GDAŃSK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

WILiŚ

Imię i nazwisko autora rozprawy: Jacek Lachowicz
Dyscyplina naukowa: Budownictwo

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim: Doświadczalne i numeryczne badania propagacji fal elektromagnetycznych w zastosowaniu do diagnostyki konstrukcji żelbetowych i ceglanych metodą georadarową

Tytuł rozprawy w języku angielskim: Experimental and numerical research on the propagation of electromagnetic waves in diagnostics of reinforced concrete and masonry structures using the ground penetrating radar method

Promotor *podpis*	Drugi promotor *podpis*
dr hab. inż. Magdalena Rucka, prof. PG	
Promotor pomocniczy *podpis*	Kopromotor *podpis*

Gdańsk, rok 2018

Spis treści

Wykaz najważniejszych oznaczeń i skrótów 7

1. Wstęp 11
   1.1. Diagnostyka konstrukcji inżynierskich 11
   1.2. Historia metody georadarowej 12
   1.3. Metoda georadarowa w diagnostyce konstrukcji żelbetowych i ceglanych 13
   1.4. Cel i zakres pracy 15

2. Podstawy teoretyczne propagacji fal elektromagnetycznych 18
   2.1. Równania Maxwella 18
   2.2. Równania konstytutywne 19
   2.3. Rodzaje ośrodków 20
   2.4. Parametry konstytutywne 20
   2.5. Materiały dyspersyjne 22

3. Numeryczne modelowanie propagacji fal elektromagnetycznych 24
   3.1. Algorytm Yee 25
   3.2. Sformułowanie równań metody różnic skończonych w dziedzinie czasu 26
      3.2.1. Symulacje dwuwymiarowe 27
         3.2.1.1. Polaryzacja TM^z 27
         3.2.1.2. Polaryzacja TE^z 29
      3.2.2. Symulacje trójwymiarowe 30
   3.3. Stabilność numeryczna 32
   3.4. Źródła promieniowania 32
   3.5. Warunki brzegowe 36
   3.6. Modelowanie ośrodka heterogenicznego 38
      3.6.1. Model ośrodka heterogenicznego CRIM 38
      3.6.2. Autorski heterogeniczny model numeryczny betonu 38

4. Podstawy metody georadarowej i przetwarzania danych 42
   4.1. Zasada działania georadaru 42
      4.1.1. Rozdzielczość pomiarowa 43
      4.1.2. Zasięg penetracji fali elektromagnetycznej 44
   4.2. Sprzęt pomiarowy 45
   4.3. Metodologia pomiarów 46
   4.4. Przetwarzanie danych georadarowych 49
      4.4.1. Ustalenie czasu zerowego 49

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

4.4.2. Uśrednianie sygnałów georadarowych ... 55
4.4.3. Wzmocnienie sygnału zmienne w czasie ... 55
4.4.4. Filtracja częstotliwościowa sygnału ... 57
4.4.5. Usuwanie średniej trasy z całego profilu ... 57
4.4.6. Migracja map georadarowych ... 58
4.4.7. Transformacja Fouriera ... 60
4.4.8. Krótkoczasowa transformacja Fouriera ... 61
4.4.9. Średnia kwadratowa ... 62

5. Identyfikacja prędkości fali elektromagnetycznej ... 63
5.1. Identyfikacja prędkości za pomocą próbki o znanej wysokości ... 63
5.2. Identyfikacja prędkości za pomocą hiperboli dyfrakcyjnej ... 64
5.2.1. Model hiperboli nie uwzględniający rozmiaru pręta i rozstawu anten ... 65
5.2.2. Model hiperboli nie uwzględniający rozmiaru pręta i uwzględniający rozstaw anten ... 66
5.2.3. Model hiperboli uwzględniający rozmiar pręta i nie uwzględniający rozstawu anten ... 67
5.2.4. Model hiperboli uwzględniający rozmiar pręta i rozstaw anten ... 67
5.2.5. Autorski model hiperboli ... 68
5.3. Identyfikacja prędkości za pomocą dyfrakcji na granicy ośrodków ... 69
5.3.1. Autorski model dyfrakcji na pionowej inkluzji ... 70
5.3.2. Autorski model dyfrakcji na narożach prostokątnego obiektu ... 70
5.3.3. Autorski model ugiętej hiperboli dyfrakcyjnej ... 71
5.4. Weryfikacja algorytmów identyfikacji prędkości propagacji fali elektromagnetycznej ... 73
5.4.1. Modele numeryczne ... 73
5.4.2. Identyfikacja prędkości za pomocą hiperbol dyfrakcyjnych ... 76
5.4.3. Identyfikacja prędkości za pomocą granicy dwóch ośrodków ... 80

6. Analiza możliwości diagnostycznych metody georadarowej: przykłady testowe ... 84
6.1. Próbka żelbetowa ... 84
6.1.1. Obiekt badawczy ... 84
6.1.2. Badania doświadczalne ... 85
6.1.3. Identyfikacja prędkości dla próbki żelbetowej ... 86
6.1.4. Symulacje numeryczne przy użyciu modelu heterogenicznego ... 93
6.1.4.1. Identyfikacja parametrów elektrycznych ... 93
6.1.4.2. Adaptacja modelu numerycznego ... 98
6.1.4.3. Walidacja modelu numerycznego ... 101
6.1.5. Podsumowanie ... 105

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

6.2. Mur ceglany ... 106
6.2.1. Obiekt badawczy ... 106
6.2.2. Analizy numeryczne ... 107
6.2.3. Badania doświadczalne ... 109
6.2.4. Wyniki ... 110
6.2.4.1. Profilowanie podłużne ... 110
6.2.4.2. Profilowanie poprzeczne ... 120
6.2.5. Podsumowanie ... 124

7. Przykłady zastosowania metody georadarowej w diagnostyce konstrukcji ... 126
7.1. Ramowo-łukowa kładka dla pieszych ... 126
7.1.1. Opis konstrukcji i problemu badawczego ... 126
7.1.2. Symulacje numeryczne ... 128
7.1.3. Badania doświadczalne ... 131
7.1.4. Wyniki ... 131
7.1.4.1. Identyfikacja prędkości propagującej fali elektromagnetycznej ... 131
7.1.4.2. Identyfikacja prętów zbrojeniowych ... 139
7.1.5. Podsumowanie ... 145
7.2. Ramowa kładka dla pieszych ... 147
7.2.1. Opis konstrukcji i problemu badawczego ... 147
7.2.2. Symulacje numeryczne ... 148
7.2.3. Badania doświadczalne ... 152
7.2.4. Wyniki ... 152
7.2.4.1. Identyfikacja parametrów elektrycznych ... 152
7.2.4.2. Profilowanie poprzeczne ... 153
7.2.4.3. Profilowanie podłużne ... 156
7.2.5. Podsumowanie ... 158
7.3. Wieża Bazyliki Mariackiej w Gdańsku ... 159
7.3.1. Opis konstrukcji i problemu badawczego ... 159
7.3.2. Symulacje numeryczne ... 161
7.3.3. Badania doświadczalne ... 163
7.3.4. Wyniki ... 163
7.3.5. Podsumowanie ... 170
7.4. Filary Bazyliki Mariackiej w Gdańsku ... 172
7.4.1. Opis konstrukcji i problemu badawczego ... 172
7.4.2. Badania doświadczalne ... 175
7.4.3. Wyniki ... 176
7.4.3.1. Filary ceglane ... 176

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

7.4.3.2. Filary wzmocnione opaską żelbetową 177
7.4.4. Podsumowanie 180

8. Wnioski 182

Bibliografia 185

Spis rysunków 200

Spis tabel 210

Streszczenie 211

Summary 212

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Wykaz najważniejszych oznaczeń i skrótów

$\mathbf{B}$	–	wektor indukcji magnetycznej,
c	–	prędkość światła w próżni ($c \simeq 29.98$ cm/ns),
d	–	wymiar symulacji ($d = 1, 2, 3$ dla 1D, 2D, 3D),
$\mathbf{D}$	–	wektor indukcji elektrycznej,
$\mathbf{D}(\omega)$	–	wektor indukcji elektrycznej w funkcji częstości,
$\mathbf{E}$	–	wektor natężenia pola elektrycznego,
$\mathbf{E}(\omega)$	–	wektor natężenia pola elektrycznego w funkcji częstości,
E_x, E_y, E_z	–	składowe wektora natężenia pola elektrycznego we współrzędnych kartezjańskich,
f	–	częstotliwość środkowa,
g	–	głębokość,
h	–	wysokość próbki,
h_{GPR}	–	odległość od stalowej płyty zidentyfikowana w pomiarze georadarowym,
h_p	–	odległość od stalowej płyty,
$\mathbf{H}$	–	wektor natężenia pola magnetycznego,
H_x, H_y, H_z	–	składowe wektora natężenia pola magnetycznego we współrzędnych kartezjańskich,
i	–	jednostka urojona,
i, j, k	–	liczba kroków przestrzennych ($x = i\Delta x, y = j\Delta y, z = k\Delta z$),
$\mathbf{J}$	–	wektor gęstości prądu,
m_d	–	masa próbki wysuszonej do stałej masy,
m_s	–	masa próbki nasyconej,
m_w	–	masa próbki wilgotnej,
n	–	dyskretna chwila czasowa ($t_n = n\Delta t$),
N_m	–	nasiąkliwość masowa,
r	–	współczynnik korelacji,
R	–	promień kołowej inkluzji,
R_o	–	współczynnik odbicia energii,
s	–	rozstaw między anteną nadawczą i odbiorczą,
S_n	–	stopień nasycenia,

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

S_w – stopień nasycenia porów wodą,
t – czas,
t_0 – czas przelotu fali do inkluzji,
t_r – czas przelotu fali do anteny odbiorczej,
t_t – czas przelotu fali od anteny nadawczej,
v – prędkość fali elektromagnetycznej w ośrodku,
$x(t)$ – sygnał w dziedzinie czasu,
x, y, z – współrzędne kartezjańskie,
x_0 – położenie inkluzji,
x_i – położenie georadaru (anteny nadawczej i odbiorczej),
x_p – położenie granicy między ośrodkami,
$X(\omega)$ – sygnał w dziedzinie częstotliwości,

δ – błąd względny,
Δl – krok przestrzenny ($\Delta l = \Delta x = \Delta y = \Delta z$),
Δt – krok czasowy,
Δx – krok przestrzenny w kierunku x,
Δx_r – rozdzielczość pozioma,
Δy – krok przestrzenny w kierunku y,
Δz – krok przestrzenny w kierunku z,
Δz_r – rozdzielczość pionowa,
ε_0 – przenikalność elektryczna próżni ($\varepsilon_0 = 8.854187817 \cdot 10^{-12}$ F/m),
ε – przenikalność elektryczna,
ε' – rzeczywista część przenikalności elektrycznej,
ε'' – urojona część przenikalności elektrycznej,
ε_a – względna przenikalność fazy gazowej (powietrze),
ε_e – efektywna przenikalność elektryczna,
ε_m – względna przenikalność fazy stałej (matryca),
ε_r – względna przenikalność elektryczna,
ε_{r1} – względna przenikalność ośrodka nr 1,
ε_{r2} – względna przenikalność ośrodka nr 2,
$\varepsilon_{r,e}$ – efektywna względna przenikalność elektryczna,
ε_s – przenikalność elektryczna przy prądzie stałym,

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

ε_{sw} – względna przenikalność fazy ciekłej (wody),

ε_{∞} – przenikalność elektryczna dla bardzo wysokich częstości,

λ – długość fali odpowiadająca częstotliwości środkowej propagującej fali,

μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni ($\mu_0 = 12.566370614 \cdot 10^{-7}$ H/m),

μ – przenikalność magnetyczna,

μ_r – względna przenikalność magnetyczna,

ρ_0 – gęstość objętościowa,

ρ – gęstość ładunku swobodnego,

ρ_w – gęstość właściwa,

σ – konduktywność (przewodność elektryczna),

σ^* – przewodność magnetyczna,

σ' – rzeczywista część konduktywności,

σ'' – urojona część konduktywności,

τ_d – czas relaksacji,

Φ – porowatość betonu,

$\chi(\omega)$ – podatność elektryczna,

ω – częstość kołowa,

$\omega(\tau)$ – okno czasowe obserwacji,

ABC – (z ang. *absorbing boundary conditions*), absorbujące warunki brzegowe,

CRIM – (z ang. *complex refractive index method*), metoda złożonego współczynnika załamania,

FDTD – (z ang. *finite difference time domain*), różnice skończone w dziedzinie czasu,

FFT – (z ang. *fast Fourier transform*), szybka transformacja Fouriera,

GPR – (z ang. *ground penetrating radar*), georadar,

NDT – (z ang. *non-destructive testing*), badania nieniszczące,

PML – (z ang. *perfectly matched layers*), warstwy idealnie dopasowane,

RBC – (z ang. *radiation boundary conditions*), radiacyjne warunki brzegowe,

RMS – (z ang. *root mean square*), średnia kwadratowa,

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

SHM – (z ang. *structural health monitoring*), system monitoringu technicznego,

STFT – (z ang. *short-time Fourier transform*), krótkoczasowa transformacja Fouriera,

SVM – (z ang. *support vector machine*), maszyna wektorów nośnych,

TE – (z ang. *transverse electric*), pole elektryczne prostopadłe do kierunku propagacji fali elektromagnetycznej,

TM – (z ang. *transverse magnetic*), pole magnetyczne prostopadłe do kierunku propagacji fali elektromagnetycznej.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

1. Wstęp

1.1. Diagnostyka konstrukcji inżynierskich

Ocena stanu technicznego istniejących konstrukcji inżynierskich wymaga przeprowadzenia szeregu prac, które nazywamy diagnostyką (z gr. *diagnosis* znaczy rozpoznanie, rozróżnianie, osądzanie). Innymi słowy jest to proces, który skutkuje postawieniem diagnozy. Diagnostyka konstrukcji inżynierskich jest dziedziną niezwykle ważną i złożoną. Wymaga posiadania interdyscyplinarnej wiedzy, a także zaangażowania ekspertów z różnych dziedzin nauki. Wyzwania i problemy, które pojawiają się podczas oceny bezpieczeństwa istniejących konstrukcji, są często bardziej wymagające od tych pojawiających się w fazie projektowania bądź wykonawstwa. Dotyczy to szczególnie oceny wieloparametrowej, która wymaga diagnozy wielu cech konstrukcji. Wówczas wykonuje się badania parametrów materiałowych, obliczenia i analizy wytrzymałościowe z uwzględnianiem realnych i projektowanych obciążeń, a także wykorzystuje się metody, które oceniają cechy inne niż wytrzymałość [26, 48].

W ostatnich latach nastąpił dynamiczny rozwój diagnostyki konstrukcji budowlanych z zastosowaniem badań nieniszczących (ang. *non-destructive testing, NDT*), np. [1, 46, 48] oraz ich wykorzystania w systemach monitoringu technicznego (ang. *structural health monitoring, SHM*), np. [50, 87, 88, 150]. Podstawowym celem badań nieniszczących jest ocena stanu konstrukcji ze szczególnym ukierunkowaniem na detekcję i lokalizację uszkodzeń oraz określenie ich wielkości, a także identyfikację wymiarów konstrukcji dostępnych jednostronnie czy też identyfikację rozkładu zbrojenia [48]. W ocenie stanu obiektów budowalnych szczególne znaczenie mają metody: dynamiczna, ultradźwiękowa, emisji akustycznej, radiograficzna czy też georadarowa. Diagnostyka dynamiczna polega na ocenie stanu konstrukcji na podstawie pomierzonych drgań oraz zidentyfikowanych charakterystyk modalnych. Może być wykorzystywana do badań elementów konstrukcji (np. [104, 161]), jak również całych obiektów (np. [140, 149]). Bardzo szerokie zastosowanie w diagnostyce konstrukcji mają również metody ultradźwiękowe, wykorzystujące zjawisko propagacji fal sprężystych. Można je stosować zarówno w konstrukcjach stalowych, żelbetowych, jak i ceglanych. W stalowych konstrukcjach prętowych i płytowych do detekcji uszkodzeń wykorzystuje się fale prowadzone (np. [106, 107, 164]). Pozwalają one również na diagnostykę momentu

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

dokręcającego w połączeniach śrubowych [57, 58] czy też ocenę jakości połączenia klejonego [59, 112]. W konstrukcjach żelbetowych przy użyciu fal ultradźwiękowych można określić obszary mikropęknięć, uszkodzeń, delaminacji, a także strefy niejednorodności betonu [47, 105, 110, 111]. Badania pokazują, iż można tę technikę wykorzystać przy diagnostyce kotew gruntowych [165, 166]. Przeprowadzone zostały również analizy doświadczalne i numeryczne, które potwierdzają użyteczność metody ultradźwiękowej do oceny skuteczności napraw konstrukcji betonowych [23, 28, 29]. W obiektach zabytkowych wykorzystano fale ultradźwiękowe do obrazowania tomograficznego w celu odtworzenia wewnętrznej struktury murowanych [116] bądź kamiennych filarów [14, 15]. Zastosowanie w diagnostyce konstrukcji żelbetowych i stalowych znalazła również metoda emisji akustycznej. Przy jej użyciu można wykryć uszkodzenia w konstrukcjach żelbetowych [37, 136] lub wstępnie sprężonych [133, 134], a także zidentyfikować pręty zbrojeniowe poddane korozji [148]. Z powodzeniem wykorzystano metodę emisji akustycznej do detekcji uszkodzeń stalowych obiektów mostowych [45, 122]. Do diagnostyki konstrukcji żelbetowych służy również metoda radiograficzna [101], która oprócz identyfikacji położenia prętów zbrojeniowych pozwala na diagnostykę mikrostruktury betonu [117].

1.2. Historia metody georadarowej

Badania nad wykorzystaniem zjawiska propagacji fal elektromagnetycznych rozpoczęły się na przełomie XIX i XX wieku. Powstał wówczas pierwowzór radaru, czyli „telemobilscope". Urządzenie wykrywające oddalone obiekty metalowe zostało zaprezentowane w 1904 roku przez jego twórcę niemieckiego fizyka, Christiana Hulsmeyera. Wynalazek nie umożliwiał jednak uzyskania informacji na temat odległości do wykrytego obiektu, dlatego też uznano go wówczas za bezużyteczny [56].

Kluczowymi postaciami, które miały znaczący wkład w rozwój metody georadarowej byli niemieccy fizycy Heinrich Lowy oraz Gotthelf Leimbach. W 1911 roku opatentowali oni urządzenie, które zdolne było wykrywać metalowe obiekty umieszczone w gruncie. Kilka lat później, w 1919 roku, Eduard Raven zaproponował urządzenie składające się z jednego odbiornika i dwóch nadajników fal elektromagnetycznych, które pozwalało na identyfikację obiektów o różnej przewodności. Swój wkład do rozwoju metody georadarowej dołożył także niemiecki fizyk Hulsenbeck, który w 1926 roku zauważył, iż przyczyną anomalii radarowej może być różnica między przenikalnością elektryczną poszukiwanego obiektu a ośrodkiem, w którym się on znajduje. Skonstruował on

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

urządzenie, które emitowało sygnał elektromagnetyczny w głąb gruntu, rejestrując falę odbitą przy użyciu oscyloskopu [56].

Po II wojnie światowej zaczęto coraz częściej wykorzystywać georadar do różnych zastosowań. Za jego pomocą określano grubości lodu na lodowcach lub wykorzystywano w kopalniach soli oraz węgla. Badano także dna zbiorników wodnych. Duży postęp w badaniach metodą georadarową zawdzięcza się programowi Apollo, gdyż wraz z człowiekiem na księżyc poleciał również georadar, który wykorzystano do badania warstw przypowierzchniowych księżyca [5, 56].

Polski wątek w metodzie georadarowej rozpoczął się na początku lat 80. w Wojskowej Akademii Technicznej. Skonstruowano wówczas prototyp georadaru, w skład którego wchodziła antena o częstotliwości środkowej równej 680 MHz. Urządzenie to zostało wykorzystane do pomiarów w kopalni soli, gdzie głębokość penetracji fali elektromagnetycznej wyniosła 300 m [56].

Historia rozwoju metody georadarowej wiąże się przede wszystkim z działalnością badawczą producentów sprzętu pomiarowego. W 1972 roku w Stanach Zjednoczonych powstała firma Geophysical Survey Syctem Inc. (GSSI), której sprzęt georadarowy wykorzystano do detekcji tuneli wojsk wietnamskich podczas wojny. Szwedzka firma MALA Geoscience w 1994 roku wprowadziła do sprzedaży georadar powierzchniowy RAMAC/GPR [56]. W 1980 roku, we Włoszech, została założona firma Ingegneria Dei Sistemi (IDS), która produkuje często stosowany do badań konstrukcji żelbetowych georadar Aladdin. Warto również wspomnieć o kanadyjskiej firmie Sensors & Software Inc., założonej przez Petera Annana, która w 1988 roku zaprezentowała georadar pulseEKKO. Obecnie rynek producentów sprzętu georadarowego jest bardzo szeroki i obejmuje anteny zarówno otworowe jak i powierzchniowe, o szerokim zakresie częstotliwości środkowej anten od 40 MHz do 3000 MHz.

1.3. Metoda georadarowa w diagnostyce konstrukcji żelbetowych i ceglanych

Metoda georadarowa (ang. *ground penetrating radar, GPR*) jest metodą geofizyczną, wykorzystującą zjawisko propagacji fal elektromagnetycznych. Początkowo, jak wskazuje angielska nazwa, używano tej techniki do badań geofizycznych i geologicznych [34, 35, 51, 121, 144]. W miarę jej rozwoju i pojawiania się anten o szerokim zakresie częstotliwości znalazła szersze zastosowanie i zaczęła być z powodzeniem wykorzystywana w diagnostyce mostów [4, 12], tuneli [153, 162], elementów

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

prefabrykowanych [60, 123], nawierzchni drogowych [77, 131], konstrukcji gruntowo-powłokowych [61, 135] oraz budynków [36, 91].

Istotną kwestią w diagnostyce konstrukcji żelbetowych jest inspekcja prętów zbrojeniowych, szczególnie ich rozkładu, liczby i średnicy, a także identyfikacja uszkodzeń betonu. Poprzednie badania wskazują na duży potencjał metody georadarowej w określaniu położenia i liczby prętów zbrojeniowych [13, 65, 108] oraz możliwości wykrycia różnego rodzaju defektów w betonie [158]. Przeanalizowano wpływ rozstawu między prętami i możliwość identyfikacji poszczególnych prętów [97]. Wykorzystano technikę GPR do wykrywania stref o zwiększonej wilgotności [4, 152], ustalania grubości elementów konstrukcyjnych [100] oraz oszacowania usuniętej warstwy betonu z płyty mostu [143]. Sprawdzono na próbkach laboratoryjnych możliwości wykrycia skorodowanych prętów [49]. Ponadto opracowano szereg procedur, mających na celu ułatwienie interpretacji danych georadarowych [22, 52]. Sporządzono algorytm do detekcji pęknięć w żelbetowym obiekcie mostowym na bazie przetworzonych map georadarowych [10]. Na podstawie danych numerycznych opracowano automatyczny algorytm wykrywania uszkodzeń przy użyciu maszyny wektorów nośnych (ang. *support vector machine*, *SVM*) [155]. Podjęto również próby ustalenia średnicy zbrojenia na podstawie autorskich algorytmów przetwarzania danych georadarowych [21, 115, 142, 160].

Ocena aktualnego stanu technicznego konstrukcji bez wpływu w jej strukturę ma ogromne znaczenie w diagnostyce zabytków, które bardzo często są wykonane z cegły bądź kamieni. Wiele zabytkowych budowli przez lata poddawano naprawie lub wzmacnianiu zarówno wewnętrznie (np. poprzez wtryskiwanie materiału cementowego do ścian [55], poprzez zbrojenie ścian za pomocą prętów stalowych i mikropali [90]), jak i zewnętrznie (np. za pomocą metalowych łączników wokół konstrukcji [62]). Głównymi celami pomiarów georadarowych w obiektach murowanych są [17]: identyfikacja stanu zachowania konstrukcji, kontrola skuteczności naprawy technikami iniekcyjnymi, a także lokalizacja różnych materiałów (drewno, stal) oraz wewnętrznych pustek powietrza. Badania doświadczalne potwierdzają, iż możliwa jest identyfikacja pustek powietrznych i braków w zaprawie w ścianach murowanych [41, 83], a także określenie rozkładu wilgoci w konstrukcji ceglanej [20, 73]. Z powodzeniem wykorzystano metodę georadarową w ocenie romańskiego mostu w Fillaboa (Hiszpania) [95], mostu w Mondariz (Hiszpania) [80], katedry Najświętszej Marii Panny na Majorce (Hiszpania) [96], dzwonnicy w Cremonie (Włochy) [16], katedry św. Agaty w Katanii (Włochy) [53],

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

katedry św. Mikołaja w Noto (Włochy) [14] oraz kościoła Santa Maria di Collemaggio w L'Aquili (Włochy) [119].

Trudnością, jaka się pojawia przy pomiarach metodą georadarową, jest poprawna interpretacja radargramów. W takich przypadkach numeryczne modelowanie propagacji fali elektromagnetycznej, staje się potężnym narzędziem, które pozwala zrozumieć pochodzenie odbić pojawiających się na radargramach [32]. Najczęściej używaną metodą numeryczną do analizy zagadnień georadarowych jest metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu [157]. Obliczenia numeryczne stosuje się jako narzędzie do interpretacji wyników pomiarów dla konstrukcji żelbetowych [153], murowych [42, 109] i kamiennych [125–128]. Ponadto modelowanie propagacji fali elektromagnetycznej pozwala zweryfikować autorskie algorytmy przetwarzania danych georadarowych [155]. W większości prac poświęconych modelowaniu propagacji fal elektromagnetycznych wykorzystano modele dwuwymiarowe (np. [24, 63, 66]). W ostatnich latach zaczyna się wdrażać trójwymiarowe modele numeryczne do symulacji GPR, jednak obecne ich zastosowania koncentrują się głównie na złożonym modelowaniu ośrodka gruntowego [31, 78].

1.4. Cel i zakres pracy

Głównym celem pracy jest opracowanie procedur, które pozwolą na efektywniejsze wykorzystywanie metody georadarowej w diagnostyce konstrukcji żelbetowych i ceglanych. Szczególną uwagę poświecono sposobom identyfikacji prędkości propagacji fali elektromagnetycznej na podstawie anomalii zarejestrowanych na mapach georadarowych oraz wykorzystaniu modelowania numerycznego jako wsparcia w interpretacji danych georadarowych i weryfikacji autorskich algorytmów.

Rozprawa składa się ośmiu rozdziałów. Rozdział 1 zawiera opis metod diagnostyki konstrukcji inżynierskich, historię metody georadarowej oraz przegląd jej zastosowań w diagnostyce konstrukcji żelbetowych i ceglanych.

Rozdział 2 poświęcony jest podstawom teoretycznym propagacji fal elektromagnetycznych. Przedstawione zostały równania Maxwella, które opisują zjawisko propagacji fal elektromagnetycznych oraz równania i parametry konstytutywne. Ostatnią część rozdziału poświęcono opisowi matematycznemu materiału dyspersyjnego.

W rozdziale 3 przedstawiono podejście numeryczne do rozwiązywania elektromagnetycznego problemu brzegowego za pomocą metody różnic skończonych w dziedzinie czasu. Zaprezentowano schemat i algorytm Yee, a także równania, które

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

stanowią podstawę symulacji dwu i trójwymiarowych. Następnie opisano sposoby modelowania ośrodków heterogenicznych, a także zaprezentowano autorski sposób modelowania numerycznego heterogenicznego betonu.

Praktyczne aspekty pomiarów metodą georadarową opisano w rozdziale 4. W pierwszej jego części przedstawiono zasadę działania georadaru wraz z jego ograniczeniami i parametrami pomiarowymi, a także scharakteryzowano używany sprzęt pomiarowy i metodologię pomiarów. Następnie opisano wybrane procedury przetwarzania danych georadarowych. Przedstawiono metody ustalania czasu zerowego i przeprowadzono pomiary kalibracyjne w celu identyfikacji czasu zerowego dla używanej anteny.

Rozdział 5 został poświęcony sposobom identyfikacji prędkości propagacji fali elektromagnetycznej. Przedstawiono znane z literatury modele hiperbol dyfrakcyjnych, które umożliwiają wyznaczenie prędkości fali elektromagnetycznej. Zaproponowano również autorski model hiperboli, który pozwala na dokładniejsze ustalenie wartości prędkości niż znane do tej pory metody. W dalszej części rozdziału zawarto autorskie modele dyfrakcji na granicy ośrodków, tj. model dyfrakcji na pionowej spoinie, na narożach prostokątnego obiektu, a także model ugiętej hiperboli. Zaproponowane modele anomalii obserwowanych na mapach georadarowych zostały poddane weryfikacji na danych numerycznych.

W rozdziale 6 przedstawiono analizę możliwości diagnostycznych metody georadarowej na dwóch przykładach testowych, tj. próbce żelbetowej oraz murze ceglanym. Na przykładzie próbki żelbetowej zidentyfikowano prędkość fali elektromagnetycznej za pomocą opisanych wcześniej modeli hiperbol, a także wykonano obliczenia przy użyciu autorskiego heterogonicznego modelu numerycznego betonu wraz z ich walidacją doświadczalną. W drugiej części rozdziału przeprowadzano analizę możliwości wykrycia różnych typów defektów w konstrukcji murowej.

Rozdział 7 poświęcony jest praktycznym zastosowaniom metody georadarowej w diagnostyce konstrukcji inżynierskich. Opisano cztery przykłady praktyczne. Pierwsze dwa dotyczyły diagnostyki dwóch żelbetowych kładek dla pieszych. W badaniach przeanalizowano wpływ różnych układów prętów zbrojeniowych oraz zawartości wody na wyniki pomiarów georadarowych. Kolejne dwa przykłady obejmowały diagnostykę ceglanych ścian i filarów, które zostały wzmocnione elementami żelbetowymi. Przeprowadzone badania koncentrowały się na wyznaczeniu wartości prędkości fali

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

elektromagnetycznej, a także identyfikacji systemu zbrojenia i granicy między materiałami.

Wnioski końcowe oraz plany dalszej pracy zawarto w rozdziale 8.

Jako elementy oryginalne zawarte w niniejszej rozprawie można wskazać:

- cztery modele matematyczne anomalii rejestrowanych na mapach georadarowych: (i) matematyczny model hiperboli dyfrakcyjnej uwzględniający rozmiar pręta, rozstaw między dwoma antenami, a także fakt, iż fala odbija się od powierzchni pręta, (ii) matematyczny model dyfrakcji na pionowej inkluzji, (iii) matematyczny model dyfrakcji na narożach prostokątnego obiektu zanurzonego w innym materiale, (iv) matematyczny model ugiętej hiperboli dyfrakcyjnej oraz ich wykorzystanie do identyfikacji propagacji fali elektromagnetycznej w konstrukcjach żelbetowych i ceglanych, a także do identyfikacji granicy między ośrodkami;
- opracowanie dwóch metod ekstrakcji hiperbol dyfrakcyjnych z map georadarowych: (i) metody dwóch krzywych, (ii) metody jednej krzywej oraz weryfikacja wpływu wyboru metody na rezultaty dopasowania hiperbol;
- analiza wzajemnego usytuowania prętów w konstrukcjach żelbetowych ze złożonym systemem zbrojenia;
- analiza możliwości wykrycia różnych typów defektów w ceglanym murze;
- opracowanie heterogenicznego modelu numerycznego betonu wraz z algorytmem adaptacji parametrów elektrycznych;
- zastosowanie opracowanego heterogenicznego numerycznego modelu betonu do analiz konstrukcji żelbetowej o dwóch różnych stopniach zawilgocenia;
- wykorzystanie modelowania 3D do diagnostyki konstrukcji żelbetowych i ceglanych, jako wsparcie w interpretacji danych pomiarowych, a także weryfikacji algorytmów przetwarzania danych.

Wyniki zawarte w pracy zostały częściowo opublikowane w artykułach [64, 67–69, 109] oraz były podstawą zgłoszenia patentowego [70].

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

2. Podstawy teoretyczne propagacji fal elektromagnetycznych

W XIX wieku wielu naukowców (m.in. André Ampère, Michael Faraday, Carl Friedrich Gauss, Heinrich Lenz, Alessandro Volta, Charles Coulomb) prowadziło badania nad elektromagnetyzmem, proponując fundamentalne prawa fizyki na bazie eksperymentów [8]. Pozwoliło to na sformułowanie podstaw teoretycznych propagacji fal elektromagnetycznych poprzez równania, które zebrał i uogólnił James Maxwell.

2.1. Równania Maxwella

Prawa fizyki, opisujące zjawiska elektromagnetyczne w ujęciu makroskopowym, zostały nazwane równaniami Maxwella. Są to równania różniczkowe cząstkowe pierwszego rzędu, które służą do opisu i powiązania gęstości prądu, gęstości ładunku oraz wektorów pola w dowolnym punkcie przestrzeni i czasu. Pierwsze równanie zostało sformułowane przez angielskiego fizyka i chemika Michaela Faradaya. Prawo Ampera, francuskiego fizyka i matematyka, jest podstawą drugiego równania. Maxwell uogólnił je, wprowadzając gęstość prądu przesunięcia, gdyż prawo Ampera obejmowało tylko przypadek prądów stałych. Podstawą dwóch ostatnich równań Maxwella są prawa Gaussa dla indukcji magnetycznej i elektrycznej. W formie różniczkowej równania Maxwella przybierają postać [98]:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \tag{2.1}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}, \tag{2.2}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \tag{2.3}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \tag{2.4}$$

gdzie:

$\mathbf{H}$ – wektor natężenia pola magnetycznego,

$\mathbf{E}$ – wektor natężenia pola elektrycznego,

$\mathbf{B}$ – wektor indukcji magnetycznej,

$\mathbf{D}$ – wektor indukcji elektrycznej,

$\mathbf{J}$ – wektor gęstości prądu,

ρ – gęstość ładunku swobodnego.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Do rozwiązania elektromagnetycznego problemu brzegowego najczęściej stosuje się właśnie formę różniczkową równań Maxwella. Zakłada się, że wektory pola są jednowartościowymi, ograniczonymi, ciągłymi funkcjami w czasie i przestrzeni. Wektory pola, występujące w falach elektromagnetycznych, posiadają opisane wyżej cechy, z wyjątkiem gwałtownych zmian w ładunkach i gęstościach prądu [8].

Pełen opis wektorów pola w dowolnym punkcie w przestrzeni i czasie wymaga nie tylko różniczkowej postaci równań Maxwella, ale również zdefiniowanych warunków brzegowych. W przypadku problemów brzegowych, które zachowują pełną symetrię stosuje się całkową formę równań Maxwella [8]. Korzystając z twierdzenia Stokesa oraz Gaussa-Ostrogradskiego uzyskujemy postać całkową [98]:

$$\oint_l \mathbf{E}\, dl = -\oiint_A \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot \mathbf{n}\, dA, \tag{2.5}$$

$$\oint_l \mathbf{H}\, dl = \oiint_A \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \mathbf{n}\, dA, \tag{2.6}$$

$$\oiint_A \mathbf{D} \cdot \mathbf{n}\, dA = \oiiint_V \rho\, dV, \tag{2.7}$$

$$\oiint_A \mathbf{B} \cdot \mathbf{n}\, dA = 0. \tag{2.8}$$

2.2. Równania konstytutywne

W elektromagnetyzmie możemy wyróżnić ośrodki materialne oraz próżnię, a cechą podziału nie są właściwości mechaniczne, lecz elektryczne. Ośrodki materialne zawierające naładowane cząstki, gdy są poddane działaniu pola elektromagnetycznego wytwarzają prądy i modyfikują propagację fali elektromagnetycznej. W celu identyfikacji zmiany, którą spowodowało pole elektromagnetyczne oraz wyznaczenia zależności między wektorami **E**, **H**, **D**, **B**, **J** definiuje się tzw. równania konstytutywne (materiałowe) [8, 89]:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \tag{2.9}$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \tag{2.10}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \tag{2.11}$$

gdzie:

μ – przenikalność magnetyczna,

ε – przenikalność elektryczna,

σ – konduktywność (przewodność elektryczna).

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

2.3. Rodzaje ośrodków

Ośrodek można nazwać liniowym, jeżeli parametry konstytutywne danego materiału są stałe i nie zależą od działającego pola. W przeciwnym razie ośrodek taki nazywamy nieliniowym. Wiele materiałów w pewnych zakresach działającego pola elektromagnetycznego wykazuje liniową charakterystykę, jak na przykład powietrze w zakresie 10^6 V/m [8].

Jeżeli parametry konstytutywne nie są zależne od kierunku działającego pola, wówczas taki ośrodek nazywa się izotropowym. W przeciwnym przypadku, ośrodek nazywamy anizotropowym i parametry materiałowe zapisujemy w postaci tensorów.

Ośrodek nazywa się jednorodnym (homogenicznym), jeśli parametry materiałowe nie są zależne od współrzędnych punktu. Gdy chociaż jeden z nich jest uzależniony od współrzędnych, ośrodek nazywamy niejednorodnym (heterogenicznym).

Gdy parametry konstytutywne danego ośrodka nie zależą od częstotliwości, wówczas ośrodek nazywany jest niedyspersyjnym. W praktyce parametry konstytutywne większości materiałów są uzależnione w pewnym stopniu od częstotliwości. Nazywamy je wówczas ośrodkami dyspersyjnymi [8].

2.4. Parametry konstytutywne

Parametry konstytutywne, które uzależniają między sobą wektory pola elektromagnetycznego, określają właściwości elektryczne danego materiału (por. (2.9)–(2.11)). Stanowią one podstawę do podziału materiałów na dielektryki, magnetyki i przewodniki. Dielektryki posiadają właściwości izolacyjne i w przypadku idealnego dielektryka charakteryzują się tym, iż wartość konduktywności jest równa zero ($\sigma = 0$). Magnetyki, czyli materiały, które ulegają zewnętrznemu polu magnetycznemu możemy podzielić na paramagnetyki, diamagnetyki i ferromagnetyki. Większość jednak materiałów pozostaje niemagnetyczna, co przejawia się w wartości przenikalności magnetycznej $\mu_r = 1$. Ośrodki, których konduktywność charakteryzuje się wysokimi wartościami, nazywamy przewodnikami, tj. materiałami, które są zdolne do przewodzenia prądu elektrycznego. W ogólnym przypadku można powiedzieć, iż większość materiałów jest nieliniowa, anizotropowa, niejednorodna i dyspersyjna. Jednakże często wystarczającym przybliżeniem jest założenie, iż mamy do czynienia z jednorodnym, izotropowym i liniowym materiałem [8, 30]. W takim przypadku tensory przenikalności magnetycznej i elektrycznej upraszcza się do skalarów, uzyskując:

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 , \tag{2.12}$$

$$\mu = \mu_r \mu_0 , \tag{2.13}$$

gdzie:

ε_0 – przenikalność elektryczna próżni ($\varepsilon_0 = 8.854187817 \cdot 10^{-12}$ F/m),

ε_r – względna przenikalność elektryczna,

μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni ($\mu_0 = 12.566370614 \cdot 10^{-7}$ H/m),

μ_r – względna przenikalność magnetyczna.

Wartości względne wymienionych parametrów są wartościami bezwymiarowymi i określają ile razy parametr bezwzględny jest większy od wartości dla próżni. Wartości tych parametrów wyznaczają prędkość propagacji fali elektromagnetycznej w ośrodku, według zależności [89]:

$$\varepsilon\mu = \frac{1}{v^2} , \tag{2.14}$$

$$\varepsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2} , \tag{2.15}$$

gdzie:

v – prędkość fali elekromagnetycznej w ośrodku,

c – prędkość światła w próżni ($c \simeq 29.98$ cm/ns).

Zazwyczaj jednak parametry konstytutywne zależą od częstości pola elektromagnetycznego. Stąd drugie równania Maxwella przybiera postać [33]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = i\omega\hat{\varepsilon}\mathbf{E} + \hat{\sigma}\mathbf{E} , \tag{2.16}$$

gdzie zespolona przenikalność elektryczna i konduktywność mają formę:

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon' - i\varepsilon'' , \tag{2.17}$$

$$\hat{\sigma} = \sigma' - i\sigma'' , \tag{2.18}$$

gdzie:

ε' – rzeczywista część przenikalności elektrycznej,

ε'' – urojona część przenikalności elektrycznej (odpowiedzialna za tłumienie),

σ' – rzeczywista część konduktywności,

σ'' – urojona część konduktywności,

i – jednostka urojona,

ω – częstość kołowa.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Na podstawie zależności (2.16) można zdefiniować efektywną (skuteczną) przenikalność ε_e, która uwzględnia wartość zarówno przenikalności elektrycznej, jak i konduktywności [76]:

$$\varepsilon_e = \varepsilon + \frac{\sigma}{i\omega} = \varepsilon_e' - i\varepsilon_e''. \tag{2.19}$$

2.5. Materiały dyspersyjne

Materiał nazywamy dyspersyjnym, gdy jego przenikalność elektryczna bądź magnetyczna jest uzależniona od częstotliwości. Na potrzeby niniejszej rozprawy ograniczono rozważania do omówienia modeli dyspersji jedynie dla przenikalności elektrycznej. Dla materiału homogenicznego, izotropowego i liniowego przy stałej częstości pola elektromagnetycznego można zapisać jedno z równań konstytutywnych (2.9) w następującej formie [118]:

$$\mathbf{D}(\omega) = \varepsilon_0 \mathbf{E}(\omega) + \varepsilon_0 \chi(\omega) \mathbf{E}(\omega), \tag{2.20}$$

gdzie:

$\mathbf{D}(\omega)$ – wektor indukcji elektrycznej w funkcji częstości,

$\mathbf{E}(\omega)$ – wektor natężenia pola elektrycznego w funkcji częstości,

$\chi(\omega)$ – podatność elektryczna.

Przenikalność elektryczna w funkcji częstości przybiera wówczas postać [118]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 \varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_0 \left(\varepsilon_\infty + \chi(\omega)\right), \tag{2.21}$$

gdzie:

ε_∞ – przenikalność elektryczna dla bardzo wysokich częstości.

Jak można zauważyć z powyższych zależności, uwzględnienie dyspersji w danym materiale polega na zastosowaniu odpowiedniej funkcji podatności. Poniżej przedstawiono model dyspersji Debye'a, który jest zalecany dla większości zakresów częstotliwościowych w metodzie georadarowej [33]. Funkcja podatności dana jest wzorem [137]:

$$\chi(\omega) = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + i\omega\tau_d}, \tag{2.22}$$

gdzie:

ε_s – przenikalność elektryczna przy prądzie stałym,

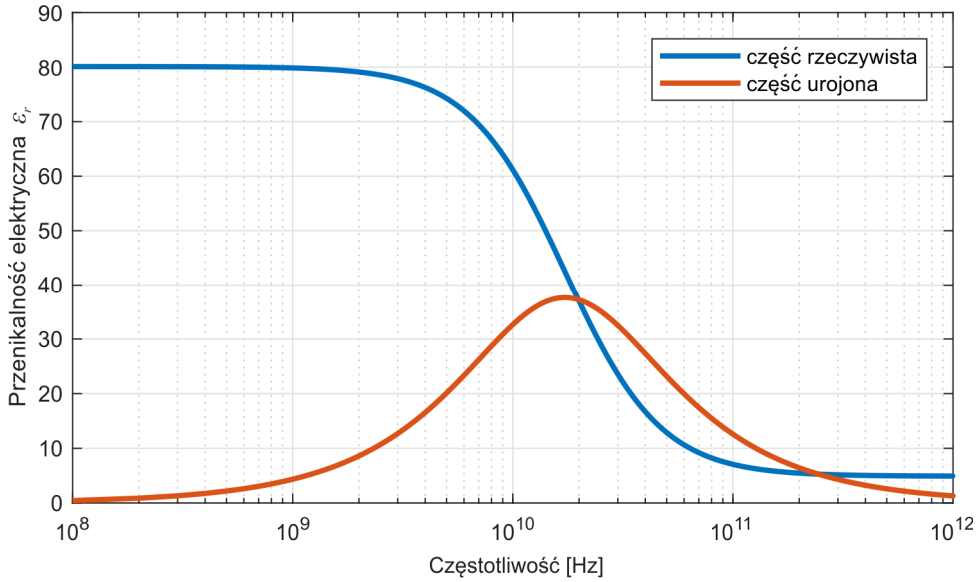
τ_d – czas relaksacji.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Zgodnie z zależnością (2.21) oraz (2.22) względna przenikalność elektryczna przyjmuje postać:

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + i\omega\tau_d}. \tag{2.23}$$

Na rys. 2.1 przedstawiono wykres zależności przenikalności elektrycznej (części rzeczywistej i urojonej) od częstotliwości w modelu Debye'a dla wody ($\varepsilon_s = 80.1$, $\varepsilon_\infty = 4.8$ oraz $\tau_d = 9.2134 \cdot 10^{-12}$).



Rys. 2.1. Zależność przenikalności elektrycznej od częstotliwości w modelu dyspersji Debye'a dla wody

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

3. Numeryczne modelowanie propagacji fal elektromagnetycznych

Elektromagnetyczny problem brzegowy można rozwiązać za pomocą metod analitycznych bądź numerycznych. Wśród powszechnie stosowanych metod analitycznych można wyróżnić: metodę separacji zmiennych, analizę w domenie spektralnej, metodę obrazów czy też funkcję Greena. Do najbardziej popularnych metod numerycznych, których używa się do rozwiązania elektromagnetycznych problemów brzegowych, można zaliczyć: metodę różnic skończonych w dziedzinie czasu, metodę różnic skończonych, metodę elementów skończonych, metodę momentów oraz metodę macierzy linii transmisyjnych [30].

Do obliczeń propagacji fal elektromagnetycznych w diagnostyce konstrukcji techniką georadarową najczęściej wykorzystuje się metodę różnic skończonych w dziedzinie czasu. Jest to metoda numeryczna, która rozwiązuje równania Maxwella, uwzględniając zależność pola elektromagnetycznego od współrzędnych czasu i przestrzeni. W 1966 roku Yee zaproponował algorytm dyskretyzacji i metodę rozwiązywania równań Maxwella [157]. Początkowo jego rozwiązania nie przyjęto z entuzjazmem. Dopiero w 1975 roku Taflove [139] przypomniał zaproponowane przez Yee rozwiązanie oraz wprowadził warunek stabilności metody dla jednego, dwóch i trzech wymiarów analizy. W 1980 roku nazwał algorytm Yee metodą różnic skończonych w dziedzinie czasu (ang. *finite difference time domain, FDTD*) [138], która jest używana do dzisiaj i stanowi rdzeń wielu programów numerycznych używanych do rozwiązywania problemów elektromagnetycznych. Podstawową zaletą tej metody jest wysoka dokładność oraz łatwość w modelowaniu ośrodków, poprzez nadawanie cech elektrycznych i magnetycznych poszczególnym punktom siatki.

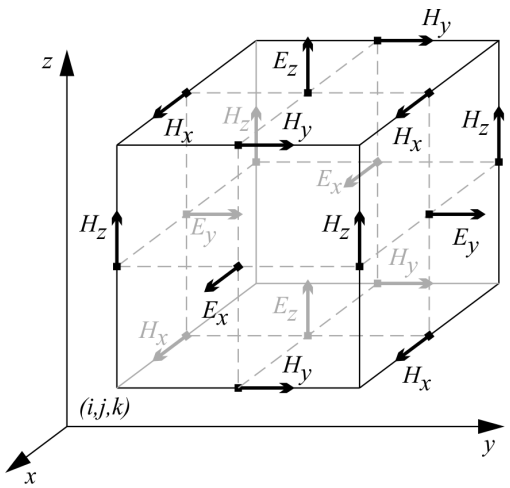
Numeryczne modelowanie propagacji pola elektromagnetycznego stanowi nieocenioną pomoc w interpretacji danych doświadczalnych uzyskiwanych techniką GPR. Umożliwia zidentyfikowanie źródeł poszczególnych odbić i dyfrakcji w mapach georadarowych. Pozwala także uzyskać niezbędne doświadczenie w analizowaniu radargramów. Dodatkowo, za pomocą symulacji numerycznych, można zweryfikować autorskie algorytmy przetwarzania danych. Obliczenia przeprowadzone w ramach niniejszej rozprawy wykonano za pomocą programu gprMax [32, 146], który

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

wykorzystuje metodę FDTD. Niniejszy rozdział zawiera najważniejsze informacje na temat tej metody.

