

POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA w Kielcach
Wydział Budownictwa i Architektury
Katedra Wytrzymałości Materiałów, Konstrukcji Betonowych i Mostowych
Al. Tysiąclecia P.P. 7
25-314 Kielce
Tel. (0-41) 34-24-593,
NIP: 657-000-97-74



Kielce, dnia 07.05.2018 r

Dr hab. inż. Grzegorz ŚWIT, prof. nadzw. PŚk
Politechnika świętokrzyska
Wydział Budownictwa i Architektury
Katedra Wytrzymałości Materiałów, Konstrukcji Betonowych i Mostowych
Al. Tysiąclecia Państwa Poleskiego 7
25-314 Kielce

Szanowny Pan
Prof. dr hab. inż. Krzysztof Wilde, prof. zw. PG
Dziekan Wydziału
Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska
ul. G. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

W załączeniu przesyłam dwa egzemplarze recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Jacka Lachowicza zatytułowanej *„Doświadczalne i numeryczne badania propagacji fal elektromagnetycznych w zastosowaniu do diagnostyki konstrukcji żelbetowych i ceglanych metodą georadarową”*.



Kielce, dnia 07.05.2018

Recenzent:

Dr hab. inż. Grzegorz ŚWIT, prof. nadzw. PŚk
Politechnika świętokrzyska
Wydział Budownictwa i Architektury
Katedra Wytrzymałości Materiałów, Konstrukcji Betonowych i Mostowych
Al. Tysiąclecia Państwa Poleskiego 7
25-314 Kielce

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Jacka Lachowicza
pt. „Doświadczalne i numeryczne badania propagacji fal elektromagnetycznych
w zastosowaniu do diagnostyki konstrukcji żelbetowych i ceglanych metodą georadarową”.

1. Podstawa formalna

Niniejszą Recenzję sporządzono na wniosek Rady Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej, pismo z dnia 18.04.2018 roku.

2. Podstawa prawna

- Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003, Nr 65, poz. 595, z póź. zm.)
- Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. 2018, poz. 261)

3. Ocena Rozprawy

3.1. Opis Rozprawy

Rozprawa została przedłożona w formie zwartego dwustronnie zadrukowanego skryptu. Całość zawartości skryptu znajduje się na 212 stronach.

Praca została podzielona na 8 rozdziałów z zamykającą bibliografią liczącą 168 pozycji, spisem rysunków liczącym 156 pozycji oraz tabel liczącym 9 pozycji. Rozprawa kończy się streszczeniem w języku polskim i angielskim.

3.2. Ocena merytoryczna Rozprawy

Metoda georadarowa (Georadar, GPR method) jest szeroko stosowaną techniką diagnostyczną, opartą o emisję fal elektromagnetycznych i rejestrację fal odbitych. Mimo jej popularności, wciąż istnieje wiele kwestii wymagających prowadzenia dalszych badań. Obecnie występujące trendy, dążące do automatyzacji pomiarów wymagają opracowania technik i schematów, które pozwoliłyby na określenie podstawowych parametrów koniecznych do właściwej oceny badanego obiektu. Wynika stąd potrzeba rozwijania i doskonalenia metod obróbki oraz interpretacji otrzymanych danych georadarowych.



W rozdziale pierwszym Autor zamieścił wstęp, w którym wymieniono najczęściej stosowane metody diagnostyczne oraz omówiono historię metody georadarowej. Opisano również przykłady badań konstrukcji żelbetonowych oraz ceglanych występujące w literaturze, a także określono cel i zakres pracy.

Rozdział drugi zawiera podstawy teoretyczne propagacji fal elektromagnetycznych. Przedstawione zostały równania Maxwella oraz równania konstytutywne. Omówiono rodzaje ośrodków materialnych i ich parametry.

W rozdziale trzecim Autor przedstawił model numeryczny propagacji fal elektromagnetycznych. Opisany został algorytm Yee, sformułowano równania metody różnic skończonych w dziedzinie czasu oraz określono warunek stabilności numerycznej. Omówione zostały źródła promieniowania, warunki brzegowe oraz autorski heterogeniczny model betonu, które użyte zostały w symulacjach przedstawionych w dalszych rozdziałach pracy.

Rozdział czwarty opisuje podstawy metody georadarowej i przetwarzania danych. Omówiono tu zasadę działania georadaru, przedstawiono także dane techniczne aparatury oraz metodologię pomiarów, które wykorzystane zostały w trakcie wykonywania badań. Przedstawione zostały także procedury przetwarzania uzyskanych danych georadarowych.

W rozdziale piątym opisano metody identyfikacji prędkości propagacji fali elektromagnetycznej w ośrodku, takie jak określenie prędkości propagacji na podstawie próbki o znanej wysokości, za pomocą hiperboli dyfrakcyjnej oraz za pomocą dyfrakcji na granicy ośrodków. Dla dwóch ostatnich metod Autor przedstawił modele własne. W dalszej części rozdziału opisano sposób weryfikacji algorytmów identyfikacji prędkości propagacji fali EM za pomocą analiz numerycznych.

W rozdziale szóstym zawarto analizę możliwości diagnostycznych metody georadarowej. Pierwszym z opisanych przykładów testowych były badania próbki żelbetowej. Wykonano badania doświadczalne, a przeprowadzone na ich podstawie analizy umożliwiły identyfikację prędkości propagacji. Ekstrakcja punktów hiperbol wykonana za pomocą algorytmów napisanych w środowisku MATLAB pozwoliła na zastosowanie pięciu matematycznych modeli hiperbol. Wartości prędkości propagacji otrzymane dla poszczególnych modeli zostały ze sobą porównane. Następnie przeprowadzono symulacje numeryczne przy zastosowaniu heterogenicznego modelu betonu. W dalszym etapie wykonano analizę porównawczą tego modelu z pomiarami doświadczalnymi oraz modelem homogenicznym. Drugim z opisanych przykładów testowych były badania muru ceglanoego, który wykonano z zaprojektowanymi wadami konstrukcyjnymi. Wyniki badań doświadczalnych porównano z otrzymanymi wynikami symulacji numerycznych.

