizmu przebicia i pracy po zarysowaniu płyt opartych na gruncie.

4. Uwagi o charakterze dyskusyjnym

Recenzowana praca stanowi interesujące, całościowe i nowatorskie opracowanie dotyczące zachowania się płyt gruntowych z betonu zbrojonego włóknami syntetycznymi (SyFRC) obciążonych centralnie siłą skupioną. Autorka trafnie wybrała temat badań, ponieważ problematyka nośności na przebicie w tego typu konstrukcjach, mimo rosnącego zastosowania betonu włóknistego w posadzkach przemysłowych, pozostaje wciąż niedostatecznie rozpoznana w literaturze i normach projektowych. Brak jednoznacznych wytycznych dotyczących obliczeń i oceny mechanizmu przebicia w płytach SyFRC uzasadnia podjęcie tego zagadnienia na poziomie rozprawy doktorskiej.

Poprzez przeprowadzone badania Autorka wykazała wysokie kompetencje badawcze i inżynierskie, projektując oraz realizując autorskie stanowisko badawcze, które w wiarygodny sposób odwzorowuje rzeczywiste warunki pracy płyt gruntowych. Należy podkreślić, że opracowane stanowisko badawcze i program eksperymentalny wnoszą istotny

wkład do metodologii badań konstrukcji z betonu włóknistego. Docenić należy również dbałość

o dokładność pomiarów, powtarzalność wyników oraz analizę różnych wariantów materiałowych, co potwierdza szeroki i przemyślany zakres badań.

Na uwagę zasługuje rozdział 3, stanowiący kompendium wiedzy teoretycznej i normatywnej w zakresie płyt gruntowych z betonu zbrojonego włóknami syntetycznymi. Autorka w sposób wyjątkowo rzetelny zebrała, uporządkowała i porównała dostępne modele analityczne, przedstawiła aktualne normy badawcze i projektowe, a także omówiła metody oceny właściwości mechanicznych FRC. Wskazano również ograniczenia istniejących metod oraz brak jednoznacznych zaleceń normowych dotyczących oceny nośności na przebicie płyt SyFRC. Rozdział ten, choć niezwykle cenny merytorycznie, jest nieproporcjonalnie obszerny w stosunku do pozostałych części dysertacji. Z punktu widzenia struktury pracy korzystne byłoby jego częściowe skrócenie lub podział na dwie spójne części, co poprawiłoby przejrzystość układu i ułatwiło odbiór treści.

W części doświadczalnej zauważa się, że opisy przebiegu badań i wyników poszczególnych płyt miejscami powtarzają się, co czyni niektóre fragmenty rozdziałów zbyt rozbudowanymi. Z punktu widzenia redakcyjnego większą czytelność pracy zapewniłoby umieszczenie szczegółowych danych, zestawień tabelarycznych i fotografii w załącznikach, pozostawiając w głównej treści jedynie uogólnione wnioski i komentarze porównawcze. Nie wpływa to jednak na wysoką ocenę merytoryczną rozprawy, a jedynie na jej stronę redakcyjną. Skrócenie tych fragmentów pozwoliłoby lepiej zachować proporcje objętościowe między rozdziałami oraz zwiększyć spójność i przejrzystość treści pracy.

W kontekście całości rozprawy warto zauważyć, że w przeprowadzonych analizach nie uwzględniono możliwego wzrostu modułu sztywności podłoża gruntowego wraz z głębokością. Przyjęcie podłoża o stałym module reakcji (model Winklera) stanowi istotne uproszczenie, które może wpływać na rozkład naprężeń kontaktowych i lokalną deformację płyty w strefie przebicia. W literaturze geotechnicznej (m.in. Janbu, Burland, Schanz) podkreśla się, że sztywność gruntu wzrasta nieliniowo z głębokością, co prowadzi do zmniejszenia osiadań i zwiększenia efektywnej nośności płyty. Brak uwzględnienia tej zależności w analizach może powodować nieznaczące przeszacowanie deformacji i lokalnych ugięć, szczególnie płyt o większej rozpiętości lub przy wyższych wartościach obciążeń skupionych. Warto byłoby w przyszłości rozszerzyć badania o modele uwzględniające zmienność modułu odkształcalności z głębokością, co pozwoliłoby na jeszcze dokładniejsze odwzorowanie współpracy płyty z podłożem.