3.1. Algorytm Yee

Opracowany przez Yee algorytm rozwiązywania problemów propagacji fali elektromagnetycznej przedstawia zbiór równań różnic skończonych dla czasowo zależnego układu równań Maxwella. Algorytm Yee za pomocą sprzężonych równań Maxwella oblicza wektory pól elektrycznych i magnetycznych w czasie i przestrzeni, zamiast pojedynczo rozwiązywać wektory pola elektrycznego (lub pola magnetycznego) z równania falowego. Wyznaczanie wektorów **E** i **H** jednocześnie pozwala na uzyskanie stabilniejszego rozwiązania. Składowe pól magnetycznych i elektrycznych są ustawione w taki sposób, że jedna składowa wektora **H** jest otoczona przez cztery składowe wektora **E**, a jedną składową wektora **E** otaczają cztery sąsiadujące składowe wektora **H**, co pokazano na rys. 3.1. Takie ustawienie wektorów dobrze odzwierciedla prawa Faradaya oraz Ampera. Składowe pola elektrycznego są obliczane na zmianę ze składowymi pola magnetycznego. Na podstawie wartości **E** z poprzedniego kroku obliczane są wartości **H**, które następnie służą do obliczenia wartości **E** w kroku następnym. Taki mechanizm określono jako „skok przez plecy" (ang. *leapfrog*). Proces ten jest w pełni jawny (ang. *fully explicit*), dzięki czemu nie występuje problem jednoczesnego odwracania macierzy i rozwiązywania równań. W rozwiązaniu używa się centralnych ilorazów różnicowych o dokładności drugiego rzędu. Modelowanie parametrów materiałowych (μ, ε, σ) polega na zdefiniowaniu ich wartości w każdym punkcie siatki Yee (punkt zaczepienia składowych wektorów pola, por. rys. 3.1) [137].



Rys. 3.1. Kostka Yee dla symulacji trójwymiarowych

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Algorytm Yee można zapisać w następujący sposób [118]:

1. W wybranym obszarze obliczeniowym dokonuje się dyskretyzacji dla zdefiniowanego kroku czasowego oraz przestrzennego, a każdemu punktowi na siatce nadaje się parametry materiałowe.
2. Pochodne z równań Maxwella zastępuje się centralnymi różnicami skończonymi, uzyskując zestaw równań sprzężonych definiujących (nieznane) „przyszłe" wektory pól za pomocą (znanych) „przeszłych" wektorów pól.
3. Oblicza się „przyszłe" wektory pola magnetycznego, które jednocześnie stają się „przeszłymi" wektorami.
4. Oblicza się „przyszłe" wektory pola elektrycznego, które jednocześnie stają się „przeszłymi" wektorami.
5. Ostatnie dwa kroki powtarza się, aż do ukończenia założonego czasu symulacji. W procesie iteracyjnym uwzględnia się warunki brzegowe oraz źródła promieniowania.

3.2. Sformułowanie równań metody różnic skończonych w dziedzinie czasu

Sformułowanie sprzężonych równań metody różnic skończonych w dziedzinie czasu wymaga zmiany modelu ciągłego na model dyskretny. Krok czasowy oraz kroki przestrzenne są używane do aproksymacji pochodnych cząstkowych, występujących w równaniach Maxwella, za pomocą centralnych różnic skończonych. W niniejszym rozdziale pokazano równania metody różnic skończonych w dziedzinie czasu dla symulacji dwuwymiarowych oraz trójwymiarowych. W opisie przyjęto oznaczenia:

- dla chwili czasu,

$$t_n = n\Delta t\,, \tag{3.1}$$

- dla punktu w przestrzeni,

$$x = i\Delta x, \quad y = j\Delta y, \quad z = k\Delta z\,, \tag{3.2}$$

- dla wartości funkcji $u(x, y, z, t_n)$ w chwili czasu n w punkcie i, j, k,

$$u(x, y, z, t_n) = u\big|_{i,j,k}^{n}\,. \tag{3.3}$$

Centralne różnice skończone drugiego rzędu dane są wzorem:

$$\left.\frac{\partial u}{\partial x}\right|_i^n \simeq \frac{u_{i+1/2}^n - u_{i-1/2}^n}{\Delta x}\,. \tag{3.4}$$

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

3.2.1. Symulacje dwuwymiarowe

Symulacje numeryczne przeprowadzone na dwuwymiarowych modelach, pozwalają na uzyskanie obliczonych map georadarowych, które stanowią pomoc w interpretacji danych pomiarowych. Dzięki uproszczeniu symulacji do dwóch wymiarów skraca się czas prowadzonych obliczeń, co pozwala na stosowanie siatek dyskretyzacyjnych ze stosunkowo gęstym rozstawem węzłów. Jednakże w przypadku bardziej rozbudowanych konstrukcji, gdzie w badanym ośrodku istnieje wiele źródeł dyfrakcji, modelowanie propagacji fali elektromagnetycznej w dwóch wymiarach może okazać się zbyt dużym uproszczeniem.

Poniżej przedstawiono sprzężone równania Maxwella dla symulacji dwuwymiarowych, w których pole magnetyczne albo pole elektryczne jest prostopadłe do kierunku propagacji fali elektromagnetycznej, tj. odpowiednio: polaryzacji TM^z (ang. *transverse magnetic*) lub TE^z (ang. *transverse electric*). Obliczenia dwuwymiarowe prowadzone w programie gprMax [146] wykorzystują polaryzację TM^z.

3.2.1.1. Polaryzacja TM^z

Polaryzacja TM^z oznacza, iż wektory pola magnetycznego są prostopadłe do kierunku propagacji fali elektromagnetycznej, a składowe pól elektrycznych i magnetycznych upraszczają się do trzech wektorów H_x, H_y oraz E_z. Równania Maxwella w ośrodku izotropowym można zapisać jako [113]:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \tag{3.5}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E}. \tag{3.6}$$

Wyrażając je w prostokątnym układzie współrzędnych otrzymuje się zestaw trzech równań sprzężonych [118]:

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = -\frac{1}{\mu}\frac{\partial E_z}{\partial y}, \tag{3.7}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu}\frac{\partial E_z}{\partial x}, \tag{3.8}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z\right). \tag{3.9}$$

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Zastępując pochodne z równań (3.7)–(3.9) centralnymi różnicami skończonymi (3.4) uzyskujemy:

$$\frac{H_x\big|_{i,j+1/2}^{n+1/2} - H_x\big|_{i,j+1/2}^{n-1/2}}{\Delta t} = -\frac{1}{\mu}\frac{E_z\big|_{i,j+1}^{n} - E_z\big|_{i,j}^{n}}{\Delta y}, \tag{3.10}$$

$$\frac{H_y\big|_{i+1/2,j}^{n+1/2} - H_y\big|_{i+1/2,j}^{n-1/2}}{\Delta t} = \frac{1}{\mu}\frac{E_z\big|_{i+1,j}^{n} - E_z\big|_{i,j}^{n}}{\Delta x}, \tag{3.11}$$

$$\begin{aligned}\frac{E_z\big|_{i,j}^{n+1} - E_z\big|_{i,j}^{n}}{\Delta t} = \frac{1}{\varepsilon}\Bigg(&\left[\frac{H_y\big|_{i+1/2,j}^{n+1/2} - H_y\big|_{i-1/2,j}^{n+1/2}}{\Delta x}\right] + \\ &-\left[\frac{H_x\big|_{i,j+1/2}^{n+1/2} - H_x\big|_{i,j-1/2}^{n+1/2}}{\Delta y}\right] - \sigma\frac{E_z\big|_{i,j}^{n+1} - E_z\big|_{i,j}^{n}}{\Delta t}\Bigg).\end{aligned} \tag{3.12}$$

Ostatecznie, przekształcając równania (3.10)–(3.12) otrzymujemy zestaw równań sprzężonych metody FDTD w dwóch wymiarach dla polaryzacji TM^z:

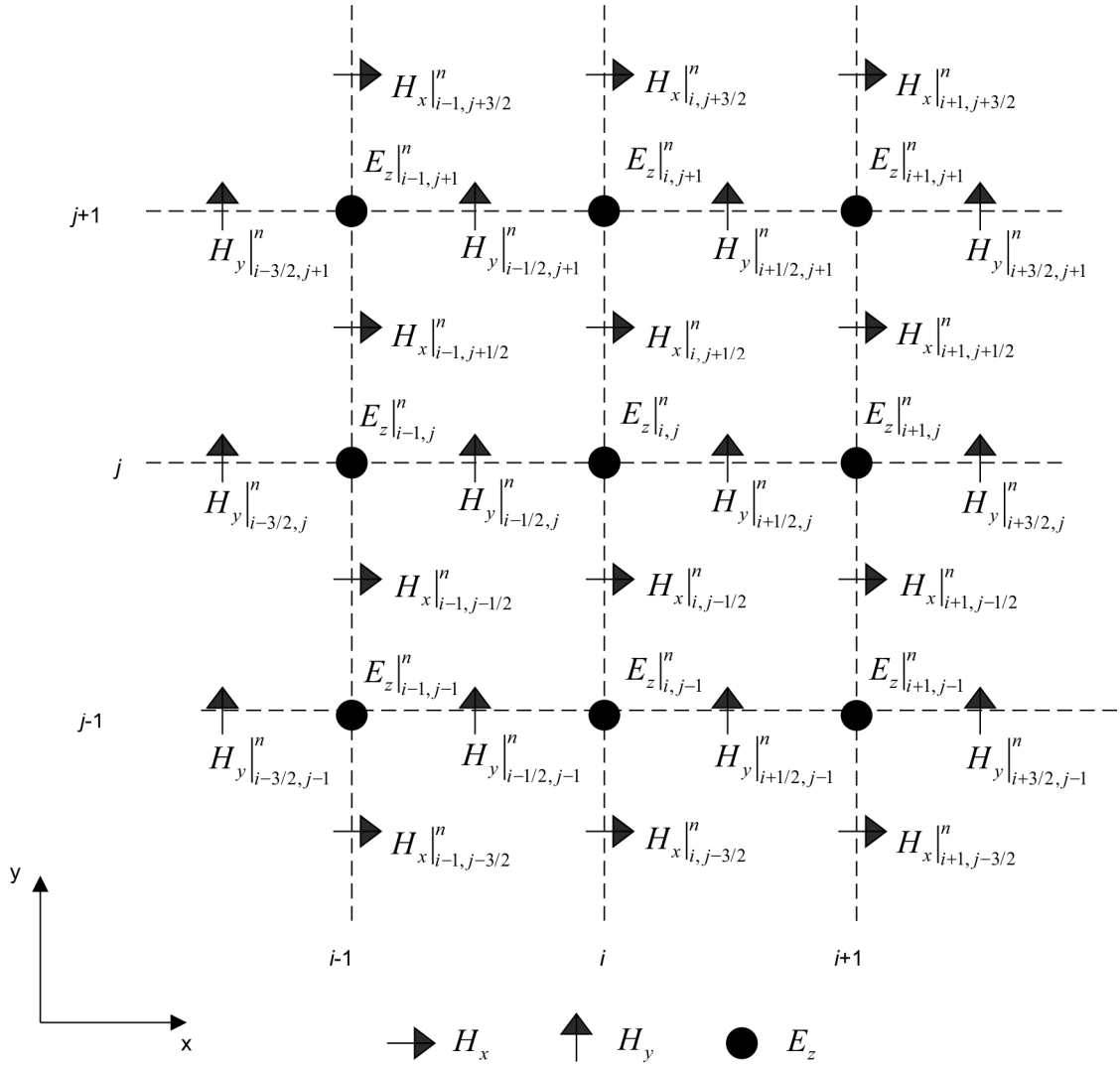
$$H_x\big|_{i,j+1/2}^{n+1/2} = H_x\big|_{i,j+1/2}^{n-1/2} - \frac{\Delta t}{\mu\Delta y}\left(E_z\big|_{i,j+1}^{n} - E_z\big|_{i,j}^{n}\right), \tag{3.13}$$

$$H_y\big|_{i+1/2,j}^{n+1/2} = H_y\big|_{i+1/2,j}^{n-1/2} + \frac{\Delta t}{\mu\Delta x}\left(E_z\big|_{i+1,j}^{n} - E_z\big|_{i,j}^{n}\right), \tag{3.14}$$

$$\begin{aligned}E_z\big|_{i,j}^{n+1} = \frac{1-\dfrac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon}}{1+\dfrac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon}}E_z\big|_{i,j}^{n} + \frac{1}{1+\dfrac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon}}\Bigg(&\frac{\Delta t}{\varepsilon\Delta x}\left[H_y\big|_{i+1/2,j}^{n+1/2} - H_y\big|_{i-1/2,j}^{n+1/2}\right] + \\ &-\frac{\Delta t}{\varepsilon\Delta y}\left[H_x\big|_{i,j+1/2}^{n+1/2} - H_x\big|_{i,j-1/2}^{n+1/2}\right]\Bigg).\end{aligned} \tag{3.15}$$

Można zauważyć, iż składowe pola magnetycznego i elektrycznego po lewej stronie równań (3.13)–(3.15) są wartościami „przyszłymi”, wyrażonymi przy pomocy wartości tych składowych z „przeszłości”. Na rys. 3.2 przedstawiono uproszczoną siatkę Yee dla dwóch wymiarów w chwili n, dla polaryzacji TM^z z zaznaczonymi składowymi pola elektrycznego i magnetycznego. Widać, iż składowe pola magnetycznego są przesunięte względem składowej pola elektrycznego o 1/2. Jedną składową pola elektrycznego otaczają cztery składowe pola magnetycznego. W przypadku polaryzacji TE^z zależność jest odwrotna, cztery składowe pola elektrycznego otaczają jedną składową pola magnetycznego.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 3.2. Uproszczona siatka Yee dla dwóch wymiarów modu TM^z w chwili n

3.2.1.2. Polaryzacja TE^z

W przypadku polaryzacji TE^z, składowe pola elektrycznego są prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali elektromagnetycznej. Równania Maxwella w ośrodku izotropowym, wyrażone w prostokątnym układzie współrzędnych, uproszczone do trzech składowych E_x, E_y oraz H_z można zapisać jako [118]:

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \sigma E_x\right), \tag{3.16}$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = -\frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial H_z}{\partial x} + \sigma E_y\right), \tag{3.17}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x}\right). \tag{3.18}$$

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Ponownie zastępujemy pochodne z równań (3.16)–(3.18) centralnymi różnicami skończonymi, ostatecznie otrzymując zestaw równań sprzężonych metody FDTD w dwóch wymiarach dla polaryzacji TE^z:

$$E_x\Big|_{i+1/2,j}^{n+1} = \frac{1-\dfrac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon}}{1+\dfrac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon}} E_x\Big|_{i+1/2,j}^{n} + \frac{1}{1+\dfrac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon}} \frac{\Delta t}{\varepsilon\Delta y}\left(H_z\Big|_{i+1/2,j+1/2}^{n+1/2} - H_z\Big|_{i+1/2,j-1/2}^{n+1/2}\right), \tag{3.19}$$

$$E_y\Big|_{i,j+1/2}^{n+1} = \frac{1-\dfrac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon}}{1+\dfrac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon}} E_y\Big|_{i,j+1/2}^{n} - \frac{1}{1+\dfrac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon}} \frac{\Delta t}{\varepsilon\Delta x}\left(H_z\Big|_{i+1/2,j+1/2}^{n+1/2} - H_z\Big|_{i-1/2,j+1/2}^{n+1/2}\right), \tag{3.20}$$

$$\begin{aligned} H_z\Big|_{i+1/2,j+1/2}^{n+1/2} &= H_z\Big|_{i+1/2,j+1/2}^{n-1/2} + \frac{\Delta t}{\mu\Delta y}\left[E_x\Big|_{i+1/2,j+1}^{n} - E_x\Big|_{i+1/2,j}^{n}\right] + \\ &- \frac{\Delta t}{\mu\Delta x}\left[E_y\Big|_{i+1,j-1/2}^{n} - E_y\Big|_{i,j+1/2}^{n}\right]. \end{aligned} \tag{3.21}$$

3.2.2. Symulacje trójwymiarowe

W diagnostyce georadarowej symulacje trójwymiarowe stosuje się do zaawansowanych analiz zachowania się pola elektromagnetycznego w badanym ośrodku. W porównaniu do symulacji dwuwymiarowych, modelowanie to jest bliższe rzeczywistości, gdyż fala elektromagnetyczna w tym modelu rozchodzi się sferycznie, podobnie jak w antenie georadarowej. Do trudności związanych z modelowaniem w trzech wymiarach należy czas symulacji, który jest znacznie dłuższy niż w 2D. Natomiast modelowanie 3D daje możliwości stworzenia jednego modelu i prowadzenia dowolnych tras georadarowych dla analizowanego ośrodka.

Równania Maxwella w ośrodku izotropowym, wyrażone w prostokątnym układzie współrzędnych można zapisać jako [113]:

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y}\right), \tag{3.22}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z}\right), \tag{3.23}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x}\right), \tag{3.24}$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x\right), \tag{3.25}$$

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y\right), \tag{3.26}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon}\left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z\right). \tag{3.27}$$

Zastępujemy pochodne z równań (3.22)–(3.27) centralnymi różnicami skończonymi, otrzymując zestaw równań sprzężonych metody FDTD w trzech wymiarach:

$$\begin{aligned} H_x\Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} &= H_x\Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n-1/2} + \frac{\Delta t}{\mu\Delta z}\left[E_y\Big|_{i,j+1/2,k+1}^{n} - E_y\Big|_{i,j+1/2,k}^{n}\right] + \\ &- \frac{\Delta t}{\mu\Delta y}\left[E_z\Big|_{i,j+1,k+1/2}^{n} - E_z\Big|_{i,j,k+1/2}^{n}\right], \end{aligned} \tag{3.28}$$

$$\begin{aligned} H_y\Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} &= H_y\Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n-1/2} + \frac{\Delta t}{\mu\Delta x}\left[E_z\Big|_{i+1,j,k+1/2}^{n} - E_z\Big|_{i,j,k+1/2}^{n}\right] + \\ &- \frac{\Delta t}{\mu\Delta z}\left[E_x\Big|_{i+1/2,j,k+1}^{n} - E_x\Big|_{i+1/2,j,k}^{n}\right], \end{aligned} \tag{3.29}$$

$$\begin{aligned} H_z\Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} &= H_z\Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n-1/2} + \frac{\Delta t}{\mu\Delta y}\left[E_x\Big|_{i+1/2,j+1,k}^{n} - E_x\Big|_{i+1/2,j,k}^{n}\right] + \\ &- \frac{\Delta t}{\mu\Delta x}\left[E_y\Big|_{i+1,j+1/2,k}^{n} - E_y\Big|_{i,j+1/2,k}^{n}\right], \end{aligned} \tag{3.30}$$

$$\begin{aligned} E_x\Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1} &= \frac{1-\dfrac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon}}{1+\dfrac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon}} E_x\Big|_{i+1/2,j,k}^{n} + \frac{1}{1+\dfrac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon}}\left(\frac{\Delta t}{\varepsilon\Delta y}\left[H_z\Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z\Big|_{i+1/2,j-1/2,k}^{n+1/2}\right] + \right. \\ &\left. - \frac{\Delta t}{\varepsilon\Delta z}\left[H_y\Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y\Big|_{i+1/2,j,k-1/2}^{n+1/2}\right]\right), \end{aligned} \tag{3.31}$$

$$\begin{aligned} E_y\Big|_{i,j+1/2,k}^{n+1} &= \frac{1-\dfrac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon}}{1+\dfrac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon}} E_x\Big|_{i,j+1/2,k}^{n} + \frac{1}{1+\dfrac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon}}\left(\frac{\Delta t}{\varepsilon\Delta z}\left[H_x\Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - H_x\Big|_{i,j+1/2,k-1/2}^{n+1/2}\right] + \right. \\ &\left. - \frac{\Delta t}{\varepsilon\Delta x}\left[H_z\Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z\Big|_{i-1/2,j+1/2,k}^{n+1/2}\right]\right), \end{aligned} \tag{3.32}$$

$$\begin{aligned} E_z\Big|_{i,j,k+1/2}^{n+1} &= \frac{1-\dfrac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon}}{1+\dfrac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon}} E_z\Big|_{i,j,k+1/2}^{n} + \frac{1}{1+\dfrac{\sigma\Delta t}{2\varepsilon}}\left(\frac{\Delta t}{\varepsilon\Delta x}\left[H_y\Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y\Big|_{i-1/2,j,k+1/2}^{n+1/2}\right] + \right. \\ &\left. - \frac{\Delta t}{\varepsilon\Delta y}\left[H_x\Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - H_x\Big|_{i,j-1/2,k+1/2}^{n+1/2}\right]\right). \end{aligned} \tag{3.33}$$

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

3.3. Stabilność numeryczna

Metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu jest metodą numeryczną warunkowo stabilną. Oznacza to, że istnieje górna granica wartości kroku czasowego, powyżej której metoda numeryczna prowadzi do niestabilnego rozwiązania. Warunek stabilności metody FDTD, zwany również warunkiem CFL (ang. *Courant–Friedrichs–Lewy*), wyprowadzono za pomocą wyodrębnienia problemów własnych dla czasu i przestrzeni z algorytmu różnic skończonych. W wyniku przeprowadzonych analiz stabilności numerycznej stwierdzono, iż dla symulacji trójwymiarowych prowadzonych w próżni, warunek przybiera postać [137]:

$$\Delta t \le \frac{1}{c\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2}+\frac{1}{(\Delta y)^2}+\frac{1}{(\Delta z)^2}}}, \tag{3.34}$$

gdzie:

Δt – krok czasowy,

Δx – krok przestrzenny w kierunku x,

Δy – krok przestrzenny w kierunku y,

Δz – krok przestrzenny w kierunku z.

Ze względu na fakt, iż powyższe kryterium zostało wyznaczone dla próżni, należy je zmodyfikować, uwzględniając możliwe występowanie ośrodków o rożnych właściwościach elektrycznych, a co za tym idzie, różnych prędkościach fazowych. Wówczas do ustalenia kroku czasowego, należy przyjmować ośrodek, w którym fala elektromagnetyczna propaguje z największą wartością prędkości. Zatem ogólny warunek stabilności metody FDTD przybiera postać [33]:

$$\Delta t \le \frac{\Delta l}{v\sqrt{d}}, \tag{3.35}$$

gdzie:

Δl – krok przestrzenny ($\Delta l = \Delta x = \Delta y = \Delta z$),

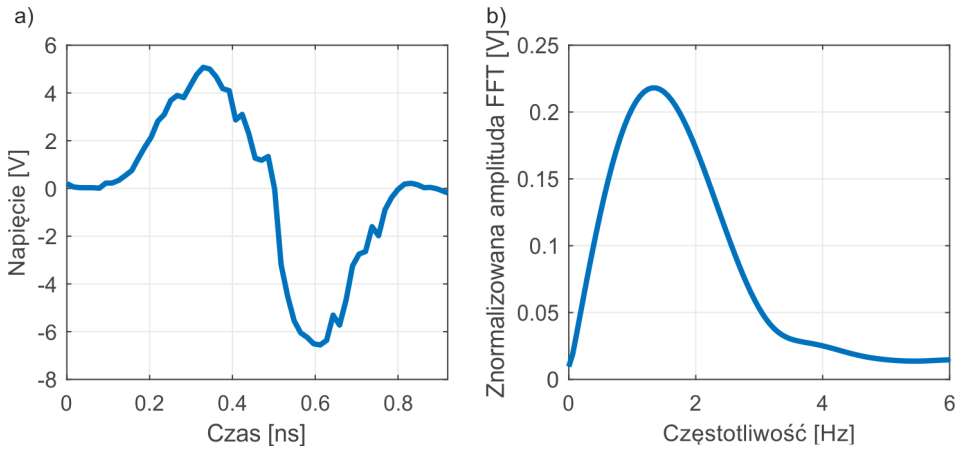
d – wymiar symulacji (d = 1, 2, 3 dla 1D, 2D, 3D).

3.4. Źródła promieniowania

Źródło promieniowania rozumie się jako zaburzenie pola elektromagnetycznego, którego zadaniem w symulacjach numerycznych jest odzwierciedlenie rzeczywistego impulsu generowanego przez antenę georadarową. Funkcje opisujące wzbudzenie,

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

używane przez producentów sprzętu georadarowego są przez nich ściśle strzeżone. Do tej pory powstały trzy dokładne modele numeryczne anten georadarowych, które uwzględniają rzeczywisty impuls [31, 129, 145] (GSSI 1.5 GHz, MALA 1.2 GHz oraz GSSI 400 MHz). W pozostałych przypadkach pozostaje użycie najprostszych sposobów generowania źródła promieniowania. Mianowicie zadaje się odpowiednią funkcję w konkretnym punkcie siatki dla danej składowej wektora elektrycznego w formie źródła miękkiego (ang. *soft source*), który nie powoduje odbicia fali elektromagnetycznej od samego siebie [132]. Problemem jest odpowiedni dobór funkcji, która ma odzwierciedlać impuls anteny georadarowej. Na rys. 3.3 przedstawiono sygnał wejściowy w dziedzinie czasu i częstotliwości, zarejestrowany przez antenę odbiorczą dla pomiaru w powietrzu, przy użyciu anteny georadarowej Aladdin o częstotliwości środkowej równej 2 GHz. W dziedzinie czasu sygnał przypomina jeden cykl funkcji sinus w oknie Hanninga, a pasmo częstotliwości obejmuje zakres od 0 do 3.5 GHz, z maksimum przy 1.4 GHz.



Rys. 3.3. Sygnał wejściowy zarejestrowany przez antenę odbiorczą (Aladdin, IDS, 2GHz): a) w dziedzinie czasu, b) w dziedzinie częstotliwości

Najczęściej stosowane funkcje opisujące wzbudzenie fali elektromagnetycznej to funkcja Gaussa, funkcja sinus o długości jednego okresu oraz funkcja Rickera. Kluczowym parametrem wyboru jest zgodność przyjętej funkcji z sygnałem wzbudzenia w dziedzinie częstotliwości.

Źródło promieniowania przyjęte jako funkcja Gaussa można opisać wzorem:

$$W(t) = e^{-2\pi^2 f^2 \left(t - \frac{1}{f}\right)^2}, \tag{3.36}$$

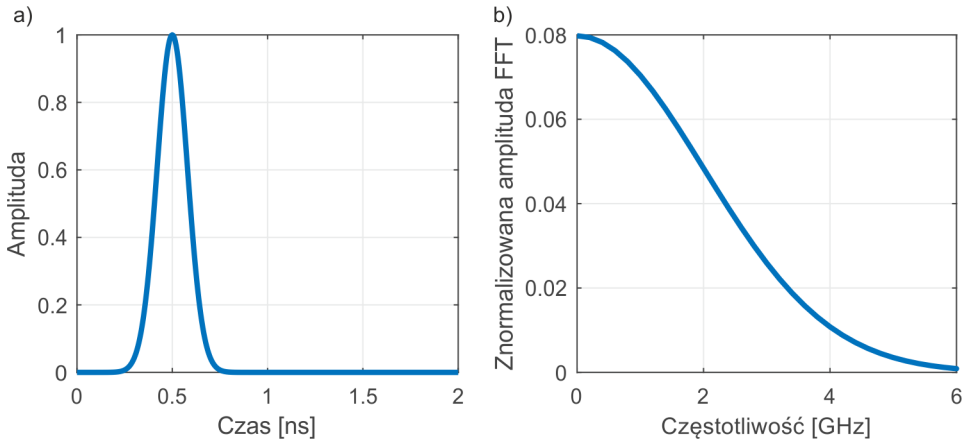
gdzie:

t – czas,

f – częstotliwość środkowa.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Na rys. 3.4 przedstawiono funkcję Gaussa dla częstotliwości środkowej 2 GHz w dziedzinie czasu i częstotliwości. Porównując otrzymany sygnał z sygnałem zarejestrowanym przed antenę georadarową (rys. 3.3) można zaobserwować znaczne rozbieżności między wzbudzeniami zarówno w dziedzinie czasu, jak i częstotliwości. Spektrum częstotliwościowe osiąga maksimum przy 0 GHz i obejmuje zakres do 6 GHz.



Rys. 3.4. Funkcja Gaussa dla częstotliwości środkowej 2 GHz:
a) w dziedzinie czasu, b) w dziedzinie częstotliwości

Kolejnym źródłem promieniowania może być pojedyncza fala sinusa dana wzorem:

$$W(t)=\begin{cases}\sin(2\pi ft) & ft\le 1,\\ 0 & ft>1,\end{cases} \tag{3.37}$$

lub fala zmodulowana oknem Hanninga:

$$W(t)=\begin{cases}\sin(2\pi ft)\dfrac{1}{2}\left(1-\cos\left(2\pi ft\right)\right) & ft\le 1,\\ 0 & ft>1.\end{cases} \tag{3.38}$$

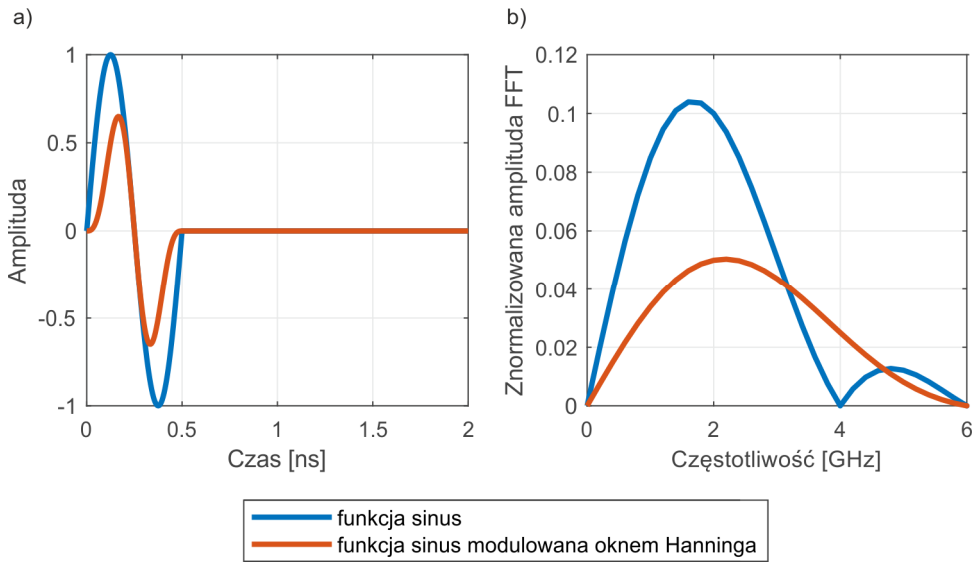
Na rys. 3.5 pokazano pojedynczą falę sinusa oraz falę sinusa zmodulowaną oknem Hanninga w dziedzinie czasu i częstotliwości. Widać podobieństwo do fali wejściowej w dziedzinie czasu. Jednakże w dziedzinie częstotliwości dla pojedynczej fali sinusa oprócz wiązki głównej widać listek boczny będący efektem braku okna modulującego. W przypadku fali zmodulowanej oknem Hanninga widać brak listka bocznego, natomiast spektrum częstotliwościowe rozszerza się do 6 GHz.

Węższe spektrum częstotliwości, w porównaniu do źródła harmonicznego modulowanego oknem Hanninga, można wprowadzić poprzez funkcję Rickera, której główna częstotliwość jest definiowana jednym parametrem, a źródło takie nie ma komponentu prądu stałego [118]. Funkcja Rickera jest odpowiednikiem drugiej pochodnej funkcji Gaussa i przybiera postać:

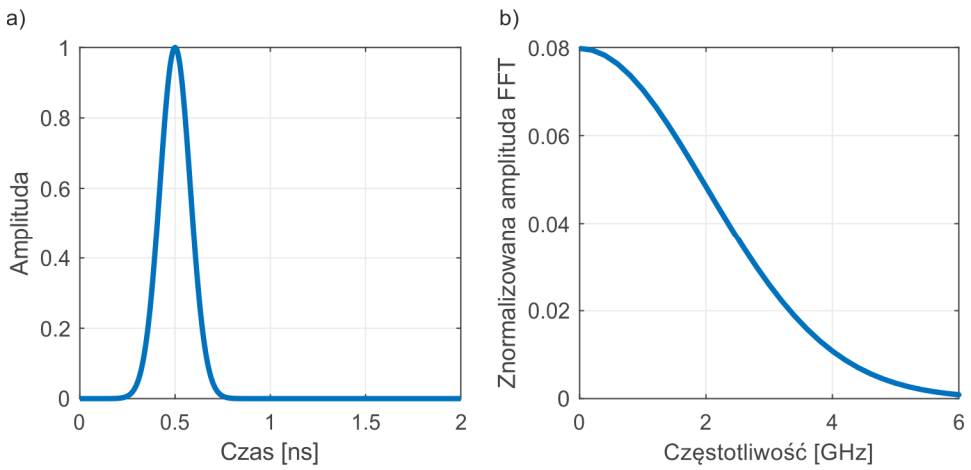
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

$$W(t) = -\left(2\pi^2 f^2 \left(t - \frac{\sqrt{2}}{f}\right)^2\right) e^{-2\pi^2 f^2 \left(t - \frac{\sqrt{2}}{f}\right)^2}. \tag{3.39}$$

Na rys. 3.6 przedstawiono funkcję Rickera dla częstotliwości środkowej 2 GHz w dziedzinie czasu i częstotliwości. Pomimo faktu, iż w dziedzinie czasu sygnał nie jest podobny do rzeczywistego impulsu, to zakres częstotliwościowy takiego źródła odpowiada impulsowi generowanemu przez antenę georadarową. Należy podkreślić, iż sygnał przyjmowany do obliczeń porównuje się z sygnałem zarejestrowanym przez antenę odbiorczą. Ostatecznie, w niniejszej pracy, jako źródło wzbudzenia przyjmowano funkcję Rickera.



Rys. 3.5. Funkcja pojedynczej fali sinusa dla częstotliwości środkowej 2 GHz:
a) w dziedzinie czasu, b) w dziedzinie częstotliwości



Rys. 3.6. Funkcja Rickera dla częstotliwości środkowej 2 GHz:
a) w dziedzinie czasu, b) w dziedzinie częstotliwości

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

3.5. Warunki brzegowe

Fala elektromagnetyczna po osiągnieciu brzegu obszaru obliczeniowego, tj. ostatniego punktu na siatce Yee, ulega odbiciu i zaczyna wracać do źródła. W celu uniknięcia takiego efektu należy zastosować odpowiednie warunki brzegowe, których głównym celem jest zasymulowanie rozciągnięcia obszaru obliczeniowego w nieskończoność. Wraz z coraz częstszym wykorzystaniem metody różnic skończonych w dziedzinie czasu powstało wiele metod formułowania warunków brzegowych. Wśród nich można wyróżnić radiacyjne warunki brzegowe (ang. *radiation boundary conditions, RBC*) opracowane przez Baylissa, Turkela [9] i Higdona [44] oraz absorbujące warunki brzegowe (ang. *absorbing boundary conditions, ABC*) zaprezentowane przez Majdę i Engquista [27]. Na uwagę zasługują również warunki brzegowe wprowadzone poprzez warstwy idealnie dopasowane (ang. *perfectly matched layers, PML*) na granicach obszaru obliczeniowego, opisane przez Berengera [11], które to zostały zaimplementowane w trzeciej wersji oprogramowania gprMax [146].

Poniżej przedstawiono ideę warstw idealnie dopasowanych dla obliczeń numerycznych dwuwymiarowych dla modu TM^z. Na brzegach obszaru obliczeniowego tworzy się sztuczną warstwę materiału, który ma pochłonąć nadchodzącą falę elektromagnetyczną. Innymi słowy, należy zapewnić pełną transmisję fali na styku próżni z regionem PML [118]. Schemat dwuwymiarowej siatki FDTD z warunkami brzegowymi PML został zaprezentowany na rys. 3.7.

Dla polaryzacji TM^z równania Maxwella dla próżni przybierają postać (por. (3.7)–(3.9)) [137]:

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} + \sigma^* H_x = -\frac{1}{\mu_0}\frac{\partial E_z}{\partial y}, \tag{3.40}$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} + \sigma^* H_y = \frac{1}{\mu_0}\frac{\partial E_z}{\partial x}, \tag{3.41}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_0}\left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z\right), \tag{3.42}$$

gdzie region PML, jako ośrodek stratny, zdefiniowany jest poprzez konduktywność σ oraz przewodność magnetyczną σ^*, które powiązane są ze sobą zależnością:

$$\frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma^*}{\mu_0}. \tag{3.43}$$

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

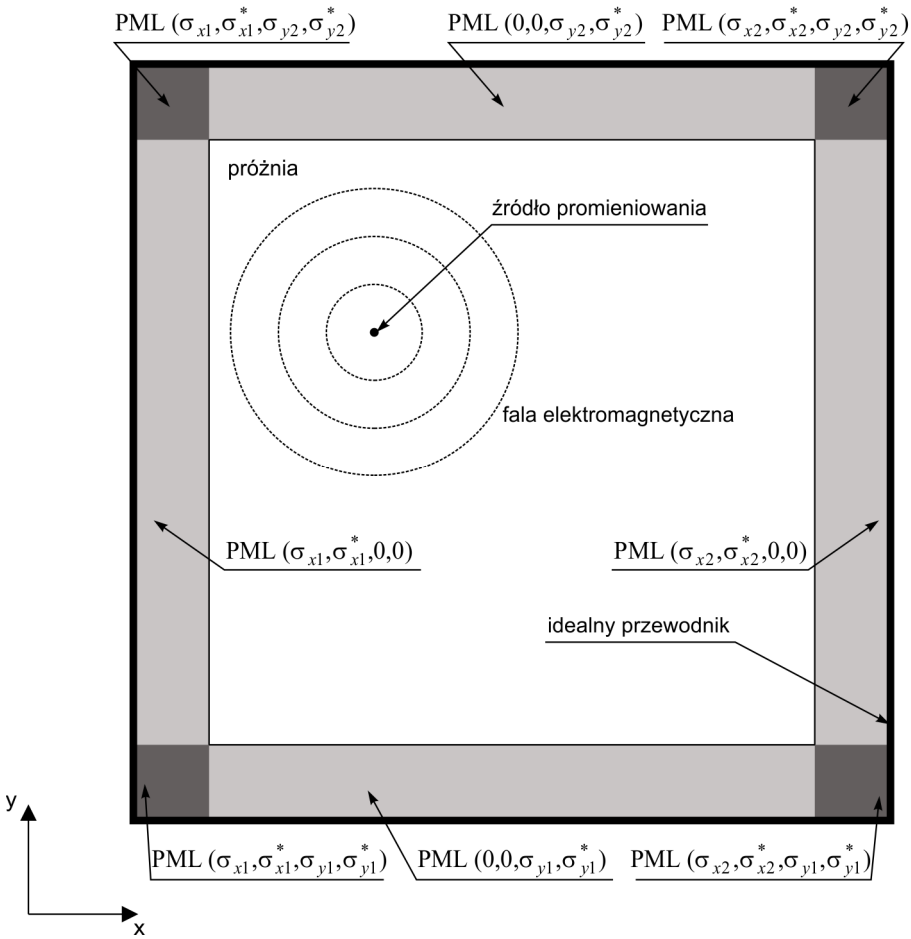
W celu umożliwienia pełnej transmisji sygnału w głąb regionu PML, należy zapewnić anizotropową charakterystykę przewodności elektrycznej i magnetycznej. Należy zatem podzielić składową wektora E_z na dwa składniki $E_{z,x}$ oraz $E_{z,y}$, z jednoczesnym wydzieleniem kierunków dla przewodności $\left(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_x^*, \sigma_x^*\right)$ [113]. W ten sposób uzyskuje się sprzężone równania Maxwella uwzględniające region PML:

$$\mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t} + \sigma_y^* H_x = -\frac{\partial\left(E_{z,x} + E_{z,y}\right)}{\partial y}, \tag{3.44}$$

$$\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} + \sigma_x^* H_y = \frac{\partial\left(E_{z,x} + E_{z,y}\right)}{\partial x}, \tag{3.45}$$

$$\varepsilon_0 \frac{\partial E_{z,x}}{\partial t} + \sigma_x E_{z,x} = \frac{\partial H_y}{\partial x}, \tag{3.46}$$

$$\varepsilon_0 \frac{\partial E_{z,y}}{\partial t} + \sigma_y E_{z,y} = -\frac{\partial H_x}{\partial y}. \tag{3.47}$$



Rys. 3.7. Schemat dwuwymiarowego modelu FDTD z warunkami brzegowymi PML

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

3.6. Modelowanie ośrodka heterogenicznego

W tradycyjnym modelowaniu numerycznym dedykowanym do wspomagania diagnostyki GPR, materiały są traktowane jako homogeniczne i bardzo często jest to wystarczającym uproszczeniem. Jednakże obecnie rośnie zainteresowanie opracowywaniem bardziej precyzyjnych, heterogenicznych modeli ośrodków, w których propaguje pole elektromagnetyczne. Heterogeniczny model gruntu zaproponowali Peplinski i in. [94], wyprowadzając wzory empiryczne. Model materiałowy został z powodzeniem wykorzystany do numerycznego modelowania wykrywania min wojskowych w gruncie, z uwzględnieniem wody, chropowatej powierzchni i dokładnego modelu anteny georadarowej [31].

3.6.1. Model ośrodka heterogenicznego CRIM

Najprostszym modelem materiału heterogenicznego, który opisuje efektywną przenikalność elektryczną ośrodka jest CRIM (ang. *Complex Refractive Index Method*). Ze względu na swoją prostotę i pomimo braku podstaw teoretycznych, jest on szeroko wykorzystywany do opisu skał, gruntu lub betonu. Model opisany jest zależnością [40]:

$$\sqrt{\varepsilon_{r,e}} = (1-\Phi)\sqrt{\varepsilon_m} + (1-S_w)\Phi\sqrt{\varepsilon_a} + \Phi S_w \sqrt{\varepsilon_{sw}}\,, \tag{3.48}$$

gdzie:

$\varepsilon_{r,e}$ – efektywna względna przenikalność elektryczna,

Φ – porowatość betonu,

S_w – stopień nasycenia porów wodą ($S_w = w / \Phi \cdot 100\%$),

w – wilgotność,

ε_m – względna przenikalność fazy stałej (matryca),

ε_a – względna przenikalność fazy gazowej (powietrze),

ε_{sw} – względna przenikalność fazy ciekłej (wody).

3.6.2. Autorski heterogeniczny model numeryczny betonu

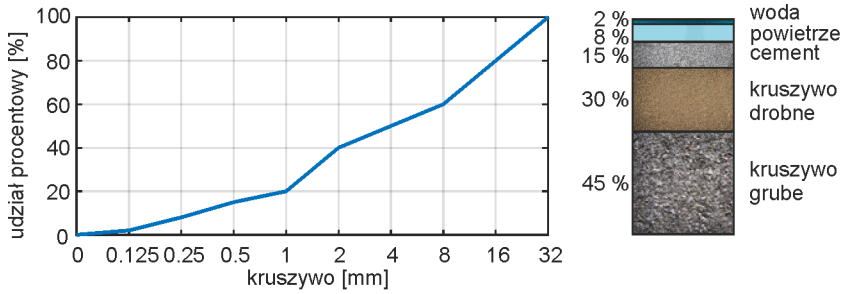
Beton jest materiałem składającym się z grubego i drobnego kruszywa, cementu, wody i powietrza oraz domieszek wtórnych. Innymi słowy, beton jest mieszaniną różnych faz. Suchy beton złożony tylko z fazy stałej i gazowej nie jest materiałem dyspersyjnym, tj. prędkość rozchodzenia się fali nie jest zależna od jej częstotliwości [76]. Dyspersja

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

w betonie jest spowodowana głównie obecnością wody w porach betonu. Najczęściej stosowanym modelem dyspersji dla wody jest sformułowanie podatności Debye'a [99], opisane w rozdziale 2.5. Stosując ten sam model dyspersji w pracy [154], podjęto próby opisu betonu. Jednakże taki materiał pozostaje nadal jednorodny. W przypadku betonu, badania są głównie ukierunkowane na pomiary właściwości elektrycznych [76, 154], podczas gdy brakuje heterogenicznego modelu numerycznego tego materiału.

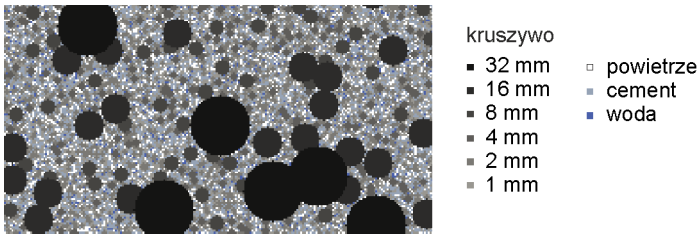
W ramach niniejszej rozprawy proponuje się autorski model numeryczny, w którym rozkład poszczególnych składników betonu jest pseudolosowy. Skrypt napisany w języku Python generuje pseudolosową pozycję dla poszczególnych składników betonu, biorąc pod uwagę procentowy rozkład frakcji oraz ich wymiary. W tworzeniu modelu można zastosować dowolną krzywą uziarnienia, stworzoną z frakcji od 1 mm do 32 mm. Dla każdej frakcji można przypisać różne właściwości elektryczne. Ponadto można w modelu również uwzględnić zawartość chlorków, zmieniając właściwości elektryczne wody lub dodając kolejną frakcję, gdyż jak pokazują poprzednie badania (np. [103]), zasolenie ma duży wpływ na parametry elektryczne wody, co pośrednio wpływa na właściwości betonu.

Skrypt został zaimplementowany w pliku wejściowym oprogramowania gprMax [146, 147]. Na samym początku algorytmu definiuje się obszar obliczeniowy, w którym ma powstać heterogeniczna mieszanka. Następnie precyzuje się skład procentowy poszczególnych składników betonu wraz z krzywą uziarnienia (rys. 3.8). W kolejnym kroku, do każdego zdefiniowanego składnika mieszanki, przypisuje się wartości stałych materiałowych. Definicja pozostałych parametrów obliczeniowych pozostaje bez zmian w stosunku do modeli homogenicznych. Ostatecznie powstaje geometria heterogenicznej mieszanki z pseudolosowym rozmieszczeniem poszczególnych składników betonu (rys. 3.9).



Rys. 3.8. Przykładowy skład betonu i krzywa uziarnienia w autorskim heterogenicznym modelu numerycznym betonu

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 3.9. Wizualizacja rozkładu poszczególnych frakcji w autorskim heterogenicznym modelu numerycznym betonu

Proponuje się, by stałe materiałowe przypisywane poszczególnym składnikom były opisane zgodnie z modelem CRIM. Dlatego stworzenie heterogenicznego modelu numerycznego konkretnego betonu, wymaga przeprowadzenia identyfikacji parametrów elektrycznych badanej próbki dla różnych stopni nasycenia betonu. Poniżej przedstawiono algorytm tworzenia przykładowego modelu. Obejmuje on następujące kroki:

1. Ustalenie nasiąkliwości masowej N_m oraz porowatości Φ próbki zgodnie z zależnościami:

$$N_m = \frac{m_s - m_d}{m_d} \cdot 100\% , \tag{3.49}$$

gdzie:

m_s – masa próbki nasyconej,

m_d – masa próbki wysuszonej do stałej masy,

$$\Phi = \frac{\rho_w - \rho_0}{\rho_w} \cdot 100\% , \tag{3.50}$$

gdzie:

ρ_0 – gęstość objętościowa,

ρ_w – gęstość właściwa.

2. Wykonanie pomiarów georadarowych, mających na celu identyfikację prędkości fali elektromagnetycznej oraz ustalenie wilgotności w próbki w czasie badania zgodnie ze wzorem:

$$w = \frac{m_w - m_d}{m_d} \cdot 100\% , \tag{3.51}$$

gdzie:

m_w – masa próbki wilgotnej.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

3. Ustalenie wartości efektywnej przenikalności elektrycznej dla badanych wilgotności próbki, na podstawie uzyskanych wartości prędkości. W celu ustalenia stałych materiałowych, potrzebne są co najmniej dwa pomiary dla dwóch różnych wilgotności próbki.
4. Wykonanie aproksymacji uzyskanych danych pomiarowych za pomocą modelu CRIM, zakładając, iż stałe materiałowe fazy ciekłej i gazowej są znane ($\varepsilon_a = 1$, $\varepsilon_{sw} = 79.1 + i8.6$). Ze względu na fakt, iż nie wszystkie pory powietrza muszą być wypełnione wodą, należy użyć zmodyfikowanej zależności (3.48), wprowadzając do równania nasiąkliwość masową i stopień nasycenia:

$$\sqrt{\varepsilon_{r,e}} = (1-\Phi)\sqrt{\varepsilon_m} + \left(\Phi - N_m S_n\right)\sqrt{\varepsilon_a} + N_m S_n \sqrt{\varepsilon_{sw}}\,, \tag{3.52}$$

gdzie:

$$S_n = \frac{w}{N_m} \cdot 100\%\,. \tag{3.53}$$

W ten sposób uzyskuje się wartość przenikalności fazy stałej.