Rozdział siódmy poświęcony jest analizie przykładów zastosowania metody georadarowej w diagnostyce konstrukcji. Przedstawiono analizy obiektów rzeczywistych: kładki dla pieszych o konstrukcji ramowo-łukowej, kładki dla pieszych o konstrukcji ramowej, a także wieży i filarów Bazyliki Mariackiej w Gdańsku.

W przypadku pierwszego obiektu badano możliwość oszacowania średnic prętów zbrojeniowych oraz wykrycia prętów ułożonych obok siebie. W tym celu tu wykonano badania doświadczalne oraz symulacje numeryczne. Ponadto dokonano identyfikacji prętów występujących w konstrukcji, poprzez porównanie otrzymanych radargramów z mapami numerycznymi.

Badania drugiej z opisywanych konstrukcji obejmowały przeprowadzenie symulacji oraz badań georadarowych. W pierwszym etapie analiz numerycznych wykonano trzy przekroje kładki, w tym zawierających uszkodzenia, w celu weryfikacji możliwości ich wykrycia. W drugim ich etapie uwagę skupiono na wpływie zawilgocenia na czytelność map georadarowych. W tym celu wykonano trzy modele o różnym stopniu penetracji wody w konstrukcji. Trzecia część analiz numerycznych obejmowała symulację numeryczną profilowania podłużnego. Wykonano cztery modele: po dwa wykorzystujące homogeniczny oraz model heterogeniczny betonu. W każdej grup symulowano warunki panujące w czasie pierwszego oraz drugiego pomiaru. W wyniku przeprowadzonych badań doświadczalnych otrzymano profile na podstawie, których ustalono rzeczywiste parametry elektryczne betonu. Następnie wyniki symulacji oraz pomiarów konstrukcji rzeczywistych zostały porównane.

Trzecią konstrukcją poddaną analizie była wieża Bazyliki Mariackiej w Gdańsku. Wykonano trzy modele numeryczne w celu poprawnej interpretacji badań doświadczalnych. Pierwszy z nich symulował przekrój poprzeczny przez słup betonowy wykonany w bruździe w murze ceglanoym. Drugi odpowiadał



przekrojowi poprzecznemu, a trzeci podłużnemu przez pierścień betonowy wykonany w bruzdzie w murze ceglanym. Otrzymane rezultaty porównano z wynikami badań konstrukcji rzeczywistej.

Ostatnią z opisywanych konstrukcji były filary Bazyliki Mariackiej w Gdańsku. Badania georadarowe obejmowały cztery filary ceglane oraz pięć filarów wzmocnionych za pomocą opaski żelbetowej. Otrzymane radargramy poddano interpretacji, na ich podstawie dokonano również oszacowania prędkości propagacji fali elektromagnetycznej.

W rozdziale ósmym zawarto wnioski.

4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Recenzent stwierdza, że w omawianej rozprawie dostrzegł pewne usterki.

1. We wstępie Autor cytując literaturę, używa skrótu "np", co w odniesieniu do konkretnych pozycji wykorzystanych w pracy nie jest konieczne. Ponadto cytowania uszeregowane są w kolejności alfabetycznej, co sprawia, że pierwsza z zacytowanych pozycji jest oznaczona numerem [26].
2. W rozdziale trzecim, na stronie 32 Autor pisze "fala elektromagnetyczna propaguje z największą wartością prędkości". Słowo "wartością" wydaje się zbędne.
3. W rozdziale trzecim, na stronie 33 Autor do oddzielenia części dziesiątej ułamka stosuje kropkę zamiast przecinka. Błąd ten powtarza się w całej rozprawie.
4. W rozdziale trzecim, na stronie 37 Autor zastosował oznaczenie kierunku przewodności σ_x^* , które zostało użyte dwa razy. W miejscu tym Autor powinien zastosować oznaczenie σ_y^* .
5. W rozdziale trzecim Autor pisze o ośrodkach, "w których propaguje pole elektryczne". Tymczasem w ośrodkach propaguje fala elektromagnetyczna.
6. W rozdziale trzecim, na stronie 41, w punkcie 5. Autor pisze "ze względu na fakt, iż efektywna wartości przenikalności". Należy tu użyć słowa "wartość".
7. W rozdziale czwartym, na stronie 42 Autor pisze, iż skan typu B to radargram. Tymczasem określenie radargram dotyczy wszystkich sposobów przedstawienia wyników pomiarów georadarowych. Autor pisze również "W przypadku, gdy wykona się kilka pomiarów w gęstym rozkładzie profili pomiarowych można uzyskać zestaw radargramów, czyli skan typu C". Nie jest to jeszcze skan typu C. Jest on możliwy do uzyskania na tej podstawie, po przetworzeniu za pomocą oprogramowania. Ponadto zdanie to należy poprawić, z uwagi na występujące błędy gramatyczne.
8. W rozdziale czwartym, na stronie 45, Autor pisze "Pozostałymi czynnikami, które wpływają na zasięg jest niewielka moc anteny nadawczej oraz tłumienie fali elektromagnetycznej". Bardziej precyzyjnym określeniem jest "niewielka energia impulsu sondującego", gdyż energia ta zależy od parametrów całej aparatury georadarowej.
9. Na tej samej stronie Autor używa określenia "próbek/skan". Należy zastanowić się nad poprawnością tego określenia, ponieważ próbkowaniu (części procesu cyfryzacji sygnału) poddaje się tylko rejestrowany w oknie czasowym impuls elektromagnetyczny. Parametr określający liczbę próbek sygnału podaje się, jako liczbę całkowitą. Jest to wartość bezwymiarowa. Grupa próbek zarejestrowanych w oknie czasowym tworzy ślad georadarowy (trasę). A-skan natomiast może być



zapisem pojedynczego śladu lub powstawać poprzez składanie sygnału. Określenie "próbek/skan" pojawia się również w dalszych rozdziałach pracy.