Należy podkreślić, że praca ma wyraźny charakter aplikacyjny, uzyskane wyniki i sformułowane rekomendacje mogą być bezpośrednio wykorzystane w praktyce projektowej płyt przemysłowych oraz w dalszym rozwoju wytycznych dotyczących projektowania konstrukcji z SyFRC. Przeprowadzone badania oraz zaproponowane analizy stanowią pionierski krok w kierunku pełniejszego zrozumienia mechanizmu przebicia i wpływu włókien syntetycznych na nośność oraz deformacje płyt opartych na gruncie.

5. Uwagi do recenzowanej pracy:

✓ Uwagi o charakterze szczegółowym

1. W części analitycznej pracy (rozdz. 6) Autorka wykorzystwała model podłoża Winklera

- o stałym module reakcji gruntu k . Warto byłoby wyjaśnić, czy rozważano możliwość uwzględnienia zmiennego modułu sztywności gruntu z głębokością, który jak wskazują liczne opracowania geotechniczne (m.in. Janbu, Schanz, Burland), może znacząco wpływać na rozkład nacisków pod płytą i wartości osiadań. Uproszczenie to mogło mieć wpływ na dokładność odwzorowania współpracy płyta–grunt.
2. W rozdziale dotyczącym analizy przebicia (6.5 i 6.6) warto byłoby doprecyzować sposób wyznaczania obwodu krytycznego a , zwłaszcza w odniesieniu do rzeczywistego kąta powierzchni zniszczenia θ . Czy Autorka analizowała zależność między kątem nachylenia stożka przebicia a rodzajem i ilością włókien syntetycznych?
 3. W badaniach materiałowych (rozd. 4) wskazano, że włókna były dodawane do mieszanki w określonych proporcjach wagowych. Czy w trakcie mieszania weryfikowano jednorodność rozkładu włókien w mieszance betonowej, np. poprzez analizę próbek z różnych części wytworzonej partii betonu?
 4. W części doświadczalnej wyniki z poszczególnych płyt przedstawiono w powtarzalnej formie, co zwiększa przejrzystość, jednak część danych jest bardzo szczegółowa. Warto rozważyć przeniesienie niektórych zestawień i wykresów do załączników, co pozwoliłoby skrócić główny tekst i poprawić czytelność dysertacji.
 5. W rozdziale 5, przy opisie mechanizmu zniszczenia, Autorka podaje wartości kątów nachylenia powierzchni przebicia θ . Czy wykonano analizę korelacji między tym kątem a maksymalnym przemieszczeniem lub nośnością płyty? Zależność ta mogłaby stanowić cenny element poznawczy pracy.
 6. W odniesieniu do przyjętych modeli analitycznych: Westergaarda, Falknera, Shentu i Meyerhofa–Losberga, warto byłoby wyjaśnić kryteria wyboru tych metod oraz podać argumenty, dlaczego pominięto inne modele (np. Boussinesqa, Kerr’a lub Vesica), które również opisują pracę płyt na sprężystym podłożu.
 7. Przy porównaniu wyników eksperymentalnych z obliczeniami wg TR34 i MC2010 zauważono zaniżenie nośności analitycznej. Czy Autorka rozważała możliwość skalowania wyników z uwzględnieniem efektu wymiaru płyty (efektu skali) lub zróżnicowania podparcia rzeczywistego względem teoretycznego?
 8. W rozdziale 7 omówiono zależność pomiędzy wynikami testów belkowych (3PBT) a nośnością płyt. Warto byłoby rozwinąć tę część o krótkie odniesienie do koncepcji równoważności energii pęknięcia (fracture energy equivalence), co wzmocniłoby podstawę teoretyczną obserwowanego zjawiska.
 9. W pracy przedstawiono wartości resztkowych wytrzymałości na zginanie f_{R1} – f_{R4} . Warto byłoby wskazać, czy przyjęte parametry odpowiadają klasom włókien syntetycznych zgodnie z EN 14889-2, a jeśli nie, czy Autorka proponuje własną klasyfikację w kontekście wyników uzyskanych w pracy.
 10. W odniesieniu do porównania modeli analitycznych i eksperymentu, czy Autorka analizowała wpływ nierównomiernego kontaktu płyty z podłożem (np. chwilowego oderwania stref skrajnych przy większych ugięciach)? Taki efekt mógł wpływać na rozbieżności między modelem a rzeczywistością.
 11. Ciekawym uzupełnieniem badań byłyby również analiza wpływu właściwości podłoża (modułu reakcji, zagęszczenia, wilgotności) na nośność i deformacje płyt. Czy w planowanych dalszych badaniach (rozd. 9) Autorka zamierza rozszerzyć zakres