5. Ostatnim etapem jest ustalenie zastępczych wartości stałych materiałowych, ze względu na fakt, iż efektywna wartości przenikalności w modelu numerycznym jest średnią ważoną poszczególnych składników. Dlatego zakładając, iż przenikalność fazy gazowej nie może się zmienić ($\varepsilon_a = 1$), wykonuje się nieliniową aproksymację dla parametrów przenikalności elektrycznej fazy ciekłej oraz stałej zgodnie z zależnością:

$$\varepsilon_r = (1-\Phi)\varepsilon_m + \left(\Phi - N_m S_n\right)\varepsilon_a + N_m S_n \varepsilon_{sw}\,. \tag{3.54}$$

Należy podkreślić, iż opisany powyżej sposób ustalania zastępczych wartości stałych materiałowych jest sposobem przybliżonym. Przybliżenia są wykonywane na każdym etapie, począwszy od ustalenia nasiąkliwości, wilgotności, kończąc na założeniach dotyczących wartości przenikalności fazy ciekłej betonu. Jednakże, jak pokazały badania przeprowadzone w ramach niniejszej rozprawy, można uznać ten model za zdecydowanie bliższy rzeczywistości niż model homogeniczny.

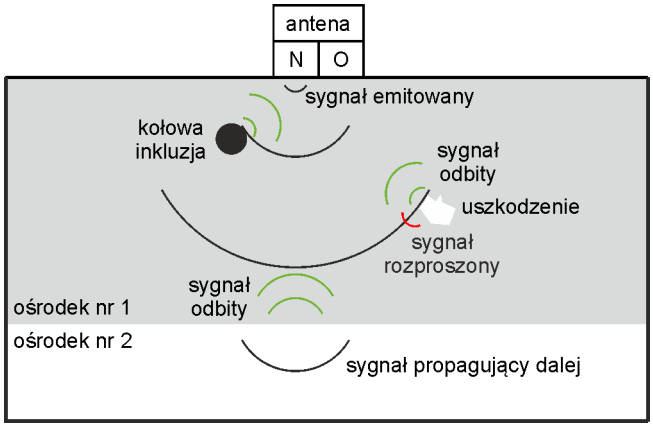
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

4. Podstawy metody georadarowej i przetwarzania danych

Metoda georadarowa jest dobrze znaną i często stosowaną metodą geofizyczną [6]. Niniejszy rozdział poświęcono przedstawieniu zasad działania georadaru wraz z jego ograniczeniami i parametrami pomiarowymi. Scharakteryzowano używany sprzęt pomiarowy oraz opisano procedury przetwarzania danych. Szczególną uwagę poświęcono tym operacjom, które mają na celu poprawić lub ułatwić interpretację danych pomiarowych, szczególnie w diagnostyce konstrukcji żelbetowych i ceglanych.

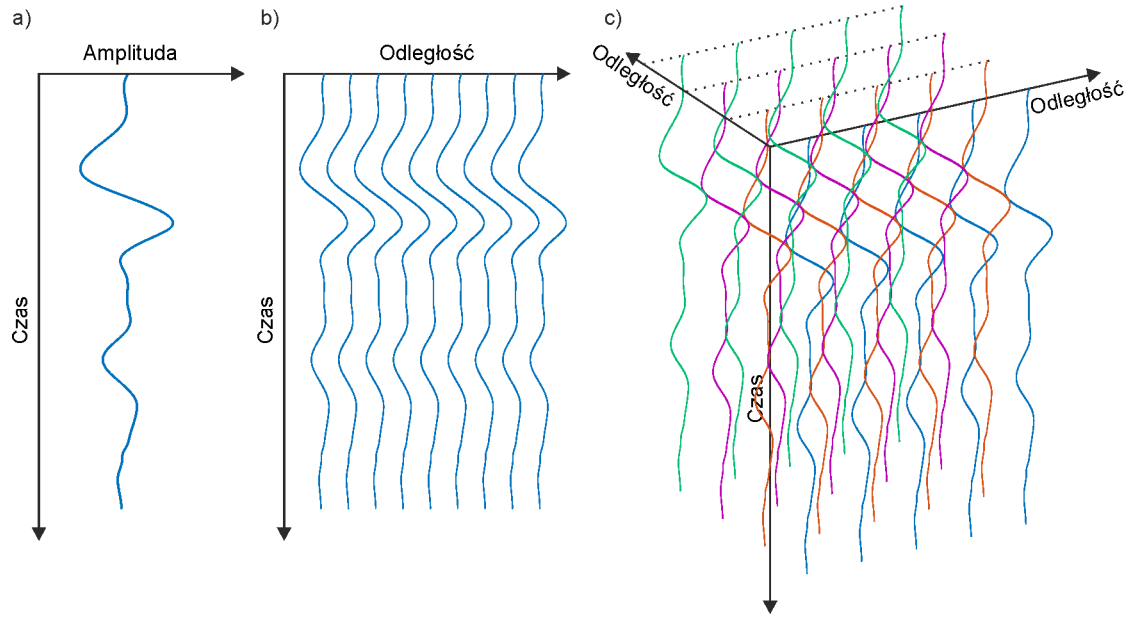
4.1. Zasada działania georadaru

Metoda georadarowa wykorzystuje zjawisko propagacji fali elektromagnetycznej. Antena nadawcza (N) emituje impuls, który penetruje badany ośrodek. Fala elektromagnetyczna propagując przez materiał o różnych właściwościach elektrycznych (przenikalność elektryczna i konduktywność) może ulegać odbiciu, dyfrakcji bądź rozproszeniu (rys. 4.1). Powracający sygnał rejestruje antena odbiorcza (O). W ten sposób powstaje pojedyncza trasa georadarowa, zwana też skanem typu A (rys. 4.2a). Jednakże podstawowym zobrazowaniem, który jest powszechnie używany w diagnostyce jest mapa georadarowa (rys. 4.2b), inaczej nazywana radargramem lub skanem typu B. Zobrazowanie to powstaje podczas przesuwania georadaru wzdłuż badanej powierzchni, gdy odbiornik rejestruje pojedynczą trasę dla każdego kroku zapisu anteny. W przypadku, gdy wykona się kilka pomiarów w gęstym rozkładzie profili pomiarowych można uzyskać zestaw radargramów (rys. 4.2c), czyli skan typu C.



Rys. 4.1. Schemat działania metody georadarowej

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 4.2. Rodzaje wyników pomiarów metodą georadarową: a) pojedyncza trasa (skan typu A), b) mapa georadarowa (skan typu B), c) zestaw radargramów (skan typu C)

Jak wspomniano wcześniej, część fali elektromagnetycznej po napotkaniu materiału o innych właściwościach elektrycznych ulega odbiciu. O tym jak duża część zostaje odbita, decyduje wartość względnych przenikalności elektrycznych dwóch ośrodków. Współczynnik odbicia energii fali R_o jest określony wzorem [56]:

$$R_o = \frac{\sqrt{\varepsilon_{r1}} - \sqrt{\varepsilon_{r2}}}{\sqrt{\varepsilon_{r1}} + \sqrt{\varepsilon_{r2}}}, \tag{4.1}$$

gdzie:

ε_{r1} – względna przenikalność elektryczna ośrodka nr 1,

ε_{r2} – względna przenikalność elektryczna ośrodka nr 2.

Można zauważyć, że im większa różnica między wartościami przenikalności, tym współczynnik odbicia jest większy, co oznacza, iż większa cześć fali zostaje odbita.

4.1.1. Rozdzielczość pomiarowa

Rozdzielczość pomiarowa jest parametrem, który określa możliwości wykrycia położenia i rozmiaru inkluzji. Parametr ten dzielimy na rozdzielczość pionową i poziomą (rys. 4.3). Rozdzielczość pionowa zdefiniowana jest zależnością [7]:

$$\Delta z_r = \frac{1}{4}\lambda, \tag{4.2}$$

gdzie:

λ – długość fali odpowiadająca częstotliwości środkowej propagującej fali.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Długość fali elektromagnetycznej jest uzależniona od częstotliwość fali oraz prędkości jej propagacji zgodnie ze wzorem:

$$\lambda = \frac{v}{f}, \tag{4.3}$$

gdzie:

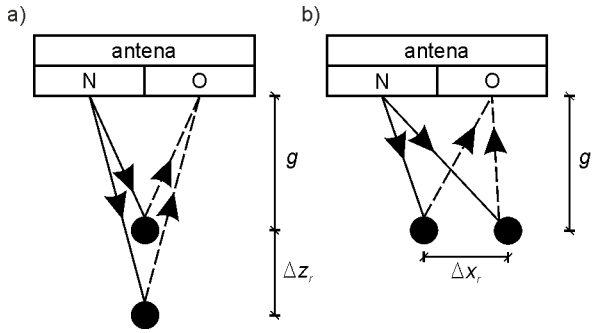
v – prędkość fali elektromagnetycznej w ośrodku,

f – częstotliwość środkowa.

Rozdzielczość pozioma jest uzależniona od głębokości g i jest dana wzorem [7]:

$$\Delta x_r = \sqrt{\frac{g\lambda}{2}}. \tag{4.4}$$

Dla używanej anteny o częstotliwości środkowej 2 GHz ustalono, iż rozdzielczość pionowa zgodnie z zależnością (4.2) wynosi $\Delta z_r = 1$ cm dla prędkości fali równej $v = 8$ cm/ns oraz $\Delta z_r = 2$ cm dla prędkości $v = 16$ cm/ns. Na głębokości g = 4 cm rozdzielczość pozioma, odpowiednio dla prędkości $v = 8$ cm/ns i $v = 16$ cm/ns, wynosi $\Delta x_r = 2.83$ cm oraz $\Delta x_r = 4$ cm. Dla większej głębokości g = 30 cm, dla tych samych prędkości, rozdzielczość pozioma wynosi $\Delta x_r = 7.75$ cm oraz $\Delta x_r = 10.95$ cm.



Rys. 4.3. Rozdzielczość pomiarowa georadaru: a) pionowa, b) pozioma

4.1.2. Zasięg penetracji fali elektromagnetycznej

Głównym czynnikiem, który ma wpływ na zasięg (głębokość) penetracji fali elektromagnetycznej w badanym ośrodku jest częstotliwość pracy anteny. Im większa częstotliwość, tym mniejszy jest zasięg fali, jednocześnie jednak następuje wzrost rozdzielczości mapy georadarowej. Stąd dla pomiarów georadarowych konstrukcji żelbetowych o wysokości przekroju do 50 cm stosuje się anteny w zakresie częstotliwości od 1.5 GHz do 2 GHz. Przy użyciu georadaru o częstotliwości 3 GHz efektywna głębokość penetracji maleje do ok. 30 cm. W przypadku konstrukcji o wyższych przekrojach, na przykład w płytach fundamentowych, można stosować aparaturę

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

pomiarową w zakresie częstotliwości od 400 MHz do 900 MHz, uzyskując efektywny zasięg fali do 3 m. Pozostałymi czynnikami, które wpływają na zasięg jest niewielka moc anteny nadawczej oraz tłumienie fali elektromagnetycznej [26, 56].

4.2. Sprzęt pomiarowy

Pomiary doświadczalne w ramach niniejszej rozprawy prowadzono przy użyciu zestawu georadarowego Aladdin włoskiej firmy IDS GeoRadar (rys. 4.4a). W skład zestawu wchodzi komputer przenośny, okablowanie, jednostka sterująca DAD Fast Wave oraz ekranowana antena bipolarna o częstotliwości środkowej 2 GHz. Rozstaw między anteną nadawczą a odbiorczą wynosi 6 cm. Antenę nazywamy bipolarną, gdyż posiada dwie pary nadajnik-odbiornik, ustawione prostopadle względem siebie, które umożliwiają wykonywanie pomiarów jednocześnie dla dwóch polaryzacji (poziomej (HH) i pionowej (VV)). Za digitalizację danych pomiarowych oraz sterowanie anteną odpowiada jednostka DAD, która powtarza impuls z częstotliwością 400 kHz. Specyfikacja techniczna zestawu georadarowego została przedstawiona w tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Specyfikacja techniczna zestawu georadarowego Aladdin firmy IDS

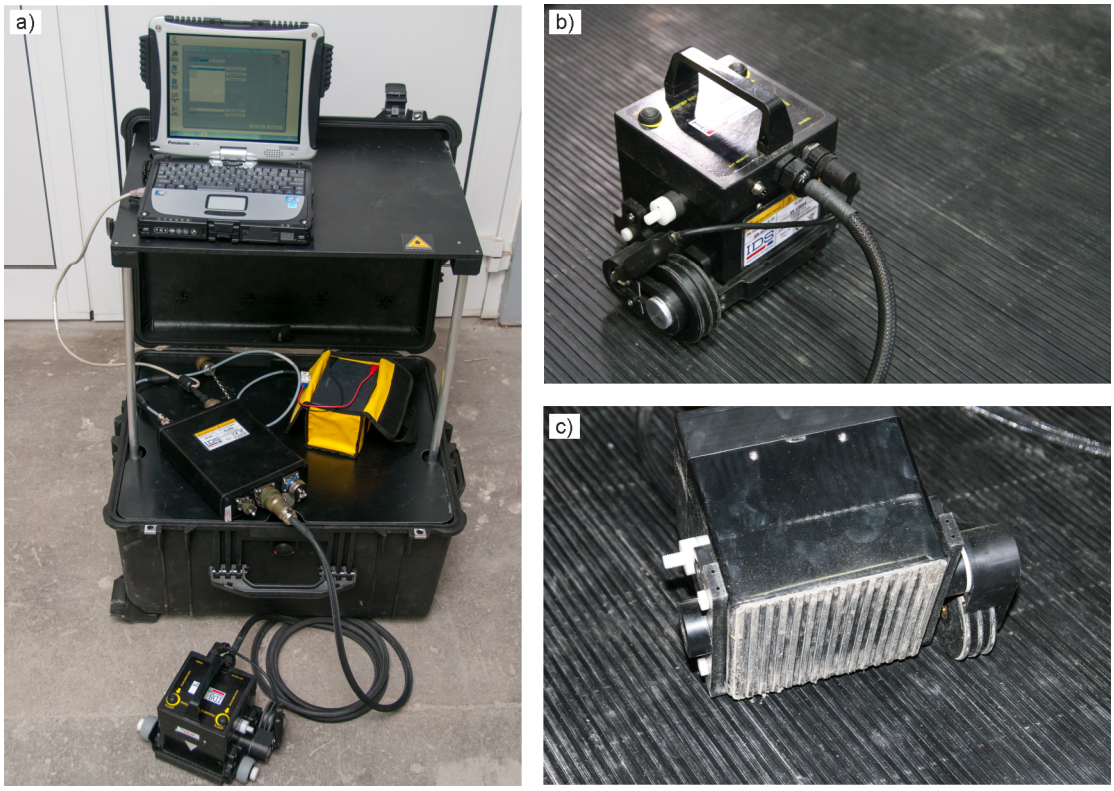
Częstotliwość środkowa	2 GHz
Liczba kanałów	2
Polaryzacja	pozioma (HH) i pionowa (VV)
Wymiary	12,4 cm x 12,4 cm x 18,5 cm
Waga	2 kg
Hermetyczność	IP 65
Jednostka sterująca	DAD Fast Wave
DAD – częstotliwość powtarzania impulsu	400 kHz
DAD – maks. częstotliwość próbkowania	4768 skanów/s (@ 128 próbek/skan)
DAD – liczba bitów na próbkę	16 bit

Dodatkowym wyposażeniem jest specjalna mata badawcza PSG (ang. *pad survey guide*), która umożliwia wykonywanie pomiarów w gęstym profilowaniu. Mata o wymiarach 200 cm × 100 cm posiada szereg rowków rozmieszczonych w odległości 0.78 cm (rys. 4.4b), które są zintegrowane z gumową podstawą anteny (por. rys. 4.4c). W przypadku gdy pomiar nie jest wykonywany na macie PSG, wówczas na gumową podstawę nakłada się plastikową osłonę ochronną.

Do akwizycji danych pomiarowych służy oprogramowanie K2 FAST WAVE, w którym definiuje się parametry pomiarowe, m.in. czas rejestrowania sygnału, liczbę próbek/skan oraz tryb pracy (gęste profilowanie na macie PSG, profilowanie

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

pojedyncze). W programie tym definiuje się również schemat rozmieszczenia skanów, co pozwala na etapie obróbki danych wykonać tomografię, bądź trójwymiarową wizualizację wyników pomiarów. Podstawowe procedury przetwarzania danych georadarowych wykonuje się za pomocą oprogramowania GRED HD, który umożliwia również trójwymiarową wizualizację danych wraz z wrysowaniem zidentyfikowanych obiektów na mapie georadarowej. W ramach niniejszej pracy wizualizacje oraz własne procedury przetwarzania danych georadarowych wykonano przy użyciu autorskich algorytmów napisanych w środowisku MATLAB®.



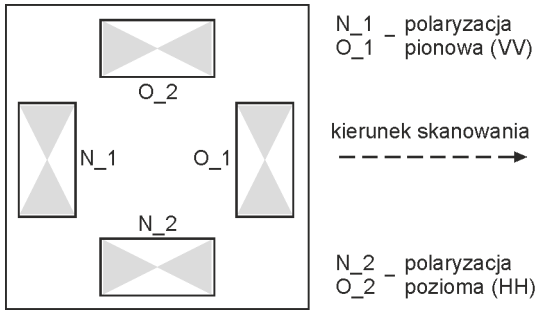
Rys. 4.4. Georadar Aladdin: a) antena, jednostka sterująca, akumulator oraz przenośny komputer, b) antena na macie badawczej PSG, c) widok spodu anteny w trybie pracy na macie PSG [108]

4.3. Metodologia pomiarów

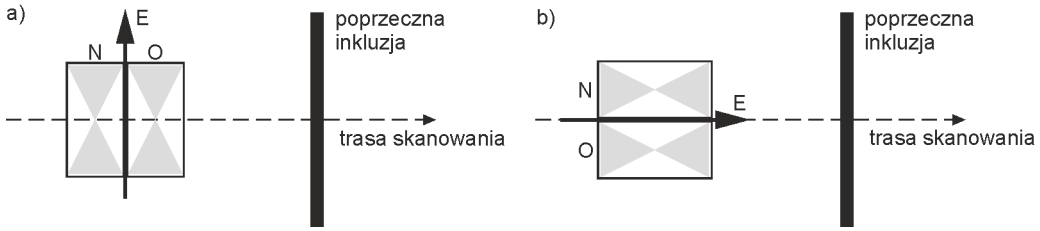
W Polsce normy techniczne dotyczące badań konstrukcji metodą georadarową nie zostały dotychczas opracowane. Można zatem skorzystać z norm amerykańskich, brytyjskich oraz zaleceń francuskich i niemieckich, które zgodnie zaznaczają, iż pomiary powinny być prowadzone zgodnie z instrukcją użytkowania sprzętu pomiarowego, a trasy skanowania powinny być usytuowane w kierunku prostopadłym do prętów zbrojeniowych bądź w kierunku prostopadłym i równoległym [25]. Oznacza to, iż każdy pomiar wymaga odpowiedniego przygotowania i zaprojektowania. W przypadku, gdy

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

istnieje dokumentacja techniczna obiektu, może ona stanowić podstawę i pomoc w planowaniu pomiarów. W przeciwnym wypadku, w projektowaniu badań należy bazować na wiedzy i doświadczeniu inżynierskim. Warto również przed pomiarami dokonać wizji lokalnej obiektu. Przy projektowaniu pomiarów należy pamiętać o polaryzacji anteny, która wpływa na możliwości detekcji poprzecznych inkluzji. Na rys. 4.5 przedstawiono schemat używanej anteny bipolarnej IDS o częstotliwości środkowej 2 GHz z zaznaczonymi polaryzacjami układu dwóch par nadajnik-odbiornik. Natomiast na rys. 4.6 pokazano dwie możliwości usytuowania anten względem poprzecznej inkluzji. Prawidłowe wykrycie takiej inkluzji następuje w przypadku zastosowania polaryzacji pionowej (rys. 4.6a) podczas gdy ustawienie anteny zgodnie z polaryzacją poziomą (rys. 4.6b) może nie doprowadzić do wykrycia inkluzji.



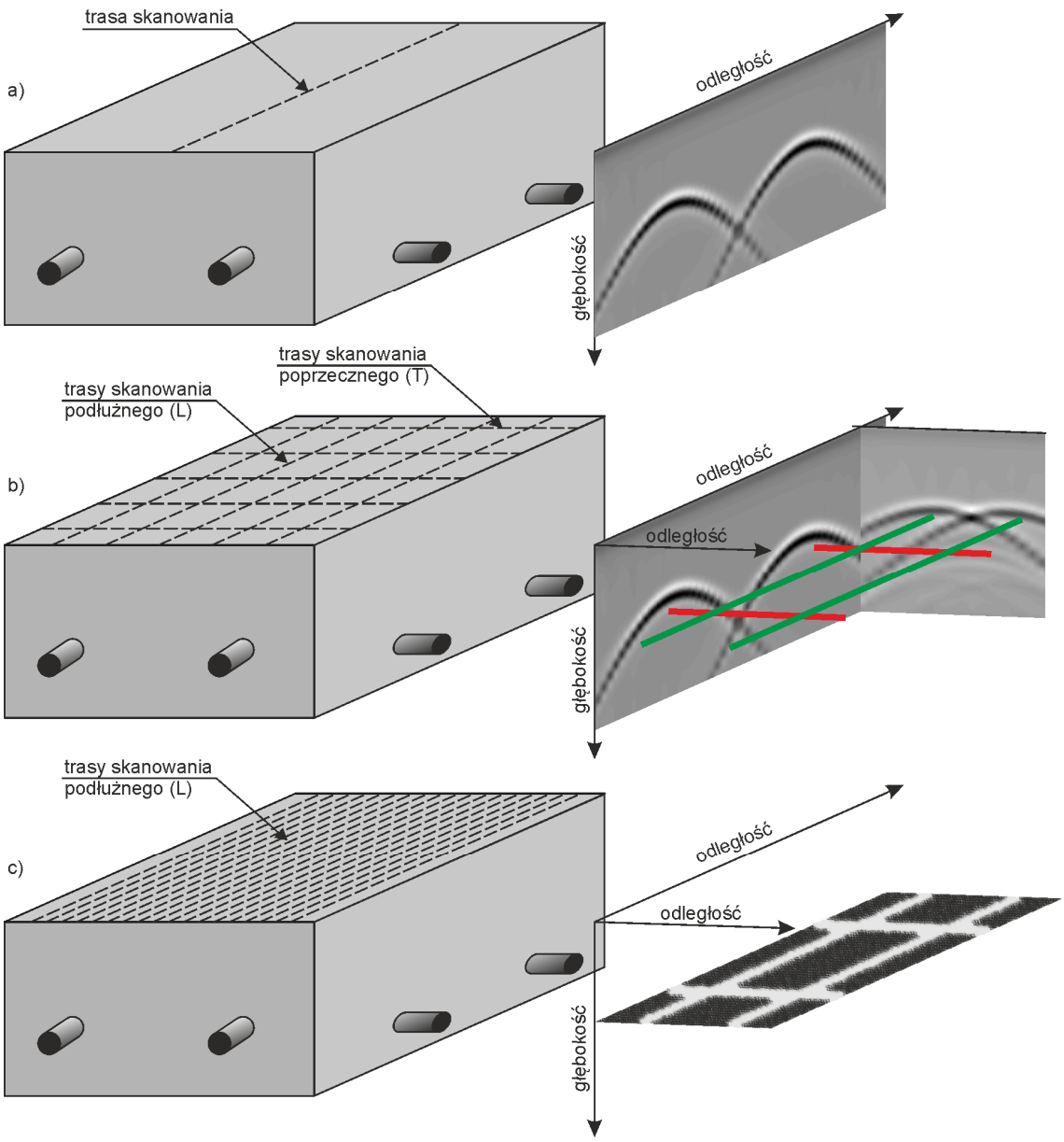
Rys. 4.5. Schemat anteny bipolarnej Aladdin o częstotliwości pracy 2 GHz (na podstawie [56])



Rys. 4.6. Pomiar georadarowy poprzecznej inkluzji z polaryzacją: a) pionową (VV), b) poziomą (HH)

W zależności od zastosowanej metodologii pomiarów georadarowych można uzyskać różne zobrazowania skanowanego obszaru (rys. 4.7). Najprostszym i najczęściej stosowanym podejściem w badaniach GPR jest wykonanie pojedynczego skanu wzdłuż wybranego profilu (rys. 4.7a). W wyniku takiego pomiaru uzyskuje się pojedynczą mapę georadarową, na której ukażą się wszystkie inkluzje, które są prostopadłe do kierunku skanowania, zgodnie z rys. 4.6a. Taki radargram dostarcza informacji o głębokości danej inkluzji, a także odległości między nimi.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 4.7. Metodologia pomiaru: a) pojedynczy profil podłużny, b) ortogonalna siatka profili podłużnych i poprzecznych, c) gęste profilowanie podłużne

Inną możliwością jest akwizycja danych wzdłuż profili podłużnych i poprzecznych, tworzących ortogonalną siatkę (rys. 4.7b). W ten sposób można uzyskać informację o podłużnych i poprzecznych inkluzjach w badanym obszarze. W przypadku konstrukcji żelbetowych pozwala to na wrysowanie prętów zbrojeniowych, a także oszacowanie średnicy zbrojenia na podstawie położenia prętów poprzecznych i podłużnych względem siebie [26].

Trzecie podejście polega na użyciu anteny bipolarnej, prowadząc skany jedynie wzdłuż gęsto rozmieszczonych profili podłużnych (rys. 4.7c). W ten sposób skany poprzeczne są generowane na podstawie danych z polaryzacji poziomej na etapie obróbki

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

danych. W rezultacie uzyskuje się tomografię skanowanego obszaru na wybranej głębokości. Ze względu na dużą liczbę wymaganych profili podłużnych, ta metodologia jest najbardziej czasochłonna. Należy podkreślić, iż uzyskanie tomografii jest również możliwe dla drugiego podejścia (rys. 4.7b), jednakże z mniejszą dokładnością.

4.4. Przetwarzanie danych georadarowych

Procedury przetwarzania danych georadarowych są szczególnie istotne, gdyż uzyskujemy dzięki nim poprawę stosunku sygnału użytecznego do szumu [56]. W wyniku zastosowania procedur otrzymuje się przetworzone dane georadarowe, które stanowią podstawę do interpretacji inżynierskiej.

Operacje na danych georadarowych można podzielić na te, które dotyczą tylko jednej trasy (rys. 4.2a), zestawu pojedynczych tras zwanych zobrazowaniem typu B (rys. 4.2b), a także zestawu radargramów zwanych zobrazowaniem typu C (rys. 4.2c).

Pierwsza część rozdziału dotyczy opisu standardowych procedur dotyczących pojedynczej trasy, wraz z wyznaczeniem czasu zerowego, który jest jednym z najistotniejszych parametrów pomiarowych. Następnie przedstawiono operacje stosowane dla radargramów m.in. algorytm migracji, który generuje nowe zobrazowanie ułatwiające interpretację inżynierską. Scharakteryzowano procedury stosowane do analizy częstotliwościowej, które stosuje się do zestawu radargramów. Opisano także metodę średniej kwadratowej, gdyż w niniejszej rozprawie podjęto próbę jej zaimplementowania do analizy danych georadarowych.

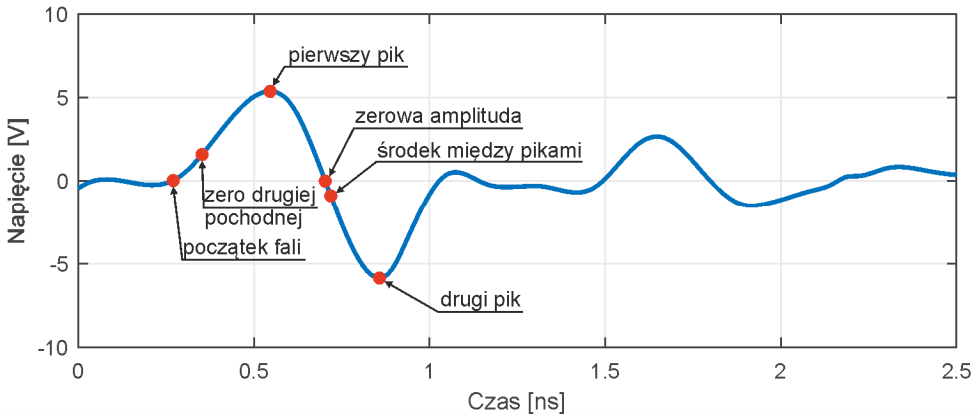
4.4.1. Ustalenie czasu zerowego

Ustalenie czasu zerowego jest podstawową procedurą stosowaną dla każdej mapy georadarowej. Parametr ten wskazuje, w którym miejscu przebiegu czasowego zaczyna się skanowana powierzchnia. Jego prawidłowe ustawienie stanowi kluczowy problem dla pomiarów georadarowych, a jednocześnie jest parametrem, który dzieli środowisko naukowców. Podstawowa publikacja tłumacząca metody ustalania czasu zerowego [159] nie udziela jednoznacznej odpowiedzi i podkreśla, iż wiele czynników ma wpływ na czas zerowy i będzie on inny dla każdego rodzaju anteny. Parametr ten uwzględnia już wszystkie opóźnienia, które powstają podczas pomiaru, na przykład opóźnienie w rejestracji między anteną nadawczą, a odbiorczą.

Najczęściej stosowane metody ustalania czasu zerowego [159] zostały zobrazowane na rys. 4.8. Czas zerowy może być ustalony jako początek fali wejściowej. Takie

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

podejście, nie jest stabilne dla anten wysokoczęstotliwościowych ze względu na zmiany elektrycznych właściwości badanego ośrodka, które znajdują się w bliskim polu anteny [159]. Najłatwiej zidentyfikować czas zerowy za pomocą pierwszego bądź drugiego piku, ze względu na łatwość w ustaleniu wartości maksymalnej i minimalnej napięcia na pojedynczej trasie georadarowej. Czas zerowy można również ustalić jako połowę odległości między pierwszym a drugim pikiem. Niektórzy producenci sprzętu georadarowego jako automatyczny czas zerowy stosują punkt o zerowej amplitudzie między pierwszym a drugim pikiem [159]. Należy także wspomnieć metodę proponowaną przez zespół prof. Wallace Lok Lai [71, 72, 74], która bazuje na fakcie, iż fala zmieniając ośrodek propagacji z powietrza na ośrodek stratny zmienia swoją częstotliwość. Stąd można stwierdzić, iż czas zerowy odpowiada miejscu zerowania się drugiej pochodnej pojedynczego skanu typu A.



Rys. 4.8. Metody ustalania czasu zerowego dla sygnału georadarowego

Pomiary doświadczalne wyznaczenia czasu zerowego, które przeprowadzono na potrzeby niniejszej rozprawy, były przeprowadzane za pomocą zestawu georadarowego Aladdin włoskiej firmy IDS GeoRadar opisanego w rozdziale 4.2. W celu ustalenia czasu zerowego dla używanej anteny, wykonano pomiary kalibracyjne.

Badanie polegało na identyfikacji czasu odbicia sygnału od stalowej płyty. Stanowisko pomiarowe zostało przedstawione na rys. 4.9. Antena georadarowa składa się z nadajnika (N) i odbiornika (O), umieszczonych we wspólnej obudowie w rozstawie s = 6 cm. Pomiar przeprowadzono ustawiając antenę w różnych odległościach h_p od stalowej płyty. Antena nadawcza emitowała sygnał, który propagował w kierunku stalowej płyty, odbijał się od niej i powracał do anteny odbiorczej. Ze względu na rozstaw s między antenami, fala elektromagnetyczna nie powracała tą samą drogą do anteny odbiorczej. Przyjęto, iż t_1 oznacza czas, w którym sygnał propaguje od anteny nadawczej do płyty, natomiast

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

t_2 jest to czas, w którym odbity sygnał powracał do anteny odbiorczej. Z twierdzenia Pitagorasa można otrzymać zestaw równań:

$$\begin{cases} c^2 t_1^2 = h_p^2 + \left(\dfrac{s}{2}\right)^2, \\ c^2 t_2^2 = h_p^2 + \left(\dfrac{s}{2}\right)^2. \end{cases} \tag{4.5}$$

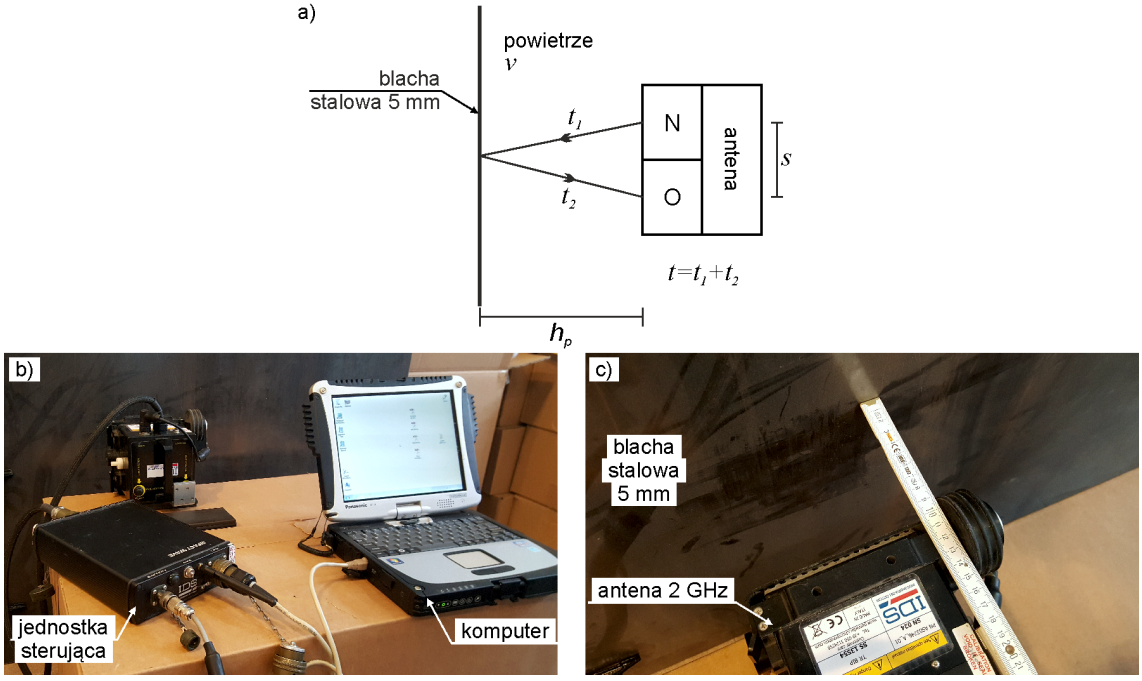
Przekształcając zależność (4.5) uzyskujemy równanie, które pozwala obliczyć odległość od stalowej płyty na podstawie pomiarów georadarowych (por. [7]):

$$h_{GPR} = \frac{1}{2}\sqrt{c^2 t^2 - s^2}\,, \tag{4.6}$$

gdzie:

t – całkowity czas przelotu fali elektromagnetycznej ($t = t_1 + t_2$),

h_{GPR} – odległość od stalowej płyty zidentyfikowana w pomiarze georadarowym.



Rys. 4.9. Stanowisko dla pomiarów kalibracyjnych w celu ustalenia czasu zerowego dla anteny 2 GHz (Aladdin, IDS): a) schemat, b) zdjęcie stanowiska, c) ustawienie dla h_p = 10 cm

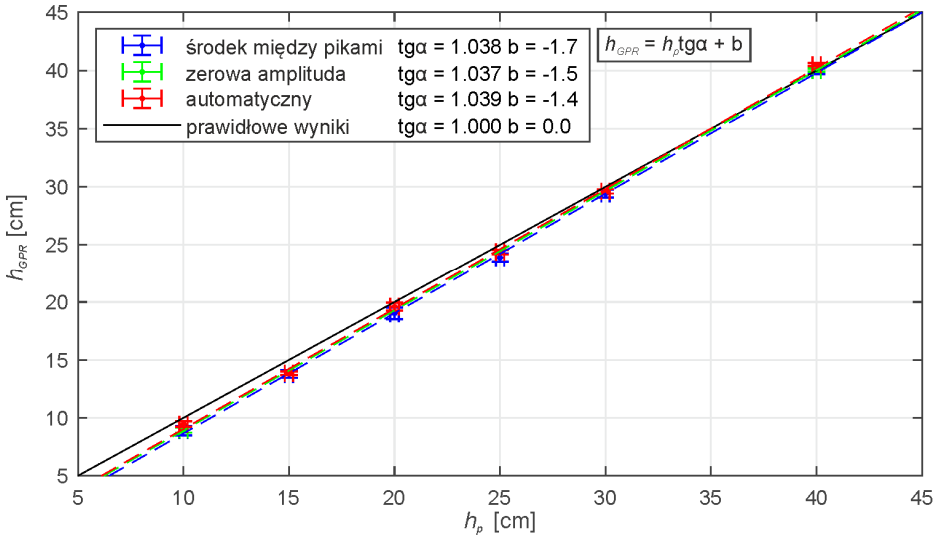
Badania prowadzono rejestrując sygnał długości 4 ns dla czterech różnych wartości zapisywanych próbek: 512 próbek/skan ($\Delta t = 7.8125 \cdot 10^{-12}$ s), 384 próbki/skan ($\Delta t = 1.0417 \cdot 10^{-11}$ s), 256 próbek/skan ($\Delta t = 1.5625 \cdot 10^{-11}$ s) oraz 128 próbek/skan ($\Delta t = 3.125 \cdot 10^{-11}$ s). Antenę ustawiano w różnych odległościach h_p od stalowej płyty

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

($h_p = 10$ cm, $h_p = 15$ cm, $h_p = 20$ cm, $h_p = 25$ cm, $h_p = 30$ cm oraz $h_p = 40$ cm) i wykonywano pomiar 90 pojedynczych skanów typu A.

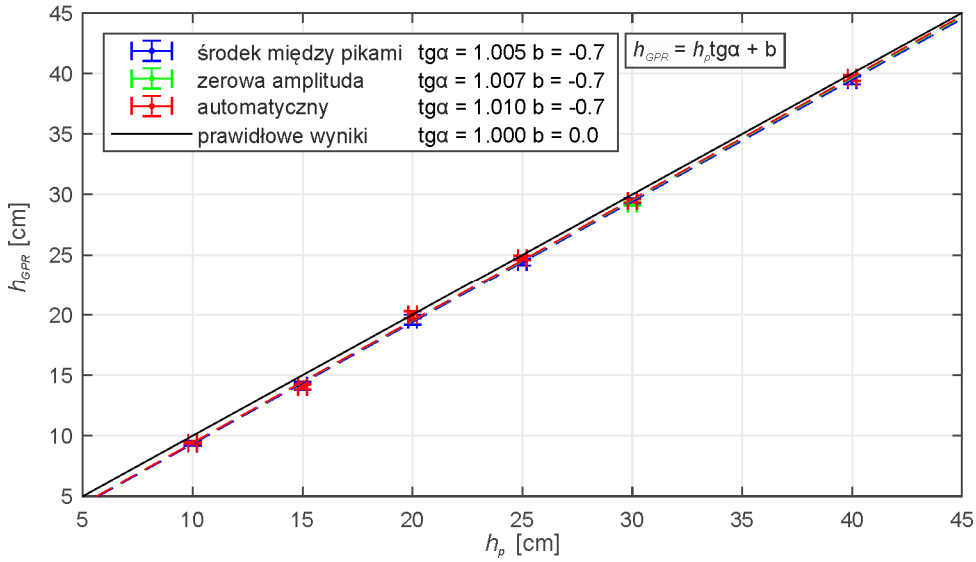
Po wykonaniu pomiarów wyznaczono odległość h_{GPR} od stalowej płyty, zgodnie z zależnością (4.6), dla sześciu ustawień anten, zgodnie z sześcioma opisanymi wcześniej metodami ustalania czasu zerowego (por. rys. 4.8). Czas odbicia (pierwszy pik odbicia) był uśredniany dla 90 pomiarów pojedynczych skanów typu A. Niepewności pomiarowe zostały policzone metodą różnicową, przyjmując niepewność prędkości fali elektromagnetycznej w powietrzu jako $\Delta c = 0.01$ cm/ns oraz niepewność pomiaru odległości jako $\Delta h_p = 2$ mm. W dalszej analizie przyjęto tylko te metody ustalania czasu zerowego, których błąd względny oszacowania odległości nie przekraczał 5%. Przyjęto w związku z tym do analizy czas zerowy ustalony za pomocą zerowej amplitudy, środka między pikami oraz automatycznego algorytmu proponowanego przez producenta georadaru Aladdin.

Po obliczeniu odległości od płyty h_{GPR} oraz niepewności pomiarowych, punkty zostały naniesione na wykresy dla czterech pomiarów z różną liczbą rejestrowanych próbek (128, 256, 384 oraz 512 próbek/skan) wraz z rzeczywistymi odległościami h_p. Następnie dokonano aproksymacji uzyskanych punktów funkcją liniową, za pomocą metody najmniejszych kwadratów, w celu porównania oszacowanych wyników z linią prawidłowych wyników, której kąt nachylenia jest równy 45˚. Na rys. 4.10 – 4.13 przedstawiono wyniki identyfikacji odległości od płyty.

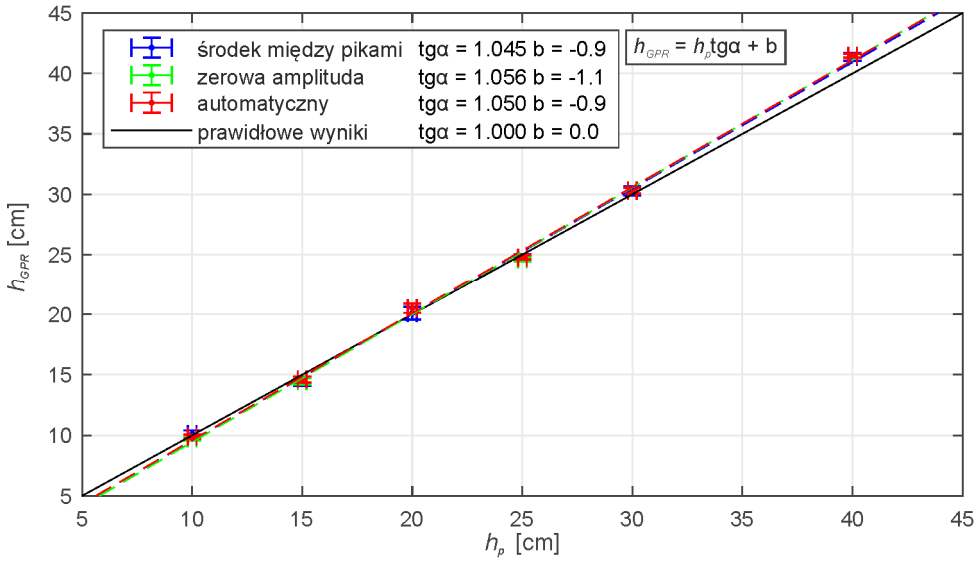


Rys. 4.10. Identyfikacja odległości anteny od stalowej płyty dla pomiaru 128 próbek/skan dla różnych metod ustalania czasu zerowego

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 4.11. Identyfikacja odległości anteny od stalowej płyty dla pomiaru 256 próbek/skan dla różnych metod ustalania czasu zerowego



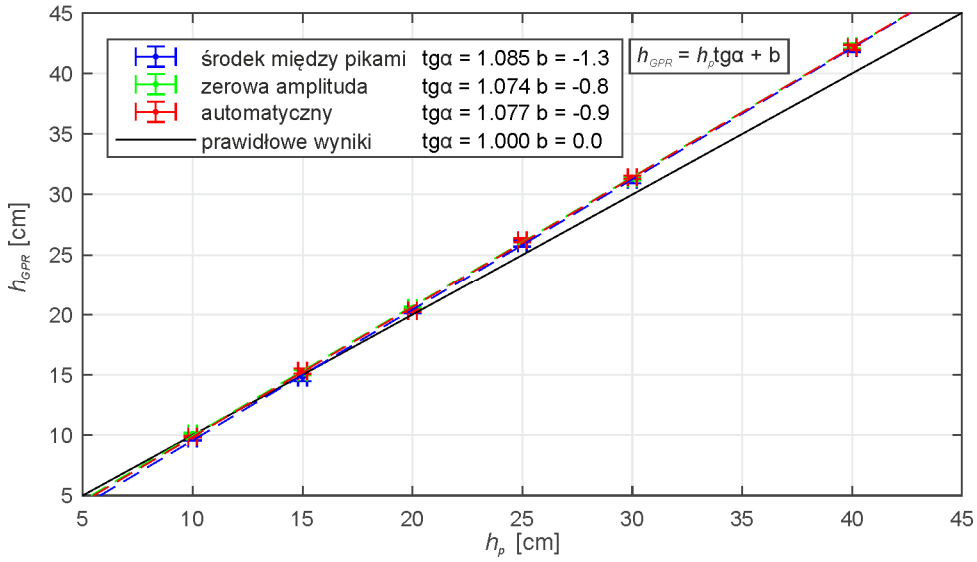
Rys. 4.12. Identyfikacja odległości anteny od stalowej płyty dla pomiaru 384 próbek/skan dla różnych metod ustalania czasu zerowego

Można zauważyć, iż w wyniku wybranych do analizy metod ustalania czasu zerowego otrzymano zbliżone wyniki. Porównując uzyskiwane współczynniki funkcji liniowej (tgα oraz *b*) z aproksymacji punktów można stwierdzić, iż najbliższe prawidłowym wynikom były pomiary wykonywane dla 256 próbek/skan (por. rys. 4.11). Jednakże dla najmniejszych odległości, bliższe prawidłowym wynikom były pomiary dla 512 próbek/skan (por.rys. 4.13).

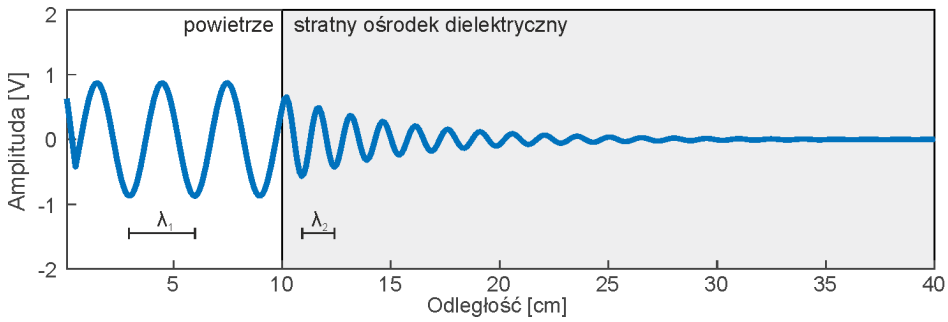
Należy podkreślić, iż są to pomiary przeprowadzone dla powietrza. Oznacza to, że fala wejściowa nie wnikała w głąb stratnego ośrodka dielektrycznego, ale propagowała nie zmieniając swojej charakterystyki częstotliwościowej. Mając na względzie zjawisko

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

zwiększenia częstotliwości przy przenikaniu fali wejściowej do stratnego ośrodka dielektrycznego (rys. 4.14), należałoby znaleźć różnicę czasową w ustalaniu czasu zerowego między pomiarem w powietrzu, a pomiarem w stratnym ośrodku dielektrycznym. Proponuje się, by każdorazowo w przypadku bardzo płytkich inspekcji wykonywać test unoszenia georadaru nad powierzchnię skanowania (ang. *lift test*) [159] (por. rys. 6.4). Obserwuje się wówczas zjawisko rozszczepienia fali wejściowej w powietrzu, od fali wejściowej dla ośrodka dielektrycznego. Należy pobrać pojedynczą trasę georadarową pomiaru w powietrzu oraz drugą z pomiaru ośrodka i wyznaczyć różnicę czasową między ustalonymi czasami zerowymi. Test ten przeprowadzono dla badań opisanych w rozdziale 6.1.3. Różnica w czasie uzyskana z takiego testu nie jest ważna z punktu widzenia głębokich inspekcji. Natomiast w przypadku badań, które wymagają dokładności w określaniu głębokości do 10 cm w betonie, ta niewielka różnica czasowa może być bardzo istotna.