10. W rozdziale czwartym, na stronie 49, Autor pisze: "W rezultacie uzyskuje się tomografię skanowanego obszaru na wybranej głębokości". W rzeczywistości uzyskuje się "widok tomografii dla zadanego opóźnienia". Aby można było mówić o głębokości, należy precyzyjnie określić prędkość propagacji fali we warstwach ośrodka, co możliwe jest często tylko w warunkach laboratoryjnych. Niżej Autor pisze: "Należy podkreślić, iż uzyskanie tomografii jest również możliwe dla drugiego podejścia, jednakże z mniejszą dokładnością." Zdanie to dotyczy dokładności wykonywania pomiarów w siatce ortogonalnej, względem pomiarów prowadzonych w jednym kierunku, w małym rozstawie profili, przy użyciu anteny bipolarnej. Nie jest to końca prawda, gdyż precyzja pomiarów prowadzonych w siatce ortogonalnej zależy od rozstawu pomiędzy profilami i może być równie wysoka. Na tej samej stronie, poniżej Autor opisuje rodzaje sposobów przedstawienia danych georadarowych. Uwagi takie same jak w punkcie 7.

Na tej samej stronie w podpunkcie 4.4.1 Autor pisze: "Ustalenie czasu zerowego jest podstawową procedurą stosowaną dla każdej mapy georadarowej." Na stronie 42 Autor zaznaczył, że "mapa georadarowa" to określenie skanu typu B, czyli profilu dwuwymiarowego. W rzeczywistości jest to podstawowa procedura w każdym ze sposobów przedstawiania wyników: A, B, jak i C-skanu.

11. W rozdziale czwartym, na stronie 51, autor przedstawił doświadczalną metodę wyznaczania czasu zerowego dla sygnału georadarowego. Metoda ta opiera się na wysłaniu przez antenę impulsu propagującego w powietrzu, który ulega odbiciu od płytki stalowej, po czym rejestrowany jest przez urządzenie. Wykorzystując twierdzenia Pitagorasa Autor podał zależność pozwalającą wyznaczyć odległość płytki stalowej od anteny, na podstawie czasu całkowitego czasu propagacji fali EM, prędkości propagacji fali EM w próżni oraz rozstawu anten (równanie 4.6). Czy Autor uwzględnił odległość dipoli od powierzchni anteny? (rys. 4.9 sugeruje, że nie)
12. W rozdziale czwartym, na stronie 54 Autor zaleca, aby wykonać test unoszenia georadaru nad powierzchnię skanowania. Należy doprecyzować, że chodzi o podnoszenie anteny georadaru.
13. W rozdziale czwartym, na stronie 55 Autor pisze: "Obserwuje się, że sygnały odbite z większych głębokości, w porównaniu do odbić z niższych głębokości, są bardzo małe". Konsekwentnie należało by napisać "... do odbić z mniejszych głębokości, są bardzo słabe".
14. W rozdziale czwartym, na stronie 57 omówiona jest procedura usuwania średniej trasy z całego profilu. Autor pisze: "Często na mapach georadarowych można zaobserwować poziome odbicia, które są wynikiem zakłócenia pola elektromagnetycznego." Bardziej poprawne wydaje się stwierdzenie: "Często na mapach georadarowych można zaobserwować poziome refleksy, będące wynikiem zakłóceń z tła, wywołanych przez odbicia wielokrotne."



15. W rozdziale piątym, na stronie 66 Autor przedstawia model hiperboli niewzględniający rozmiaru pręta i uwzględniający rozstaw anten. W uzyskanym układzie dwóch równań, symbole t_t oraz t_r występujące po ich prawej stronie zostały ze sobą zamienione.
16. W rozdziale piątym, na stronie 67 Autor przedstawia model hiperboli uwzględniający rozmiar pręta oraz rozstaw anten. W uzyskanym układzie dwóch równań, symbole t_t oraz t_r występujące po ich prawej stronie zostały ze sobą zamienione.
17. W rozdziale piątym, na stronie 68 przedstawiono autorski model hiperboli. W uzyskanym układzie dwóch równań, symbole t_t oraz t_r występujące po ich prawej stronie zostały ze sobą zamienione. Ponadto na stronie 69 Autor oznaczył funkcję tangens, jako \tan , zamiast tg . Na rysunku 5.7 zastosowano oznaczenie x_a , podczas gdy w wyrażeniu 5.12 na stronie 68 wartość t_a została oznaczona, jako x_p . Na tej samej stronie w podrozdziale 5.3 Autor pisze: "Fala elektromagnetyczna propagując przez badany ośrodek ulega tłumieniu, rozproszeniu, a także odbiciu od obiektów, których parametry elektryczne się różnią". Proponuje się by zmienić brzmienie na: " Fala EM propagując przez ośrodek ulega tłumieniu, rozproszeniu, a także odbiciu od obiektów, których parametry elektryczne wykazują zróżnicowanie względem badanego ośrodka."
18. W rozdziale piątym, na stronie 70 Autor opisuje autorski model dyfrakcji na narożach prostokątnego obiektu. Pierwsze zdanie brzmi: "Dyfrakcja może nastąpić na granicy ośrodków w szczególnym przypadku, kiedy jeden prostokątny obiekt umieszczony jest w innym materiale". Proponuje się by brzmienie zmienić na: "Dyfrakcja może nastąpić na granicy ośrodków w szczególnym przypadku, kiedy obiekt o przekroju prostokątnym umieszczony jest w ośrodku o innych parametrach elektrycznych". Autor pisze dalej, że "Model ten odpowiada sytuacji pojedynczej cegły umieszczonej w murze, gdzie prostokątny obiekt jest reprezentowany przez cegłę, a materiał otaczający ilustruje zaprawę". Nie jest to do końca prawda, gdyż model ten jest uproszczeniem odzwierciedlającym pojedynczą cegłę w zaprawie, a nie mur, który w większości składa się z cegieł. Należy również wspomnieć o ograniczeniu tego modelu, który praktycznie może być stosowany w przypadku muru z cegły pełnej. Badania elementów murowych zawierających pustki powietrzne może być znacznie utrudnione z uwagi na dużą ilość odbić wielokrotnych.
19. W rozdziale piątym na stronach 71 oraz 72 Autor przedstawia własny model ugiętej hiperboli dyfrakcyjnej. Posługując się twierdzeniem Pitagorasa oraz twierdzeniem Talesa, uzyskano funkcję zależną od położenia anteny. Formułując założenia Autor mógł nie uwzględnić faktu, że fala elektromagnetyczna przechodząc przez granicę ośrodków o zróżnicowanych parametrach elektrycznych ulega załamaniu. Odcinki opisane na rys. 5.10, jako t_1 oraz t_2 mają różne pochylenie. Uproszczenie, jakie przyjął Autor jest prawdziwe w przypadku występowania małych różnic