eksperymentów o ten aspekt?

12. W przeprowadzonych badaniach zastosowano typową, inżyniersko uzasadnioną zawartość włókien syntetycznych na poziomie 2 kg/m^3 , zgodną z zaleceniami TR34 i fib Model Code 2010 dla płyt przemysłowych. Dobór ten nie wynikał z klasycznych zasad zbrojenia konstrukcyjnego, lecz z założeń materiałowych charakterystycznych betonu zbrojonego włóknami, w którym o właściwościach nośnych decyduje klasa zachowania po zarysowaniu, a nie procent zbrojenia w przekroju. W przypadku płyt z SyFRC nie istnieją jednoznaczne normy obliczeniowe określające zastępczy stopień zbrojenia (tak jak w żelbecie wg PN-EN 1992-1-1). Zamiast tego, projektowanie opiera się na: wynikach badań prób zginania belek wg PN-EN 14651, charakterystyce naprężenie-rozwartość rysy (σ - w) oraz energii pęknięcia (fracture energy) i klasie zachowania po zarysowaniu (np. FRC class 1b, 2a, 3b wg MC2010). Według recenzenta, 2 kg/m^3 dobrano nie jako „zbrojenie”, lecz jako parametr materiałowy, zapewniający określone właściwości reologiczne i wytrzymałościowe, potwierdzone badaniami materiałowymi w rozdziale 4 pracy. Dlatego, w pracy warto byłoby doprecyzować przesłanki doboru ilości włókien syntetycznych na poziomie 2 kg/m^3 , wskazując jednoznacznie, czy wartość ta została przyjęta w oparciu o zalecenia normatywne (np. TR34, fib Model Code 2010) czy wynikała z wcześniejszych badań własnych lub literaturowych. Uzupełnienie tego elementu pozwoliłoby lepiej zrozumieć zależność pomiędzy przyjętą zawartością włókien, a uzyskanymi wynikami dotyczącymi nośności na przebicie i deformacji posadzek przemysłowych/ płyt opartych na gruncie. Dodatkowo warto byłoby rozważyć odniesienie ilości włókien do klasy zachowania po zarysowaniu (*post-cracking behavior class*) w rozumieniu fib Model Code 2010, co umożliwiłoby szersze porównanie wyników z literaturą międzynarodową.
13. W pracy słusznie wskazano, że nośność na przebicie zwiększa się wraz ze wzrostem ilości włókien syntetycznych. Warto jednak zaznaczyć, że przy wyższych zawartościach włókien obserwuje się również pogorszenie urabialności mieszanki betonowej, co może wpływać na jednorodność materiału. Wskazane byłoby odniesienie się do tego zjawiska w kontekście praktycznych ograniczeń technologicznych.
14. W rozdziale dotyczącym wniosków Autorka potwierdziła większość tez pracy, natomiast nie sprecyzowała, które z uzyskanych wyników mają największe znaczenie aplikacyjne (np. projektowania płyt przemysłowych, magazynowych, drogowych). Takie doprecyzowanie zwiększyłoby wartość praktyczną opracowania.
15. W kontekście analiz numerycznych, które Autorka wskazała jako potencjalny kierunek dalszych badań (rozd. 9), warto byłoby rozważyć implementację modelu nieliniowego podłoża (np. *Hardening Soil*) w środowisku MES, co pozwoliłoby na pełniejsze odwzorowanie współpracy płyta-grunt i zróżnicowania sztywności w funkcji głębokości.