Rys. 4.13. Identyfikacja odległości anteny od stalowej płyty dla pomiaru 512 próbek/skan dla różnych metod ustalania czasu zerowego



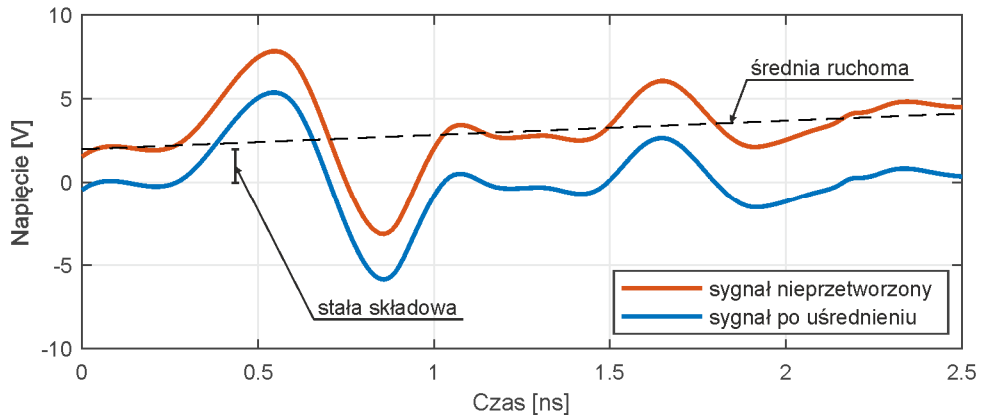
Rys. 4.14. Przykładowy sygnał numeryczny 1D propagacji fali elektromagnetycznej w stratnym ośrodku dielektrycznym (widoczne zjawisko zmiany częstotliwości fali)

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

4.4.2. Uśrednianie sygnałów georadarowych

Bliskie pole nadajnika anteny georadarowej zawiera energię o niskiej częstotliwości, która zanika bardzo szybko wraz z odległością. Ze względu na fakt, iż w antenach GPR nadajnik jest położony stosunkowo blisko odbiornika, energia niskoczęstotliwościowa rejestruje się jako zmienna w czasie składowa sygnału. Efekt ten został nazwany „*wow*" [6]. Stąd angielska nazwa procedury odejmowania średniej ruchomej, która usuwa niskoczęstotliwościowe zakłócenia, nazywa się „*dewow*". W dawniej stosowanych przyrządach typu analogowego filtr ten był już stosowany podczas pomiarów. Wraz z nadejściem cyfrowej akwizycji danych procedura stała się częścią przetwarzania danych [7]. Procedura uśredniania polega na odjęciu średniej arytmetycznej zadanej liczby chwil czasowych od wartości środkowej danego okna czasowego. W kolejnym kroku, okno jest przesuwane i ponownie odejmuje się średnią arytmetyczną od wartości środkowej.

Z powodu niedoskonałości sprzętu pomiarowego, może się także pojawić przesunięcie sygnału o stałą składową. Procedura usuwania przesunięcia stałoprądowego (ang. *DC-shift*) polega na odjęciu obliczonej średniej arytmetycznej wszystkich próbek od całego sygnału [56]. Przykład omawianych procedur uśredniania, działających na jedną wybraną trasę georadarową, przedstawiono na rys. 4.15.



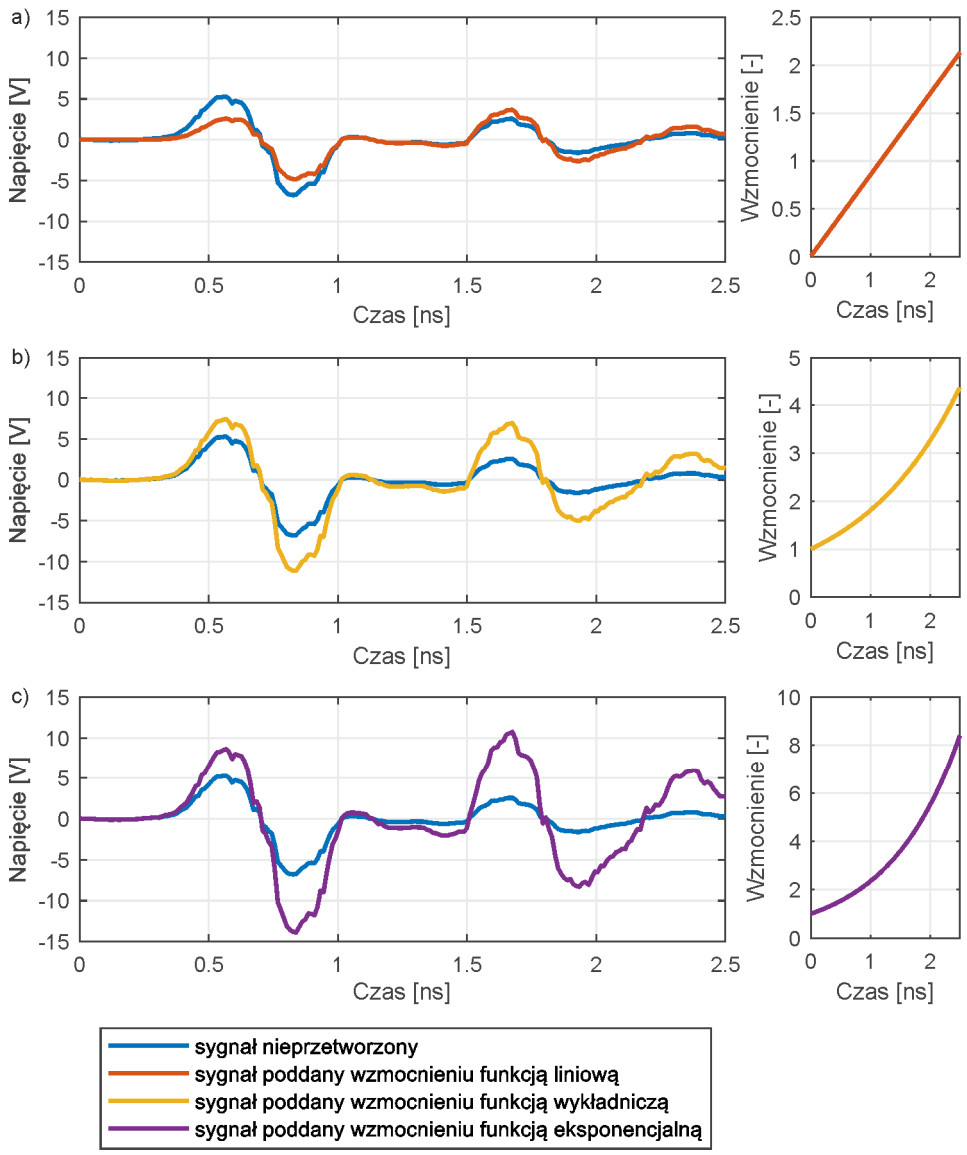
Rys. 4.15. Skan typu A poddany usunięciu stałej składowej oraz średniej ruchomej

4.4.3. Wzmocnienie sygnału zmienne w czasie

Amplituda rejestrowanego sygnału maleje w miarę propagacji fali elektromagnetycznej w głąb badanego ośrodka. Obserwuje się, że sygnały odbite z większych głębokości, w porównaniu do odbić z niższych głębokości, są bardzo małe.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Powodem spadku wartości amplitudy jest między innymi tłumienie fali w badanym materiale, straty energii na przejściu przez granicę dwóch ośrodków, rozproszenie oraz absorpcja. Zjawiska te sprawiają, iż dla podobnych konstrukcji inżynierskich i tej samej częstotliwości pracy anteny, można uzyskiwać różne zasięgi fali elektromagnetycznej. Dlatego dla każdej pojedynczej trasy wprowadza się korektę amplitudy sygnału poprzez jego wzmocnienie zmienne w czasie. Najczęściej stosowanymi algorytmami do wzmacniania sygnałów są wzmocnienia funkcyjne (np. liniowe, eksponencjalne, wykładnicze) lub wzmocnienia automatyczne (ang. *Automatic Gain Control, AGC*). Efekt działania wzmocnienia liniowego, eksponencjalnego i wykładniczego dla pojedynczej trasy georadarowej pokazano na rys. 4.16.

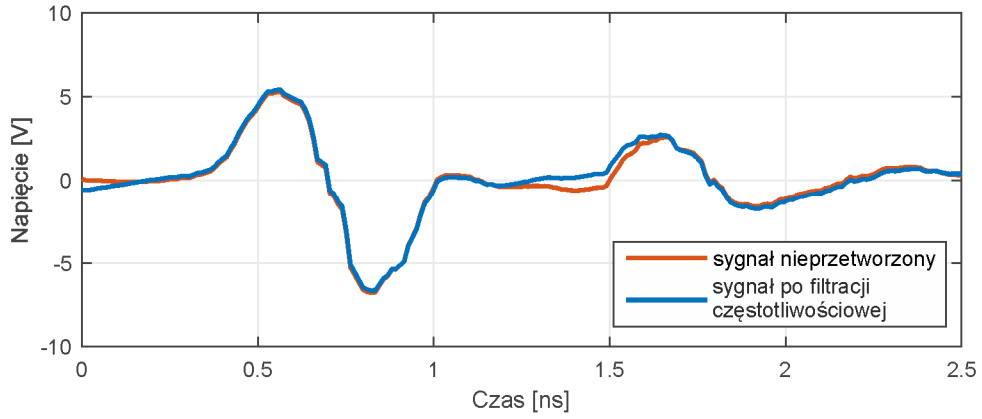


Rys. 4.16. Procedura wzmocnienia sygnału: a) funkcją liniową, b) funkcją wykładniczą, c) funkcją eksponencjalną

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

4.4.4. Filtracja częstotliwościowa sygnału

Występujące w sygnale zakłócenia można usunąć poprzez zastosowanie filtracji częstotliwościowej. Najczęściej wykonuje się filtrację danego sygnału w dziedzinie częstotliwości [56], stosując filtry dolnoprzepustowe, górnoprzepustowe oraz pasmowo-przepustowe. Znając charakterystykę częstotliwościową danej anteny, można stosować filtry pasmowo-przepustowe, które pozwolą zachować sygnał użyteczny, a tym samym zmniejszyć zakłócenia. Dla anteny o częstotliwości środkowej 2 GHz, producent zaleca stosowanie filtru pasmowo-przepustowego w zakresie od 500 MHz do 3000 MHz. Przykładowy sygnał poddany takiej procedurze został przedstawiony na rys. 4.17.

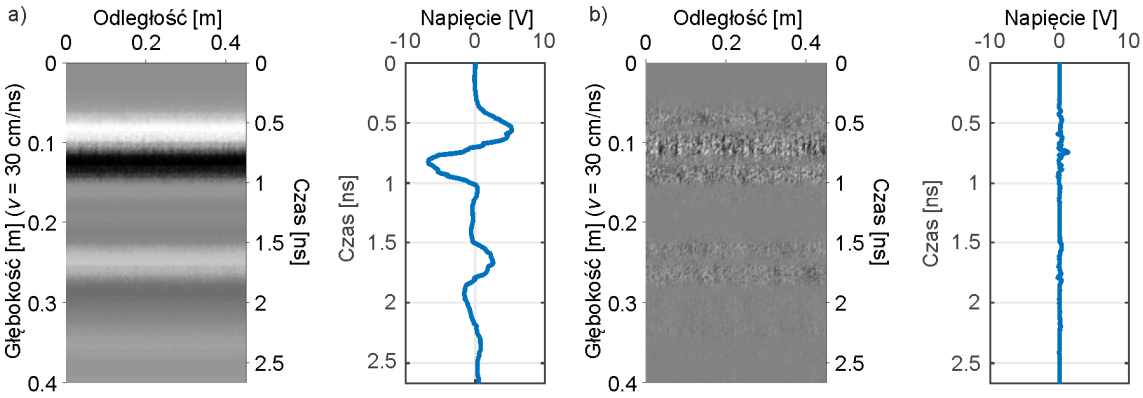


Rys. 4.17. Trasa georadarowa poddana filtracji pasmowo przepustowej w zakresie 500 MHz – 3000 MHz

4.4.5. Usuwanie średniej trasy z całego profilu

Często na mapach georadarowych można zaobserwować poziome odbicia, które są wynikiem zakłócenia pola elektromagnetycznego. Ze względu na fakt, iż zakłócenie dotyczy całego radargramu, potrzebna jest procedura, który wyeliminuje zakłócenie dla wszystkich tras. Najprostszą z nich jest operacja usunięcia średniej trasy z całego profilu [34]. Należy wyliczyć średnią trasę dla całego profilu, a następnie odjąć ją od każdej pojedynczej trasy. W ten sposób usuwa się poziome odbicia, które pojawiają się na całej mapie. W przypadku tej procedury, należy zachować szczególną ostrożność z uwagi na fakt, iż można w ten sposób usunąć również informację o granicy miedzy ośrodkami. Na rys. 4.18 przedstawiono przykładową mapę georadarową poddaną usuwaniu średniej trasy z całego profilu.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 4.18. Mapa georadarowa poddana usuwaniu średniej trasy z całego profilu:
a) sygnał nieprzetworzony, b) sygnał przetworzony

4.4.6. Migracja map georadarowych

Migracja map georadarowych jest procedurą zapożyczoną z badań sejsmicznych. Polega na odtworzeniu geometrii, która spowodowała anomalie na radargramach. Oznacza to, że źródło każdej dyfrakcji zostaje zastąpione punktem. W przypadku badań geologicznych migracja nie daje spektakularnych wyników [56]. Jednakże badając konstrukcje żelbetowe, pręty zbrojeniowe ujawniają się w postaci hiperbol, które o wiele łatwiej można zastąpić anomalią punktową. Dzięki migracji map georadarowych uzyskanych dla konstrukcji żelbetowych można dokładniej zobrazować system zbrojenia. Parametrem, który jest niezbędny do przeprowadzenia prawidłowej migracji jest prędkość propagacji fali elektromagnetycznej. Im dokładniej jest wyznaczona wartość prędkości, tym dokładniejsze są wyniki migracji. Często stosowanymi metodami migracji są: metoda Kirchoffa, metoda Stolta, metoda różnic skończonych i metoda sumowania hiperbol [2, 6, 93, 124].

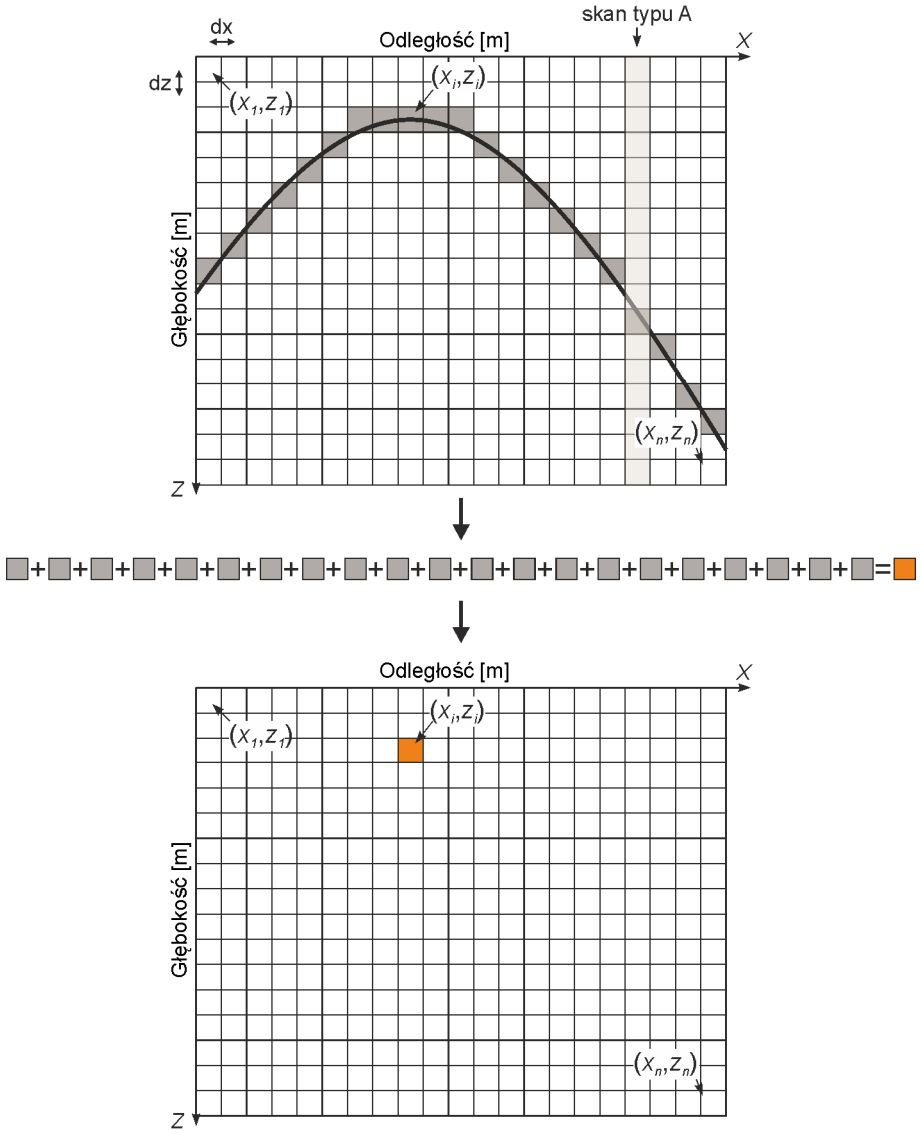
W niniejszej rozprawie do migracji map georadarowych użyto algorytmu, zaproponowanego przez Ozdemira [92, 93], nazwanego sumowaniem hiperbol (ang. *hyperbolic summation*). Operacja ta powoduje zwinięcie pojedynczej hiperboli występującej na radargramie do punktu. Założeniem metody jest homogeniczność i jednorodność materiału, w którym propaguje fala elektromagnetyczna oraz fakt, iż antena georadarowa przylega bezpośrednio do skanowanej powierzchni.

W algorytmie sumowania hiperbol przyjmuje się, iż każdy punkt mapy georadarowej (x_i, z_i) może być źródłem dyfrakcji, które stworzy na radargramie hiperbolę. Zakładając, iż anteną porusza się wzdłuż wektora X, emituje i rejestruje sygnał w kierunku Z, można z twierdzenia Pitagorasa wyprowadzić zależność opisującą powstającą hiperbolę:

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

$$Z=\sqrt{z_i^2+\left(X-x_i\right)^2}\,. \tag{4.7}$$

Pierwszym krokiem, jest zmiana skali czasowej radargramu na odległościową, do czego potrzebne jest poprawne zdefiniowanie prędkości propagacji. Następnie podstawiając współrzędne pojedynczego punktu mapy (x_i, z_i) do zależności (4.7), definiuje się hiperbolę. Wówczas sumuje się wartości napięcia z radargramu pokrywające się z obliczoną hiperbolą (por. rys. 4.19). Zsumowana wartość zostaje zapisana na nowej mapie w wierzchołku założonej hiperboli (x_i, z_i). Algorytm powtarza się przeliczając wszystkie punkty całego zobrazowania typu B począwszy od (x_1, z_1) aż do (x_n, z_n). Rezultatem migracji jest nowa mapa georadarowa, która ukazuje punktowe anomalie w wierzchołkach hiperbol dyfrakcyjnych występujących na radargramie.



Rys. 4.19. Schemat algorytmu sumowania hiperbol

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

4.4.7. Transformacja Fouriera

Podstawowym narzędziem używanym do analizy częstotliwościowej sygnałów jest transformacja Fouriera [163]. Pozwala ona na określenie jakie częstotliwości zawarte są w sygnale. Ciągłe przekształcenie Fouriera dane jest wzorem [82]:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \,, \tag{4.8}$$

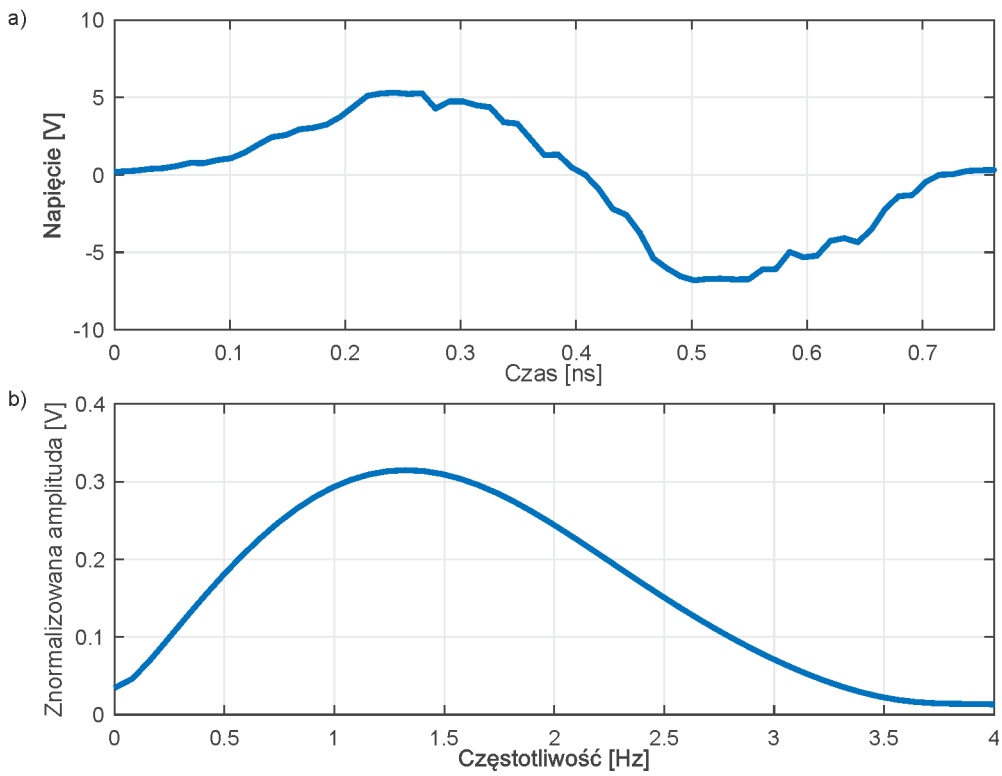
gdzie:

$x(t)$ – sygnał w dziedzinie czasu,

$X(\omega)$ – sygnał w dziedzinie częstotliwości.

Ze względu na fakt, iż analizowane w pracy sygnały cyfrowe są sygnałami dyskretnymi, do realizacji numerycznej transformaty danej wzorem (4.8) stosowano algorytm szybkiej transformacji Fouriera (ang. *fast Fourier transform, FFT*) [82].

Na rys. 4.20 przedstawiono sygnał wejściowy w dziedzinie czasu i częstotliwości, zarejestrowany przez antenę o częstotliwości środkowej 2 GHz. Można zauważyć że środkową częstotliwością sygnału wejściowego jest częstotliwość ok 1.4 GHz, co oznacza, iż w stosunku do generowanego sygnału o częstotliwości środkowej 2 GHz następuje spadek częstotliwości.



Rys. 4.20. Transformacja Fouriera sygnału wejściowego anteny 2 GHz w dziedzinie: a) czasu, b) częstotliwości

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

4.4.8. Krótkoczasowa transformacja Fouriera

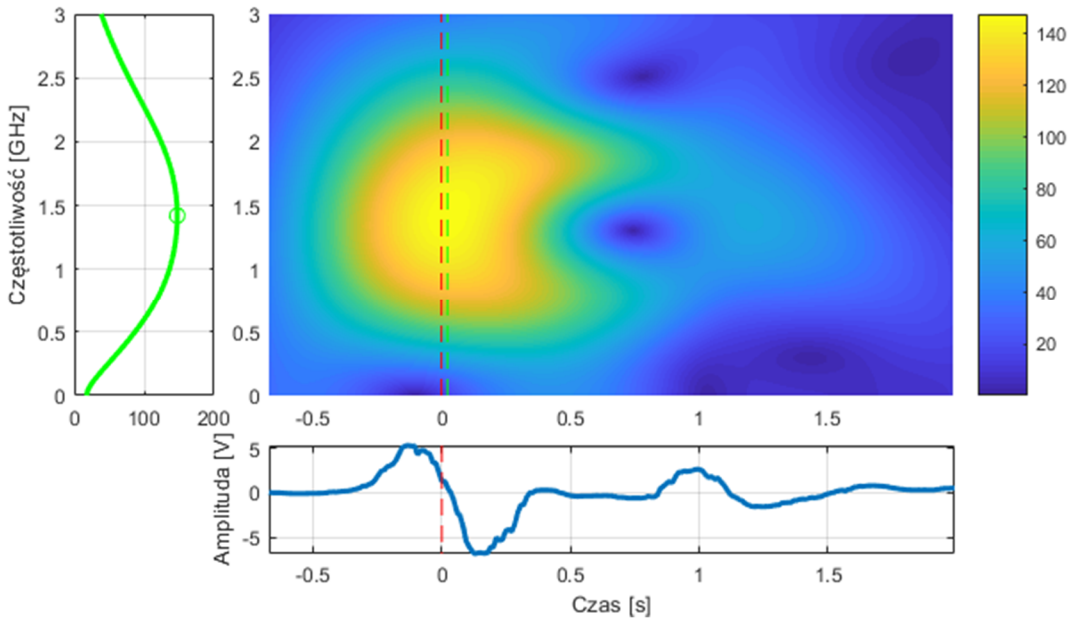
Jedną z metod czasowo-częstotliwościowej analizy sygnałów jest krótkoczasowa transformacja Fouriera (ang. *short-time Fourier transform, STFT*). Jest ona używana w celu uzyskania informacji o częstotliwościach fragmentów sygnału uzależnionych od czasu. W celu otrzymania informacji o częstotliwości definiuje się okno czasowe, które jest przesuwane w czasie, analizując skład częstotliwościowy wewnątrz okna. Rozmiar okna jest ściśle powiązany z rozdzielczością wynikowego widma. Im większa szerokość okna czasowego, tym lepsza rozdzielczość częstotliwościowa i mniejsza rozdzielczość czasowa. Wraz ze zmniejszeniem szerokości okna zwiększa się rozdzielczość w czasie, jednak pogarsza w dziedzinie częstotliwości. Ciągła, krótkoczasowa transformacja Fouriera w dziedzinie czasu jest opisana zależnością [163]:

$$X(\tau,\omega)=\int_{-\infty}^{\infty} x(t)\omega(t-\tau)e^{-j\omega t}dt\,, \tag{4.9}$$

gdzie:

$\omega(\tau)$ – okno czasowe obserwacji.

W metodzie GPR krótkoczasową transformację Fouriera stosuje się do szczegółowych analiz wpływu wilgotności na konstrukcje murowane [75] oraz żelbetowe [71]. Na rys. 4.21 przedstawiono przykładowy spektrogram dla sygnału pomierzonego w powietrzu w odległości 15 cm od stalowej płyty.



Rys. 4.21. Krótkoczasowa transformacja Fouriera dla sygnału pomierzonego w powietrzu w odległości 15 cm od stalowej płyty

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

4.4.9. Średnia kwadratowa

Średnia kwadratowa (ang. *root mean square, RMS*) jest miarą statystyczną, zdefiniowaną przez inżynierów elektryków i nazwaną przez nich wartością skuteczną [82]. Miara ta informuje o tym, jaki jest rząd wielkości sygnału pomiarowego i jest wyrażona wzorem:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1}\int_{t_1}^{t_2}\left(x(t)^2\right)dt}\ . \tag{4.10}$$

Metodę tę stosuje się z powodzeniem przy wykrywaniu uszkodzeń z przetwarzania danych fal prowadzonych Lamba, rejestrowanych przy użyciu wibrometru laserowego [112, 167]. W pracy sprawdzono możliwość wykorzystania średniej kwadratowej do oceny uszkodzeń konstrukcji ceglanych.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

5. Identyfikacja prędkości fali elektromagnetycznej

Określenie prędkości propagacji fali elektromagnetycznej należy do jednego z najistotniejszych zadań podczas wykonywania badań metodą georadarową. Prędkość pozwala nam zmienić opis czasowy na zmienną przestrzenną. W związku z tym, im bardziej precyzyjnie jest określona prędkość propagacji fali, tym większa dokładność w określeniu miejsca położenia inkluzji. Ponadto precyzyjne określenie prędkości propagacji fali pozwala na uzyskanie prawidłowej migracji obrazu georadarowego.

Niniejszy rozdział poświęcony jest identyfikacji prędkości fali elektromagnetycznej w badanym materiale, na podstawie anomalii wykrytych na mapach georadarowych. Opracowane modele matematyczne anomalii pozwalają efektywniej korzystać z pomiarów doświadczalnych w celu diagnostyki konstrukcji inżynierskich. Pierwszą cześć rozdziału poświęcono najpopularniejszej metodzie wyznaczania prędkości w badanym materiale, na podstawie odbicia fali w próbce o znanej wysokości. Metoda ta może stanowić pomiar referencyjny wobec innych metod analizujących dyfrakcje, występujące na mapach georadarowych. W drugiej części opisano zagadnienie identyfikacji prędkości fali elektromagnetycznej, analizując hiperbole dyfrakcyjne, które często występują na radargramach w konstrukcjach żelbetowych. Opisano znane do tej pory modele hiperbol dyfrakcyjnych, a także zaproponowano autorski model, który pozwala na uzyskanie wyników bardziej zbliżonych do wartości rzeczywistych. Trzecią część rozdziału poświęcono identyfikacji prędkości, przy wykorzystaniu dyfrakcji na granicy ośrodków. Opisano trzy autorskie modele dyfrakcji, wykorzystujące różne położenia dwóch ośrodków. Na podstawie analizowanych modeli możliwe jest zidentyfikowanie prędkości, a także granicy między dwoma ośrodkami. Należy podkreślić, iż opracowane metody są metodami przybliżonymi, które pomijają między innymi wpływ częstotliwości i bliskiego pola anteny georadarowej. Ostatecznie w celu potwierdzenia założeń i weryfikacji wyników oszacowywanych prędkości, przeprowadzono analizy numeryczne dla każdego rodzaju opisanych anomalii.

5.1. Identyfikacja prędkości za pomocą próbki o znanej wysokości

Najprostszym sposobem identyfikacji prędkości fali elektromagnetycznej jest dokonanie pomiaru jednostronnego na próbce o znanej wysokości h. Badanie polega na identyfikacji czasu odbicia sygnału od spodu próbki. W celu zwiększenia amplitudy

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

odbitego sygnału bezpośrednio pod próbką można umieścić stalową płytę. Schemat opisywanej metody przedstawiono na rys. 5.1. Pomiar przeprowadza się ustawiając antenę georadarową składającą się z nadajnika i odbiornika na powierzchni testowanego ośrodka. Antena nadawcza emituje sygnał, który propaguje w kierunku spodu próbki i powraca do anteny odbiorczej. Ze względu na rozstaw s między antenami, fala elektromagnetyczna nie powraca tą samą drogą do anteny georadarowej. Przyjęto, iż t_1 to czas, w którym sygnał propaguje od anteny nadawczej do spodu próbki, a t_2 oznacza czas, w którym odbity sygnał powraca do anteny. Z twierdzenia Pitagorasa uzyskujemy zestaw równań (por. (4.5)):

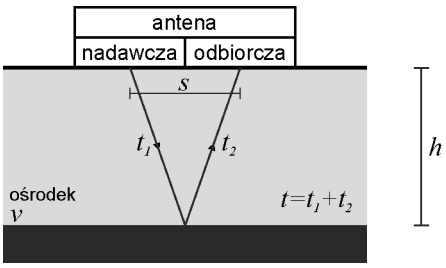
$$\begin{cases} v^2 t_1^2 = h^2 + \left(\dfrac{s}{2}\right)^2, \\ v^2 t_2^2 = h^2 + \left(\dfrac{s}{2}\right)^2. \end{cases} \tag{5.1}$$

Przekształcając zależność (5.1) i wprowadzając czas całkowity t ($t = t_1 + t_2$) otrzymujemy równanie (por. (4.6)), które pozwala oszacować prędkość na podstawie czasu odbitego sygnału georadarowego:

$$v = \sqrt{\frac{4h^2 + s^2}{t^2}}. \tag{5.2}$$

Metoda ta znana jest w literaturze jako „*depth to known reflector method*" [130]. Na podstawie oszacowanej prędkości można określić przenikalność elektryczną danego materiału wykorzystując relację [26]:

$$\varepsilon_r = \frac{c^2}{v^2}. \tag{5.3}$$



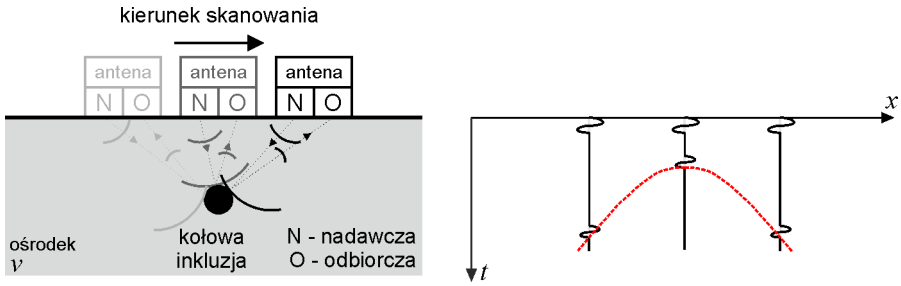
Rys. 5.1. Schemat odbicia fali elektromagnetycznej od spodu próbki o znanej wysokości h

5.2. Identyfikacja prędkości za pomocą hiperboli dyfrakcyjnej

Wraz ze zbliżaniem się anteny georadarowej do kołowej inkluzji, której właściwości elektryczne różnią od właściwości otaczającego ośrodka, maleje czas powrotu fali do

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

anteny odbiorczej. W wyniku połączenia punktów zawierających dane o odległości od inkluzji w poszczególnych położeniach anteny powstaje hiperbola dyfrakcyjna (rys. 5.2), która odzwierciedla poszukiwaną inkluzję na mapie georadarowej [56].



Rys. 5.2. Schemat powstania hiperboli dyfrakcyjnej na mapie georadarowej

W przypadku diagnostyki konstrukcji żelbetowych na mapach georadarowych często obserwowanym kształtem są hiperbole dyfrakcyjne, które odwzorowują pręty zbrojeniowe położone prostopadle do linii skanowania. Wiadomo, że kształt powstającej hiperboli jest ściśle związany z prędkością fali w ośrodku [7]. W związku z tym opisując matematycznie model hiperboli i uwzględniając różne czynniki wpływające na jej kształt, można oszacować wartość prędkości fali elektromagnetycznej w badanym ośrodku. Założeniem opisywanych poniżej modeli matematycznych jest fakt, iż ośrodek w którym znajduje się kołowa inkluzja jest homogeniczny.

5.2.1. Model hiperboli nie uwzględniający rozmiaru pręta i rozstawu anten

Najprostszym opisem hiperboli, przedstawionym na rys. 5.3, jest model w którym pomijany jest promień pręta oraz rozstaw między anteną nadawczą i odbiorczą [79, 86, 151]. Z twierdzenia Pitagorasa uzyskujemy zależność:

$$\left(\frac{vt_0}{2}\right)^2 + \left(x_0 - x_i\right)^2 = \left(\frac{vt}{2}\right)^2, \tag{5.4}$$

gdzie:

x_i – położenie georadaru (anteny nadawczej i odbiorczej),

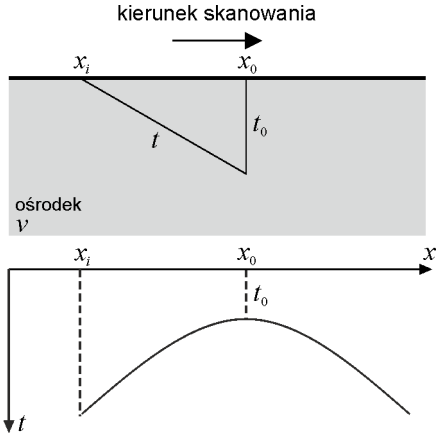
x_0 – położenie inkluzji,

t_0 – czas przelotu fali do inkluzji.

Przekształcając równanie (5.4) uzyskujemy matematyczny opis hiperboli:

$$t = \sqrt{4\frac{\left(x_0 - x_i\right)^2}{v^2} + t_0^2}\,. \tag{5.5}$$

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 5.3. Model hiperboli nie uwzględniający rozmiaru pręta i rozstawu anten

5.2.2. Model hiperboli nie uwzględniający rozmiaru pręta i uwzględniający rozstaw anten

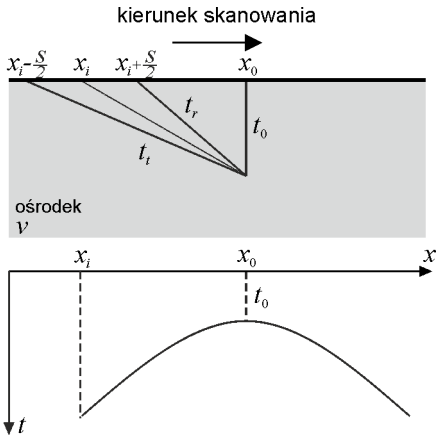
Model hiperboli, w którym nie uwzględnia się rozmiaru pręta, natomiast uwzględnia się rozstaw miedzy anteną nadawczą i odbiorczą został przedstawiony na rys. 5.4. Z twierdzenia Pitagorasa uzyskujemy zestaw dwóch równań dla czasu t_r oraz t_t:

$$\begin{cases} \left(\dfrac{vt_0}{2}\right)^2 + \left(x_0 - x_i - \dfrac{s}{2}\right)^2 = \left(\dfrac{vt_t}{2}\right)^2, \\ \left(\dfrac{vt_0}{2}\right)^2 + \left(x_0 - x_i + \dfrac{s}{2}\right)^2 = \left(\dfrac{vt_r}{2}\right)^2. \end{cases} \tag{5.6}$$

gdzie:

t_t – czas przelotu fali od anteny nadawczej,

t_r – czas przelotu fali do anteny odbiorczej.



Rys. 5.4. Model hiperboli nie uwzględniający rozmiaru pręta i uwzględniający rozstaw anten

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Przekształcając równania (5.6) otrzymujemy:

$$t = t_t + t_r \Rightarrow t = \frac{1}{v}\left(\sqrt{\left(\frac{vt_0}{2}\right)^2 + \left(x_0 - x_i - \frac{s}{2}\right)^2} + \sqrt{\left(\frac{vt_0}{2}\right)^2 + \left(x_0 - x_i + \frac{s}{2}\right)^2}\right). \quad (5.7)$$

5.2.3. Model hiperboli uwzględniający rozmiar pręta i nie uwzględniający rozstawu anten

Najczęściej używanym obecnie modelem hiperboli jest równanie uwzględniające promień kołowej inkluzji (np. [3, 85, 86, 102, 120, 156]). Oprócz uproszczenia wynikającego z pominięcia rozstawu między anteną nadawczą i odbiorczą, w modelu zakłada się, iż fala elektromagnetyczna odbija się od środka inkluzji (rys. 5.5). Z twierdzenia Pitagorasa uzyskujemy wzór:

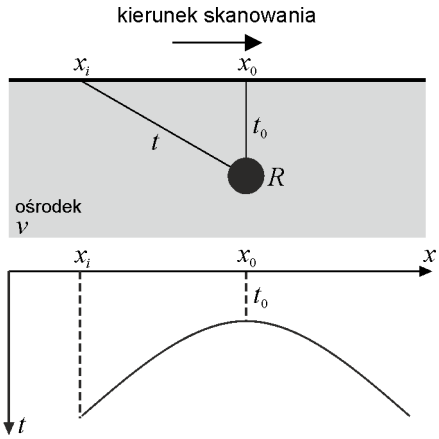
$$\left(\frac{vt_0}{2} + R\right)^2 + \left(x_0 - x_i\right)^2 = \left(\frac{vt}{2} + R\right)^2, \quad (5.8)$$

gdzie:

R – promień kołowej inkluzji.

Przekształcając zależność (5.8) uzyskujemy:

$$t = \frac{2}{v}\left(\sqrt{\left(\frac{vt_0}{2} + R\right)^2 + \left(x_0 - x_i\right)^2} - R\right). \quad (5.9)$$



Rys. 5.5. Model hiperboli uwzględniający rozmiar pręta i nie uwzględniający rozstawu anten

5.2.4. Model hiperboli uwzględniający rozmiar pręta i rozstaw anten

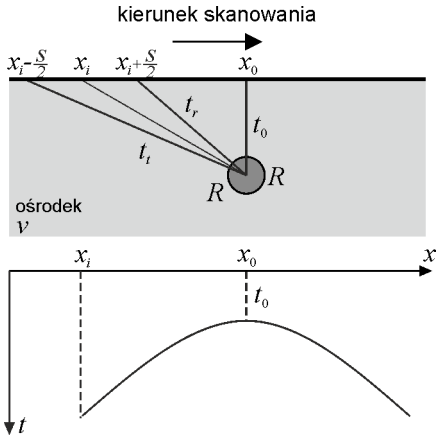
Model hiperboli który uwzględnia promień pręta oraz rozstaw między anteną nadawczą i odbiorczą [114], został przedstawiony na rys. 5.6. Z twierdzenia Pitagorasa uzyskujemy zestaw dwóch równań dla czasu t_r oraz t_t:

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

$$\begin{cases} \left(\frac{vt_0}{2}+R\right)^2+\left(x_0-x_i-\frac{s}{2}\right)^2=\left(\frac{vt_t}{2}+R\right)^2, \\ \left(\frac{vt_0}{2}+R\right)^2+\left(x_0-x_i+\frac{s}{2}\right)^2=\left(\frac{vt_r}{2}+R\right)^2. \end{cases} \tag{5.10}$$

Przekształcając zależności (5.10) otrzymujemy:

$$t=\frac{1}{v}\left(\sqrt{\left(\frac{vt_0}{2}+R\right)^2+\left(x_0-x_i-\frac{s}{2}\right)^2}+\sqrt{\left(\frac{vt_0}{2}+R\right)^2+\left(x_0-x_i+\frac{s}{2}\right)^2}-2R\right). \tag{5.11}$$



Rys. 5.6. Model hiperboli uwzględniający rozmiar pręta i rozstaw anten

5.2.5. Autorski model hiperboli

Autorski model matematyczny hiperboli, pokazany na rys. 5.7, uwzględnia rozmiar pręta, rozstaw między dwoma antenami, a także fakt, iż fala odbija się od powierzchni pręta. Z twierdzenia Pitagorasa uzyskujemy zestaw dwóch równań dla czasu t_r oraz t_t:

$$\begin{cases} \left(r_p\right)^2+\left(x_0-x_i-\frac{s}{2}-x_p\right)^2=\left(\frac{vt_t}{2}\right)^2, \\ \left(r_p\right)^2+\left(x_0-x_i+\frac{s}{2}-x_p\right)^2=\left(\frac{vt_r}{2}\right)^2, \end{cases} \tag{5.12}$$

gdzie pomocnicze zmienne r_p oraz x_a zostały zdefiniowane jako:

$$x_a=R\sin\left(\alpha\right), \tag{5.13}$$

$$r_p=\frac{vt_0}{2}+R-R\left|\cos\left(\alpha\right)\right|. \tag{5.14}$$

Zmienne te zostały zdefiniowane przy użyciu kąta α zaznaczonego na rys. 5.7:

$$\mathrm{tg}\alpha=\frac{x_0-x_i}{\frac{vt_0}{2}+R}. \tag{5.15}$$

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

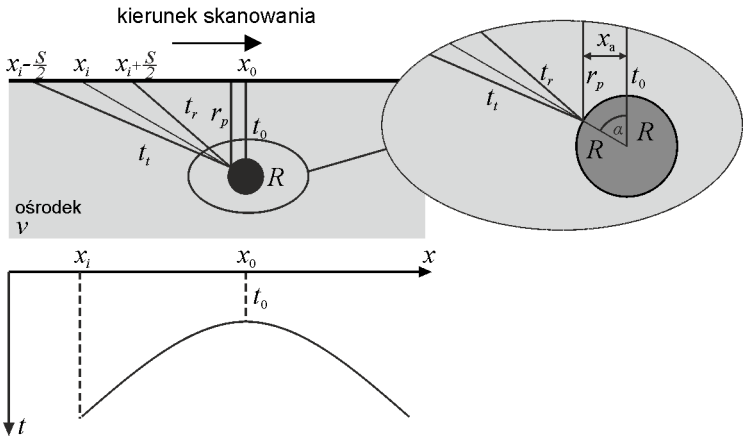
Przekształcając równania (5.12) uzyskujemy ostatecznie:

$$t = \frac{1}{v}\left(\sqrt{r_p^2 + \left(x_0 - x_i - \frac{s}{2} - x_a\right)^2} + \sqrt{r_p^2 + \left(x_0 - x_i + \frac{s}{2} - x_a\right)^2}\right), \tag{5.16}$$

gdzie:

$$x_a = R\sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{x_0 - x_i}{\frac{vt_0}{2} + R}\right)\right), \tag{5.17}$$

$$r_p = \frac{vt_0}{2} + R - R\left|\cos\left(\tan^{-1}\left(\frac{x_0 - x_i}{\frac{vt_0}{2} + R}\right)\right)\right|. \tag{5.18}$$



Rys. 5.7. Autorski model hiperboli uwzgledniający promień pręta, rozstaw między antenami oraz fakt odbicia fali od powierzchni pręta

Należy podkreślić, iż dla zależności (5.16) nie istnieje rozwiązanie dla kąta α = 90˚. W przypadku pomiarów georadarowych, czy też symulacji numerycznych, otrzymanie kąta α o takiej wartości jest niemożliwe. Usytuowanie anten względem kołowej inkluzji nie pozwala, by kąt $\alpha = 90^\circ$.

5.3. Identyfikacja prędkości za pomocą dyfrakcji na granicy ośrodków

Fala elektromagnetyczna propagując przez badany ośrodek ulega tłumieniu, rozproszeniu, a także odbiciu od obiektów, których parametry elektryczne się różnią. W związku z tym, na mapach georadarowych mogą się pojawiać anomalie, które niosą ze sobą informację o prędkości fali. Poniżej opisano modele dyfrakcyjne, które można

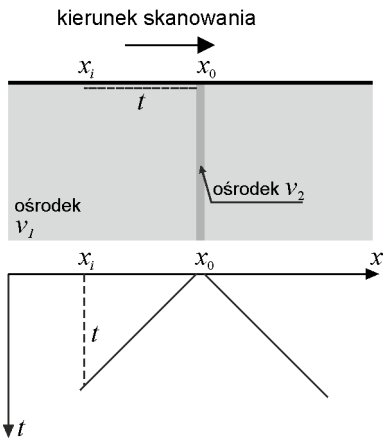
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

zaobserwować na radargramach uzyskanych podczas pomiarów na konstrukcji ceglanej. Założeniem opisywanych zależności jest jednorodność ośrodków.

5.3.1. Autorski model dyfrakcji na pionowej inkluzji

Model dyfrakcji na granicy dwóch ośrodków, pomiędzy którymi występuje pionowa inkluzja, został przedstawiony na rys. 5.8. Model może odpowiadać rzeczywistej sytuacji konstrukcji ceglanych, gdzie między cegłami znajduje się pionowa spoina. Fala powierzchniowa emitowana przez antenę nadawczą powraca po odbiciu od pionowej inkluzji tą samą drogą, dlatego też odbicie na radargramie zachowuje kształt linii prostej, której nachylenie zawiera informację o prędkości fali w badanym ośrodku (rys. 5.8). Opis matematyczny dyfrakcji można przedstawić za pomocą prostej zależności:

$$t = \frac{2\left(x_i - x_0\right)}{v}. \tag{5.19}$$

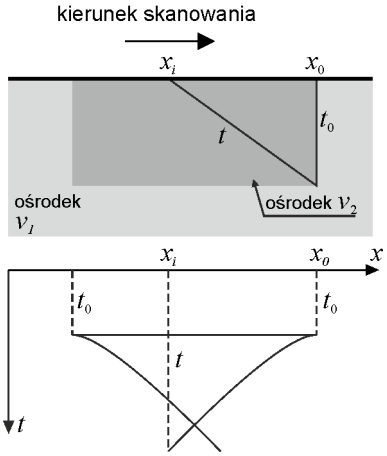


Rys. 5.8. Autorski model dyfrakcji fali elektromagnetycznej na pionowej inkluzji

5.3.2. Autorski model dyfrakcji na narożach prostokątnego obiektu

Dyfrakcja może nastąpić na granicy ośrodków w szczególnym przypadku, kiedy jeden prostokątny obiekt jest umieszczony w innym materiale (rys. 5.9). Model ten odpowiada sytuacji pojedynczej cegły umieszczonej w murze, gdzie prostokątny obiekt jest reprezentowany przez cegłę, a materiał otaczający ilustruje zaprawę. Fala elektromagnetyczna propagując przez prostokątny obiekt odbija się od granicy tego obiektu z otaczającym go materiałem. W wyniku tego odbicia, na mapie georadarowej pojawiają się dwa ramiona hiperboli, wzajemnie się krzyżujące (rys. 5.9).