- w wartościach elektrycznych obu ośrodków. Ponadto we wzorze 5.22, zarówno w liczniku, jak i w mianowniku odjemną zamieniono z odjemnikiem.
20. W rozdziale piątym, w podrozdziale "Identyfikacja prędkości za pomocą hiperbol dyfrakcyjnych" Autor stosuje pięć modeli matematycznych hiperboli w celu określenia prędkości propagacji fali w ośrodku. Przedmiotem badań były modele płyty żelbetowej z prętami o średnicy 8, 16 oraz 32mm. Zgodnie z literaturą tematu oszacowanie prędkości propagacji fali w ośrodku na podstawie pochylenia ramion hiperboli dyfrakcyjnych, lecz bez uwzględniania promienia powodujących je anomalii, można stosować w przypadku anomalii dużo mniejszych niż długość fali. Dla przyjętej w modelu wartości przenikalności elektrycznej $\epsilon_r = 9$, długość fali wynosi $\lambda=5\text{cm}$, co powoduje, że modele #1 oraz #2, nieuwzględniające średnicy pręta, z góry obarczone są dużym błędem, co znajduje potwierdzenie w przedstawionych zależnościach prędkości propagacji fali od średnicy pręta oraz od głębokości jego położenia.
 21. W rozdziale piątym, na stronie 80, Autor pisze: "Rysunek 5.19 ukazuje mapę georadarową obliczoną dla modelu z prostokątnym obiektem (rys. 5.12b), który odpowiada sytuacji pojedynczej cegły w murze." W rzeczywistości model ten nie odzwierciedla pojedynczej cegły w murze, lecz cegłę otoczoną z trzech stron zaprawą. Ponadto należałoby raczej mówić o obiekcie o przekroju prostokątnym.
 22. W rozdziale szóstym, na stronie 84, Autor pisze: "Badania doświadczalne zostały przeprowadzone na próbce żelbetowej o zewnętrznych wymiarach próbki wynosiły 80 cm x 10 cm x 15 cm". W zdaniu tym słowa "próbki wynosiły" należy pominąć. Niżej na tej samej stronie Autor pisze: "Projekt próbki wraz ze zdjęciem, z wymiarami pomierzonymi po jej wykonaniu, został przedstawiony na rys. 6.1. Próbka dojrzewała rok w warunkach laboratoryjnych przed wykonaniem pomiarów GPR". Pierwsze zacytowane zdanie wymaga przeredagowania ze względu na stylistykę. Wyjaśnienia wymaga również, dlaczego próbka dojrzewała przez rok oraz co Autor miał na myśli pisząc o warunkach laboratoryjnych.
 23. W rozdziale szóstym, na stronie 86, omawiając mapy georadarowe przedstawiona na rys. 6.3, Autor pisze: "Porównując obie mapy, nie jest możliwe wizualne ustalenie większych różnic między nimi." Tymczasem już na pierwszy rzut oka widać, że na radargramie uzyskanym dla pomiaru wykonanego z próbkowaniem 512 kontrast jest znacznie wyższy.
 24. W tym samym rozdziale, na stronie 89 Autor pisze: "Można zauważyć, iż metody ekstrakcji hiperbol, a także parametrów pomiarowych mają istotny wpływ na liczbę punktów hiperboli, co ma bezpośredni wpływ na jakość aproksymacji". W zdaniu tym słowa " parametrów pomiarowych" należy zamienić na "parametry pomiarowe". Ponadto wydaje się uzasadnionym, aby zamienić wyrażenie "jakość aproksymacji" na "dokładność aproksymacji".
 25. W rozdziale szóstym na stronie 90, Autor stwierdza: "Można zauważyć, iż dla każdej metody istnieje trend wskazujący na zwiększenie zbieżności oszacowania prędkości wraz ze zmniejszeniem kroku anteny". Należy zauważyć, że trend