✓ Uwagi stylistyczne i edytorskie

- Dla zachowania przejrzystości zaleca się jednoznaczne zdefiniowanie akronimów FRC, SyFRC, SFRC w rozdziale List of Basic Symbols oraz konsekwentne stosowanie ich w całym tekście.
- W niektórych miejscach tekstu (np. rozdz. 2 i 3) występują drobne powtórzenia zwrotów typu „w pracy przedstawiono”, „Autorka omówiła”. W części wstępnej i opisowej korzystne

byłoby zastosowanie strony biernej (np. „przedstawiono”, „omówiono”), co nadałoby wypowiedzi bardziej naukowy charakter.

- W tekście pojawia się kilka drobnych niekonsekwencji typograficznych, np. brak jednostek przy wymiarach (zapis 150 x 2500 x 2500 mm zamiast 150 mm x 2500 mm x 2500 mm). Zaleca się ujednoczenie zapisu wartości liczbowych i jednostek zgodnie z zasadami układu SI.
- W poprawnym i precyzyjnym języku technicznym nie powinno się pisać „weight of cast cubes”, jeśli nie ma potrzeby podkreślania samego procesu formowania próbek. Sformułowanie „weight of cubes” jest krótsze, bardziej naturalne i w pełni zrozumiałe w kontekście badań laboratoryjnych nad betonem. W literaturze technicznej (np. PN-EN, EN, ACI, RILEM, ASTM) przyjęło się właśnie to określenie.
- W tabeli 3.4 i w przywołanej w jej treści bibliografii występuje niespójność w oznaczeniu źródła literaturowego: zapisano Hajduk [29], podczas gdy zgodnie z kolejnością cytowań w tekście powinno być Hajduk [24]. Zaleca się korektę numeracji odwołania w celu zachowania zgodności między powołaniem w tabeli a wykazem literatury.
- W pracy występują bardzo rozbudowane fragmenty opisowe (szczególnie w rozdziałach 4 i 5). W niektórych miejscach można je skrócić, co poprawiłoby odbiór tekstu.
- Przy przywoływaniu norm (np. PN-EN 14651, PN-EN 1992-1-1) wskazane byłoby ujednoczenie sposobu ich zapisu i cytowania, tak aby zachować spójność w całej pracy. Należy konsekwentnie stosować jeden format odniesienia np. przez odwoływanie się do pełnego oznaczenia norm wydanych przez Polski Komitet Normalizacyjny (PKN) lub, w przypadku odniesień do wersji europejskich, do norm EN publikowanych przez CEN (Bruksela). Warto przyjąć jednolity zapis w całym tekście, analogiczny do tego zastosowanego w tekście pracy lub np. w tabeli 4.3, gdzie format cytowania jest przejrzysty i zgodny z zasadami edytorskimi obowiązującymi w zagranicznych publikacjach naukowych.

Należy podkreślić, że tekst zasadniczy pracy został przygotowany z dużą starannością i nie zawiera błędów językowych. Reasumując, zdaniem recenzenta, mimo drobnych uchybień o charakterze edytorskim, praca została napisana na bardzo wysokim poziomie językowym i redakcyjnym, z zachowaniem zasad poprawności terminologicznej i stylistycznej właściwej dla opracowań naukowych.

6. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska jest wartościowym i oryginalnym opracowaniem eksperymentalno-teoretycznym o dużym znaczeniu poznawczym i aplikacyjnym, dotyczącym zachowania się posadzek przemysłowych z betonu zbrojonego włóknami syntetycznymi (SyFRC) poddanych działaniu centralnego obciążenia skupionego. Tematyka pracy jest aktualna i istotna zarówno z punktu widzenia nauki o konstrukcjach betonowych, jak i praktyki inżynierskiej, szczególnie w kontekście rosnącego zastosowania betonów włóknistych w posadzkach przemysłowych i fundamentach powierzchniowych.

Na szczególne podkreślenie zasługuje autorskie opracowanie stanowiska badawczego oraz szeroki program badań eksperymentalnych, które umożliwiły określenie wpływu rodzaju i ilości włókien syntetycznych na nośność, deformacje i mechanizm przebicia płyt opartych na gruncie. Wysoką wartość naukową mają również analizy porównawcze z wybranymi

modelami teoretycznymi oraz ocena przydatności obowiązujących zaleceń normowych (m.in. TR34, MC2010) w odniesieniu do płyt SyFRC.

Przeprowadzona przez Doktorantkę analiza wyników jest wnikliwa i rzetelna, a sformułowane wnioski i rekomendacje projektowe mają wymiar praktyczny i mogą być wykorzystane w inżynierskiej praktyce projektowej oraz przy opracowywaniu przyszłych wytycznych dotyczących konstrukcji z betonu zbrojonego włóknami syntetycznymi.

7. Konkluzja

Stwierdzam, że główny cel rozprawy doktorskiej został w pełni osiągnięty, a Autorka wykazała się dogłębną znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie podjętej problematyki oraz umiejętnością rozwiązywania złożonych problemów teoretycznych i eksperymentalnych.

Uzyskane wyniki mają charakter oryginalny i wnoszą istotny wkład w rozwój wiedzy o mechanizmach przebicia w płytach gruntowych z betonu zbrojonego włóknami syntetycznymi. Autorka umiejętnie przeprowadziła analizę uzyskanych rezultatów, poddała je krytycznej ocenie i na tej podstawie sformułowała poprawne, logicznie uzasadnione wnioski o dużej wartości poznawczej i aplikacyjnej.

Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że Doktorantka dostrzega kierunki dalszych badań w omawianym zakresie, co świadczy o jej dojrzałości naukowej oraz przygotowaniu do samodzielnej działalności badawczej. Przedstawiona do recenzji rozprawa potwierdza, że Autorka dysponuje bardzo dobrze rozwiniętym warształem badawczo-obliczeniowym, szeroką wiedzą teoretyczną oraz umiejętnościami niezbędnymi do samodzielnego prowadzenia badań naukowych w dziedzinie inżynierii lądowej.

Rozprawa została opracowana na wysokim poziomie merytorycznym, językowym i edytorskim, a jej wyniki i wnioski stanowią istotny wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Biorąc pod uwagę wartość naukową, oryginalność oraz wysoki poziom opracowania, stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska autorstwa **mgr inż. Julii Błazy pt. *Synthetic fibre ground slabs subjected to a central concentrated force*** spełnia wymagania określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668, z późn. zm.) i wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej przez Radę Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Śląskiej oraz dopuszczenie **Pani mgr inż. Julii Błazy** do jej publicznej obrony.

Ze względu na aktualność problematyki badawczej, wysoki poziom merytoryczny oraz istotny wkład poznawczy i aplikacyjny w rozwój wiedzy dotyczącej konstrukcji z betonu zbrojonego włóknami, wnoszę o **wyróżnienie recenzowanej rozprawy doktorskiej**.

Recenzję podpisała
Izabela Skrzypczak