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 5.9. Autorski model dyfrakcji fali elektromagnetycznej na narożach prostokątnego obiektu umieszczonego w drugim ośrodku

Charakterystyczny kształt przypominający literę „X" powstaje w wyniku odbicia się fali elektromagnetycznej od dolnych naroży prostokątnego obiektu. Temu zjawisku zawsze towarzyszy podłużne odbicie łączące dwa ramiona hiperboli. Relacja dla jednego ramienia hiperboli jest analogiczna jak w przypadku najprostszego modelu hiperboli opisanego równaniem (5.5):

$$t = \sqrt{4\frac{\left(x_0 - x_i\right)^2}{v^2} + t_0^2}\ . \tag{5.20}$$

Należy podkreślić, iż opisane zależności w rozdziałach 5.3.1 oraz 5.3.2, w przypadku zastosowania ich dla konstrukcji ceglanych, pozwalają oszacować prędkość tylko w zakresie pojedynczej cegły. Ze względu na silną porowatość cegły, różnice w prędkości mogą się pojawiać już w obszarze jednej cegły. Szczególnie dobrze jest to widoczne dla drugiego modelu dyfrakcji, gdy podłużne odbicie łączące dwa ramiona hiperboli nie jest równoległe do trasy skanowania, ale zmienia swoje położenie. Świadczy to o tym, że prędkość po długości cegły jest silnie zmienna. Dodatkowo wzmocnienie efektu zróżnicowania prędkości może spowodować woda, tj. wilgotność materiału, która zdecydowanie zaniża wartość prędkości.

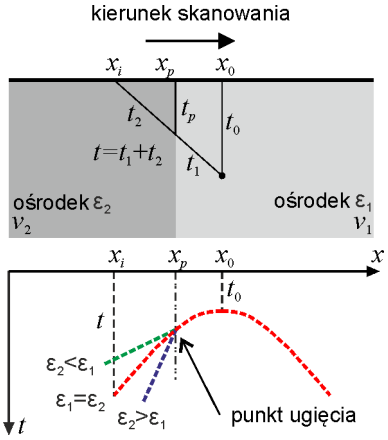
5.3.3. Autorski model ugiętej hiperboli dyfrakcyjnej

Identyfikację prędkości można przeprowadzić za pomocą analizy ugiętej hiperboli dyfrakcyjnej (rys. 5.10). W przypadku, gdy w jednym z ośrodków występuje kołowa inkluzja oraz znajduje się ona w pobliżu granicy dwóch ośrodków o różnych właściwościach elektrycznych, przede wszystkim o różnej przenikalności elektrycznej, rzeczywista hiperbola dyfrakcyjna ulega ugięciu. Gdy ośrodek, w którym znajduje się

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

inkluzja ma wyższą przenikalność elektryczną niż ośrodek sąsiadujący, ugięte ramię hiperboli znajduje się powyżej krzywej, jaka byłaby w przypadku, gdyby oba ośrodki miały tę samą przenikalność elektryczną. Gdy ośrodek, w którym znajduje się inkluzja ma niższą przenikalność elektryczną niż ośrodek sąsiadujący, ugięte ramię hiperboli znajduje się poniżej krzywej, jaka byłaby w przypadku, gdyby oba ośrodki miały tę samą przenikalność elektryczną. Wzajemną relację między wartościami przenikalności elektrycznej sąsiadujących ośrodków określa się za pomocą miary stopnia zakrzywienia ramienia ugiętej rzeczywistej hiperboli dyfrakcyjnej.

Dodatkowo na podstawie analizy radargramu z obrazem rzeczywistej hiperboli dyfrakcyjnej, można wyznaczyć granicę między ośrodkami jako pozycję x_p, odpowiadającą punktowi ugięcia hiperboli. Opisany sposób wyznaczania granicy między ośrodkami został zgłoszony do urzędu patentowego [70] oraz użyty w artykule [109].



Rys. 5.10. Autorski model ugięcia się hiperboli na granicy dwóch ośrodków

Z twierdzenia Pitagorasa uzyskujemy zestaw równań, które opisują ugiętą hiperbolę:

$$\begin{cases} \left(\dfrac{v_1 t_0}{2}\right)^2 + \left(x_0 - x_i\right)^2 = \left(\dfrac{v_1 t_1}{2} + \dfrac{v_2 t_2}{2}\right)^2, \\ \left(\dfrac{v_1 (t_0 - t_p)}{2}\right)^2 + \left(x_0 - x_p\right)^2 = \left(\dfrac{v_1 t_1}{2}\right)^2. \end{cases} \tag{5.21}$$

Pomocnicza zmienna t_p została zdefiniowana na podstawie twierdzenia Talesa jako:

$$t_p = \frac{\left(x_i - x_p\right) t_0}{x_i - x_0}, \tag{5.22}$$

gdzie:

x_p – położenie granicy między ośrodkami.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Przekształcając równania (5.21) uzyskujemy funkcję zależną od położenia anteny:

$$t = \sqrt{4\frac{\left(x_i - x_0\right)^2}{v_1^2} + t_0^2} \qquad \text{dla } x > x_p, \tag{5.23}$$

$$\begin{aligned} t = &\sqrt{4\frac{\left(x_p - x_0\right)^2}{v_1^2} + \left(t_0 - t_p\right)^2} \\ &+ \frac{1}{v_2}\left(\sqrt{v_1^2 t_0^2 + 4\left(x_i - x_0\right)^2} - \sqrt{v_1^2\left(t_0 - t_p\right)^2 + 4\left(x_p - x_0\right)^2}\right) \quad \text{dla } x < x_p. \end{aligned} \tag{5.24}$$

5.4. Weryfikacja algorytmów identyfikacji prędkości propagacji fali elektromagnetycznej

Modelowanie numeryczne jest często wykorzystywane jako narzędzie do weryfikacji założeń i działania autorskich algorytmów. W związku z tym przeprowadzono analizy numeryczne dla opisywanych anomalii georadarowych, w celu potwierdzenia możliwości ich wykorzystania do identyfikacji prędkości fali elektromagnetycznej.

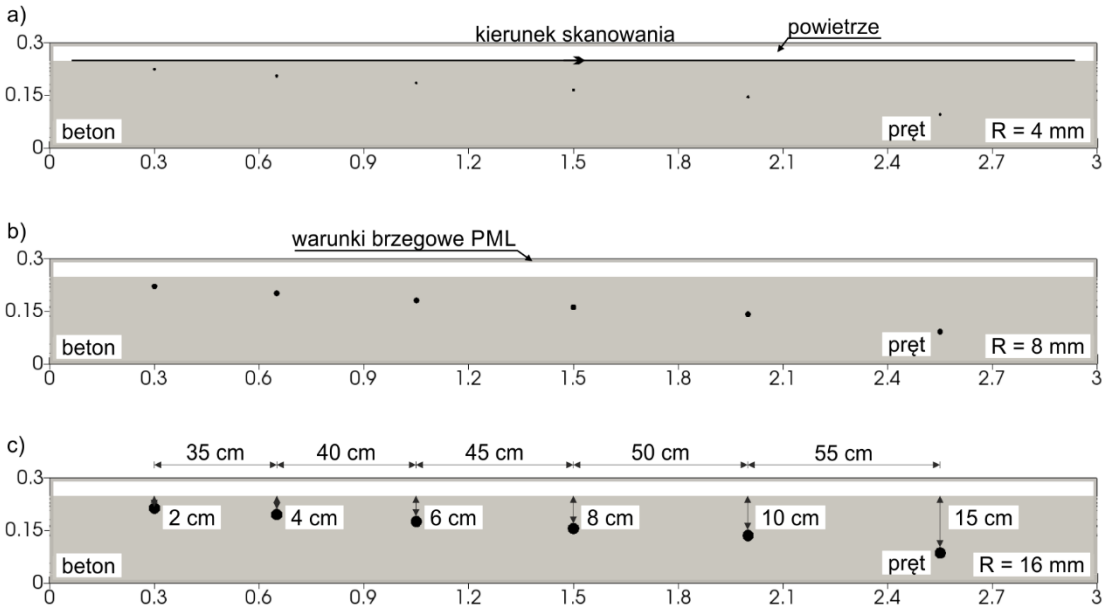
5.4.1. Modele numeryczne

Analizy numeryczne wykonano za pomocą programu gprMax [146], korzystającego z metody różnic skończonych w dziedzinie czasu. Ze względu na fakt, iż modele, które wykorzystują hiperbole do oceny prędkości fali w konstrukcjach żelbetowych zostały zweryfikowane w wielu badaniach (np. [43, 102]), w analizie hiperbol dyfrakcyjnych skupiono uwagę na wpływie różnych czynników na wynik uzyskiwanych wartości prędkości fali elektromagnetycznej.

Do analizy hiperbol dyfrakcyjnych wykonano trzy modele numeryczne płyty żelbetowej z sześcioma prętami położonych na różnych głębokościach (rys. 5.11). Każdy z modeli miał wymiar 300 cm × 30 cm i został zdyskretyzowany przy użyciu siatki Yee o wymiarze 1 mm × 1 mm. Założono, że beton jest materiałem jednorodnym i homogenicznym o przenikalności elektrycznej równej $\varepsilon_r = 9.0$. Modele różniły się między sobą jedynie rozmiarem prętów. W pierwszym modelu wykorzystano pręty o średnicy 8 mm (R = 4mm), w drugim występowały jedynie pręty o średnicy 16 mm (R = 8mm), natomiast w ostatnim modelu użyto prętów o średnicy 32 mm (R = 16 mm). Rozstaw między prętami został dobrany tak, by nie dopuścić do nałożenia się ramion hiperbol na siebie. Dla każdego modelu, prowadzono obliczenia dla czterech różnych odstępów, w zapisie pojedynczych tras georadarowych. Zapis odbywał się z krokiem

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

2 mm, 6 mm, 10 mm oraz 14 mm. Łącznie przeprowadzono 12 obliczeń (dla każdego modelu cztery obliczenia). Przeprowadzone badania miały na celu określenie wpływu średnicy, głębokości położenia prętów oraz kroku zapisu na dokładność w określeniu prędkości rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w betonie.



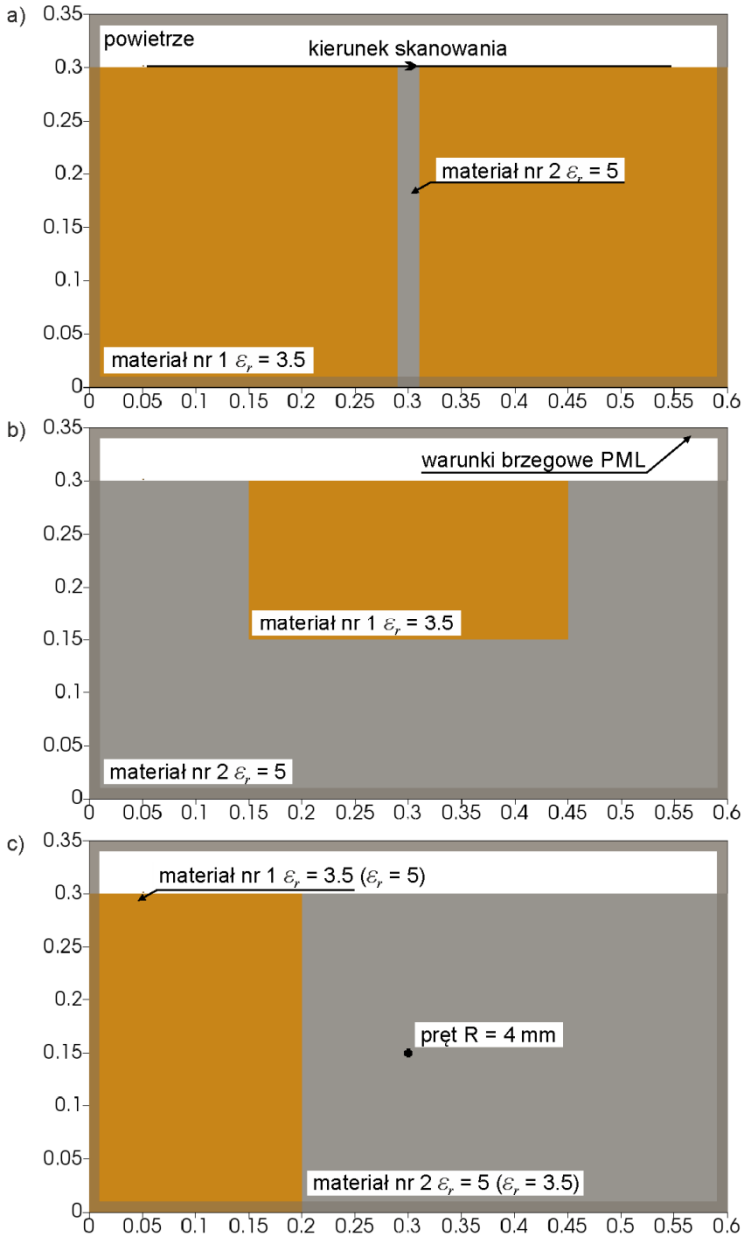
Rys. 5.11. Modele numeryczne żelbetowej płyty z prętami zbrojeniowymi o średnicy: a) 8 mm (R = 4 mm), b) 16 mm (R = 8 mm), c) 32 mm (R = 16 mm)

Weryfikacja modeli matematycznych, wykorzystujących dyfrakcję na granicy ośrodków została przeprowadzona na trzech modelach numerycznych, które zostały przedstawione na rys. 5.12. Wartości względnej przenikalności materiału nr 1 $\varepsilon_r = 3.5$ i materiału nr 2 $\varepsilon_r = 5.0$ zostały przyjęte dla każdego modelu identycznie, tak by były zbliżone do wartości przenikalności cegły i betonu. Pierwszy model przedstawia pionową inkluzję (rys. 5.12a). Jest to sytuacja analogiczna jak w przypadku konstrukcji ceglanych, gdzie pionową inkluzją jest spoina między cegłami. W drugim modelu (rys. 5.12b) przeanalizowano prostokątny obiekt zanurzony w innym ośrodku (materiale). Model ten można porównać w konstrukcjach ceglanych do jednej z cegieł umieszczonych w zaprawie. Sytuacja ta ma pokazać, iż opisywana dyfrakcja na narożach prostokątnego obiektu występuje dla jednej cegły. Ostatni model przedstawia dwa ośrodki sąsiadujące ze sobą, z których jeden zawiera kołową inkluzję (rys. 5.12c). Obliczono go dla dwóch przypadków, w celu zobrazowania uzyskanego kształtu ugiętej hiperboli, gdy kołowa inkluzja znajduje się w ośrodku o wyższej lub niższej wartości przenikalności. W pierwszym przypadku przyjęto, że inkluzja kołowa znajduje się

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

w ośrodku o wyższej przenikalności ($\varepsilon_r^{lewa} < \varepsilon_r^{prawa}$). W drugim przypadku założono, iż kołowa inkluzja umiejscowiona jest w materiale o niższej wartości przenikalności ($\varepsilon_r^{lewa} > \varepsilon_r^{prawa}$). Obszar obliczeniowy każdego z modeli wynosił 60 cm × 35 cm i był zdyskretyzowany przy użyciu siatki 1 mm × 1 mm.

Dla każdego analizowanego modelu numerycznego, jako impulsu użyto funkcji Rickera o częstotliwości środkowej równej 2 GHz. Odstęp między anteną nadawczą i odbiorczą ustawiono jako 6 cm, zgodnie z używaną anteną IDS.

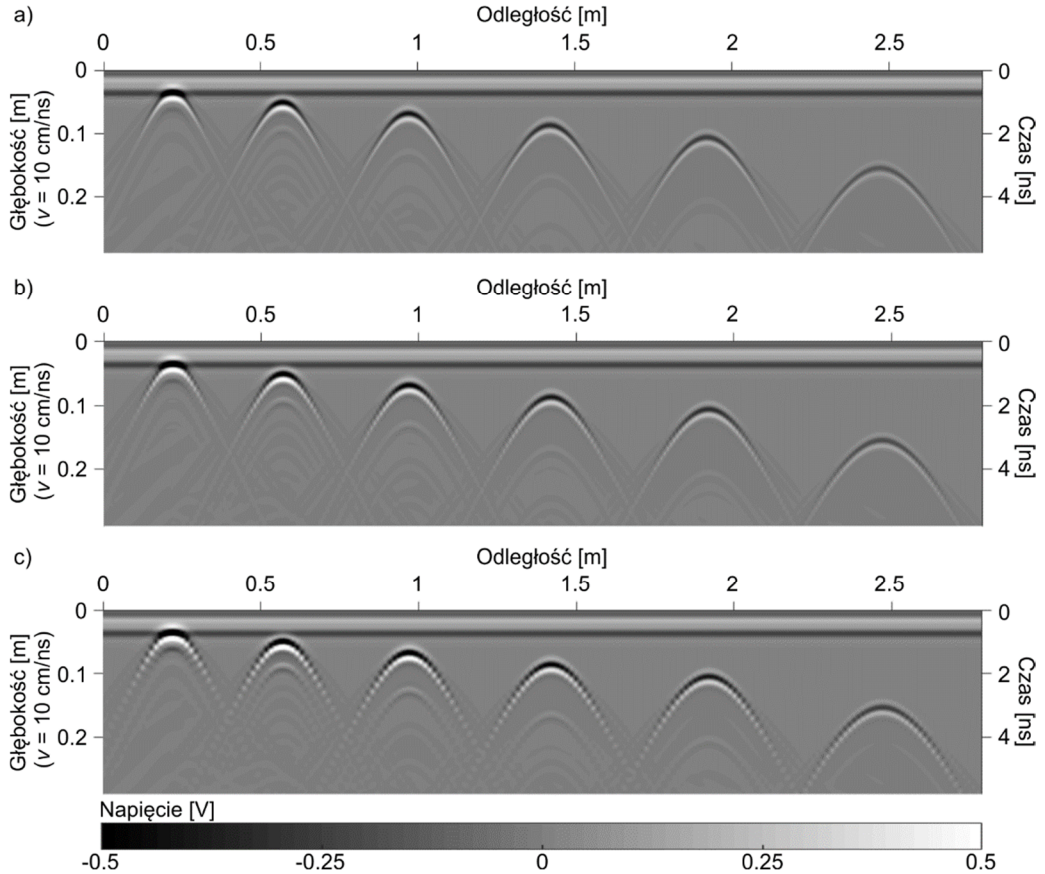


Rys. 5.12. Modele numeryczne do analizy: a) dyfrakcji na pionowej inkluzji, b) dyfrakcji na narożach prostokątnego obiektu, c) ugiętej hiperboli dyfrakcyjnej

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

5.4.2. Identyfikacja prędkości za pomocą hiperbol dyfrakcyjnych

W wyniku przeprowadzonych obliczeń modeli żelbetowej płyty (por. rys. 5.11) uzyskano 12 map georadarowych. Dla obliczonych radargramów ustawiono czas zerowy, używając drugiej pochodnej pojedynczego skanu typu A, otrzymując dla wszystkich map wartość 0.6608 ns. Na rys. 5.13 przedstawiono mapy georadarowe uzyskane z obliczeń modelu żelbetowej płyty, z prętami zbrojeniowymi o średnicy 8 mm ($R = 4$ mm) dla kroku zapisu 2 mm (rys. 5.13a), średnicy 16 mm ($R = 8$ mm) dla kroku zapisu 10 mm (rys. 5.13b) oraz średnicy 32 mm ($R = 16$ mm) dla kroku zapisu 14 mm (rys. 5.13c).



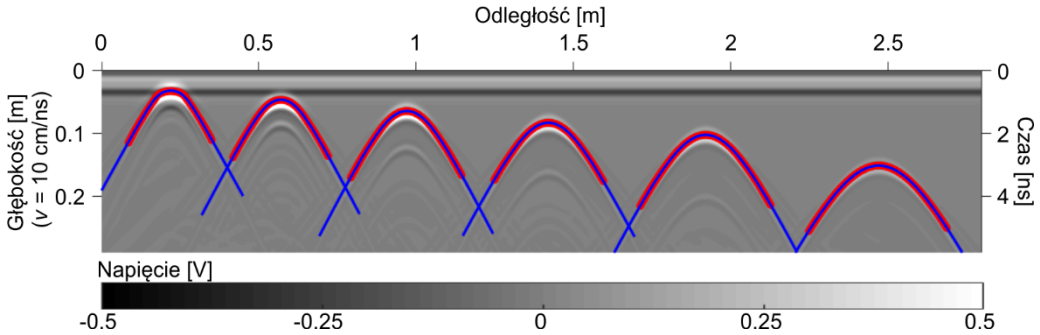
Rys. 5.13. Numeryczne mapy georadarowe dla modelu żelbetowej płyty z prętami zbrojeniowymi o średnicy: a) 8 mm ($R = 4$ mm) z krokiem zapisu 2 mm, b) 16 mm ($R = 8$ mm) z krokiem zapisu 10 mm, c) 32 mm ($R = 16$ mm) z krokiem zapisu 14 mm

Na mapach można zaobserwować sześć hiperbol dyfrakcyjnych ujawniających obecność każdego z prętów. Jednakże, oceniając wizualnie radargamy, nie można zidentyfikować wpływu średnicy pręta na kształt hiperboli. Jedyną zauważalną różnicą są zmiany na mapach georadarowych wynikające z przyjętego kroku zapisu pojedynczej trasy georadarowej. Widać, iż dla kroku zapisu co 14 mm na radargamie ujawnia się znaczący wpływ rozdzielczości. (por. rys. 5.13c).

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Każda z obliczonych map georadarowych została poddana analizie identyfikacji prędkości propagacji fali elektromagnetycznej. W pierwszym etapie algorytm wybierał najmniejsze (pierwsze ekstremum) wartości napięcia z mapy georadarowej dla każdej hiperboli, tworząc zestaw sześciu oddzielnych zbiorów punktów. W drugim etapie następowała aproksymacja uzyskanych punktów hiperboli za pomocą opisanych wcześniej modeli matematycznych hiperboli. W przypadku modelu opisanego zależnością (5.5) – model #1, do aproksymacji używano liniowej metody najmniejszych kwadratów. Natomiast dla pozostałych modeli (wzór (5.7) – model #2, wzór (5.9) – model #3, wzór (5.11) – model #4 oraz wzór (5.16) – model #5) stosowano nieliniową metodę aproksymacji Levenberga-Marquardta [84]. Wyniki uzyskane tą metodą są wrażliwe na wybrane parametry początkowe i brzegowe, dlatego przeprowadzono szereg analiz, które pozwoliły ustalić algorytm dobierania parametrów. Warunkami brzegowymi dla prędkości v były wartości od 0.01 cm/ns do 30 cm/ns, dla położenia pręta x_0 były to granice mapy od 0.01m do 2.81 m oraz dla głębokości położenia pręta (czyli opóźnienia czasowego t_0) były to wartości ograniczone czasem trwania analiz numerycznych od 0.01 ns do 6.5 ns. Warunki brzegowe dla promienia pręta R były ustalane zgodnie z jego rozmiarem w modelu numerycznym, tj. 4 mm, 8 mm oraz 16 mm, jako stała wartość. Parametry początkowe były dobierane dla każdej hiperboli oddzielnie jako wartości wynikowe z metody najmniejszych kwadratów dla modelu #1.

Na rys. 5.14 przedstawiono mapę georadarową, obliczoną dla modelu żelbetowej płyty z prętami zbrojeniowymi o średnicy prętów 16 mm dla kroku zapisu 2 mm wraz z zaznaczonymi punktami hiperboli oraz dopasowanymi hiperbolami zgodnie z autorskim modelem hiperboli dyfrakcyjnej (model #5). Otrzymane wyniki aproksymacji pozwalają zaobserwować wpływ poszczególnych czynników (głębokość



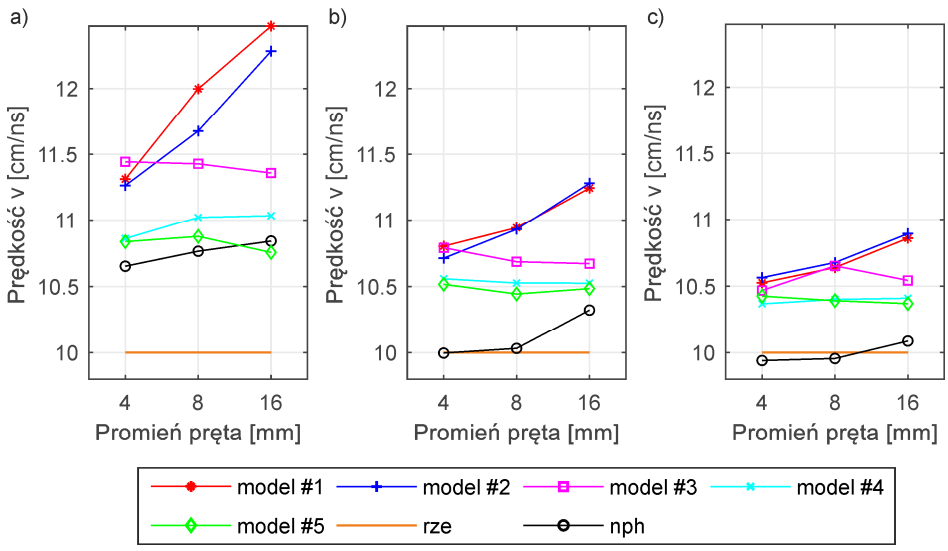
Rys. 5.14. Numeryczna mapa georadarowe dla modelu żelbetowej płyty z prętami zbrojeniowymi o średnicy 32 mm (R = 16 mm) z krokiem zapisu 2 mm z zaznaczonymi punktami hiperboli

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

położenia pręta, średnica pręta oraz krok zapisu pomiaru) na oszacowane wartości prędkości propagacji fali elektromagnetycznej.

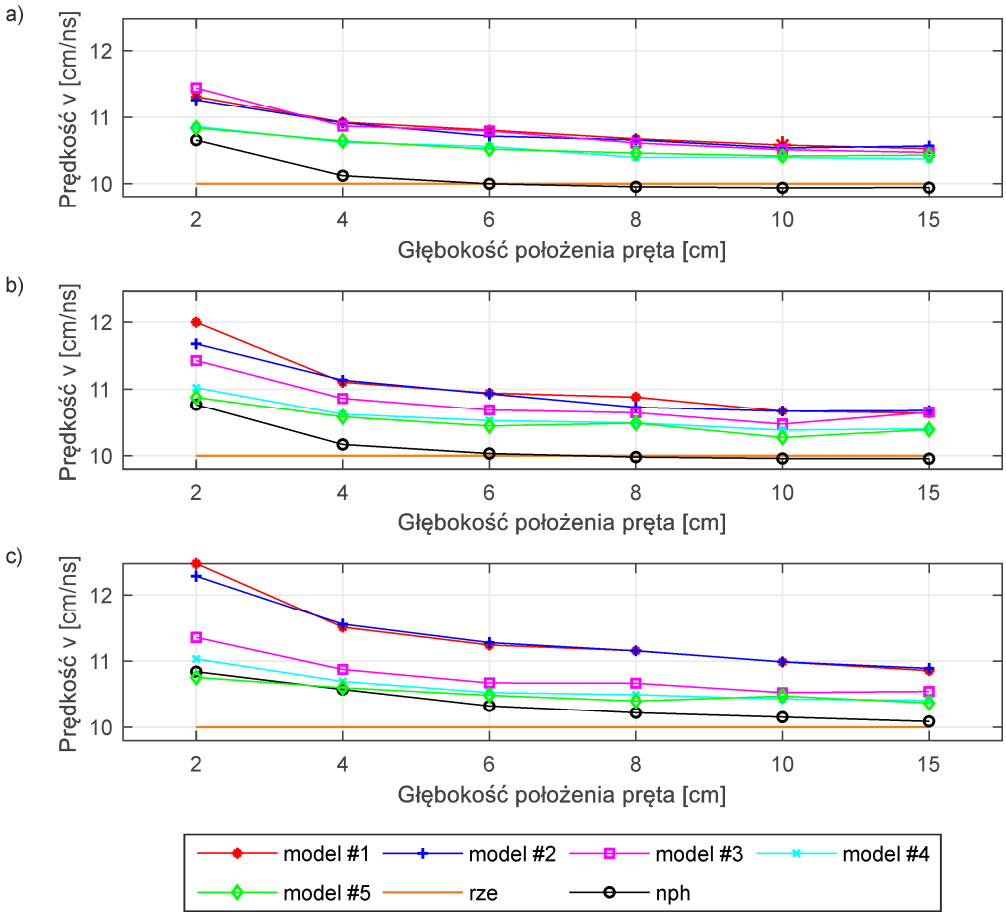
Analizę wpływu głębokości położenia oraz rozmiaru prętów na wyniki aproksymacji, przeprowadzono dla trzech modeli numerycznych żelbetowej płyty dla kroku zapisu 10 mm. Na rys. 5.15 przedstawiono wykres zależności oszacowanej prędkości od promienia pręta dla trzech różnych głębokości położenia pręta (2 cm, 6 cm oraz 15 cm). Prostą pomarańczową linią zaznaczono rzeczywistą wartość prędkości „rze" (10 cm/ns), natomiast czarną linią z kółkami zaznaczono wartości prędkości uzyskane na podstawie najwyższego punktu hiperboli „nph", zgodnie z zależnością (5.2). Można zauważyć, iż modele pomijające promień pręta (model #1 oraz model #2) znacznie zawyżają wartość prędkości wraz ze wzrostem średnicy pręta. Natomiast modele hiperbol uwzględniające średnice prętów (modele #3 do #5) utrzymują prawie stałą wartość dla każdej średnicy. Zastosowanie autorskiego modelu hiperboli (model #5), skutkuje uzyskaniem bardziej zbliżonych wyników do rzeczywistej wartości w porównaniu z pozostałymi czterema modelami.

Na rys. 5.16 przedstawiono wykres zależności oszacowanej prędkości od głębokości położenia pręta dla trzech modeli żelbetowej płyty. Zauważalny jest trend, który ukazuje, że wraz z wzrostem głębokości oszacowane wartości prędkości zbliżają się do rzeczywistej wartości.



Rys. 5.15. Zależność oszacowanej prędkości od promienia pręta dla modeli żelbetowej płyty dla pręta na głębokości: a) 2 cm, b) 6 cm, c) 15 cm

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

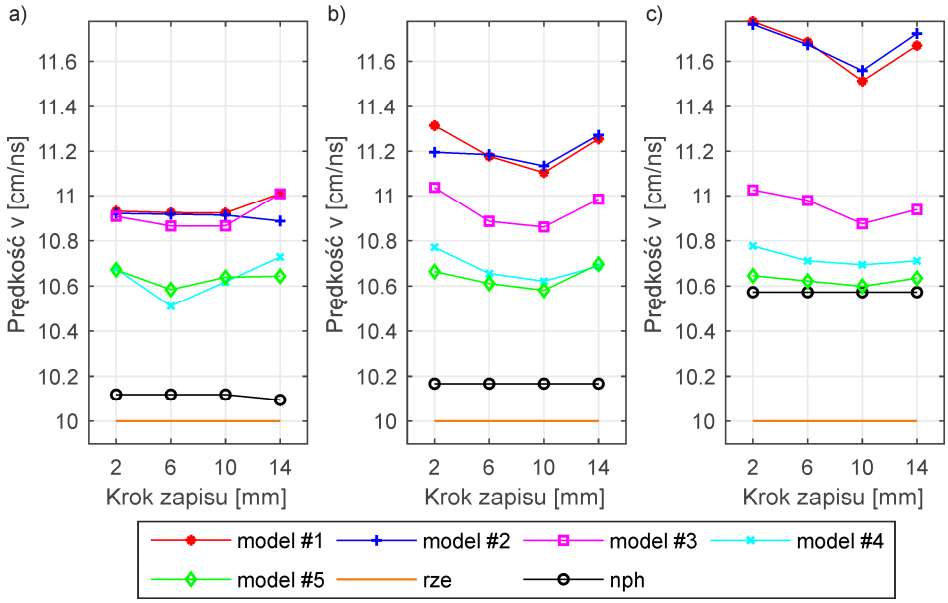


Rys. 5.16. Zależność głębokości oszacowanej prędkości od położenia pręta dla modeli żelbetowej płyty z prętami o średnicy: a) 8 mm (R = 4mm), b) 16 mm (R = 8 mm), c) 32 mm (R = 16 mm)

Zależność oszacowanej prędkości od kroku zapisu sygnału, dla trzech obliczonych modeli płyty żelbetowej, przedstawiono na rys. 5.17, porównując pręty umieszczone na głębokości 2 cm. Można zauważyć, że wpływ kroku zapisu na wyniki procesu aproksymacji nie jest istotny, biorąc pod uwagę fakt, iż różnice wynikające z zastosowania innego kroku anteny są w granicy 2% błędu względnego. Aczkolwiek zauważalne są zawyżone wartości dla najmniejszego i największego kroku anteny. Najbliższe wartości uzyskano dla kroku anteny równego 10 mm.

Podsumowując, opisane wcześniej modele hiperboli pozwalają oszacować prędkość fali elektromagnetycznej w betonie. Autorski model hiperboli (model #5) pozwala dokładniej oszacować prędkość w porównaniu do pozostałych czterech metod. W stosunku do metody #4 są to wyniki bliższe nawet do 2 pp., natomiast w stosunku do najprostszego modelu (model #1) wyniki różnią się nawet o 25 pp. Ponadto należy podkreślić, iż dopasowanie hiperboli najlepiej wykonywać na głębiej położonych prętach (od 4 cm) i w przypadku prętów o większych średnicach (od 16 mm) prętów stosować modele, które uwzględniają wielkość inkluzji.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 5.17. Zależność oszacowanej prędkości od kroku zapisu dla modeli żelbetowej płyty z prętami o średnicy: a) 8 mm (R = 4mm), b) 16 mm (R = 8 mm), c) 32 mm (R = 16 mm)

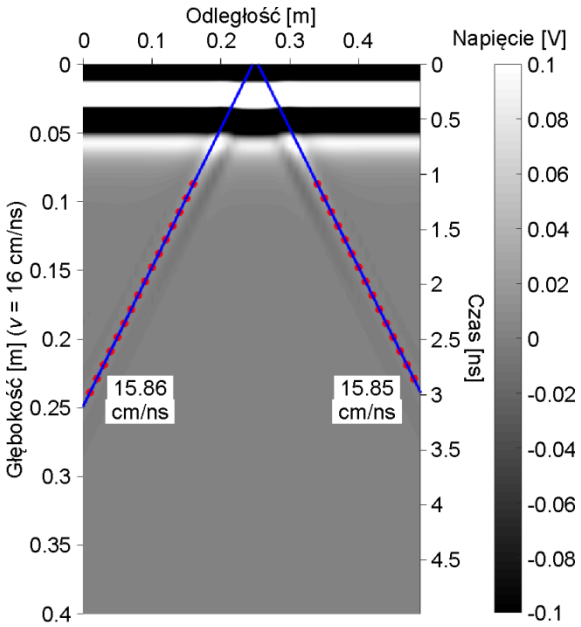
5.4.3. Identyfikacja prędkości za pomocą granicy dwóch ośrodków

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano cztery mapy georadarowe. Na rys. 5.18 przedstawiono mapę georadarową obliczoną dla modelu z pionową inkluzją (rys. 5.12a), który odpowiada sytuacji występowania pionowej spoiny między cegłami w murze. Widoczne są dwa liniowe odbicia, z których pobrane zostały punkty o maksymalnej wartości napięcia. Następnie dokonano aproksymacji metodą najmniejszych kwadratów, zgodnie z zależnością (5.19), uzyskując wartości v = 15.86 cm/ns oraz v = 15.85 cm/ns. Wartością rzeczywistą dla badanego ośrodka jest v = 16 cm/ns. Błąd oszacowania jest poniżej 1%, co pozwala stwierdzić, iż jest to wystarczająco dobre przybliżenie.

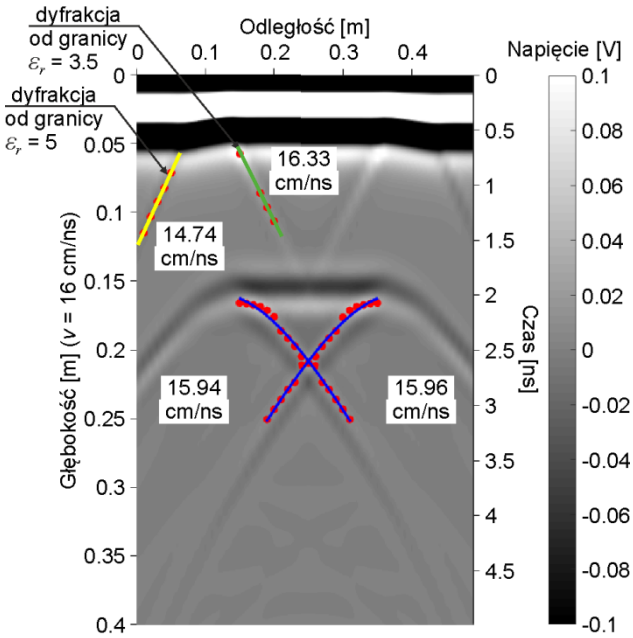
Rysunek 5.19 ukazuje mapę georadarową obliczoną dla modelu z prostokątnym obiektem (rys. 5.12b), który odpowiada sytuacji pojedynczej cegły w murze. Można zauważyć, iż u góry radargramu, widać liniowe dyfrakcje, jak w poprzednim modelu. Należy podkreślić, iż obie linie niosą informację o prędkościach dwóch różnych ośrodków. Żółta (lewa) zaznaczona linia opisuje prędkość materiału nr 2 (v = 14.74 cm/ns), podczas gdy zielona (prawa) linia pozwala określić prędkość materiału nr 1 (v = 16.33 cm/ns). Warto również zauważyć, iż obie linie mają zmienioną fazę odbicia, ze względu na różnicę w wartościach przenikalności. Gdy fala odbija się od materiału o niższej wartości stałej dielektrycznej, wtedy następuje zmiana fazy w stosunku do sygnału wejściowego. Dyfrakcja na narożach prostokątnego obiektu

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

tworzy charakterystyczny kształt „X”, z którego zostały pobrane punkty hiperboli do procesu aproksymacji. Dla dwóch zestawu punktów przeprowadzono proces aproksymacji metodą najmniejszych kwadratów zgodnie z zależnością (5.20). Uzyskano wartości v = 15.94 cm/ns oraz v = 15.96 cm/ns, co w przypadku badanego materiału (v = 16 cm/ns) daje błąd względny poniżej 0.5%. Trzeba podkreślić, iż jest to wartość prędkości dla prostokątnego obiektu, a nie dla materiału go otaczającego.



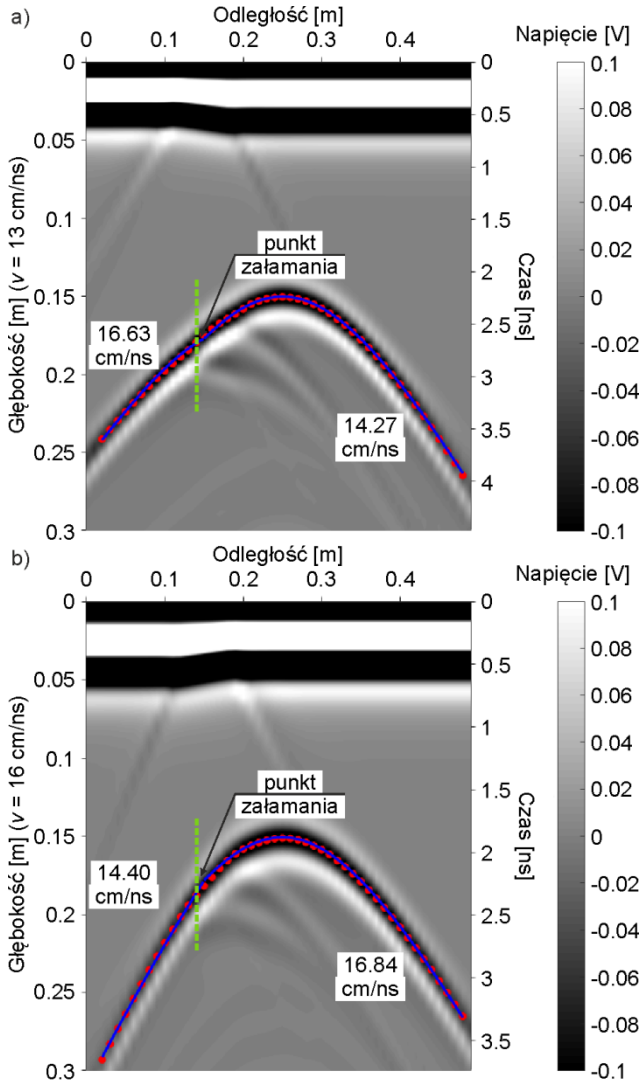
Rys. 5.18. Numeryczna mapa georadarowa dla modelu z pionową inkluzją



Rys. 5.19. Numeryczna mapa georadarowa dla modelu z prostokątnym obiektem

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Dla modelu, gdzie w jednym z ośrodków znajduje się kołowa inkluzja (rys. 5.12c), uzyskano dwie mapy georadarowe (rys. 5.20) dla dwóch analizowanych przypadków. Ponownie widoczne są liniowe odbicia od granicy ośrodków, które niosą informację o prędkościach danych materiałów. Jednakże, głównym obiektem analizy jest ugięta hiperbola, która ukazuje się na obu radargramach. Kierunek ugięcia się ramienia hiperboli zależy od relacji pomiędzy względną przenikalnością dwóch sąsiadujących ze sobą ośrodków. W przypadku, gdy materiał, w którym znajduje się inkluzja ma wyższą wartość przenikalności od sąsiadującego ośrodka, ramię hiperboli unosi się (rys. 5.20a). Natomiast w przypadku gdy materiał z kołową inkluzją ma mniejszą wartość przenikalności wtedy ramię hiperboli opada (rys. 5.20b). Schemat działania tego zjawiska został przedstawiony na rys. 5.10.



Rys. 5.20. Numeryczna mapa georadarowa dla modelu z kołową inkluzją w jednym z ośrodków: a) $\varepsilon_r^{lewa} < \varepsilon_r^{prawa}$, b) $\varepsilon_r^{lewa} > \varepsilon_r^{prawa}$

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Dla obu modeli dokonano oszacowania prędkości za pomocą wyprowadzonych zależności (5.23) i (5.24). W pierwszym etapie przeprowadzono aproksymację punktów w ośrodku, gdzie znajduje się kołowa inkluzja, zgodnie z zależnością (5.23), za pomocą metody najmniejszych kwadratów. Dzięki temu uzyskano prędkości dla tego ośrodka oraz dane potrzebne do równania (5.24). Następnie dla punktów leżących w drugim ośrodku przeprowadzono aproksymację zgodnie z zależnością (5.24) za pomocą metody Levenberga-Marquardta [84], uzyskując wyniki prędkości dla drugiego materiału. W wyniku oszacowania prędkości dla pierwszego przypadku (rys. 5.20a), uzyskano v = 16.63 cm/ns oraz v = 14.27 cm/ns, co daje odpowiednio błąd względny 4% oraz 6%. W drugim przypadku (rys. 5.20b) otrzymano wartości v = 14.40 cm/ns (7% błędu względnego) oraz v = 16.84 cm/ns (5% błędu względnego). Błędy oszacowania prędkości wynikają przede wszystkim z uproszczeń, które zostały założone w opisie matematycznym, czyli brak uwzględnienia promienia pręta oraz rozstawu anten.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

6. Analiza możliwości diagnostycznych metody georadarowej: przykłady testowe

Znajomość ograniczeń oraz możliwości dowolnej metody diagnostycznej jest niezbędna przy jej doborze do oceny stanu technicznego danej konstrukcji. W związku z tym, zostały przeprowadzone pomiary doświadczalne metodą georadarową na dwóch obiektach testowych, które pomogły ocenić możliwości stosowanej metody oraz ocenić efektywność zaproponowanych autorskich algorytmów przetwarzania danych.

Pierwsza część rozdziału poświęcona jest żelbetowej próbce, w której identyfikowano prędkość fali elektromagnetycznej za pomocą modeli hiperbol opisanych w rozdziale 5.2. Na tej samej próbce, przeprowadzono pomiary w celu ustalenia jej parametrów elektrycznych. Umożliwiło to stworzenie heterogenicznego modelu numerycznego betonu, dla którego przeprowadzono walidację z badaniami doświadczalnymi. Kolejną część rozdziału poświęcono diagnostyce konstrukcji murowej, specjalnie zbudowanej jako obiekt testowy do pomiarów georadarowych. Fragment muru z różnymi typami uszkodzeń pozwolił ocenić przydatność metody georadarowej do diagnostyki konstrukcji ceglanych, a także zweryfikować autorskie modele dyfrakcji służące identyfikacji prędkości fali elektromagnetycznej. Sprawdzono również możliwości zastosowania przekształceń Fouriera oraz średniej kwadratowej do przetwarzania zestawu radargamów uzyskanych w wyniku gęstego profilowania. Pomiary doświadczalne prowadzono za pomocą zestawu georadarowego Aladdin, z anteną o częstotliwości środkowej 2 GHz (por. rozdział 4.2).

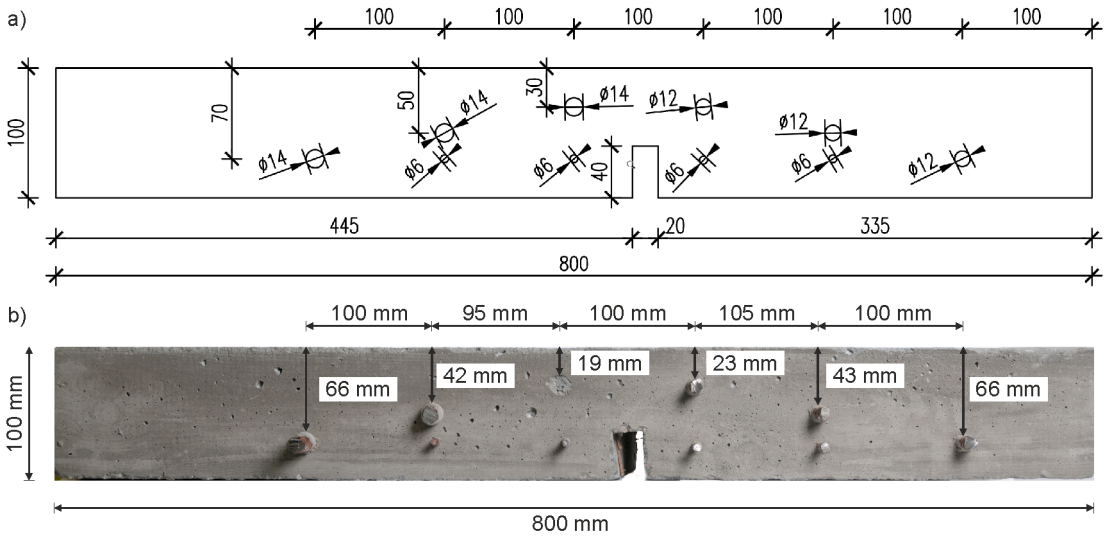
6.1. Próbka żelbetowa

6.1.1. Obiekt badawczy

Badania doświadczalne zostały przeprowadzone na próbce żelbetowej o zewnętrznych wymiarach próbki wynosiły 80 cm × 10 cm × 15 cm. W próbce umieszczono trzy pręty o średnicy 14 mm (R = 7 mm), trzy pręty o średnicy 12 mm (R = 6 mm) oraz cztery pręty o średnicy 6 mm (R = 3 mm). Zaprojektowano także jedno poprzeczne uszkodzenie w postaci nacięcia o szerokości 20 mm i wysokości 40 mm. Próbkę wykonano z betonu klasy C20/25 z cementem BV 42.5 o stosunku w/c równym 0.55. Maksymalny wymiar kruszywa wynosił 16 mm. Projekt próbki wraz ze zdjęciem, z wymiarami pomierzonymi

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

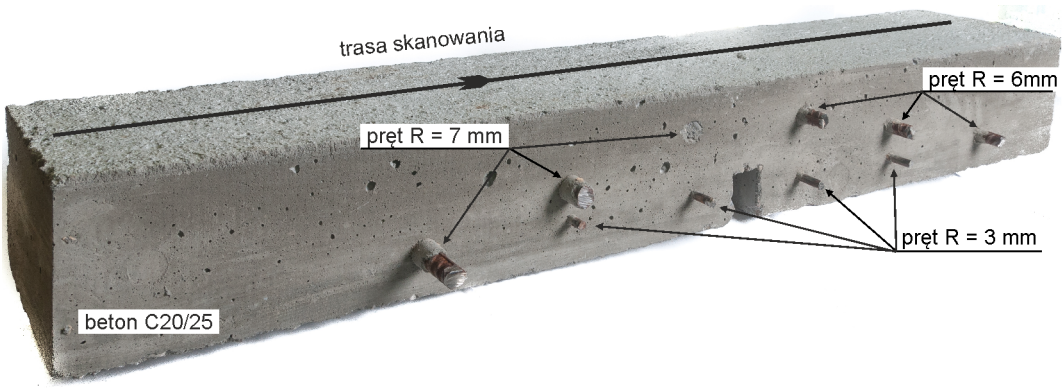
po jej wykonaniu, został przedstawiony na rys. 6.1. Próbka dojrzewała rok w warunkach laboratoryjnych przed wykonaniem pomiarów GPR.