- z punktu widzenia statystyki jest "monotonicznym składnikiem w modelu zależności danej cechy statystycznej od czasu". Aby można było mówić o występowaniu trendu, należy najpierw przeprowadzić badanie statystyczne w celu określenia czy występująca zależność nie jest dziełem przypadku. Wobec tego można mówić o występujących zależnościach, ale nie o trendach. Nieścisłość ta powtarza się w pracy kilkakrotnie. Ponadto w cytowanym zdaniu wyrażenie "kroku anteny" na należy zamienić na "kroku pomiarowego anteny".
26. W tym samym rozdziale, na stronie 91 Autor pisze: "Na rys. 6.11 oraz 6.12 przedstawiono zależność liczby rejestrowanych próbek/skan od oszacowanej prędkości, dla pręta położonego na głębokości 1.9 cm oraz 4.3 cm dla trzech metod ekstrakcji hiperboli przy kroku zapisu 2 mm". Stwierdzenie to nie jest poprawne, ponieważ w rzeczywistości "Na rys. 6.11 oraz 6.12 przedstawiono zależność oszacowanej prędkości propagacji fali od zadanej liczby próbek, dla pręta położonego na głębokości 1,9 cm oraz 4,3 cm dla trzech metod ekstrakcji hiperboli przy kroku zapisu wynoszącym 2 mm". Na tej samej stronie autor pisze: "Natomiast dla pręta położonego na większej głębokości widać trend odwrotny, sugerujący, iż mniej dokładna rozdzielczość czasowa wpływa pozytywnie na oszacowanie prędkości". Poza wcześniejszymi uwagami dotyczącymi zastosowania terminu "trend" należy zweryfikować poprawność wyciągniętego przez Autora wniosku. W przypadku wystąpienia poprawy dopasowania oszacowanej prędkości propagacji fali do wartości rzeczywistych ze spadkiem liczby próbek sygnału należy rozważyć poprawność przyjętego modelu.
27. W rozdziale szóstym, na stronie 93 Autor pisze: "... *dokładniejsze oszacowanie prędkości następuje dla prętów położonych głębiej*". Należałoby to zdanie poprawić na: "dokładniejsze oszacowanie prędkości ma miejsce w przypadku prętów położonych głębiej". W analogiczny sposób należałoby poprawić następną zdanie. Na tej samej stronie, w podrozdziale 6.1.4 Autor pisze: "Po wykonaniu wszystkich pomiarów, sygnały poddano filtrom i automatycznemu ustawieniu czasu zerowego". Zdanie to należałoby zmienić na: "Po wykonaniu wszystkich pomiarów, zarejestrowane sygnały poddano filtracji automatycznemu ustawieniu czasu zero".
28. W rozdziale szóstym, na stronie 98, Autor pisze "Na podstawie czasu odbitego sygnału określono prędkość...". Proponuje się, by zdanie to zamienić na: "Na podstawie czasu rejestracji odbitego sygnału...".
29. W tym samym rozdziale na stronie 102, Autor opisuje heterogeniczne modele numeryczne betonu. Do dyskretyzacji tych układów przyjęto kwadratową siatkę Yee o wymiarze boku równym 1,0mm oraz 0,5mm. Opisując drugi z modeli Autor stwierdza: "To spowodowało, iż pojedyncze cząsteczki wody, cementu i najmniejszego kruszywa były rozmiarów 0.5mm x 0.5mm". Nie jest to prawdą, gdyż pojedyncze cząsteczki zarówno wody, jak i cementu są o wiele rzędów wielkości mniejsze. W tym przypadku można mówić jedynie o wypełnieniu wodą pojedynczych oczek siatki Yee. Ten sam błąd występuje w następnym akapicie.



30. W rozdziale szóstym, na stronie 105 Autor pisze: "Można zauważyć, iż numeryczny radargram (rys. 6.26b) ze względu na brak cząsteczek wody nie ukazuje licznych losowych odbić". W tym wypadku nie należy mówić o "braku cząsteczek wody", lecz o nie występowaniu wody w porach betonu. W tym samym akapicie Autor pisze o "Ze względu na dużą liczbę oczek wody o znacznych rozmiarach w modelu heterogenicznym, na numerycznej mapie georadarowej (rys 6.27b) widoczne są liczne odbicia w strukturze betonu, których nie zaobserwowano na radargramie z pomiarów doświadczalnych (rys. 6.27a)". Zamiast określenia "duża liczba oczek wody" należałoby raczej pisać: znaczne rozmiary porów w betonie, które zostały wypełnione wodą.
31. Na tej samej stronie, w następnym akapicie Autor pisze: "Pręty o średnicy 6 mm pozostały niewykryte prawdopodobnie ze względu na zbyt niską rozdzielczość używanej anteny, a także ze względu na ich położenie pod większymi prętami. Stwierdzenie to ma swoje uzasadnienie w rzeczywistości. Należy jednak zauważyć, że dla oszacowanej efektywnej przenikalności betonu równej $\epsilon_r=6,46$ oraz częstotliwości środkowej anteny równej 2,0GHz, długość fali wynosi $\lambda \approx 5,9\text{cm}$. Zgodnie z literaturą wykryte mogą być tylko obiekty o wymiarze większym niż $0,1\lambda$, czyli w tym wypadku około 6,0mm. Fakt ten może wpływać na brak możliwości wykrycia prętów o średnicy 6,0mm, które znajdują się na progu wykrywalności.
32. W rozdziale szóstym, na stronie 109 Autor pisze: "Badania wykonywano rejestrując sygnały długości 32 ns, 1024 próbki/skan i zapisując pojedynczą trasę co 10 mm". Proponuje się, aby powyższe zdanie zamienić na: "Podczas badań rejestrowano sygnały w oknie czasowym o długości 32ns, przy próbkowaniu wynoszącym 1024, zapisując pojedynczą trasę co 10 mm". W tym samym akapicie Autor pisze: "Miesiąc później przeprowadzono również skanowanie w kierunku poprzecznym do warstw w gęstym profilowaniu (co 1 cm), w celu wykonania tomografii obrazu i globalnego wykrycia uszkodzeń. Proszę o wyjaśnienie, dlaczego pomiary w kierunku poprzecznym wykonano akurat po upływie miesiąca. Ponadto proponuje się, aby cytowane zdanie zamienić na: "Po upływie miesiąca przeprowadzono również pomiary w kierunku poprzecznym do warstw, w gęstym profilowaniu (co 1 cm), w celu uzyskania obrazu tomografii oraz wykrycia występujących uszkodzeń".
33. W rozdziale szóstym, na stronie 110 Autor interpretując wyniki symulacji numerycznych, stwierdza: "W szóstej warstwie, z defektami mapy georadarowe dla obu modeli (rys. 6.37) ujawniły uszkodzenia. Uszkodzenie w postaci równoległego wycięcia ukazuje się w postaci podłużnego odbicia, podczas gdy prostopadły brak spoiny ujawnia się w postaci hiperboli dyfrakcyjnej". W zdaniu tym zamiast określenia "uszkodzenie w postaci równoległego wycięcia" oraz "prostopadły brak spoiny" powinno się używać określeń: "uszkodzenie w postaci braku spoiny równoległej do płaszczyzny pomiaru" oraz "brak spoiny prostopadłej do płaszczyzny pomiaru". Należy zauważyć, że o ile uszkodzenie w postaci braku



- spoiny równoległej względem kierunku skanowania jest wyraźnie widoczne, o tyle braku spoiny prostopadłej na podstawie rys. 6.37 raczej nie można stwierdzić.
34. W rozdziale szóstym, na stronie 114 Autor omawiając niedostateczną widoczność dyfrakcji pochodzących od spoin pionowych pisze: "Dzieje się tak, prawdopodobnie ze względu na bardzo małą różnicę w parametrach elektrycznych między cegłą a zaprawą". Stwierdzenie to jest prawdziwe, można jednak zauważyć, że pewien wpływ może mieć też zjawisko "uśredniania", które wywołane jest tym, że aparatura rejestruje impuls odbity z pewnego obszaru, który równy jest powierzchni podstawy stożka promieniowania wygenerowanego przez aparaturę georadarową.
 35. W tym samym rozdziale, na stronie 115 Autor pisze: "Odbicia #10 i #11 mogą być zniekształconym odbiciem od naroży cegły w warstwie ósmej. Należy zaznaczyć, że miejsce występowania odbicia #11 pokrywa się ze spoiną prostopadłą do kierunku wykonywania pomiaru, położoną pomiędzy piątą a szóstą cegłą warstwy ósmej (licząc zgodnie z kierunkiem wykonywania pomiaru). Przyczyną wystąpienia tej anomalii może być niedokładne jej wykonanie. Na rys. 6.47 jest ponadto widoczna jeszcze jedna anomalia występująca w rzędnej 0,4m, widoczna dla opóźnienia od 4 ns do 6 ns, której położenie pokrywa się ze spoiną pomiędzy cegłą trzecią i czwartą (licząc zgodnie z kierunkiem wykonywania pomiarów).
 36. W rozdziale szóstym, na stronie 122 Autor pisze: "Rysunek 6.52a pokazuje skan typu C na głębokości pustki powietrznej". Stwierdzenie to należałoby poprawić na: "... skan typu C uzyskany dla opóźnienia, przy którym widoczna jest pustka powietrzna". Podobne stwierdzenie pojawia się w kolejnym zdaniu, gdzie Autor pisze: "Tomografia na głębokości końca pierwszego rzędu cegieł ...". Właściwszym wydaje się stwierdzenie: "Widok tomografii uzyskany dla opóźnienia, przy którym występuje koniec pierwszego rzędu cegieł.
 37. W rozdziale siódmym, podrozdziale pierwszym, Autor opisuje wykonanie symulacji numerycznych oraz pomiarów georadarowych kładki dla pieszych o konstrukcji ramowo-łukowej. W przypadku symulacji numerycznej rozpatrywano dwa modele: płyty betonowej zbrojonej prętami o średnicach 12, 24, 36 oraz 48 mm oraz płyty betonowej zbrojonej jednym lub dwoma, trzema oraz czterema prętami o stałej średnicy przylegającymi do siebie. Celem przeprowadzonych symulacji była ocena możliwości oszacowania prędkości propagacji fali EM w betonie dla nieznannej liczby przylegających do siebie prętów, na podstawie kształtu hiperboli dyfrakcyjnej. Zastosowano tu pięć modeli matematycznych opisujących hiperbole. Modele o numerach 1 i 2 nie uwzględniały średnicy pręta. Proces dopasowywania hiperbol wykonano dla trzech różnych zestawów warunków brzegowych. W pierwszym etapie warunki brzegowe były dobrane tak, aby każda ze zmiennych mogła przyjmować dowolne wartości. Warunki brzegowe dla promienia pręta R ustalono na 3 mm do 100 mm. W drugim etapie, dla modelu z prętami o różnych średnicach zastosowano warunek brzegowy dla promienia pręta, ograniczając go do wartości $R=6, 12, 18, 24$ mm. Natomiast dla modelu drugiego, w którym pręty przylegają do siebie wprowadzono promień zastępczy, opisany równy sumie wartości promieni przylegających do siebie



prętów. W trzecim etapie przywrócono poprzednie warunki brzegowe dla promienia pręta R z zakresu 3 mm do 100 mm. Jednocześnie przyjęto stałą wartość prędkości propagacji $v=12,0$ cm/ns. W tabelach 7.1 do 7.3 zamieszczono wyniki aproksymacji.

Matematyczne modele hiperboli numer 1 i 2, których używa autor, nie uwzględniają średnicy prętów. Literatura tematu mówi, że modele takie można stosować tylko w przypadku anomalii punktowych, o wymiarze $\ll \lambda$. Długość fali propagującej w ośrodku dla podanych założeń ($\epsilon_r=6,25$, częstotliwość środkowa anteny 2,0GHz) wynosi 6,0cm. Wobec tego zastosowanie modelu matematycznego hiperboli numer 1 i 2, w przypadku występowania prętów o średnicach: 12, 24, 36 oraz 48 mm jest z góry obarczone dużym błędem, co znajduje odzwierciedlenie w wynikach przedstawionych w pracy.