Rys. 6.1. Próbka żelbetowa: a) projekt, b) próbka po wykonaniu wraz z wymiarami

6.1.2. Badania doświadczalne

Badania prowadzono z różnymi parametrami pomiarowymi, aby określić ich wpływ na wyniki oszacowania prędkości fali elektromagnetycznej w betonie. Dla każdego pomiaru rejestrowano odcinek czasowy długości 6 ns. Badania prowadzono dla 512 próbek/skan ($\Delta t = 1.1719 \cdot 10^{-11}$ s), 384 próbek/skan ($\Delta t = 1.5625 \cdot 10^{-11}$ s), 256 próbek/skan ($\Delta t = 2.3438 \cdot 10^{-11}$ s) oraz 128 próbek/skan ($\Delta t = 4.6875 \cdot 10^{-11}$ s). Pomiary rejestrowano z różnym krokiem zapisu sygnału wynoszącym odpowiednio 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm oraz 12 mm. Łącznie przeprowadzono 24 pomiary. Trasa skanowania została zaznaczona na rys. 6.2.

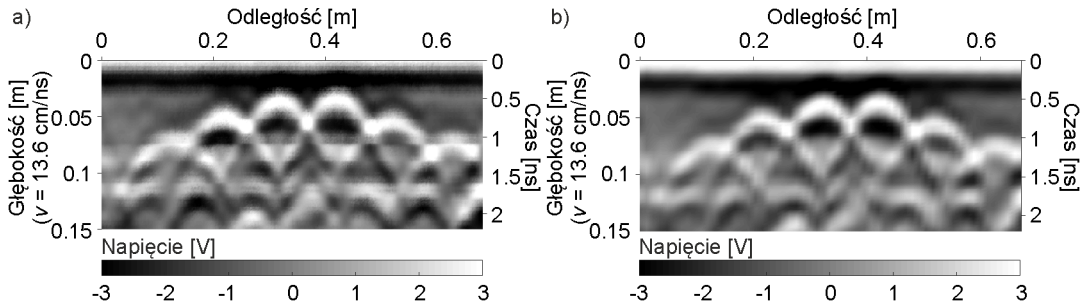


Rys. 6.2. Próbka żelbetowa z zaznaczoną trasą skanowania

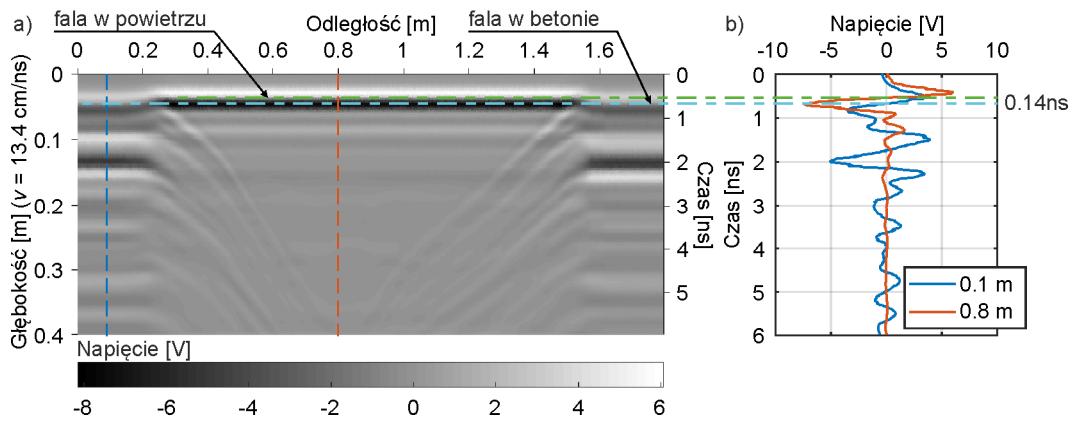
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

6.1.3. Identyfikacja prędkości dla próbki żelbetowej

W pierwszej kolejności pomiary doświadczalne zostały przeprowadzone w celu identyfikacji prędkości fali elektromagnetycznej za pomocą matematycznych modeli hiperbol opisanych w rozdziale 5.2. Na rys. 6.3 przedstawiono dwie mapy georadarowe dla dwóch skrajnie różnych rozdzielczości. Pierwsza mapa odpowiada najdokładniejszemu odwzorowaniu (krok zapisu 2 mm, 512 próbek/skan, rys. 6.3a), druga natomiast przedstawia najgorszą rozdzielczość (krok zapisu 12 mm, 128 próbek/skan, rys. 6.3b). Porównując obie mapy, nie jest możliwe wizualnie ustalenie większych różnic między nimi.



Rys. 6.3. Mapa georadarowa dla pomiaru: a) krok zapisu 2 mm, 512 próbek/skan, b) krok zapisu 12 mm, 128 próbek/skan



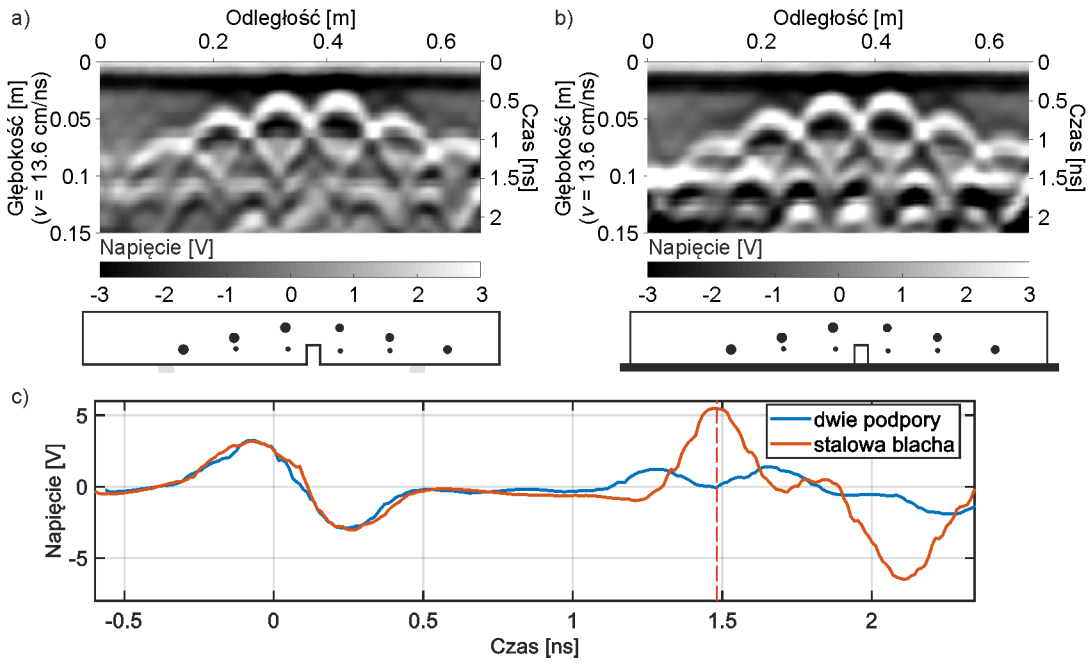
Rys. 6.4. Test podnoszenia anteny: a) mapa georadarowa, b) pojedyncze trasy georadarowe ukazujące efekt przesunięcia

Jednym z najważniejszych parametrów mających wpływ na proces aproksymacji hiperbol, dzięki któremu uzyskuje się szacowaną prędkość propagacji fali elektromagnetycznej, jest parametr t_0, czyli czas odbicia od pręta (por. rys. 5.3). Ze względu na bardzo płytkie położenie prętów przeprowadzono dokładne ustalenie czasu zerowego. Na rys. 6.4 przedstawiono mapę georadarową uzyskaną z testu unoszenia anteny nad skanowaną powierzchnią. Opisana wcześniej metodologia wyznaczania czasu

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

zerowego na podstawie testu unoszenia (por. rozdział 4.4.1), pozwoliła uzyskać czas przesunięcia między falą propagującą w powietrzu a falą propagującą w betonie (0.14 ns).

Wyznaczenie prędkości referencyjnej wykonano na podstawie metody „*depth to known reflector method*" [130]. W celu potwierdzenia odbicia od spodu próbki wykonano dwa pomiary kontrolne. Przy pierwszym pomiarze próbka opierała się na dwóch podporach, tak, by większa część spodu belki miała styczność z powietrzem (rys. 6.5a). W drugim pomiarze pod próbką umieszczono stalową blachę o grubości 5 mm (rys. 6.5b). Pojedyncze skany typu A, zestawione na rys. 6.5c, wyraźnie ukazują zmianę fazy odbitego sygnału, potwierdzając miejsce odbicia od spodu belki. Na podstawie kilku pomiarów ustalono wartość prędkości referencyjnej jako v = 13.6 cm/ns zgodnie ze wzorem (5.2).

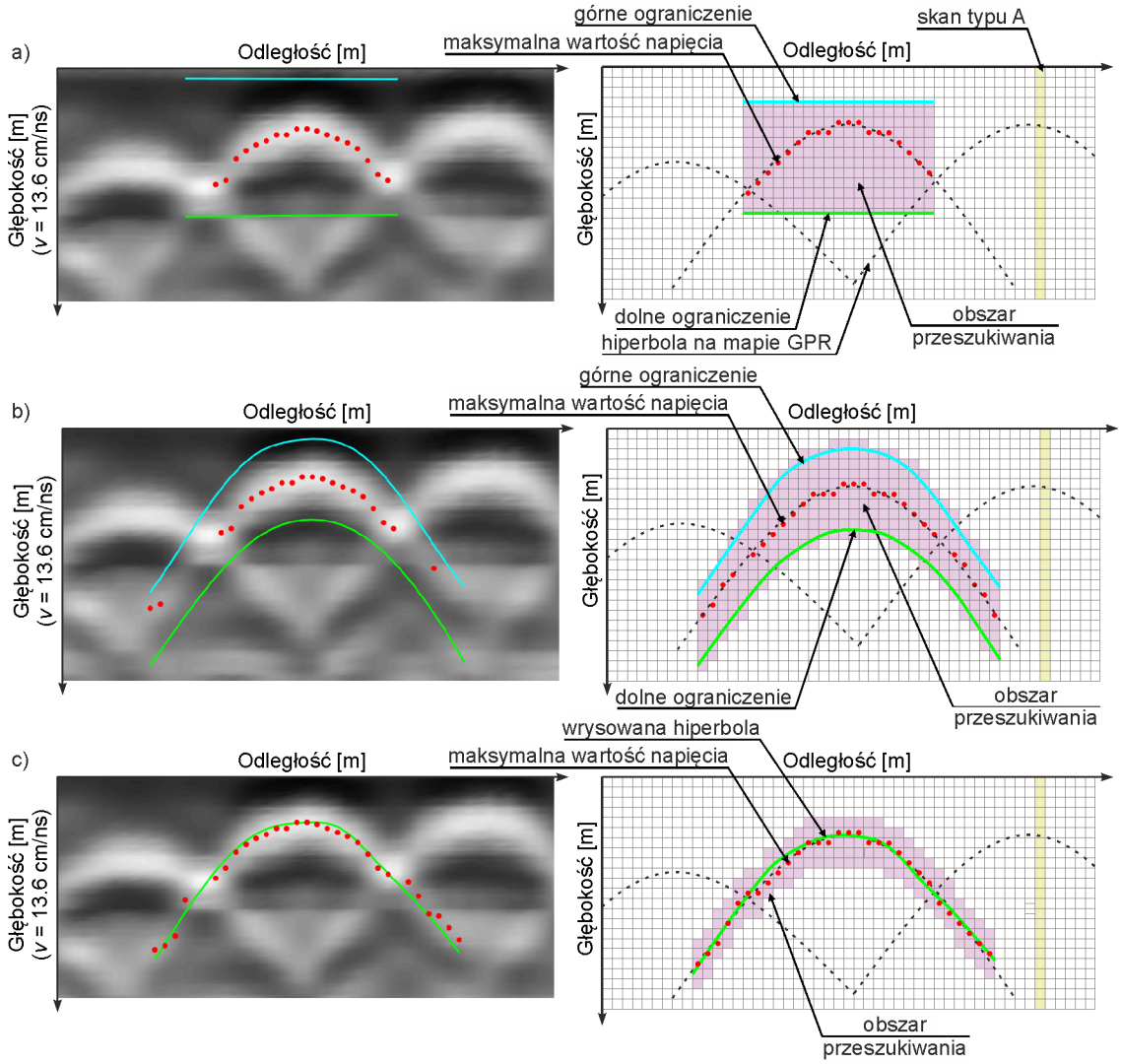


Rys. 6.5. Mapa georadarowa dla pomiaru z krokiem zapisu 10 mm i 512 próbek/skan: a) próbka umieszona na dwóch podporach, b) próbka oparta na stalowej blasze, c) skany typu A ukazujące zmianę fazy sygnału odbitego

Aproksymacja hiperbol odbywała się na podstawie punktów, które zostały pobrane z mapy georadarowej. W tym celu opracowano trzy metody, umożliwiające ekstrakcję punktów hiperbol z mapy georadarowej używając algorytmów napisanych w środkowisku MATLAB®. Schemat i zasada działania poszczególnych metod zostały przedstawione na rys. 6.6. Metoda prostokątna (rys. 6.6a) jest uproszczeniem metody użytej w analizie numerycznej. Na wyświetlonym radargramie zaznacza się linię górną i dolną ograniczającą obszar analizowanej mapy. W ten sposób powstaje prostokątny

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

obszar przeszukiwania maksymalnych wartości napięcia. Metoda dwóch krzywych (rys. 6.6b) jest rozszerzeniem poprzedniej. Polega ona na zaznaczeniu dwóch krzywych w wyniku czego powstaje nieliniowy obszar przeszukiwania, umożliwiający znalezienie punktów hiperboli poniżej sąsiadujących, krzyżujących się hiperbol na mapie GPR. Dzięki temu w aproksymacji uwzględniana jest większa liczba punktów hiperboli, co pozwala dokładniej odwzorować jej kształt. Metoda jednej krzywej (rys. 6.6c), polega na zaznaczeniu na mapie georadarowej krzywej, tak by jak najdokładniej pokrywała istniejącą hiperbole. Po zaznaczeniu, obszar przeszukiwania powstaje jako pasmo kilku punktów wokół zaznaczonej krzywej. W każdej z metod, po wyświetleniu znalezionych punktów istnieje możliwość usunięcia wybranych, które znacznie odbiegają od hiperboli.



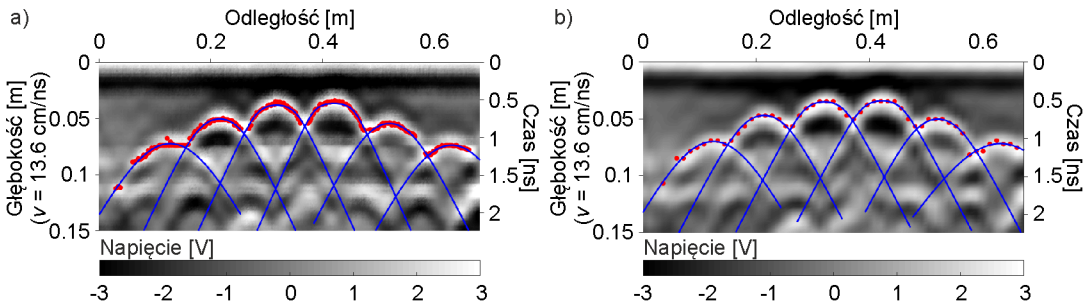
Rys. 6.6. Schemat i zasada działania opracowanych metod ekstrakcji hiperboli: a) metoda prostokątna, b) metoda dwóch krzywych, c) metoda jednej krzywej

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Jest to szczególnie przydatne w metodzie dwóch i jednej krzywej, ze względu na krzyżujące się ze sobą hiperbole.

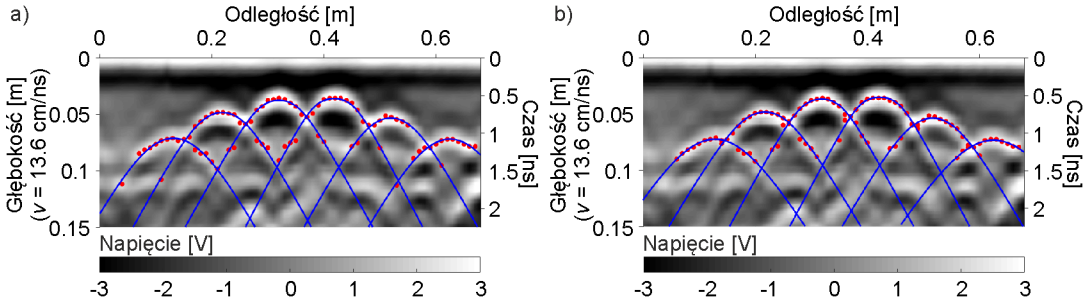
W celu przeanalizowania wpływu poszczególnych czynników na wyniki oszacowania prędkości fali elektromagnetycznej, przeprowadzono analizy 24 pomiarów jednej próbki, dla trzech metod ekstrakcji hiperboli, za pomocą pięciu modeli matematycznych hiperbol opisanych w rozdziale 5.2. Do aproksymacji używano liniowej metody najmniejszych kwadratów dla modelu opisanego zależnością (5.5) – model #1. Natomiast dla pozostałych modeli (wzór (5.7) – model #2, wzór (5.9) – model #3, wzór (5.11) – model #4 oraz wzór (5.16) – model #5) stosowano nieliniową metodę aproksymacji Levenberga-Marquardta [84]. W tym przypadku warunkami brzegowymi dla prędkości v były wartości od 0.01 cm/ns do 30 cm/ns, dla położenia pręta x_0 były to granice mapy od 0.01 m do 0.70 m oraz dla głębokości położenia pręta (czyli opóźnienia czasowego t_0) były to wartości ograniczone czasem rejestracji sygnału od 0.01 ns do 6 ns. Warunkami brzegowymi dla promienia pręta R były rzeczywiste jego rozmiary R = 6 mm oraz R = 7 mm. Parametry początkowe były dobierane dla każdej hiperboli oddzielnie jako wartości wynikowe z aproksymacji liniowej dla modelu #1.

Na rys. 6.7 przedstawiono mapy georadarowe z zaznaczonymi punktami i hiperbolami (model #5) dla metody prostokątnej, dla mapy o najdokładniejszej (rys. 6.7a) i najmniej dokładnej rozdzielczości (rys. 6.7b). Na rys. 6.8 przedstawiono mapy georadarowe dla pomiaru z krokiem zapisu 10 mm, rejestrując 384 próbki/skan dla metody dwóch krzywych (rys. 6.8a) oraz jednej krzywej (rys. 6.8b). Można zauważyć, iż metody ekstrakcji hiperbol, a także parametrów pomiarowych mają istotny wpływ na liczbę punktów hiperboli, co ma bezpośredni wpływ na jakość aproksymacji.



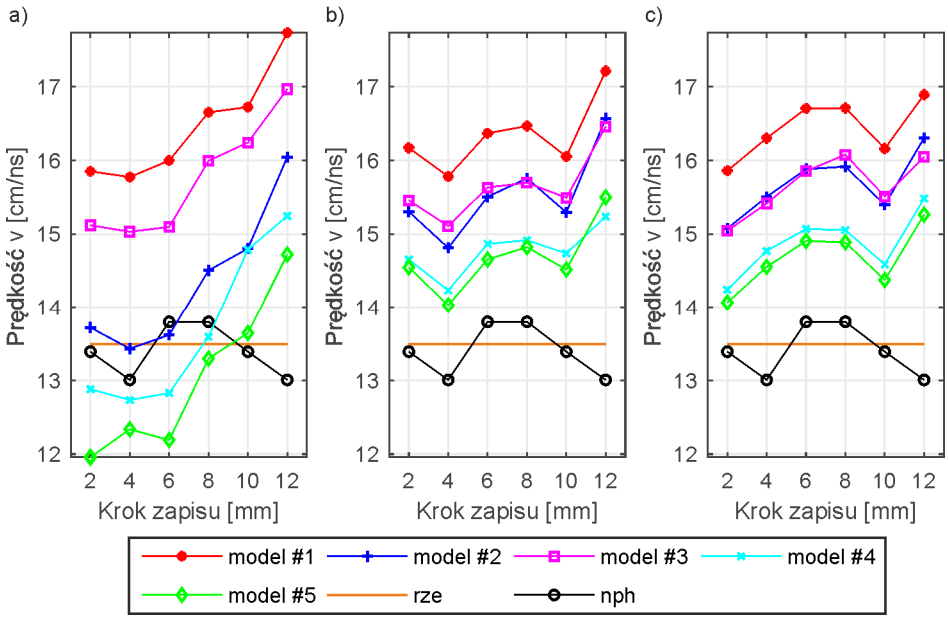
Rys. 6.7. Mapa georadarowa z zaznaczonymi hiperbolami z metody prostokątnej dla pomiaru: a) z krokiem zapisu 2 mm, 512 próbek/skan, b) z krokiem zapisu 12 mm, 128 próbki/skan

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



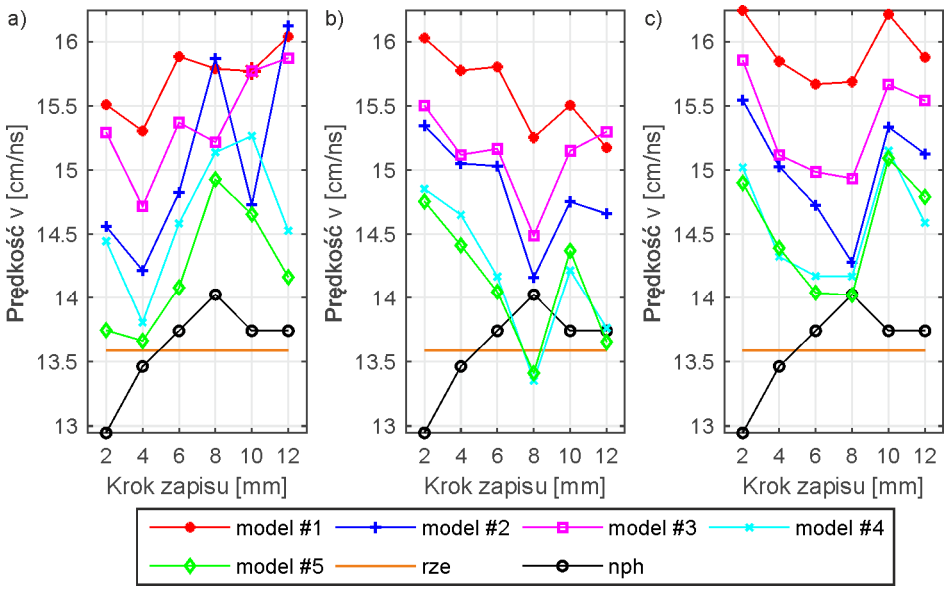
Rys. 6.8. Mapa georadarowa z zaznaczonymi hiperbolami dla pomiaru 384 próbek/skan z krokiem zapisu 10 mm dla metody: a) dwóch krzywych, b) jednej krzywej

Zależność oszacowanej prędkości od kroku zapisu sygnału, dla trzech różnych modeli ekstrakcji punktów hiperboli, dla pręta położonego na najmniejszej głębokości, tj. 1.9 cm poniżej trasy skanowania, przedstawiono na rys. 6.9. Prostą pomarańczową linią zaznaczono wartość prędkości referencyjnej „rze" (13.6 cm/ns), natomiast czarną linią z kółkami zaznaczono wartości prędkości uzyskane na podstawie najwyższego punktu hiperboli „nph", zgodnie ze wzorem (5.2). Można zauważyć, iż dla każdej metody istnieje trend wskazujący na zwiększenie zbieżności oszacowania prędkości wraz ze zmniejszeniem kroku anteny. Jednakże, ta sama zależność przedstawiona na rys. 6.10 dla niżej położonego pręta (tj. 4.3 cm poniżej trasy skanowania), ukazuje odwrotny trend dla metody dwóch i jednej krzywych.



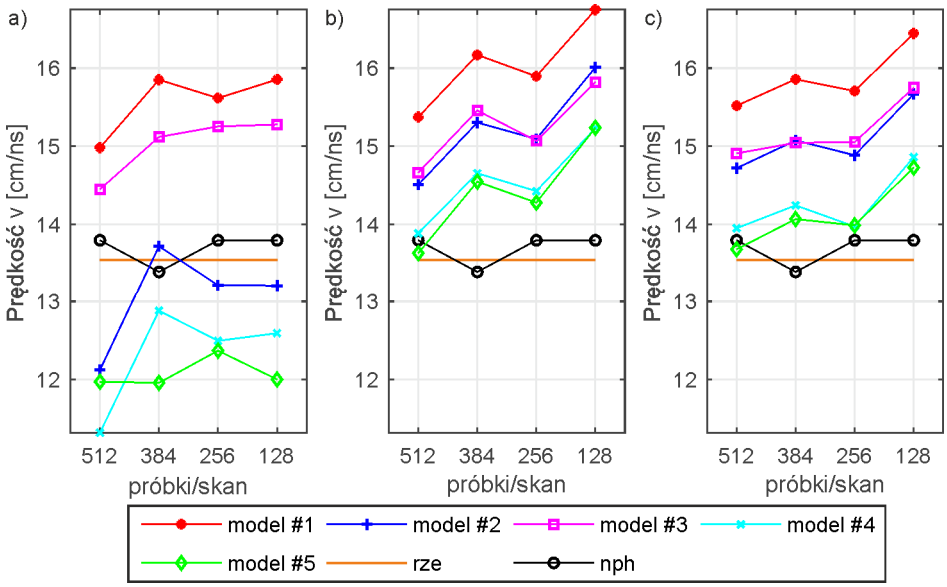
Rys. 6.9. Zależność oszacowanej prędkości od kroku zapisu sygnału dla pręta położonego na głębokości 1.9 cm, 384 próbki/skan dla metody: a) prostokątnej, b) dwóch krzywych, c) jednej krzywej

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



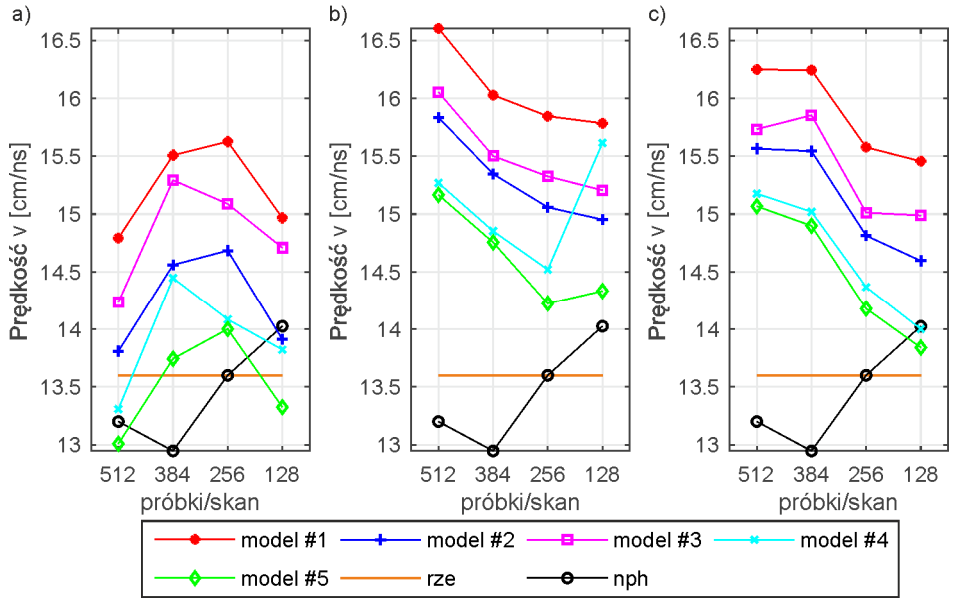
Rys. 6.10. Zależność oszacowanej prędkości od kroku zapisu sygnału dla pręta położonego na głębokości 4.3 cm, 384 próbek/skan dla metody: a) prostokątnej, b) dwóch krzywych, c) jednej krzywej

Na rys. 6.11 oraz 6.12 przedstawiono zależność liczby rejestrowanych próbek/skan od oszacowanej prędkości, dla pręta położnego na głębokości 1.9 cm oraz 4.3 cm dla trzech metod ekstrakcji hiperboli przy kroku zapisu 2 mm. Można zauważyć, że dla najpłycej położonego pręta istnieje trend wskazujący na zwiększenie zbieżności oszacowanej prędkości wraz z większą liczbą próbek/skan. Natomiast dla pręta położonego na większej głębokości widać trend odwrotny, sugerujący iż mniej dokładna rozdzielczość czasowa wpływa pozytywnie na oszacowanie prędkości.

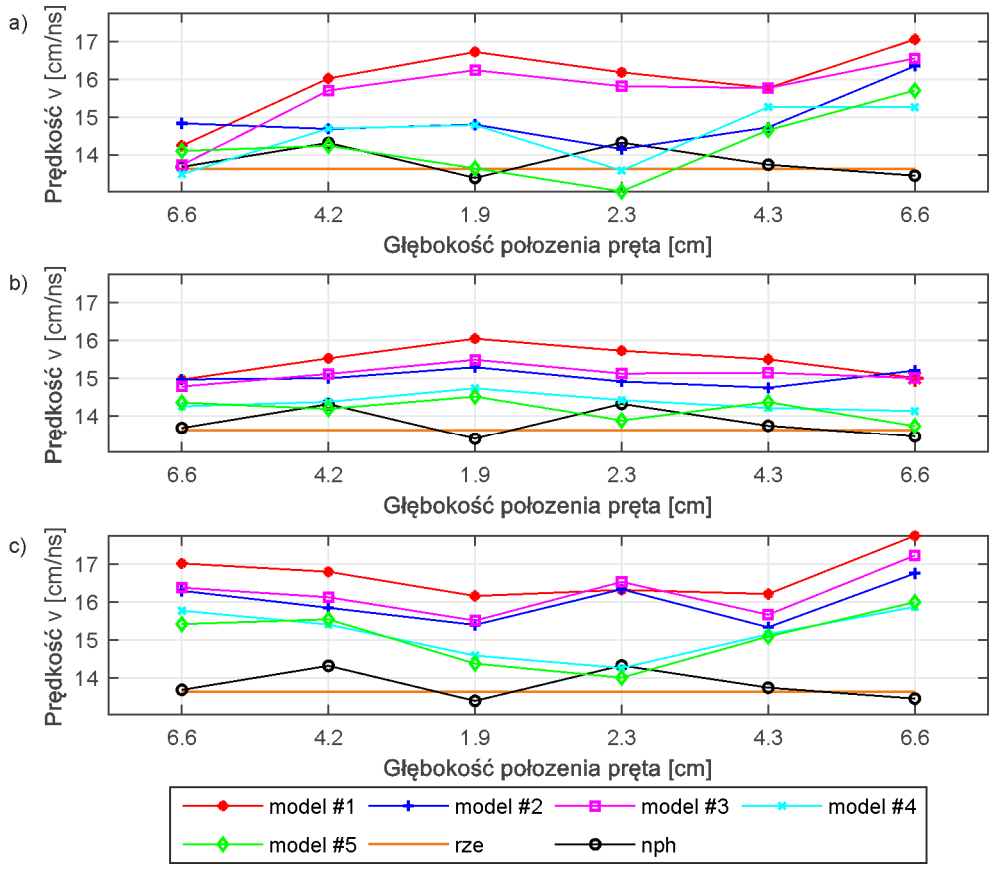


Rys. 6.11. Zależność oszacowanej prędkości od liczby rejestrowanych próbek/skan dla pręta położonego na głębokości 1.9 cm z krokiem zapisu 2 mm dla metody:
a) prostokątnej, b) dwóch krzywych, c) jednej krzywej

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 6.12. Zależność oszacowanej prędkości od liczby rejestrowanych próbek/skan dla pręta położonego na głębokości 4.3 cm z krokiem zapisu 2 mm dla metody:
a) prostokątnej, b) dwóch krzywych, c) jednej krzywej



Rys. 6.13. Zależność oszacowanej prędkości od głębokości położenia pręta dla 384 próbek/skan z krokiem zapisu 10 mm dla metody: a) prostokątnej, b) dwóch krzywych, c) jednej krzywej

Na rys. 6.13, przedstawiającym zależność oszacowanej prędkości od głębokości położenia pręta, można zauważyć, iż dla metody prostokątnej i dwóch krzywych

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

dokładniejsze oszacowanie prędkości następuje dla prętów położnych głębiej. Dla metody jednej krzywej dokładniejsze oszacowanie następuje dla prętów położonych najpłycej. Należy podkreślić, iż modele pomijające promień pręta (model #1 oraz model #2) przeszacowują wartość prędkości dla każdego kroku zapisu sygnału. Dla autorskiego modelu (#5) błąd względny wynosi między 0.2% a 14%, podczas gdy dla najprostszego modelu (#1) błąd ten zawiera się w przedziale 12% i 35%.

6.1.4. Symulacje numeryczne przy użyciu modelu heterogenicznego

6.1.4.1. Identyfikacja parametrów elektrycznych

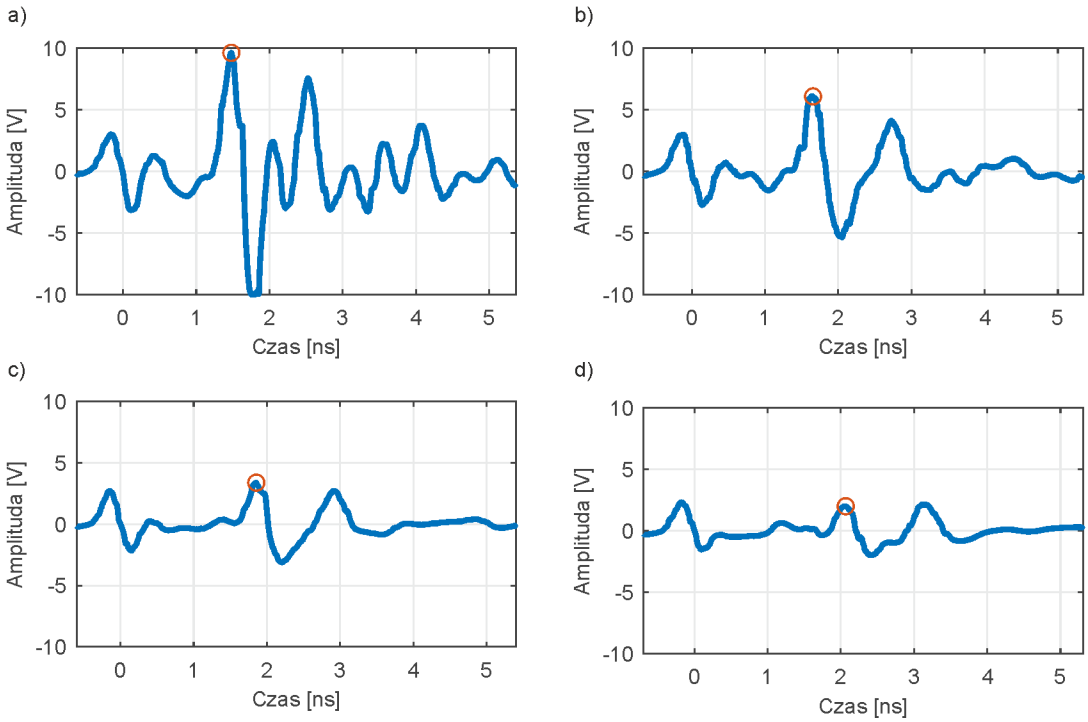
W kolejnym etapie badań, przeprowadzono pomiary doświadczalne w celu określenia parametrów elektrycznych betonu. Próbka została osuszona do stałej masy, zważona, a następnie zanurzona całkowicie w wodzie na cztery dni i kolejny raz zważona. W ten sposób określono nasiąkliwość wagową próbki jako 4.87% oraz nasiąkliwość objętościową jako 10.1%. Porowatość określono w sposób przybliżony, używając standardowej gęstości właściwej betonu (2800 kg/m^3), uzyskując wartość równą 23%. Następnie poddano próbkę suszeniu w warunkach laboratoryjnych i dokonywano pomiarów georadarowych systematycznie, monitorując spadek masy próbki. Badania georadarowe prowadzono na próbce ułożonej na stalowej płycie, by dokładnie ustalić czas odbicia od spodu próbki. Każdorazowo wykonywano dwa pomiary – jeden nad niezbrojoną częścią próbki w celu oszacowania prędkości propagacji fali w betonie oraz drugi wzdłuż całej próbki, aby przeanalizować wpływ wilgotności na cały radargram. Rejestrowano odcinek czasowy długości 6 ns, 512 próbek/skan z krokiem zapisu 4 mm. Po uzyskaniu przez próbkę stałej masy w warunkach laboratoryjnych, wykorzystano ponownie suszarkę by dokonać redukcji masy. Podczas schnięcia wykonywano pomiary, aż do pełnego wysuszenia próbki, tj. osiągniecia wagi początkowej przed zanurzeniem w wodzie. W tabeli 6.1 przedstawiono wyniki pomiarów masy próbki podczas każdego z pomiarów GPR wraz ze stopniem nasycenia wodą oraz czas pomiaru od momentu wyjęcia próbki z wody.

Po wykonaniu wszystkich pomiarów, sygnały poddano filtrom i automatycznemu ustawieniu czasu zerowego. Na rys. 6.14 zestawiono skany typu A dla wybranych stopni nasycenia, z zaznaczoną amplitudą odbicia od stalowej płyty. Można zauważyć, iż amplituda odbicia spada wraz ze wzrostem stopnia nasycenia, co pokazuje również rys. 6.15, gdzie przedstawiono zależność amplitudy odbicia od stopnia nasycenia.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

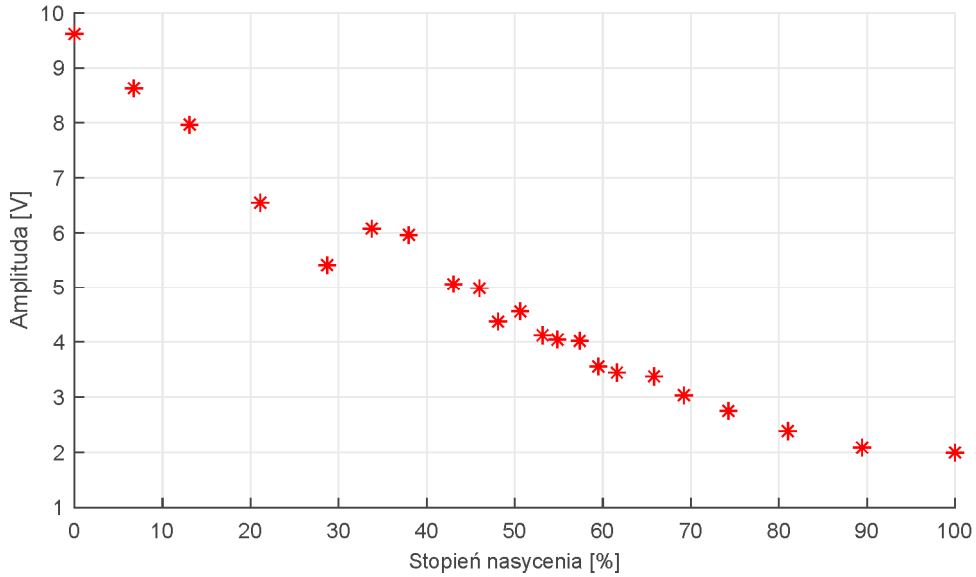
Tabela 6.1. Zestawienie masy próbki, stopnia nasycenia oraz czasu pomiaru od momentu wyjęcia próbki z wody

Czas pomiaru [h]	Masa próbki [kg]	Stopień nasycenia [%]
0	27.28	100.0%
12	27.15	89.5%
25	27.05	81.0%
35	26.97	74.3%
47	26.91	69.2%
60	26.87	65.8%
72	26.82	61.6%
83	26.80	59.5%
98	26.77	57.4%
121	26.74	54.9%
145	26.72	53.2%
175	26.69	50.6%
238	26.66	48.1%
323	26.64	46.0%
540	26.60	43.0%
1271	26.54	38.0%
2201	26.49	33.8%
4259	26.43	28.7%
4269	26.34	21.1%
4288	26.25	13.1%
4381	26.17	6.8%
4456	26.09	0.0%



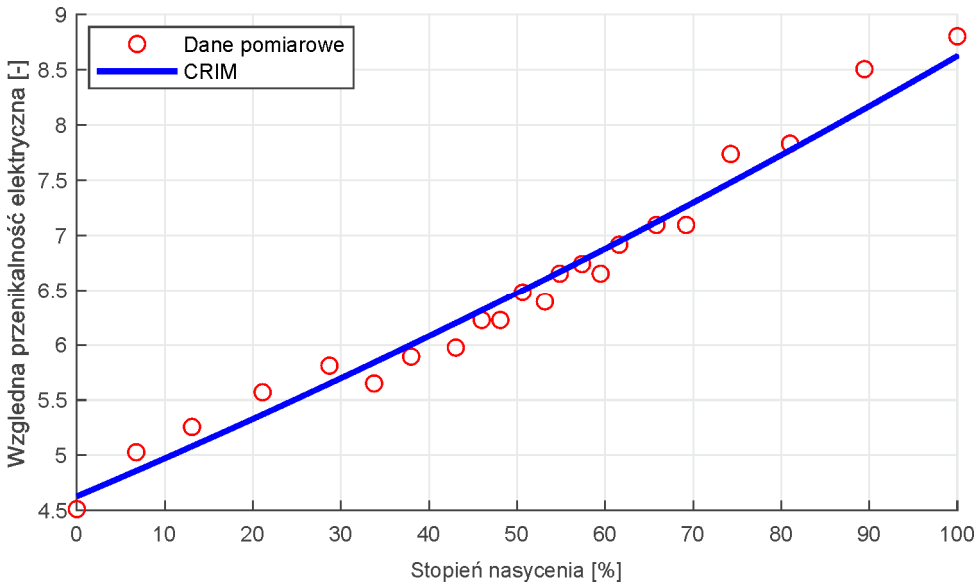
Rys. 6.14. Wybrane skany typu A z zaznaczoną amplitudą odbicia dla różnych stopni nasycenia: a) 0%, b) 33.76%, c) 65.82%, d) 100%

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 6.15. Zależność amplitudy odbitego sygnału od stopnia nasycenia

Czas odbicia od stalowej płyty potrzebny do ustalenia prędkości propagacji fali elektromagnetycznej w betonie był ustalany przy pomocy pierwszego piku o wartości dodatniej (por. rys. 6.14). Po wyznaczeniu czasów odbicia dla każdego z pomiarów, określono prędkość propagacji fali elektromagnetycznej na podstawie znanej wysokości próbki (wzór (5.2)), a następnie wyznaczono wartość względnej przenikalności elektrycznej (wzór (5.3)). Na rys. 6.16 przedstawiono zależność przenikalności elektrycznej od stopnia nasycenia. Wyraźnie widać, że jej wartość rośnie wraz ze wzrostem stopnia nasycenia.

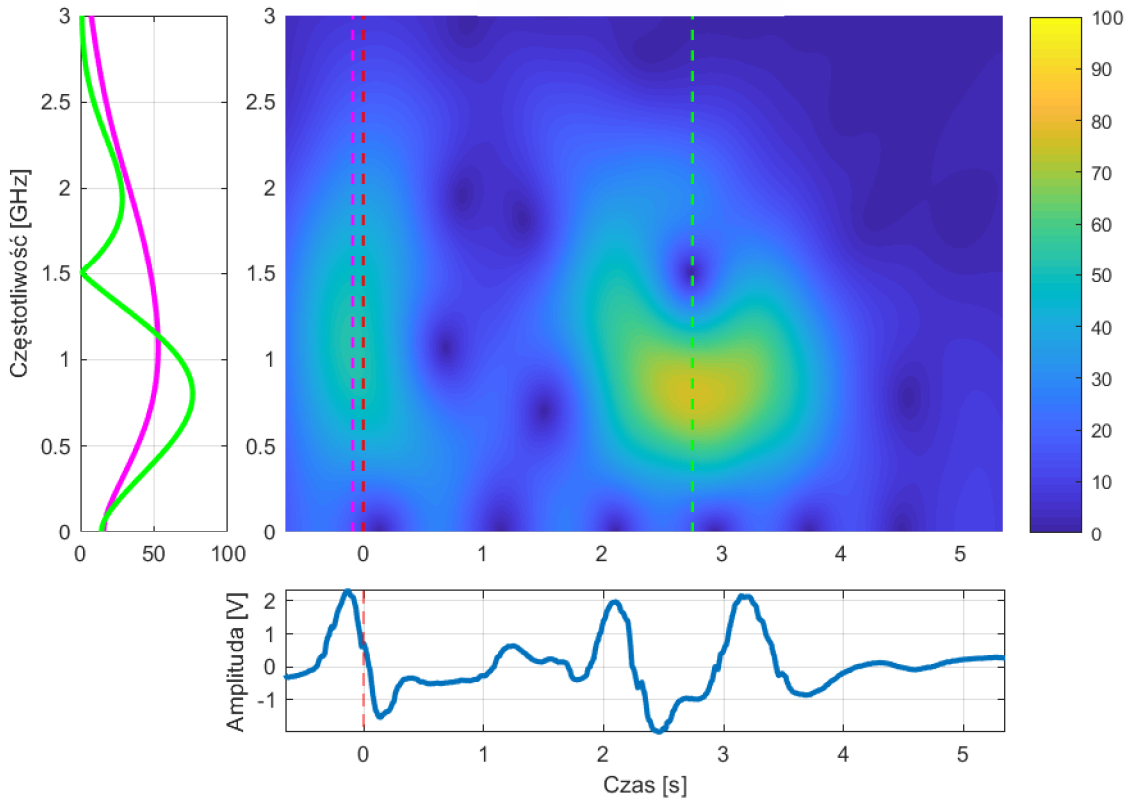


Rys. 6.16. Zależność przenikalności elektrycznej od stopnia nasycenia wraz z dopasowanym modelem CRIM

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

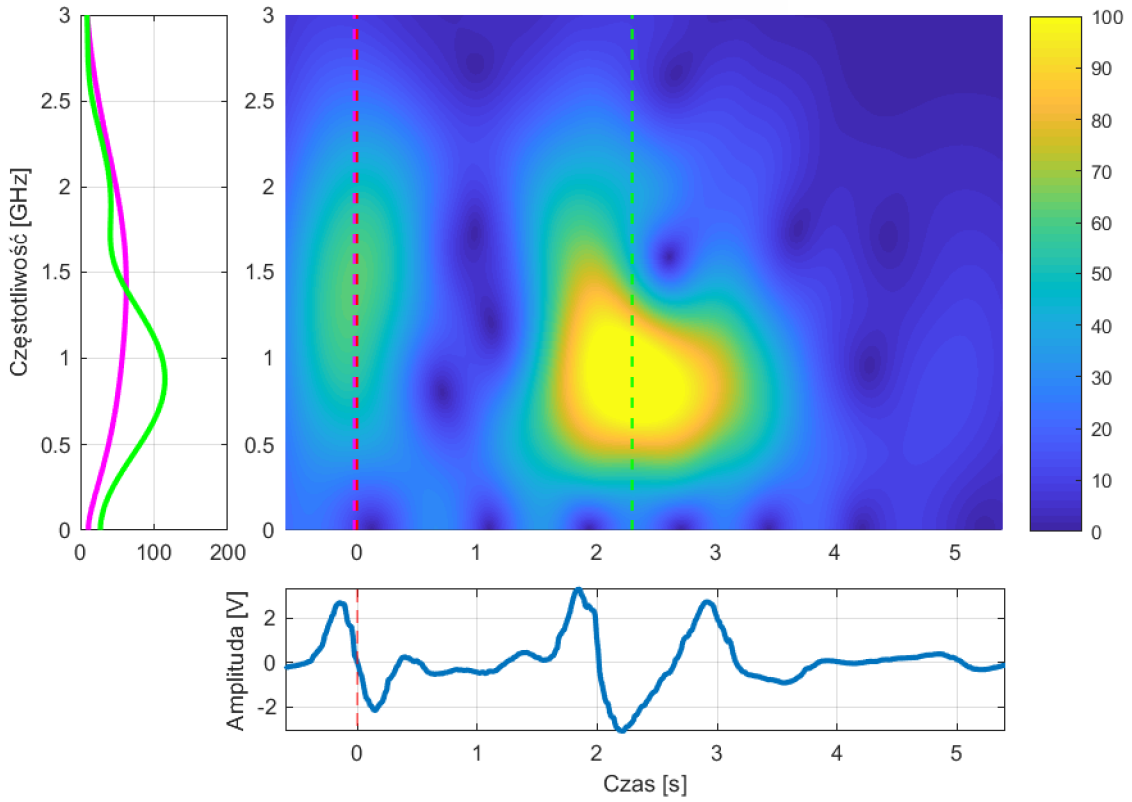
Na podstawie pomierzonych wielkości przenikalności elektrycznej dokonano dopasowania modelu CRIM według wzoru (3.48) za pomocą nieliniowej metody aproksymacji. Przyjęto, że zmienną jest stopień nasycenia, a poszukiwanym parametrem jest wartość przenikalności elektrycznej dla fazy stałej ε_m . Dla powietrza przyjęto $\varepsilon_a = 1$ oraz dla wody przyjęto $\varepsilon_{sw} = 79.1 + i8.6$, zgodnie z rys. 2.1 dla zakresu do 2 GHz. W wyniku przeprowadzonego procesu dopasowania krzywej CRIM otrzymano wartość przenikalności dla fazy stałej $\varepsilon_m = 6.21$.