Należy zaznaczyć, że model polegający na wprowadzeniu promienia zastępczego nie odwzorowuje właściwie rzeczywistości; wraz ze wzrostem liczby prętów wzrasta błąd przybliżenia, ponieważ inkluzja coraz mniej przypomina koło, a lepszym przybliżeniem wydaje się prostokąt. W przypadku czterech prętów występujących obok siebie inkluzja ma wymiary (wys. x szer.) $2R \times 8R$, podczas gdy wprowadzenie promienia zastępczego spowodowało przedstawienie inkluzji kołowej o średnicy $4R$. Zestawiając połowę wysokości inkluzji o kształcie rzeczywistym oraz przybliżonej za pomocą promienia zastępczego, dostrzec można, że różnica wysokości od osi do najwyższego punktu inkluzji wynosi $3R$. Istotnie zmienia to długość drogi propagacji fali od anteny do inkluzji i z powrotem. Wprowadzenie sformułowanej w ten sposób wartości promienia zastępczego powoduje, że wyniki obarczone są dużym błędem, szczególnie w przypadku występowania trzech lub czterech prętów obok siebie, co potwierdzają przedstawione w pracy wyniki.

Proces aproksymacji hiperbol przeprowadzono też dla wyników pomiarów *in situ*. Tu dopasowanie hiperbol wykonano dla dwóch zestawów warunków brzegowych. W pierwszym etapie przyjęto warunki umożliwiające przyjmowanie dowolnych wartości zmiennych. Promień kołowej inkluzji mógł przyjmować wartości od 3 do 100 mm. W kolejnym etapie przyjęto stałą wartość promienia $R=6$ mm, zgodnie z dokumentacją techniczną. Zastosowanie modeli matematycznych hiperbol numer 1 i 2, które nie uwzględniają promienia inkluzji wydają się w tym przypadku właściwe, ze względu na relację wielkości rejestrowanej anomalii do długości fali, która wynosi 12mm do 60 mm.

Wyniki aproksymacji hiperbol dla profilu w kierunku poprzecznym przedstawiono w tabelach 7.4 oraz 7.5. W przypadku warunków brzegowych przyjętych w pierwszym etapie (tabela 7.4), modele matematyczne numer 1 i 2 dały wyniki najbliższe rzeczywistości. Wymaga jednak wyjaśnienia, dlaczego dla modeli numer 3, 4 i 5 przyjęto promień inkluzji wynoszący 100mm, jak podano w tabeli 7.4. Mimo, iż współczynnik korelacji przyjmuje wysokie wartości, to sama wielkość przyjętego promienia nie jest zbliżona do rzeczywistej. Również oszacowane w ten sposób prędkości propagacji nie odpowiadają rzeczywistym.

W przypadku wyników podanych w tabeli 7.5, gdzie wielkość promienia została określona na 6 mm, występuje zgodność z wartościami rzeczywistymi, a pomierzony błąd nie przekracza 11%. Najlepsze wyniki dał model numer 4 i 5. Należy jednak zauważyć, że oszacowane wartości prędkości propagacji fali na podstawie pomiarów *in situ* mogą być obarczone pewnym błędem z uwagi na



występowania niedokładności wykonawczych, objawiających się niewielkimi zmianami wysokości położenia prętów, jak również niejednorodności samego ośrodka betonowego.

W tabelach 7.6 oraz 7.7 podano wyniki aproksymacji hiperbol dla profili w kierunku podłużnym nad płytą pomostu (5 hiperbol) oraz nad częścią wspornikową kładki (5 hiperbol). Tu również dopasowanie hiperbol wykonano dla dwóch zestawów warunków brzegowych. W pierwszym etapie przyjęto warunki umożliwiające przyjmowanie dowolnych wartości zmiennych. Promień kołowej inkluzji mógł przyjmować wartości od 3 do 100 mm. W kolejnym etapie przyjęto stałą wartość promienia $R=6$ mm, zgodnie z dokumentacją techniczną. Zgodnie z rys. 7.7c na radargramie nad częścią wspornikową hiperbole oznaczone, jako #1 i #4 reprezentują pręty podwójne. Ze względu na relację wielkości rejestrowanej anomalii do długości fali, która wynosi 12mm do 60 mm, zastosowanie modeli nieuwzględniających promienia pręta ma uzasadnienie. W przypadku profilu uzyskanego nad płytą pomostu największe błędy wystąpiły dla prętów #1 i #5, przy zastosowaniu modeli matematycznych 3, 4 i 5. Na wielkość tych błędów wpływa przyjęta wartość promienia inkluzji, sięgająca 100mm. Dla profilu uzyskanego nad częścią wspornikową kładki największe błędy wystąpiły dla hiperbol o numerach #1 oraz #4, co spowodowane jest faktem występowania tam prętów podwójnych, których kształt nie jest uwzględniony w modelu.

W tabeli 7.7 przedstawiono wyniki aproksymacji dla drugiego zestawu warunków brzegowych, gdzie przyjęto stałą wartość promienia $R=6$ mm. Uzyskane wyniki są znacznie bliższe rzeczywistości w porównaniu do pierwszego zestawu warunków. Największe błędy zostały zarejestrowane dla profilu uzyskanego nad częścią wspornikową kładki, dla hiperbol #1 i #4 reprezentujących pręty podwójne, których kształt nie został uwzględniony w modelach matematycznych.

Najmniejszym błędem były obciążone modele matematyczne hiperbol o numerach 4 i 5.

Tak jak w przypadku wyników aproksymacji na podstawie profili w kierunku poprzecznym, to również należy zauważyć, że oszacowane wartości prędkości propagacji fali na podstawie pomiarów *in situ* mogą być obciążone pewnym błędem z uwagi na występowania niedokładności wykonawczych, objawiających się niewielkimi zmianami wysokości położenia prętów, rozsunięcia prętów podwójnych względem siebie, jak również niejednorodności samego ośrodka betonowego.