Dodatkowo dla uzyskanych tras georadarowych wykonano analizę krótkoczasowej transformacji Fouriera (STFT). Na rys. 6.17 – 6.19 przedstawiono spektrogramy dla wybranych trzech skanów typu A o różnych stopniach nasycenia próbki wodą. Dla próbki napełnionej w 100% wodą widać, iż środkowa częstotliwość sygnału odbitego wynosi ok. 0.75 GHz, podczas gdy dla próbki suchej (rys. 6.19) częstotliwość środkowa odbicia oscyluje w granicy 1.25 GHz, zbliżając się do częstotliwości środkowej sygnału wejściowego. Można zauważyć trend wskazujący, że wraz ze wzrostem nasycenia próbki maleje częstotliwość odbitego sygnału, co uzyskuje potwierdzenie w przeprowadzonych badaniach dla próbek żelbetowych [71] i konstrukcji ceglanych [75].

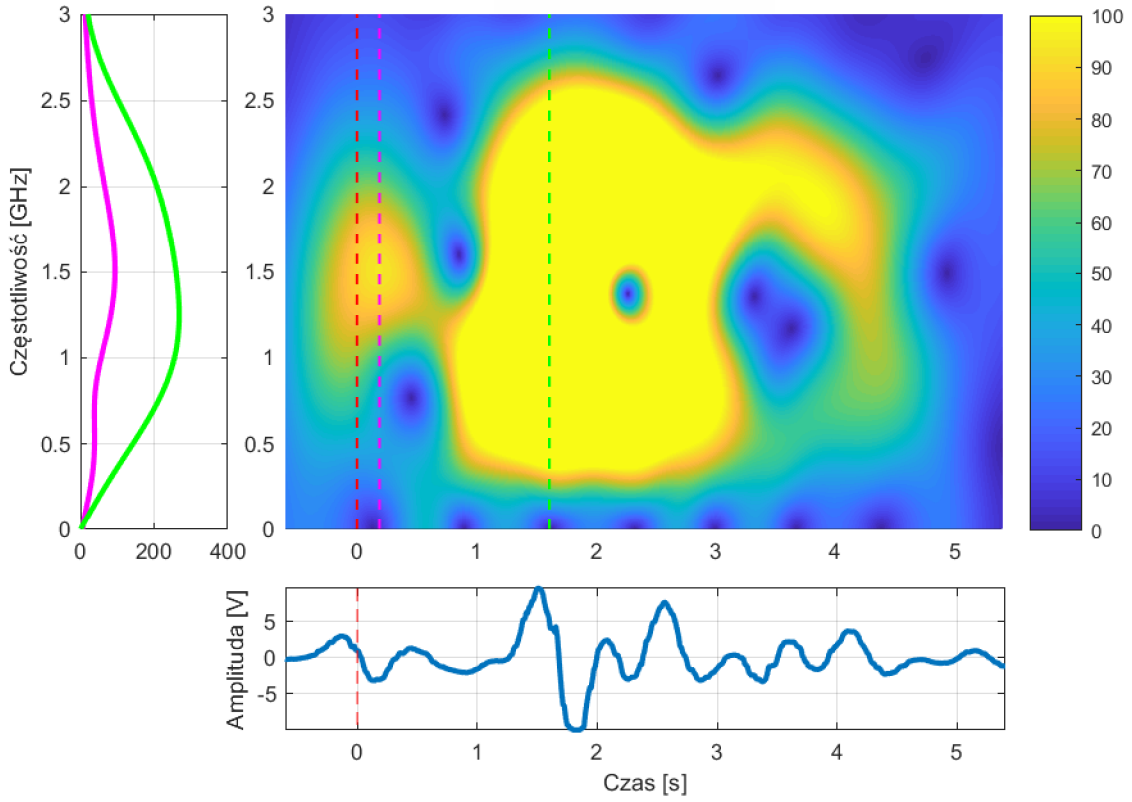


Rys. 6.17. Spektrogram dla sygnału dla próbki z 100% stopnień nasycenia

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 6.18. Spektrogram dla sygnału dla próbki z 65.82% stopniem nasycenia



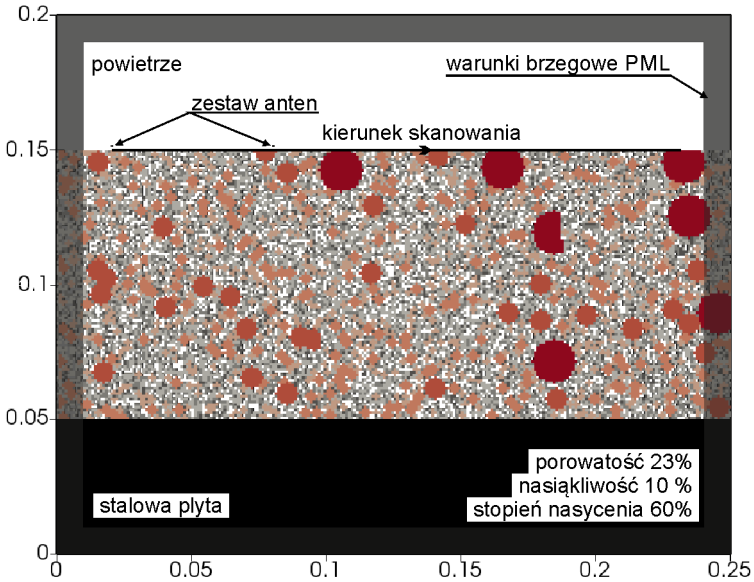
Rys. 6.19. Spektrogram dla sygnału dla próbki z 0% stopniem nasycenia

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

6.1.4.2. Adaptacja modelu numerycznego

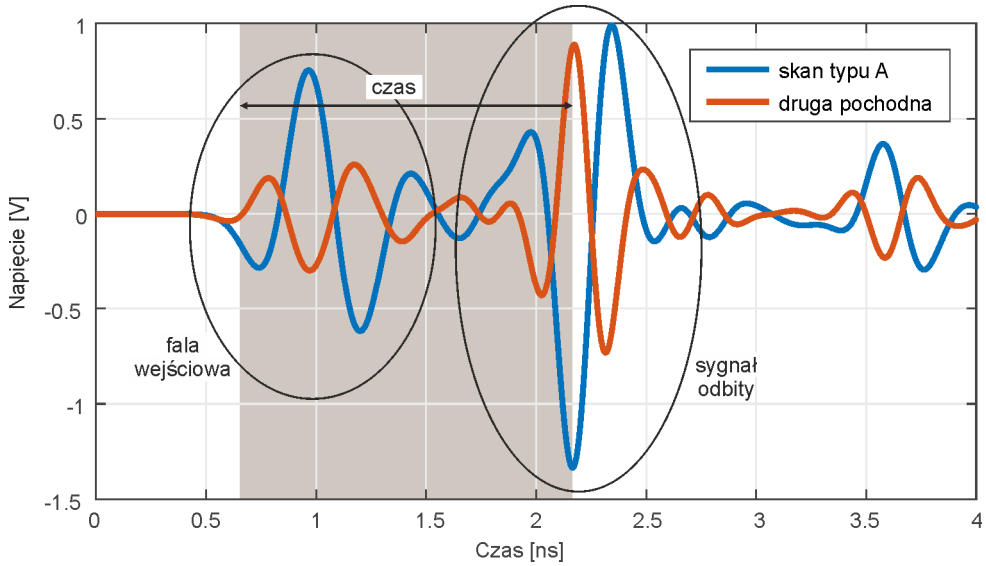
Aby zweryfikować heterogeniczny model numeryczny betonu, dla przeprowadzonych badań doświadczalnych, przeprowadzono symulacje FDTD przy użyciu programu gprMax [146], dla wycinka próbki żelbetowej, w której nie było prętów zbrojeniowych. Geometria modelu fragmentu próbki betonowej wynosiła: 25 cm × 10 cm, natomiast całkowity obszar modelu obliczeniowego wynosił 25 cm × 20 cm. Dodatkowo pod spodem próbki umieszczono stalową płytę, aby zwiększyć amplitudę odbitego sygnału. Wykonano 11 modeli numerycznych, o różnym stopniu nasycenia betonu od 0% do 100%, z krokiem 10%. Porowatość betonu została przyjęta jako 23% oraz nasiąkliwość objętościowa jako 10%, zgodnie z badaniami doświadczalnymi. Geometrię jednego z modeli obliczeniowych dla stopnia nasycenia 60% pokazano na rys. 6.20.

Sygnał wzbudzenia został przyjęty jako funkcja Rickera o częstotliwości 2 GHz. Odległość między węzłem wzbudzającym i odbiornikiem została ustalona jako 6 cm. Model zdyskretyzowano za pomocą kwadratowych oczek siatki Yee o wymiarze boku równym 1 mm. Dla każdego modelu prowadzono obliczenia dla 15 położeń anteny, przesuwając ją wzdłuż próbki co 10 mm. Dla każdej obliczonej trasy definiowano czas zerowy za pomocą drugiej pochodnej (por. rys. 4.8). Czas odbicia przyjmowano przy pierwszym piku o ujemnej wartości (rys. 6.21). Na podstawie czasu odbitego sygnału określono prędkość (wzór (5.2)), a następnie obliczono wartość przenikalności elektrycznej (wzór (5.3)) jako średnią arytmetyczną z 15 skanów typu A.



Rys. 6.20. Heterogeniczny model numeryczny betonu dla stopnia nasycenia 60%

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 6.21. Zasada wyznaczania czasu odbitego sygnału dla numerycznego sygnału georadarowego

W pierwszym etapie obliczeń przyjęto parametry elektryczne uzyskane z badań doświadczalnych ($\varepsilon_a = 1$, $\varepsilon_{sw} = 79.1$, $\varepsilon_m = 6.2$). Wyniki przedstawiono na rys. 6.22 za pomocą żółtych gwiazdek. Wyraźnie widać, iż dane nie pokrywają się z danymi doświadczalnymi. Stwierdzono, iż obliczona efektywna przenikalność jest zbliżona do średniej ważonej przenikalności poszczególnych faz, gdzie współczynnikiem wagowym jest objętość danej fazy. Aby zapewnić zgodność między wynikami z analiz numerycznych, a pomiarami doświadczalnymi, przeprowadzono adaptację modelu numerycznego, wprowadzając zastępcze wartości przenikalności elektrycznych dla fazy stałej i ciekłej. Faza gazowa pozostaje bez zmian ze względu na fakt, iż jej wartość nie może być już mniejsza. Zastępcze wartości uzyskano w wyniku przeprowadzenia dopasowania modelu CRIM (zależność (3.48)) do średniej ważonej przenikalności elektrycznych (zależność (3.54)). W ten sposób uzyskano zastępczą przenikalność wody $\varepsilon_{sw} = 40.33$ i zastępczą stałą dielektryczną fazy stałej $\varepsilon_m = 5.83$. Wyniki symulacji numerycznych z użyciem dopasowanego modelu przedstawiono na rys. 6.22 i oznaczono fioletowymi kwadratami. Walidacja modelu numerycznego zapewniła dobrą zgodność wyników numerycznych z danymi pomiarowymi. Dodatkowo na rys. 6.22 pokazano wyniki uzyskane z literatury [76], które pozostają w zgodności z autorskimi danymi pomiarowymi.

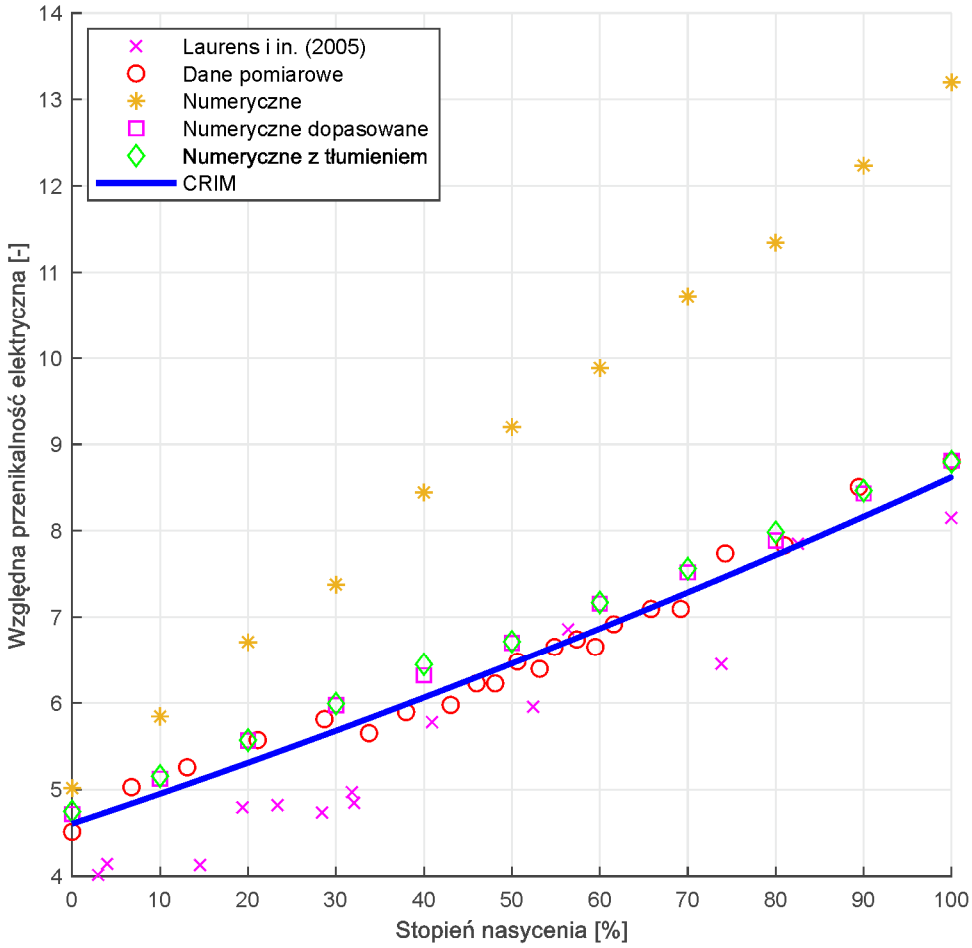
Przeanalizowane do tej pory parametry elektryczne nie uwzględniały żadnego tłumienia, które jest spowodowane obecnością wody w betonie, co można zaobserwować na rys. 6.15, na którym amplituda odbicia maleje wraz ze wzrostem zawartości wody. Ze

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

względu na zastosowanie zastępczej przenikalności elektrycznej, nie ma możliwości użycia modelu dyspersji Debye'a zaimplementowanego w programie gprMax. Dlatego właściwości tłumiące wody uwzględniono poprzez przyjęcie przewodności według wzoru [81]:

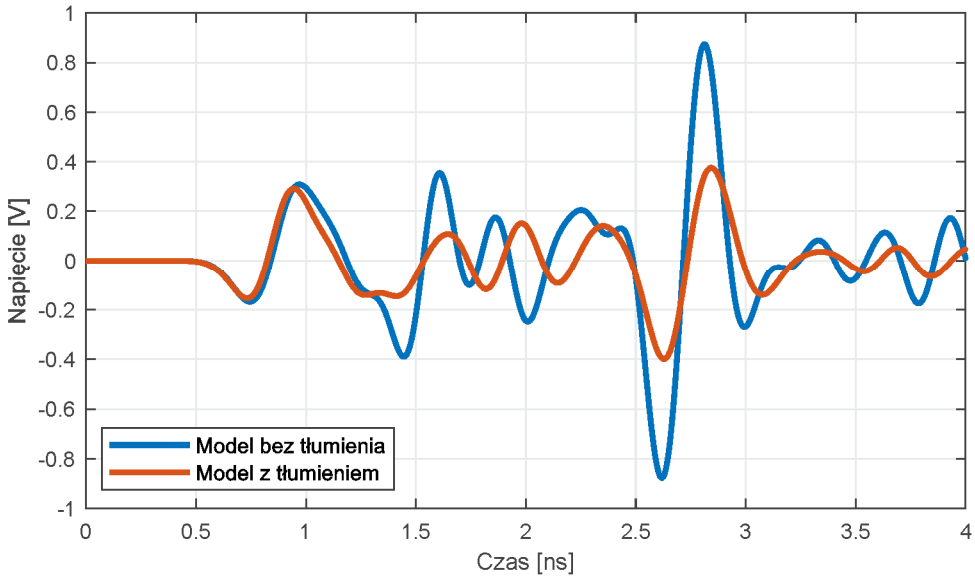
$$\sigma = \omega \cdot \varepsilon'' \tag{6.1}$$

Ponownie przeprowadzono obliczenia, tym razem przyjmując dla wody dodatkowo wartość przewodności $\sigma = 0.95$ S/m. Wyniki dla modelu numerycznego z tłumieniem przedstawiono na rys. 6.22 zaznaczając je zielonymi rombami. Widać, iż wyniki pozostają w zgodności z danymi pomiarowymi. Niewielkie różnice wynikają z pseudolosowego rozkładu frakcji. Różnice można zauważyć między pojedynczymi trasami georadarowymi dla modelu bez i z uwzględnieniem tłumienia wody przedstawionymi na rys. 6.23. Widać, iż sygnał odbity dla modelu z tłumieniem charakteryzuje się mniejszą amplitudą, niż dla modelu bez tłumienia.



Rys. 6.22. Zależność przenikalności elektrycznej od stopnia nasycenia

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



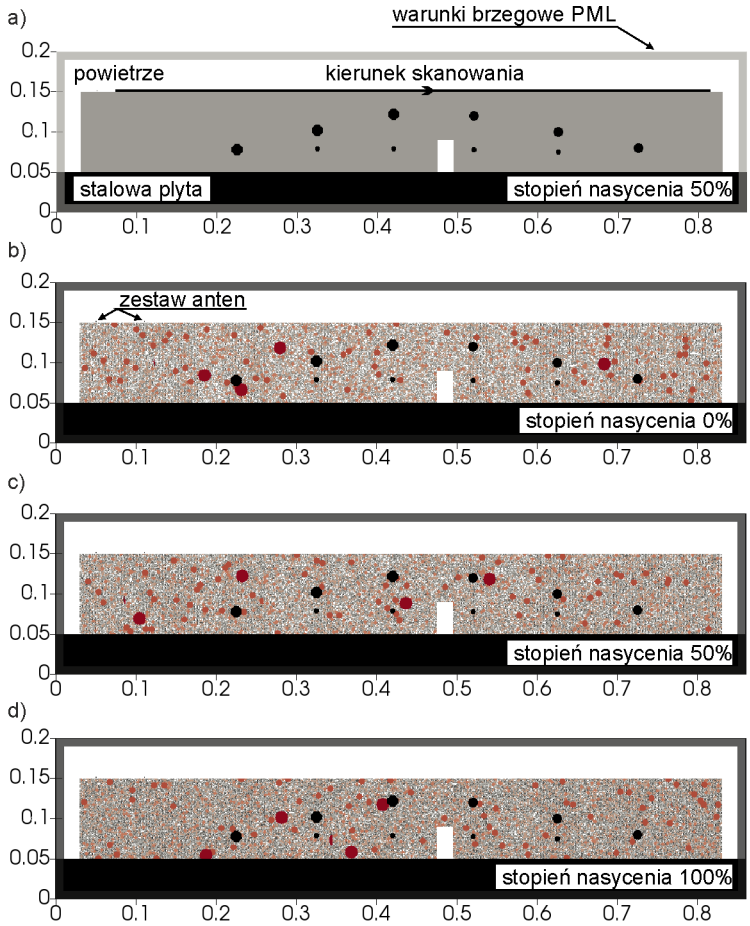
Rys. 6.23. Wybrane skany typu A dla modelu z tłumieniem i bez tłumienia dla próbki betonu o stopniu nasycenia 80%

6.1.4.3. Walidacja modelu numerycznego

W ostatnim etapie przeprowadzono analizę porównawczą uzyskanego heterogenicznego modelu numerycznego betonu z pomiarami doświadczalnymi, a także z modelem homogenicznym. Przygotowano pięć modeli numerycznych (rys. 6.24), które odpowiadały trzem wybranym stopniom nasycenia i reprezentowały próbkę z pomiarów doświadczalnych ułożoną na stalowej płycie. W modelach dokładnie odwzorowano położenie i wymiar uszkodzenia, a także położenie i rozmiar prętów zbrojeniowych. Zewnętrzne wymiary modeli wynosiły 86 cm × 20 cm. Do dyskretyzacji układu została przyjęta kwadratowa siatka Yee o wymiarze boku równym 1 mm. Sygnał wzbudzenia oraz odległość między antenami przyjęto jak w poprzednim rozdziale. Pierwszy model (rys. 6.24a) został zbudowany z homogenicznego materiału, przyjmując przenikalność elektryczną jako efektywną wartość przenikalności modelu CRIM dla stopnia nasycenia 50%. Podstawiając dane doświadczalne do zależności (3.48), otrzymano wartość efektywnej przenikalności elektrycznej betonu $\varepsilon_r = 6.46$. W kolejnych czterech modelach zastosowano heterogeniczny model betonu, przyjmując jako parametry elektryczne poprzednio uzyskane dane z uwzględnieniem tłumienia ($\varepsilon_a = 1$, $\varepsilon_m = 5.83$, $\varepsilon_{sw} = 40.33$ oraz $\sigma = 0.95$ S/m). Przeanalizowano trzy różne stopnie nasycenia 0% (rys. 6.24b), 50% (rys. 6.24c) oraz 100% (rys. 6.24d). W celu przeanalizowania wpływu wielkości siatki dyskretyzacyjnej na wyniki pomiaru, wykonano także model heterogeniczny o stopniu nasycenia 50% z siatką kwadratową

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

o boku równym 0.5 mm. To spowodowało, iż pojedyncze cząsteczki wody, cementu i najmniejszego kruszywa były rozmiarów 0.5 mm x 0.5 mm.

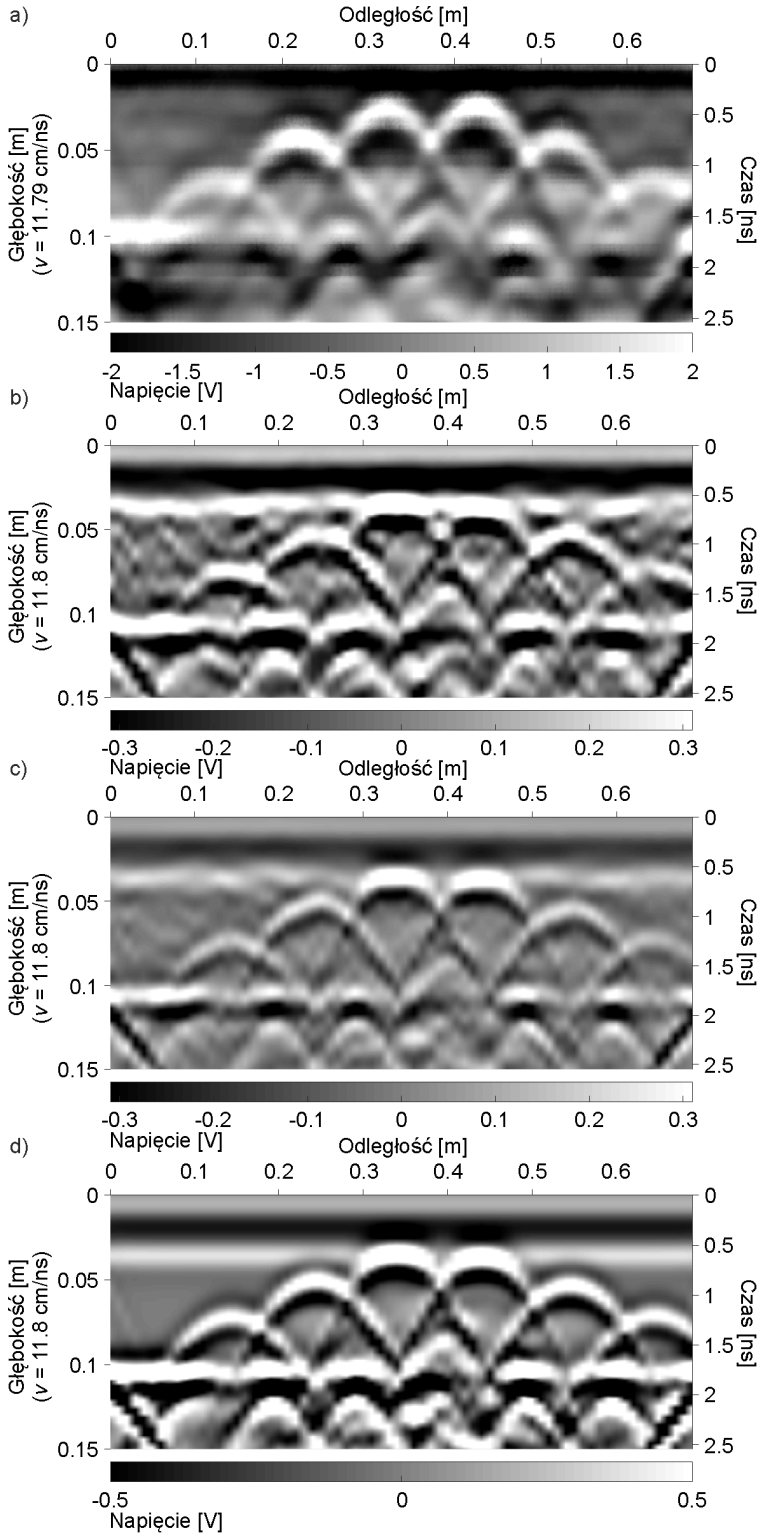


Rys. 6.24. Modele numeryczne betonu: a) homogeniczny o stopniu nasycenia 50%, b) heterogeniczny o stopniu nasycenia 0%, c) heterogeniczny o stopniu nasycenia 50%, d) heterogeniczny o stopniu nasycenia 100%

Uzyskane numeryczne mapy georadarowe zostały zestawione z pomiarami doświadczalnymi, wykonanymi podczas procesu suszenia próbki. W celu bezpośredniego porównania próbek, numeryczne radargramy zostały przemnożone przez wartość „-1”, by zapewnić zgodność faz odbicia. Na rys. 6.25 przedstawiono mapy georadarowe uzyskane dla próbki o stopniu nasycenia 50%. Można zauważyć, iż mapa georadarowa obliczona dla modelu heterogenicznego (rys. 6.25b) jest znacznie bardziej podobna do pomiarów doświadczalnych (rys. 6.25a), niż radargram obliczony dla modelu homogenicznego (rys. 6.25d). Na radargramie obliczonym dla modelu heterogenicznego (rys. 6.25b) widać liczne odbicia w strukturze betonu, które nie pojawiają się na mapie z pomiarów doświadczalnych (rys. 6.25a). Jest to spowodowane rozmiarem pojedynczych cząsteczek wody, które ze względu ma swój rozmiar (1 mm), powodują

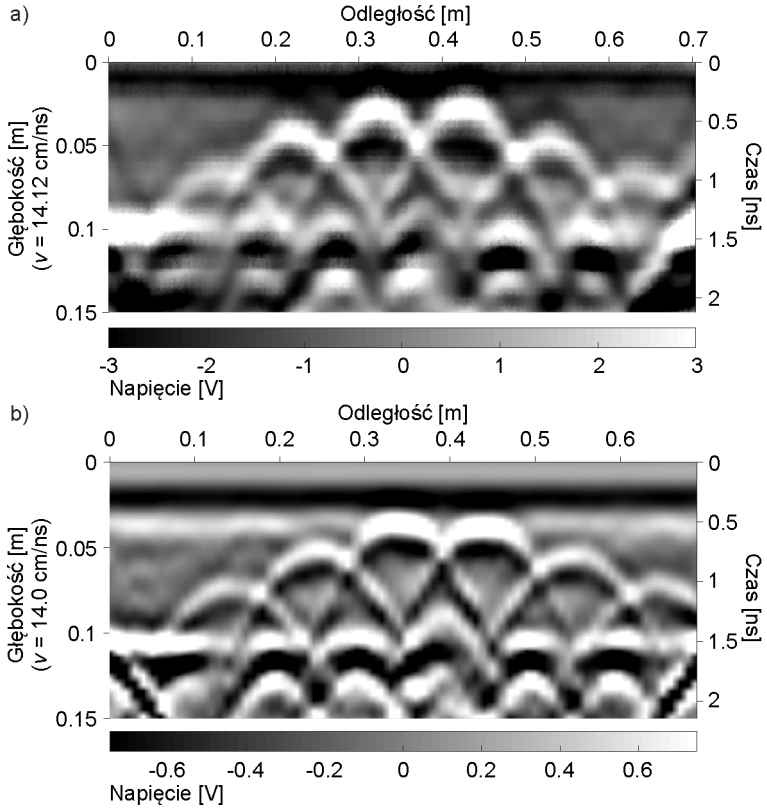
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

liczne odbicia. Efekt ten nie jest zauważalny dla radargramu uzyskanego dla modelu o dyskretyzacji 0.5 mm × 0.5 mm (rys. 6.25c).

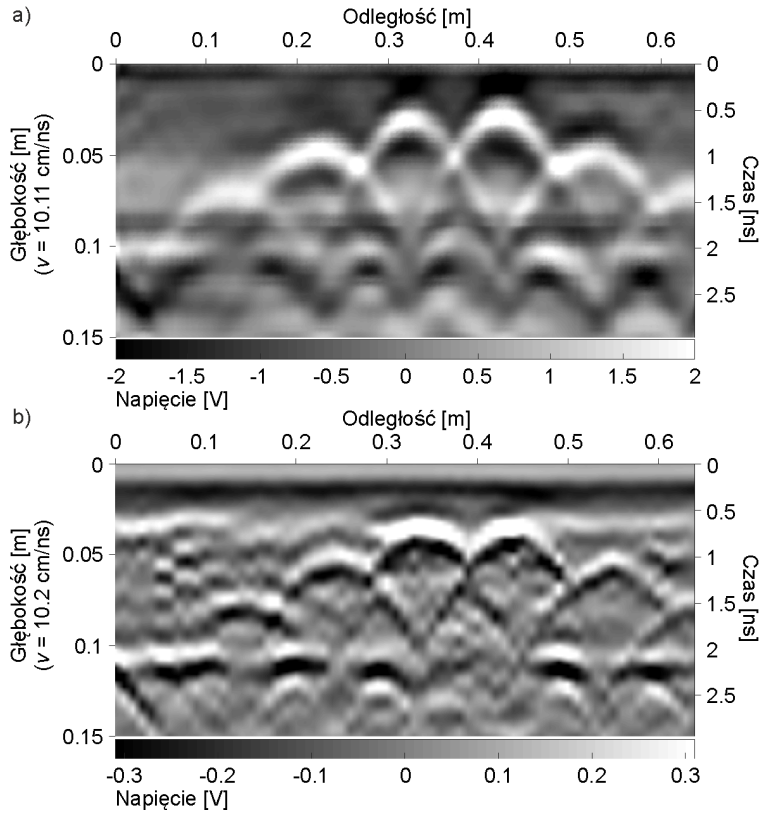


Rys. 6.25. Mapa georadarowa dla stopnia nasycenia 50%: a) badania doświadczalne, b) model heterogeniczny z siatką 1 mm x 1mm, c) model heterogeniczny z siatką 0.5 mm x 0.5 mm, d) model homogeniczny z siatką 1 mm x 1mm

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 6.26. Mapa georadarowa dla stopnia nasycenia 0% z siatką 1 mm x 1mm:
a) badania doświadczalne, b) model heterogeniczny



Rys. 6.27. Mapa georadarowa dla stopnia nasycenia 100% z siatką 1 mm x 1mm:
a) badania doświadczalne, b) model heterogeniczny

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Rysunek 6.26 przedstawia mapy georadarowe dla próbki o stopniu nasycenia równym 0%. Można zauważyć, iż numeryczny radargram (rys. 6.26b) ze względu na brak cząsteczek wody nie ukazuje licznych losowych odbić. Powoduje to, że mapa ta jest bardziej zbliżona do doświadczalnego radargramu (rys. 6.26a). Na rys. 6.27 przedstawiono wyniki obliczeń i doświadczenia dla próbki o stopniu nasycenia 100%. Ze względu na duża 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).

Analizując mapy georadarowe pod kątem możliwości wykrycia poszczególnych elementów konstrukcyjnych należy stwierdzić, iż prawidłowo wykryto pręty o średnicy 12 mm oraz 14 mm. Pręty o średnicy 6 mm pozostały nie wykryte prawdopodobnie ze względu na zbyt niską rozdzielczość używanej anteny, a także ze względu na ich położenie pod większymi prętami. Prętów tych nie wykryto także na badaniach numerycznych. Analizując wycięcie w próbce należy je uznać za niewykryte, chociaż można dopatrywać się niewielkiej, niezbyt wyraźnej anomalii na rzeczywistych radargramach, jak i na numerycznych mapach georadarowych.

6.1.5. Podsumowanie

Pomiary doświadczalne przeprowadzone na próbce żelbetowej, pozwoliły zidentyfikować prędkość fali elektromagnetycznej w betonie, wykorzystując matematyczne modele hiperboli. Przeprowadzono również pomiary georadarowe dla próbki o różnym stopniu nasycenia, uzyskując wartości przenikalności elektrycznej uzależnione od stopnia nasycenia. Symulacje numeryczne z wykorzystaniem autorskiego heterogenicznego modelu numerycznego betonu pozwoliły uzyskać mapy georadarowe zbliżone do tych uzyskanych z pomiarów doświadczalnych. Na podstawie wykonanych badań można sformułować następujące wnioski:

- Przeprowadzone analizy na danych doświadczalnych, wykorzystujące matematyczne modele hiperbol, umożliwiły identyfikację prędkości propagacji fali elektromagnetycznej w betonie. Jednocześnie stwierdzono, iż parametry pomiarowe mogą zaniżać, bądź zawyżać wartość prędkości. Dla prętów położnych płytko (< 2 cm), zmniejszenie kroku zapisu sygnału lub zwiększenie liczby próbek rejestrowanych na skan powodowały zwiększenie dokładności oszacowania prędkości. Dla prętów położonych głębiej (>4 cm)

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

zaobserwowano odwrotną zależność, zwiększenie liczby próbek rejestrowanych na skan lub zmniejszenie kroku zapisu sygnału powodowało pogorszenie rezultatów aproksymacji. Opracowane metody ekstrakcji hiperbol z radargramów również miały wpływ na otrzymywane wyniki aproksymacji. Dla prętów położnych płytko zaleca się stosowanie metody jednej krzywej, natomiast dla prętów położonych głębiej zaleca się używanie metody prostokątnej lub dwóch krzywych.

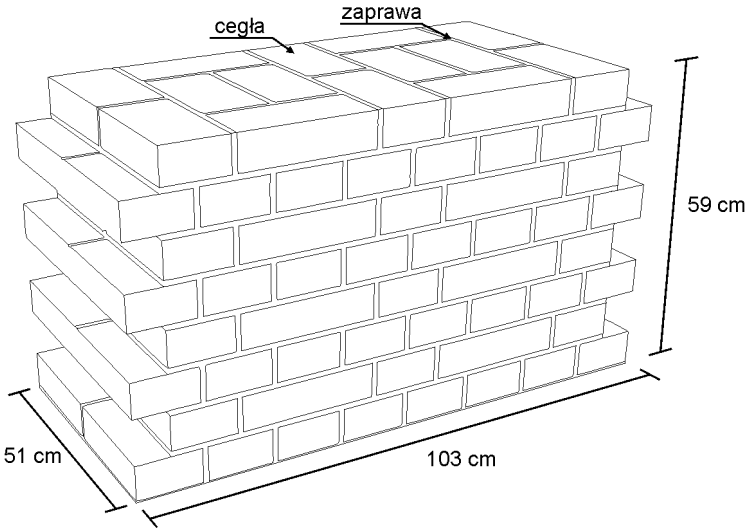
– W wyniku przeprowadzonych pomiarów, których celem była identyfikacja parametrów elektrycznych stwierdzono, iż wraz ze wzrostem stopnia nasycenia rośnie tłumienie fali elektromagnetycznej, co uwidoczniło się poprzez spadek amplitudy odbicia. Zmiany przenikalności elektrycznej zależne od stopnia nasycenia zostały opisane za pomocą modelu CRIM, co pozwoliło wykonać heterogeniczny model numeryczny badanej próbki. Przeprowadzono adaptację modelu numerycznego wprowadzając zastępcze wartości parametrów elektrycznych, dzięki czemu uzyskano wyniki zbieżne z radargramami doświadczalnymi. Numeryczne mapy georadarowe z wykorzystaniem heterogenicznego modelu betonu są zdecydowanie bardziej zbliżone do radargramów z pomiarów doświadczalnych, niż mapy georadarowe otrzymane z modelu homogenicznego. W celu jeszcze dokładniejszego odwzorowania rzeczywistych radargramów zaleca się zmniejszenie siatki dyskretyzacyjnej.

6.2. Mur ceglany

6.2.1. Obiekt badawczy

W celu sprawdzenia możliwości wykrycia uszkodzeń w konstrukcjach murowych, wykonano fragment muru z cegły pełnej o grubości dwóch cegieł i wysokości ośmiu warstw. Aby mur nie pochłaniał wilgoci od gruntu oddylatowano go za pomocą warstwy styroduru. Projekt obiektu badawczego wraz z wymiarami zewnętrznymi, przedstawiono na rys. 6.28. W testowej konstrukcji zostały wprowadzone uszkodzenia w postaci braku jednej cegły w drugiej warstwie muru oraz poprzez usunięcie w wybranych miejscach spoiny między cegłami. Dokładny rozkład uszkodzeń przedstawiony został na modelach numerycznych (rys. 6.29).

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 6.28. Projekt obiektu badawczego (fragment muru ceglanego)

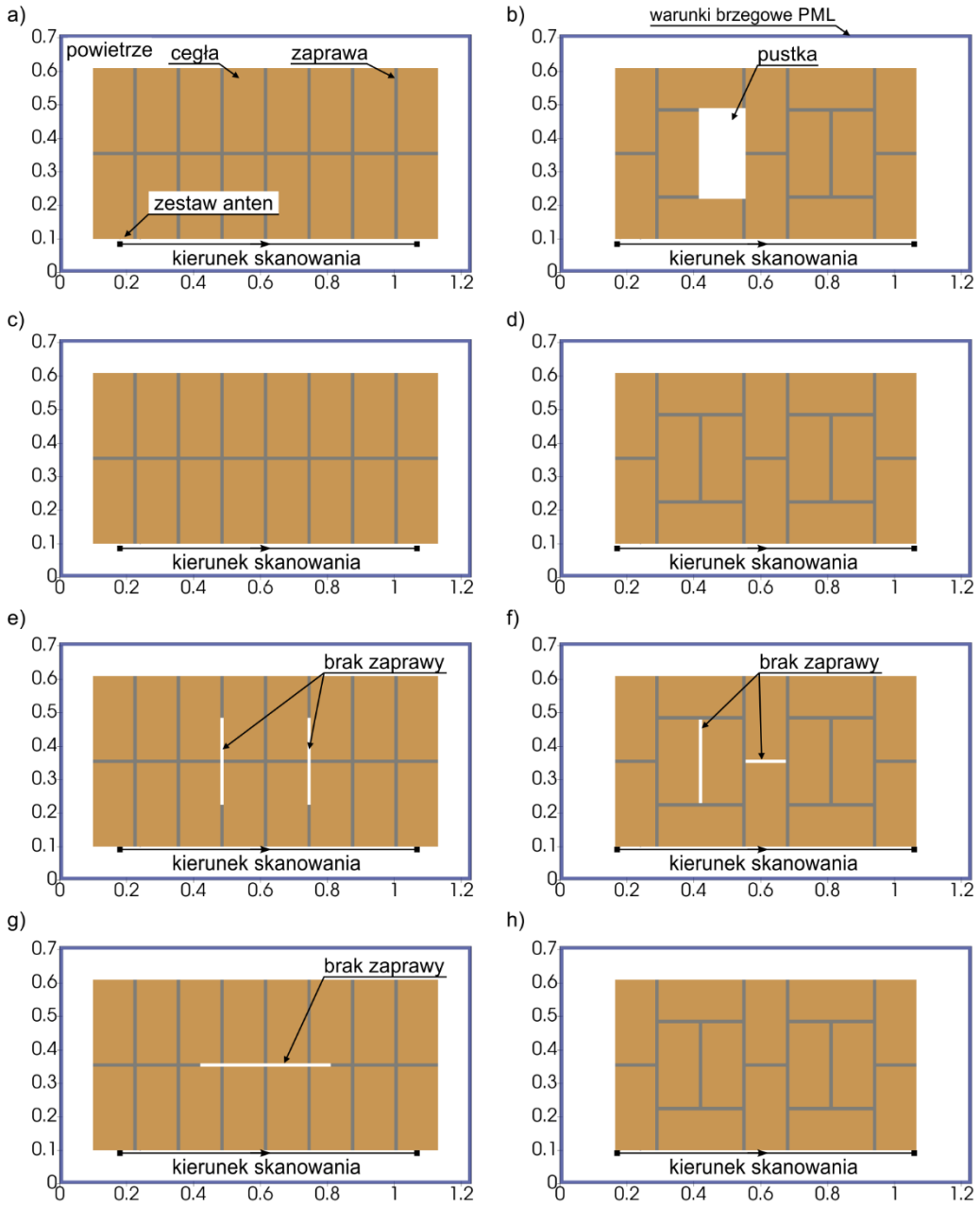
6.2.2. Analizy numeryczne

Analizę numeryczną propagacji fal elektromagnetycznych w obiekcie badawczym przeprowadzono za pomocą oprogramowania gprMax [146]. Obliczenia przeprowadzono na modelu 3D oraz dla kilku modeli 2D. Zaletą modelu 3D jest stworzenie jednej geometrii i przeprowadzanie obliczeń na wyznaczonych trasach. W przypadku obliczeń 2D należy wykonać dla każdej trasy skanowania osobny model numeryczny, co w przypadku rozważanego obiektu badawczego skutkowało powstaniem ośmiu niezaleznych modeli numerycznych, odpowiadającym ośmiu kolejnym warstwom muru. Geometria wszystkich modeli 2D została przedstawiona na rys. 6.29. Obliczenia prowadzono jako pomiary podłużne, zgodnie z trasą zaznaczoną na rys. 6.29. Całkowity obszar obliczeniowy pojedynczego modelu 2D, o wymiarach 123 cm × 71 cm został podzielony siatką o wymiarze 1 mm × 1 mm.

Model trójwymiarowy został zbudowany w sposób, który uwzględnia otoczenie obiektu. W modelu zdefiniowano płytę betonową, na której został ustawiony mur oraz warstwę styroduru, która oddzielała murek od płyty betonowej. Model został przedstawiony na rys. 6.30. Uszkodzenia w postaci braku cegły i zaprawy zadano w modelu zgodnie z ich położeniem w modelu 2D (por. rys. 6.29). Przeprowadzono obliczenia podłużne na każdej z ośmiu warstw oraz pomiary poprzeczne co 1 cm, w celu wykonania tomografii. Całkowity obszar obliczeniowy o wymiarach 143 cm × 91 cm × 80 cm został podzielony siatką o wymiarach 2.5 mm × 2.5 mm × 2.5 mm. Parametry materiałowe zostały przyjęte zgodnie z wynikami pomiarów doświadczalnych. Wartość

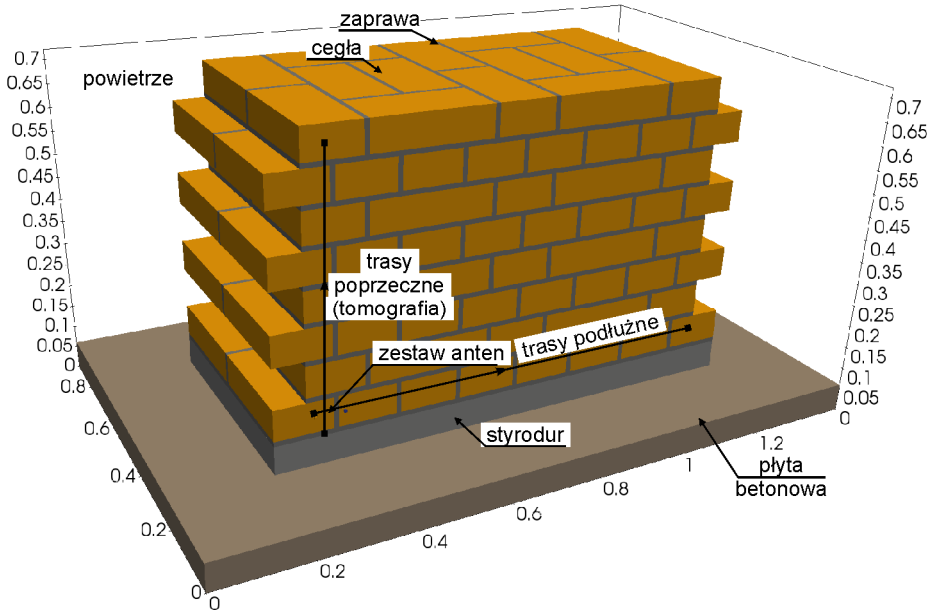
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

przenikalności elektrycznej cegły została określona jako $\varepsilon_r = 6.8$, a przewodność cegły przyjęto jako $\sigma = 0.02$ S/m. Dla zaprawy przyjęto wartość $\varepsilon_r = 5.0$ i $\sigma = 0.02$ S/m. Źródło imitujące sygnał generowany przez antenę GPR zostało przyjęte jako funkcja Rickera z częstotliwością środkową 2 GHz. Krok czasowy został wybrany automatycznie na podstawie warunku CFL. Na brzegach modelu FDTD ustawiono warunki brzegowe typu PML. Odległość między anteną nadawczą i odbiorczą w modelu została ustalona jako 6 cm.