Ponadto na rys. 7.7 Autor niewłaściwie opisał podwójne strzemiona (dwa występujące obok siebie), jako "dwa rzędy górnego zbrojenia poprzecznego".

38. W rozdziale siódmym, na stronie 142 Autor pisze o jednym, dwóch i trzech sąsiadujących ze sobą strzemionach. Zgodnie z przedstawioną dokumentacją projektową mamy tu do czynienia z jednym prętem poprzecznym i dodatkowo z jednym lub dwoma strzemionami.
39. W rozdziale siódmym, na stronie 142 Autor umieścił rysunek 7.11, na którym dwa pręty występujące obok siebie zostały opisane, jako dwa rzędy górnego zbrojenia poprzecznego.
40. W tym samym rozdziale, na stronie 143 Autor pisze: "Może to być spowodowane prawdopodobnym oddzieleniem zbrojenia poprzecznego lub pojawieniem się dodatkowego strzemienia". Właściwsze wydaje się zastosowanie wyrażenia:



- "Może to być spowodowane prawdopodobnym rozsunieniem prętów poprzecznych lub pojawieniem się dodatkowego strzemięcia".
41. W rozdziale siódmym w podsumowaniu, na stronie 145 należy poprawić wnioski, uwzględniając uwagi zamieszczone w punkcie 37.
 42. W rozdziale siódmym na stronie 155, Autor używa sformułowania: "pewnego rodzaju odcięcie sygnału". Należy je zastąpić przez "zmniejszenie energii sygnału".
 43. W rozdziale siódmym, na stronie 157 Autor pisze: "Ponadto obszar betonu ujawnia wiele odbić, od poszczególnych frakcji betonu". Proponuje się zastąpienie go zdaniem: "Ponadto w obszarze betonu pojawia się wiele odbić od poszczególnych jego frakcji".
 44. W rozdziale siódmym na stronie 162 Autor pisze: "W modelach numerycznym przyjęto wartości". Słowo "numerycznym" należy zastąpić przez "numerycznych".
 45. W tym samym rozdziale na stronie 166 Autor pisze o anomalii, "która wskazuje na brak cegły w tym miejscu". Właściwsze jest sformułowanie: "która wskazuje na pustkę w tym miejscu".
 46. Na tej samej stronie, w następnym akapicie Autor omawiając aproksymację prędkości propagacji fali na granicy dwóch ośrodków przy pomocy własnego modelu, pisze: "Jednakże po wrysowaniu ugiętej hiperboli na skanie podłużnym L5 (rys. 7.36d) uzyskano znacznie większą wartość prędkości w części betonowej ($v=26\text{cm/ns}$). Należy podkreślić, iż zawyżona wartość została zidentyfikowana tylko w jednym miejscu i może ona być wynikiem uszkodzenia części murowej lub uproszczeń, które zostały przyjęte w opisie matematycznym". Należy tu stwierdzić, że oszacowana przez Autora prędkość propagacji fali jest niemożliwa do osiągnięcia w opisywanych ośrodkach i jest bliska prędkości światła w próżni. Wartość ta jest potwierdzeniem faktu, iż uproszczenie, jakie Autor przyjął w swoim modelu matematycznym jest prawdziwe w przypadku występowania małych różnic w wartościach elektrycznych obu ośrodków. Uwagi odnośnie uproszczeń przyjętych w modelu przedstawiono w punkcie 19 recenzji.
 47. W rozdziale siódmym, na stronie 179 Autor pisze: "... , *widoczna jest silna refleksja, która może oznaczać, iż grubość opaski żelbetowej wynosi około 10 cm*". Słowo "refleksja" należy zastąpić słowem "refleks".
 48. W tym samym rozdziale na stronie 181 Autor pisze: "Diagnostyka wewnętrznej struktury filarów ujawniła, że w przypadku filarów ceglanych pierwsza warstwa cegieł miała grubość około 75cm". Słowo "pierwsza" należy wykreślić.

Uchybienia zauważone przez Recenzenta nie mają znaczenia dla oceny całości pracy. Całość rozprawy sprawia wrażenie przemyślnego opracowania. Wyznaczony kierunek badań jest całkowicie zgodny z panującymi trendami w dziedzinie badań georadarowych, które zakładają jak największą automatyzację pomiarów i interpretacji wyników. Szczególnie wartościowe w rozprawie są modele matematyczne, pozwalające w pewnym stopniu na automatyzację w interpretacji wyników pomiarów. W opinii Recenzenta ten kierunek badań powinien być kontynuowany. Zeprezentowane badania zostały szczegółowo i czytelnie opisane, a ich wyniki są interesujące z poznawczego punktu widzenia.

5. Sentencja Recenzji

W przedstawionej opinii stwierdzam, że osiągnięcie celu rozprawy mgra inż. Jacka Lachowicza pt. „*Doświadczalne i numeryczne badania propagacji fal elektromagnetycznych*

POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA w Kielcach
Wydział Budownictwa i Architektury
Katedra Wytrzymałości Materiałów, Konstrukcji Betonowych i Mostowych
Al. Tysiąclecia P.P. 7
25-314 Kielce
Tel. (0-41) 34-24-593,
NIP: 657-000-97-74



w zastosowaniu do diagnostyki konstrukcji żelbetowych i ceglanych metodą georadarową”, zostało należycie udokumentowane oraz że rozprawa w Dyscyplinie naukowej: Budownictwo spełnia warunki Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o tytule naukowym i stopniach naukowych oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (z późniejszymi zmianami), Dz. U. Nr 65, poz. 595. W związku z tym stawiam wniosek o dopuszczenie omawianej rozprawy do publicznej obrony.

Gregorz Smi+