Rys. 6.29. Geometria modelu 2D dla warstwy: a) pierwszej, b) drugiej, c) trzeciej, d) czwartej, e) piątej, f) szóstej, g) siódmej, h) ósmej

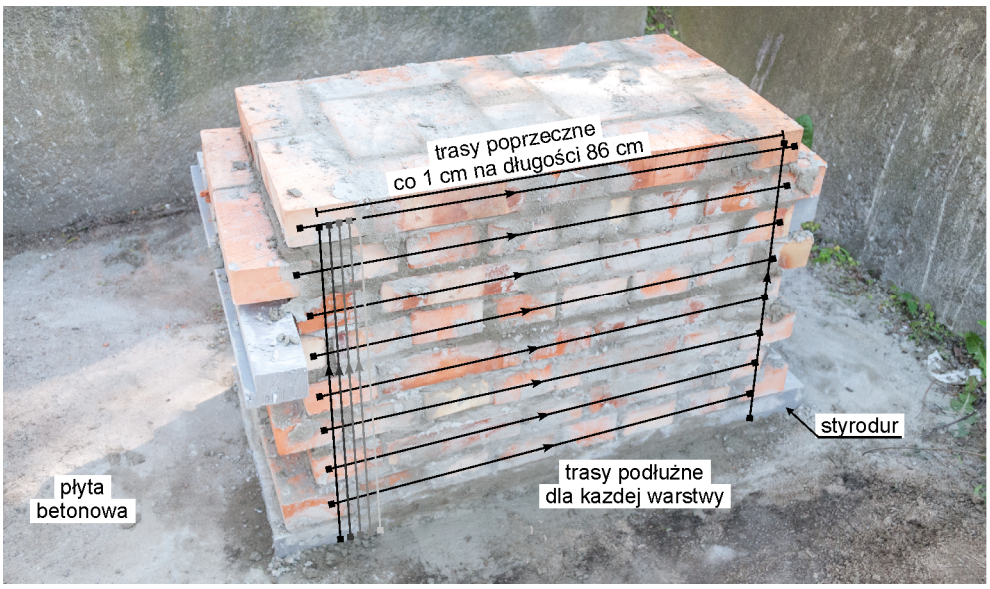
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 6.30. Geometria modelu 3D

6.2.3. Badania doświadczalne

Badania wykonywano rejestrując sygnały długości 32 ns, 1024 próbki/skan i zapisując pojedynczą trasę co 10 mm. Na murku przeprowadzono skany podłużne, w celu wykrycia uszkodzeń poszczególnych warstw cegieł. 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. Rozkład tras przedstawiono na rys. 6.31.



Rys. 6.31. Obiekt badawczy z zaznaczonymi trasami skanowania

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

6.2.4. Wyniki

6.2.4.1. Profilowanie podłużne

W wyniku przeprowadzonych analiz numerycznych uzyskano szesnaście map georadarowych, które zostały przedstawione na rys. 6.32 do 6.39. Na każdym rysunku zostały zestawione mapy obliczone dla modelu 2D i 3D w obrębie jednej warstwy. Pierwszą zauważalną różnicą, jest fakt, iż na radargramach z modelu 3D pojawiają się dyfrakcje, których nie ma na mapach georadarowych z modelu 2D. Dzieje się tak, ze względu na fakt, iż fala rozchodząc się sferycznie w murze odbija się od wszystkich źródeł dyfrakcji, nie tylko w obrębie jednej warstwy. Ze względu na niewielką wysokość każdej warstwy (6.5 cm) w stosunku do grubości muru, odbicia pojawiają się jedynie z nieznacznym opóźnieniem, wręcz niezauważalnym. Można stwierdzić, iż w przypadku konstrukcji murowych modelowanie 3D jest dokładniejsze, gdyż może ujawniać odbicia z sąsiadujących warstw.

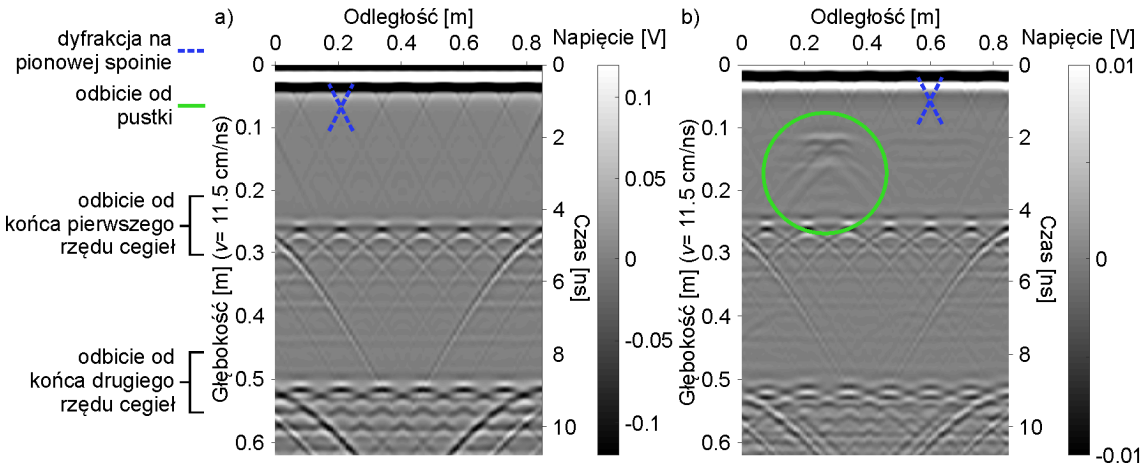
W pierwszej warstwie dla modelu 2D (rys. 6.32a) widoczne są tylko liniowe dyfrakcje na pionowych spoinach oraz odbicia od końca pierwszego i drugiego rzędu cegieł. Dla modelu 3D (rys. 6.32b) widoczne jest dodatkowo hiperboliczne odbicie od pustki powietrza umiejscowionej w drugiej warstwie cegieł (por. rys. 6.29b). W drugiej warstwie dla modelu 2D (rys. 6.33a) widoczne są odbicia podłużne od końca pierwszego rzędu cegieł i delikatne charakterystyczne odbicie w kształcie litery „X”. Siła odbicia zależy od różnicy między wartościami przenikalności cegieł i zaprawy. Mapa uzyskana z obliczeń modelu 3D (rys. 6.33b) jest bardzo podobna do mapy obliczonej na modelu 2D (rys. 6.33a). Numeryczne radargramy dla trzeciej warstwy murku (rys. 6.34) są bardzo podobne do tych z pierwszej warstwy (patrz rys. 6.32), gdzie mapa z modelu 3D (rys. 6.34b) ukazuje odbicie od pustki powietrznej z drugiej warstwy. W czwartej nieuszkodzonej warstwie (rys. 6.35), mapy z modeli 2D i 3D są do siebie porównywalne, z tym wyjątkiem iż w modelu 3D (rys. 6.35b) widać dodatkowo podłużne odbicie od końca pierwszego rzędu cegieł z dolnej i górnej warstwy. W piątej, uszkodzonej warstwie radargramy obliczone dla modelu 2D (rys. 6.36a) oraz 3D (rys. 6.36b) ujawniły hiperboliczne odbicia sugerujące, iż możliwe jest wykrycie defektu w postaci braku zaprawy. 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. Dla siódmej warstwy, mapy z modelu 2D (rys. 6.38a) oraz 3D

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

(rys. 6.38b) są do siebie podobne i pokazują podłużne mocne odbicie wskazujące na brak spoiny. W ósmej warstwie radargram z modelu 2D (rys. 6.39a) pozostaje bez zmian w stosunku do warstw z tym samym układem cegieł. Natomiast mapa dla modelu 3D (rys. 6.39b) ukazuje podłużne odbicie od defektu z warstwy siódmej.

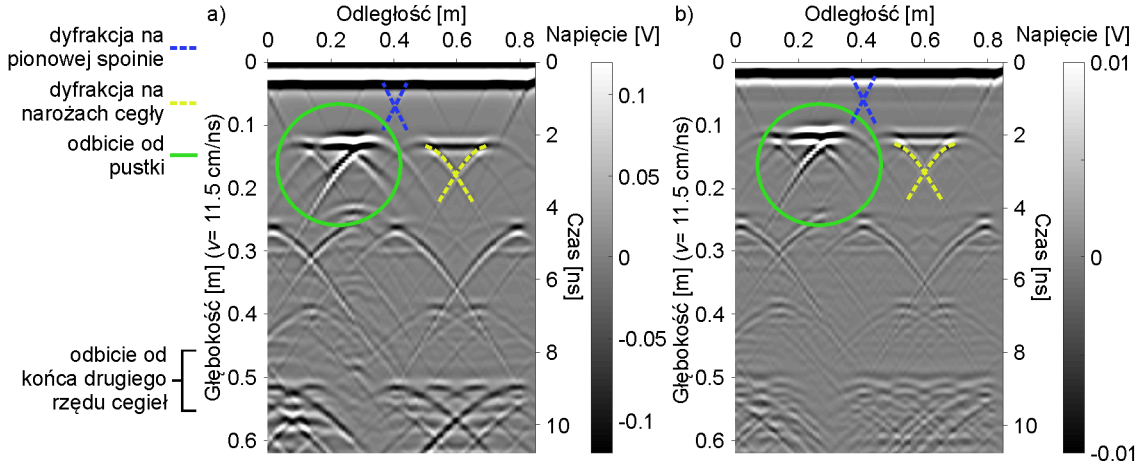
Ponadto na każdej numerycznej mapie georadarowej (rys. 6.32 – 6.39) widoczne są liniowe dyfrakcje na pionowych spoinach, zaznaczone na rysunkach za pomocą niebieskiej przerywanej linii. Są bardzo mało widoczne, podobnie jak w pomiarach doświadczalnych, ze względu na małą różnicę w wartościach przenikalności cegły i zaprawy. Dodatkowo dla warstw drugiej (rys. 6.33), czwartej (rys. 6.35), szóstej (rys. 6.37) i ósmej (rys. 6.39) widoczne są charakterystyczne odbicia w kształcie litery „X", które zostały zaznaczone na rysunkach żółtą przerywaną krzywą.

Porównując oba modele 2D oraz 3D należy podkreślić, iż model trójwymiarowy traktuje konstrukcję całościowo, przez co ujawniane są takie odbicia, które mogą występować w pomiarach doświadczalnych. Okazuje się, że odbicia z jednej warstwy mogą pojawiać się na radargramie z innej warstwy. Niestety do wad modelu 3D należy zaliczyć czas obliczeń, który jest znacznie dłuższy niż w przypadku modeli 2D. Można zwiększać rozmiar siatki Yee przy dyskretyzacji układu, jednakże wtedy ryzykuje się gorszym odwzorowaniem cegieł i możliwością pojawienia się numerycznej dyspersji. Do zalet modeli 2D należy zaliczyć czas obliczeń oraz czas potrzebny na stworzenie modelu, który jest znacznie krótszy niż dla modelu 3D.

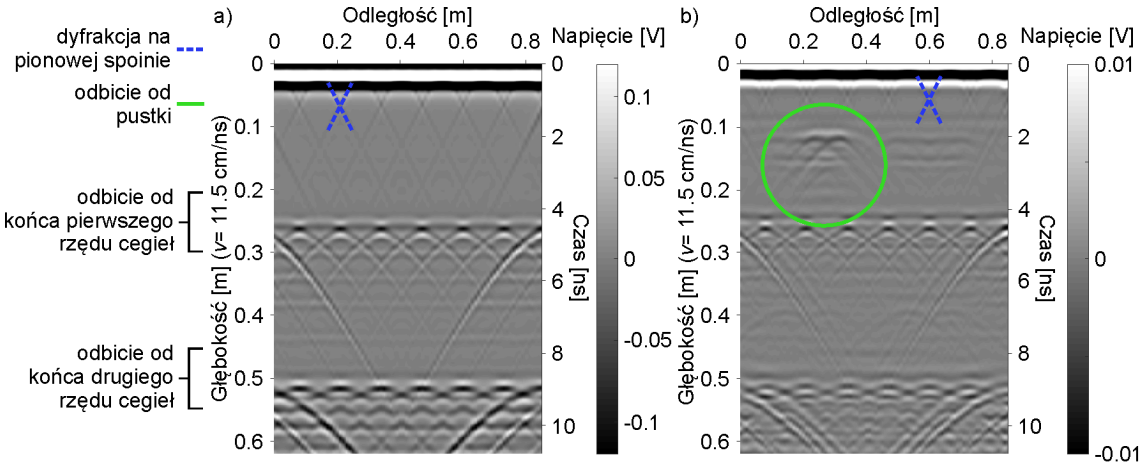


Rys. 6.32. Numeryczne mapy georadarowe dla pierwszej warstwy: a) model 2D, b) model 3D

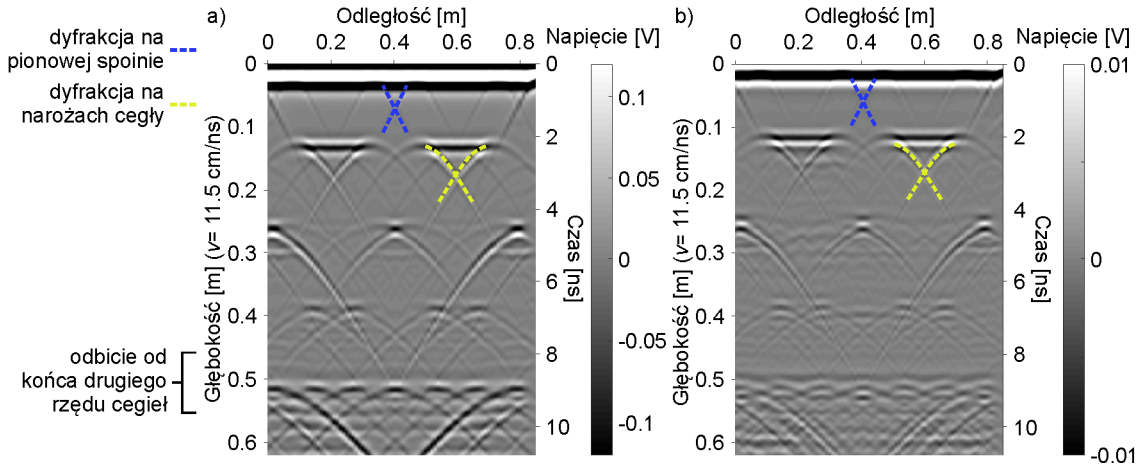
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 6.33. Numeryczne mapy georadarowe dla drugiej warstwy: a) model 2D, b) model 3D

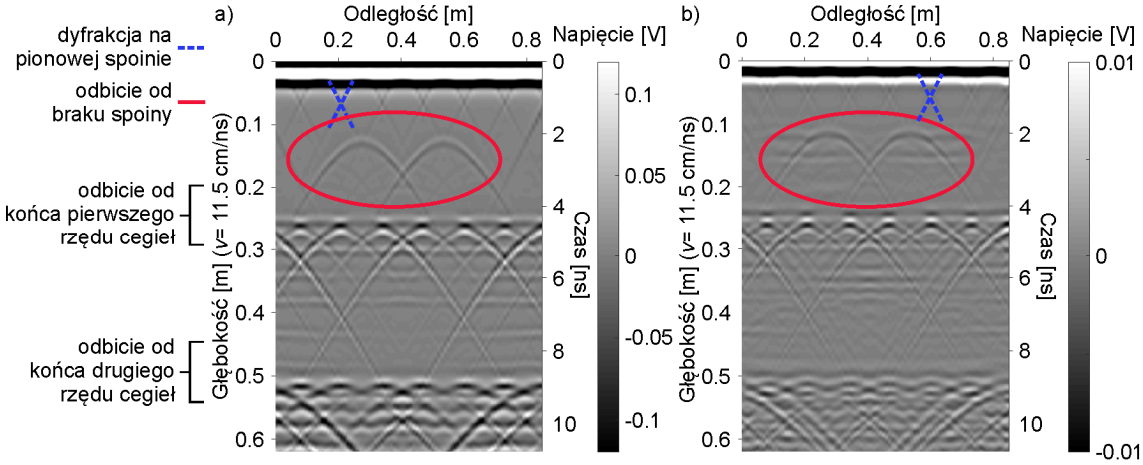


Rys. 6.34. Numeryczne mapy georadarowe dla trzeciej warstwy: a) model 2D, b) model 3D

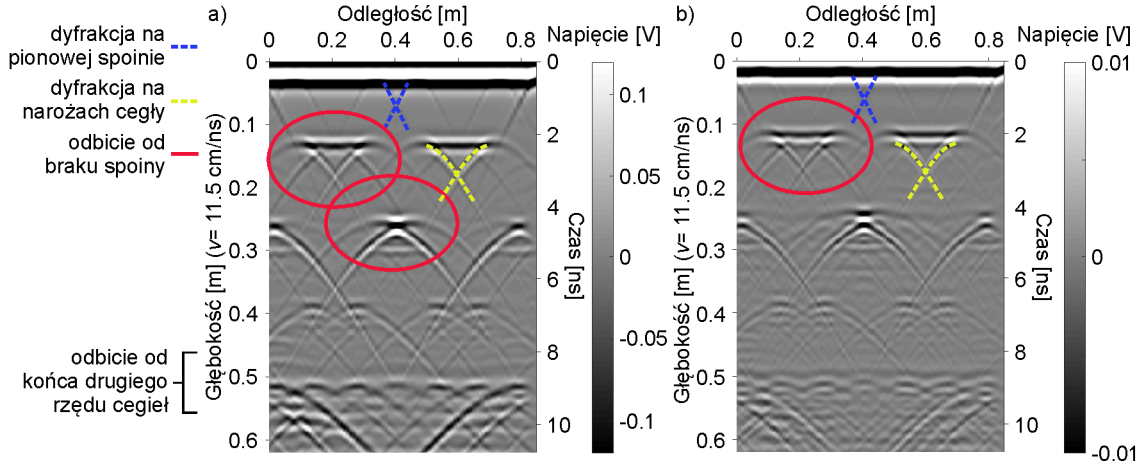


Rys. 6.35. Numeryczne mapy georadarowe dla czwartej warstwy: a) model 2D, b) model 3D

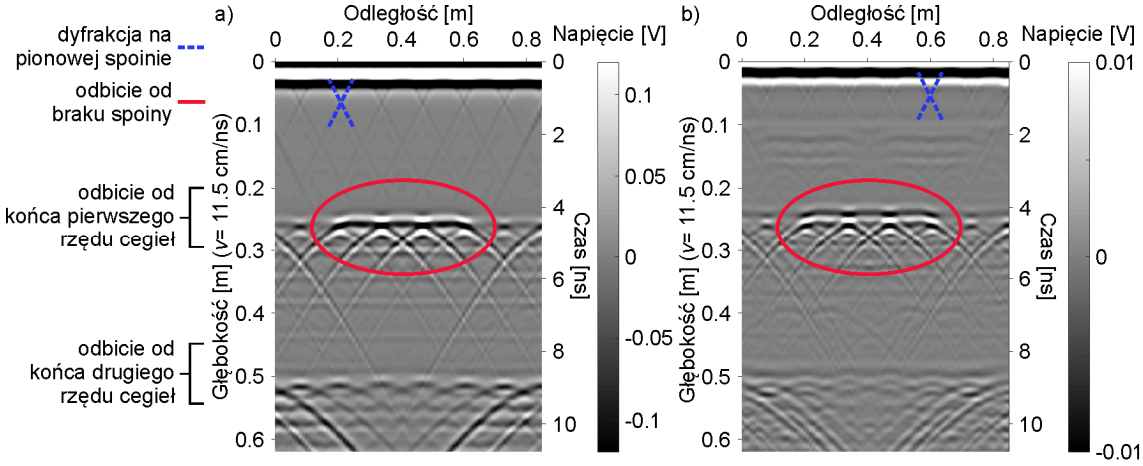
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 6.36. Numeryczne mapy georadarowe dla piątej warstwy: a) model 2D, b) model 3D

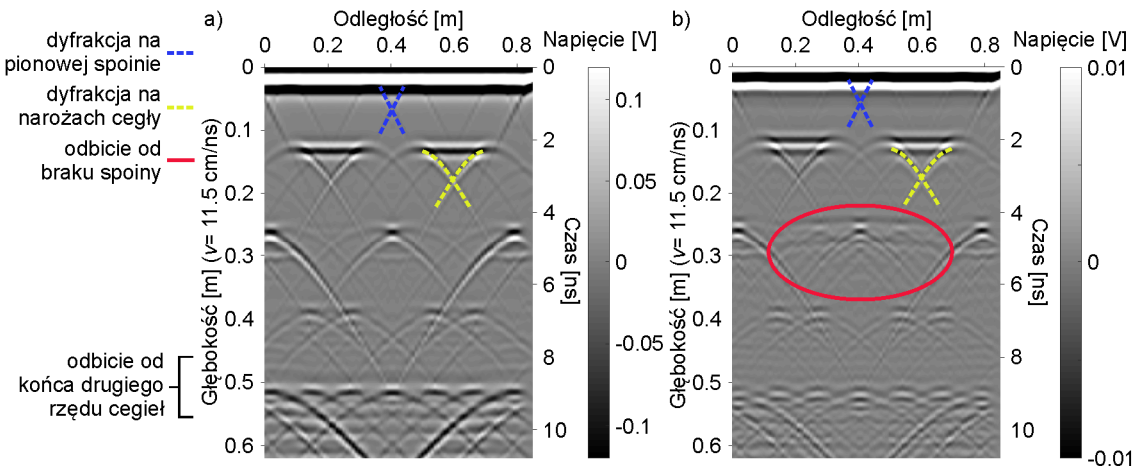


Rys. 6.37. Numeryczne mapy georadarowe dla szóstej warstwy: a) model 2D, b) model 3D



Rys. 6.38. Numeryczne mapy georadarowe dla siódmej warstwy: a) model 2D, b) model 3D

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 6.39. Numeryczne mapy georadarowe dla ósmej warstwy: a) model 2D, b) model 3D

Podstawowym celem przeprowadzonych badań doświadczalnych była ocena możliwości wykrycia zadanych defektów w postaci braku cegły, bądź zaprawy. Jednakże w celu dokładnego zidentyfikowania położenia danego defektu konieczna jest znajomość wartości prędkości propagacji fali elektromagnetycznej. W związku z tym, w pierwszym etapie, przeprowadzono analizy mające na celu oszacowanie prędkości fali elektromagnetycznej. Na rys. 6.40 – 6.47 przedstawiono uzyskane z pomiarów podłużne mapy georadarowe dla każdej z ośmiu warstw, poddane analizie oszacowania prędkości wraz ze zdjęciem danej warstwy, z występującymi w niej uszkodzeniami. Można zauważyć, iż dyfrakcje na pionowych spoinach (por. rys. 5.8) nie są wystarczająco widoczne na każdej mapie georadarowej. Dzieje się tak, prawdopodobnie ze względu na bardzo małą różnicę w parametrach elektrycznych między cegłą a zaprawą. Jednakże dla kilku dyfrakcji udało się dopasować linię prostą uzyskując wartość prędkości dla poszczególnych cegieł. Wartość średnia dla otrzymanych wyników aproksymacji wynosi v = 12 cm/ns. Dla sprawdzenia uzyskanych wyników posłużono się najłatwiejszą metodą ustalania prędkości tj. „*depth to known reflector method*” [130]. Na każdej mapie georadarowej (rys. 6.40 – 6.47) zaznaczono podłużne odbicia od końca pierwszego i drugiego rzędu cegieł. Ze względu na fakt, iż fala propaguje w całym murze, a nie tylko w jednej warstwie odbicie od końca pierwszego rzędu cegieł pojawia się również dla warstw cegieł, gdzie w rzeczywistości wyraźnej granicy między cegłami brakuje. Na podstawie analizy prędkości uzyskanej z odbić od końca warstw, stwierdzono, iż średnia wartość prędkości wyniosła v = 11.5 cm/ns. Przy każdej mapie przedstawiono wykres prędkości od długości mapy georadarowej, który pokazuje zmienność prędkości po długości muru. Kolejną metodą do oszacowania prędkości w murze była analiza kształtu

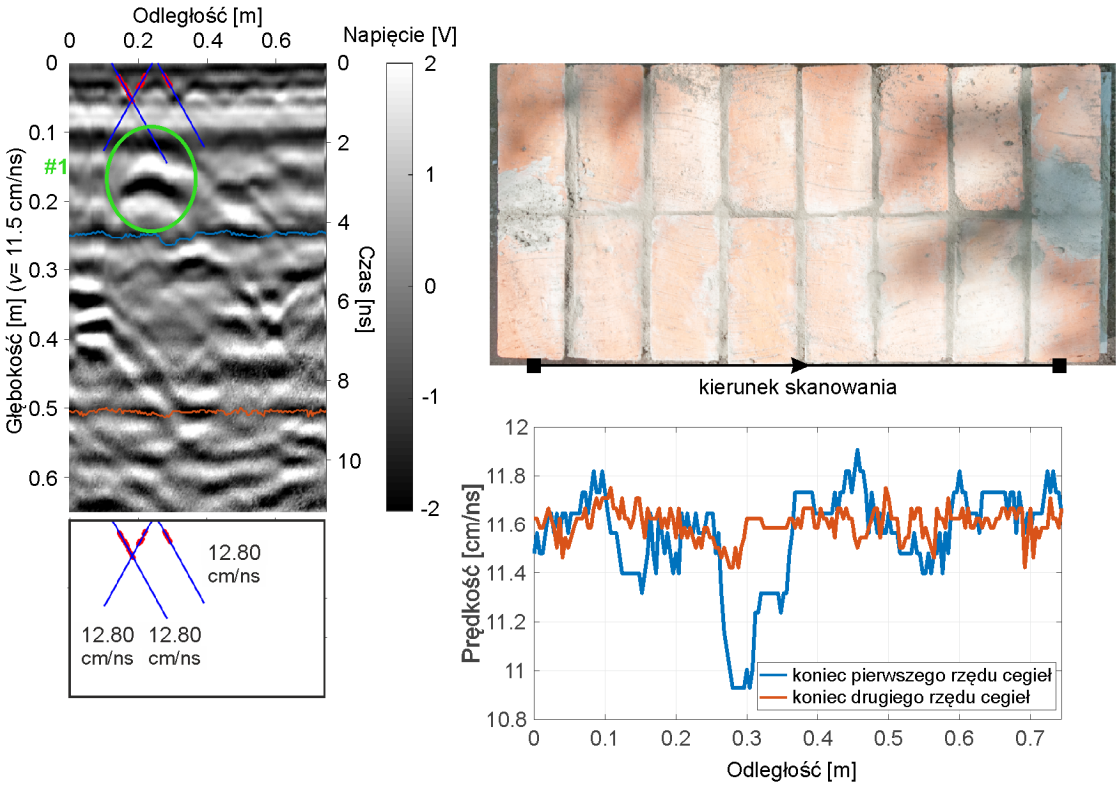
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

„X” opisanego w rozdziale 5.3.2. Charakterystyczny kształt zauważono dla warstwy drugiej (rys. 6.41), czwartej (rys. 6.43) i szóstej (rys. 6.45). Wszystkie te dyfrakcje, poprzez nierównomierny kształt pokazują silną zmienność prędkości dla analizowanych cegieł. Tylko jedno odbicie (#9) w warstwie szóstej (rys. 6.45) pokazuje, iż prędkość jest stała i możliwe jest dopasowanie hiperboli. W związku z tym dokonano ekstrakcji ramion hiperboli za pomocą metody jednej krzywej i przeprowadzono aproksymację metodą najmniejszych kwadratów używając zależności (5.19). W wyniku przeprowadzonego dopasowania ramion hiperboli uzyskano wartość średnią prędkości v = 10.13 cm/ns.

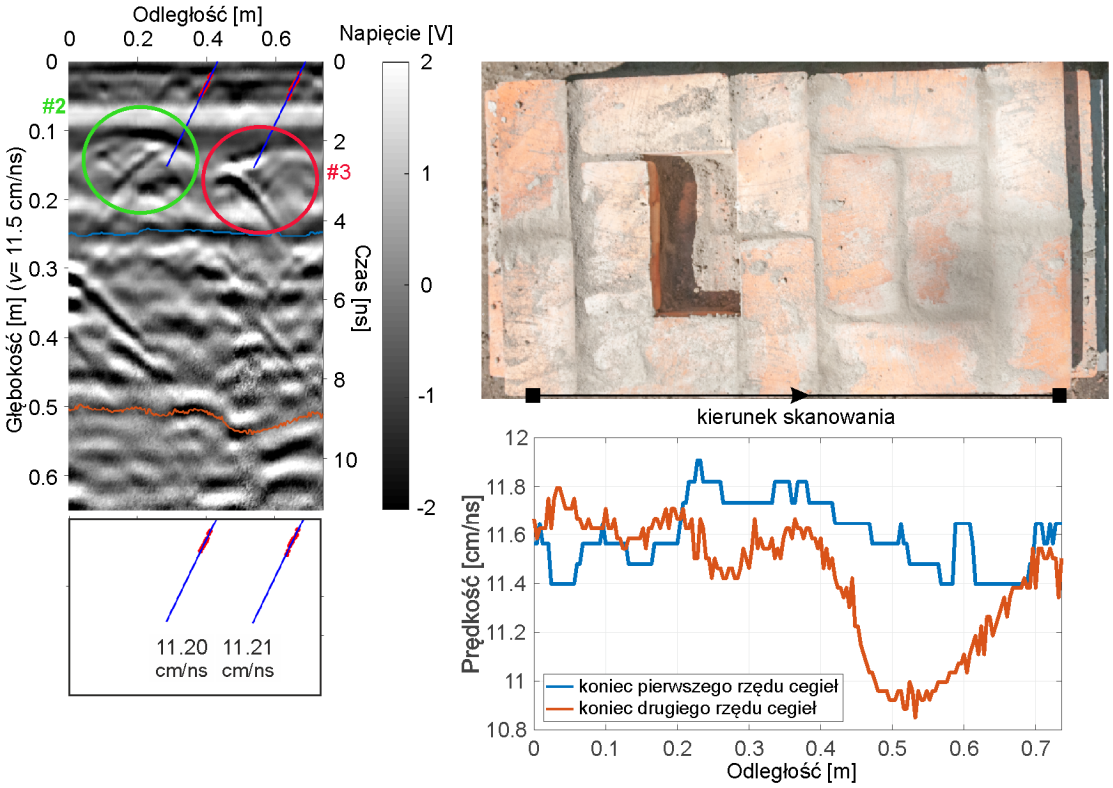
Po ustaleniu średniej wartości prędkości jako v = 11.5 cm/ns przeanalizowano mapy georadarowe pod kątem możliwości wykrycia uszkodzeń. Dla pierwszej warstwy (rys. 6.40) widoczne jest hiperboliczne odbicie od pustki powietrznej z drugiej warstwy oznaczone jako #1. Przy drugiej warstwie (rys. 6.41) odbicie od pustki powietrznej (#2) nie różni się znacznie od odbicia od naroży cegły (#3). Patrząc jedynie na ten skan, nie byłoby możliwe ustalenie położenia uszkodzenia. Trzecia warstwa (rys. 6.42) ukazuje mocne odbicie od pustki powietrznej (#4). Dla czwartej warstwy (rys. 6.43) można zauważyć charakterystyczne odbicia od naroży cegły (#5 i #6), które ukazują, iż prędkość w cegle poprzedzającej odbicie jest zmienna. W piątej warstwie (rys. 6.44) widoczne jest jedno silne nietypowe odbicie (#7), które może świadczyć o końcu uszkodzenia w postaci braku zaprawy. Jednakże nie wykryto odbicia od końca drugiego defektu zadanego w tej samej warstwie. Szósta warstwa (rys. 6.45) ukazuje charakterystyczne odbicia od naroży cegły (#8 i #9). Charakterystyczny kształt „X” oznaczony jako #9 pozwolił na identyfikację prędkości. Natomiast odbicie opisane jako #8 ukazuje silną zmienność prędkości w cegle poprzedzającej to odbicie. Dla siódmej warstwy (rys. 6.46) wyraźne jest odbicie oznaczone jako #10, które pojawia się również na warstwie ósmej (rys. 6.47) opisane jako #11. Odbicia #10 i #11 mogą być zniekształconym odbiciem od naroży cegły w warstwie ósmej. Jednakże w warstwie ósmej brakuje tego charakterystycznego odbicia po lewej stronie.

Podsumowując, dzięki dwóm autorskim metodom identyfikacji prędkości (por. rozdziały 5.3.1 oraz 5.3.2) możliwe było oszacowanie wartości prędkości fali elektromagnetycznej w murze. Dodatkowo wartość prędkości została potwierdzona przez czas odbicia od końców pierwszego i drugiego rzędu cegieł. Doświadczalne podłużne mapy georadarowe pozwoliły w sposób jednoznaczny na wykrycie jedynie braku cegły. Pozostałe uszkodzenia pozostały niewykryte.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

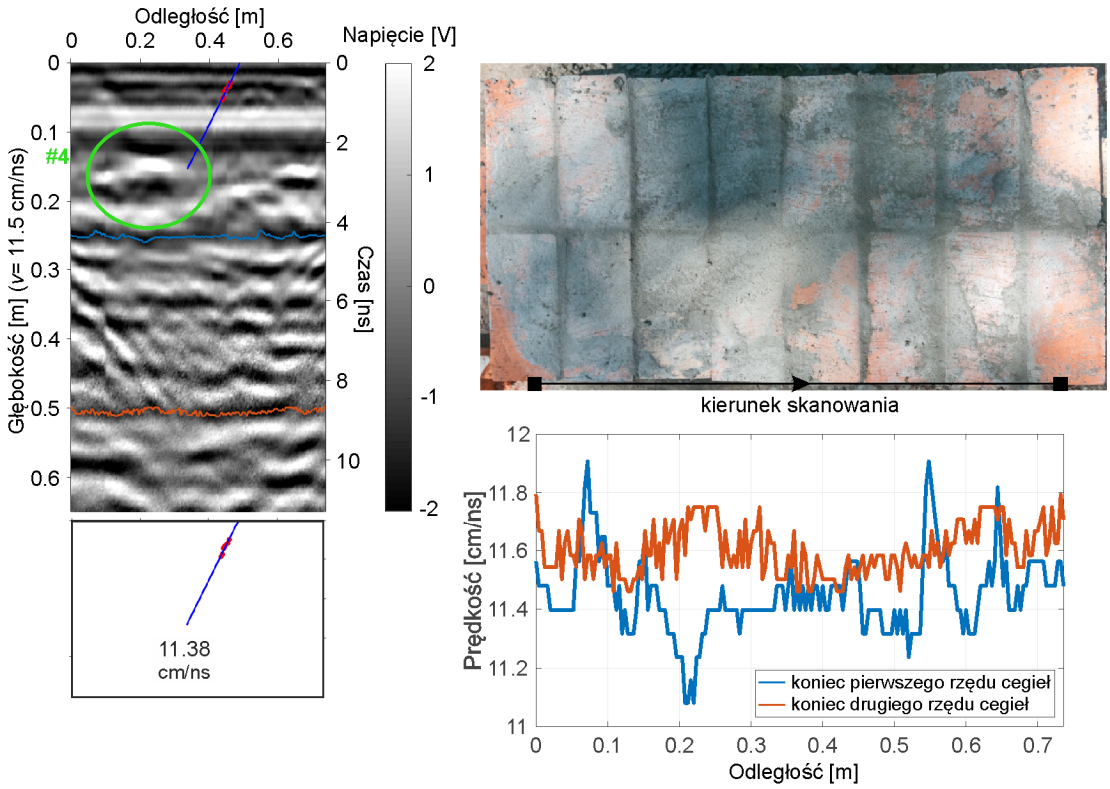


Rys. 6.40. Wynik pomiaru georadarowego dla pierwszej warstwy

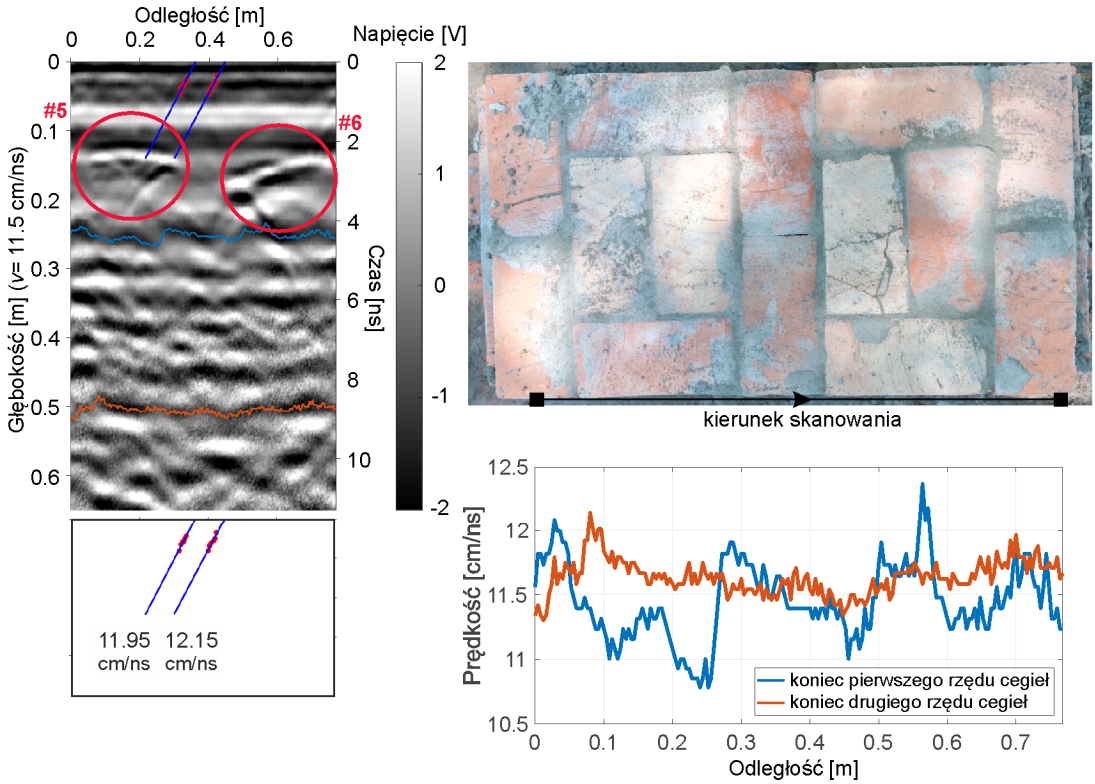


Rys. 6.41. Wynik pomiaru georadarowego dla drugiej warstwy

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

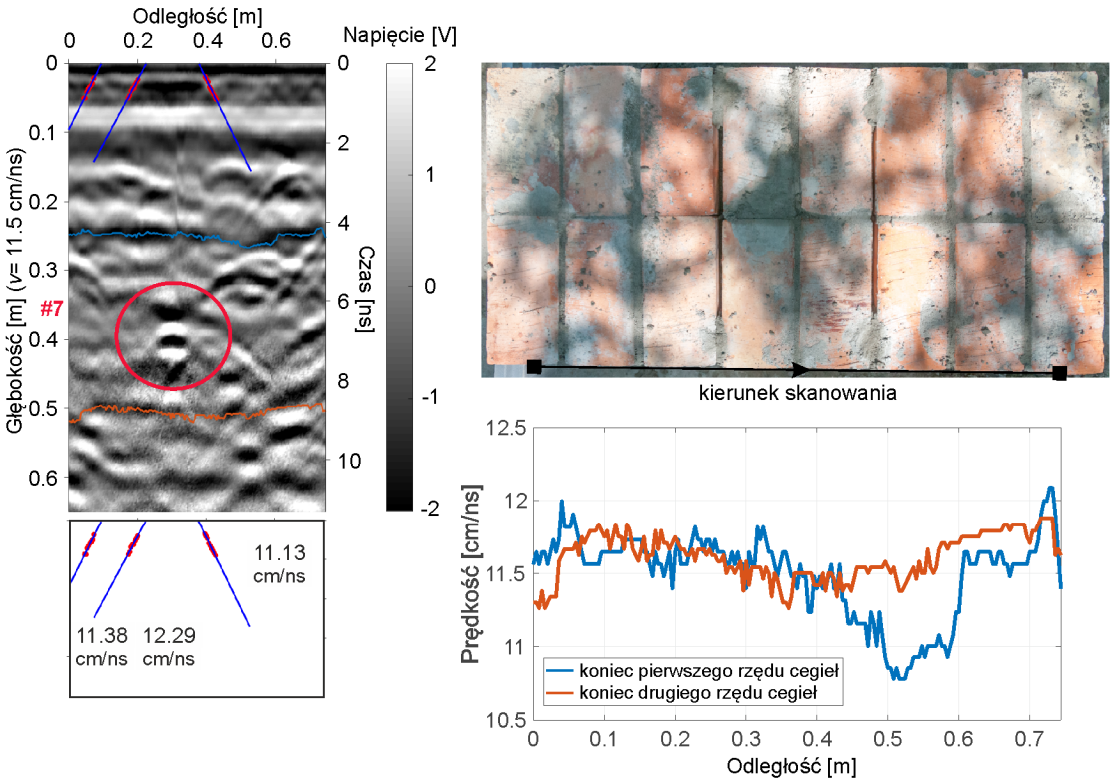


Rys. 6.42. Wynik pomiaru georadarowego dla trzeciej warstwy

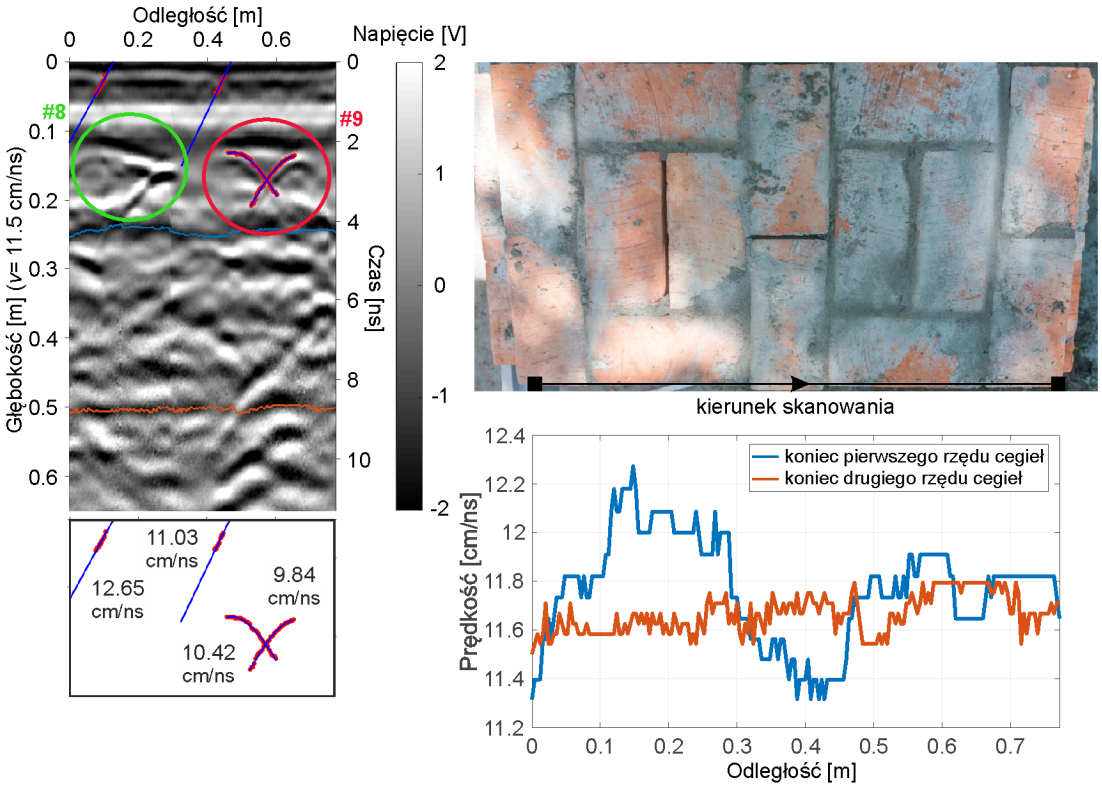


Rys. 6.43. Wynik pomiaru georadarowego dla czwartej warstwy

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

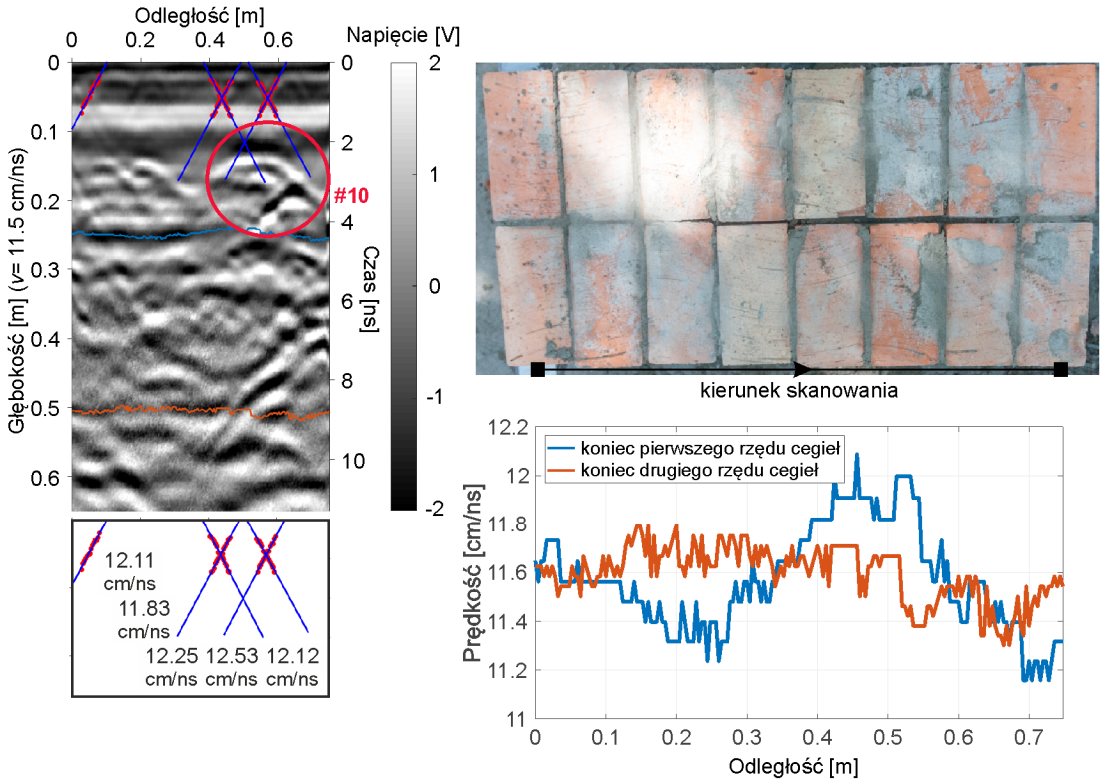


Rys. 6.44. Wynik pomiaru georadarowego dla piątej warstwy

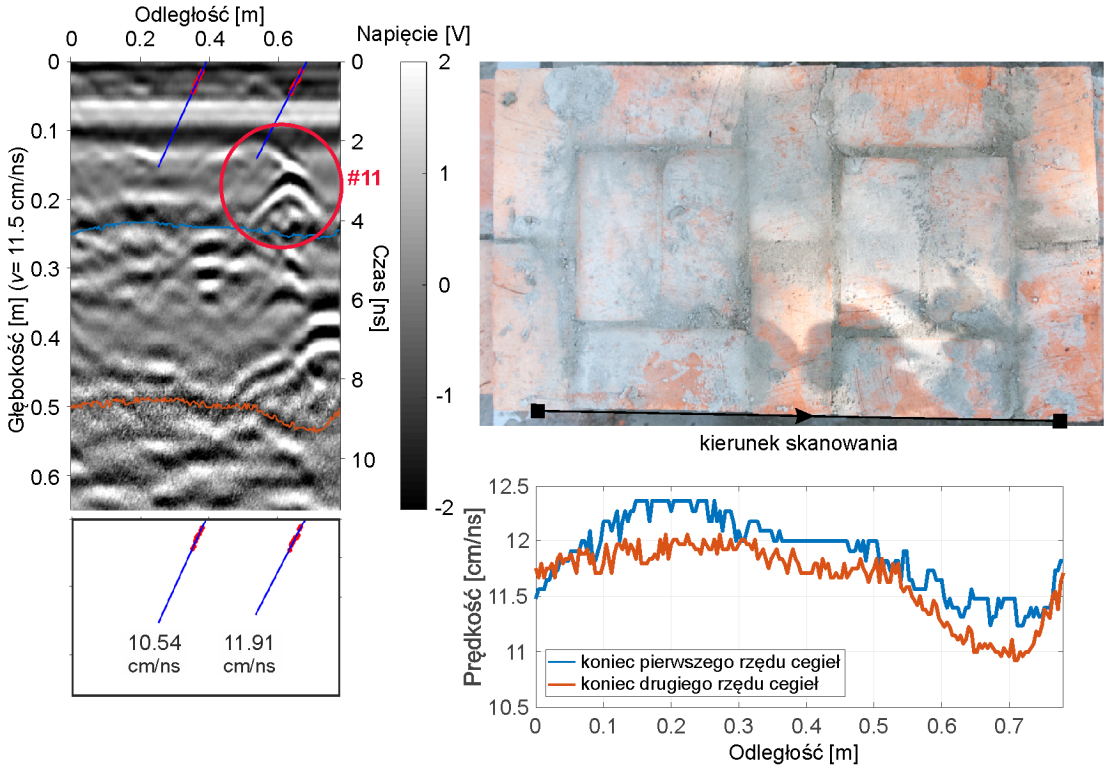


Rys. 6.45. Wynik pomiaru georadarowego dla szóstej warstwy

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 6.46. Wynik pomiaru georadarowego dla siódmej warstwy

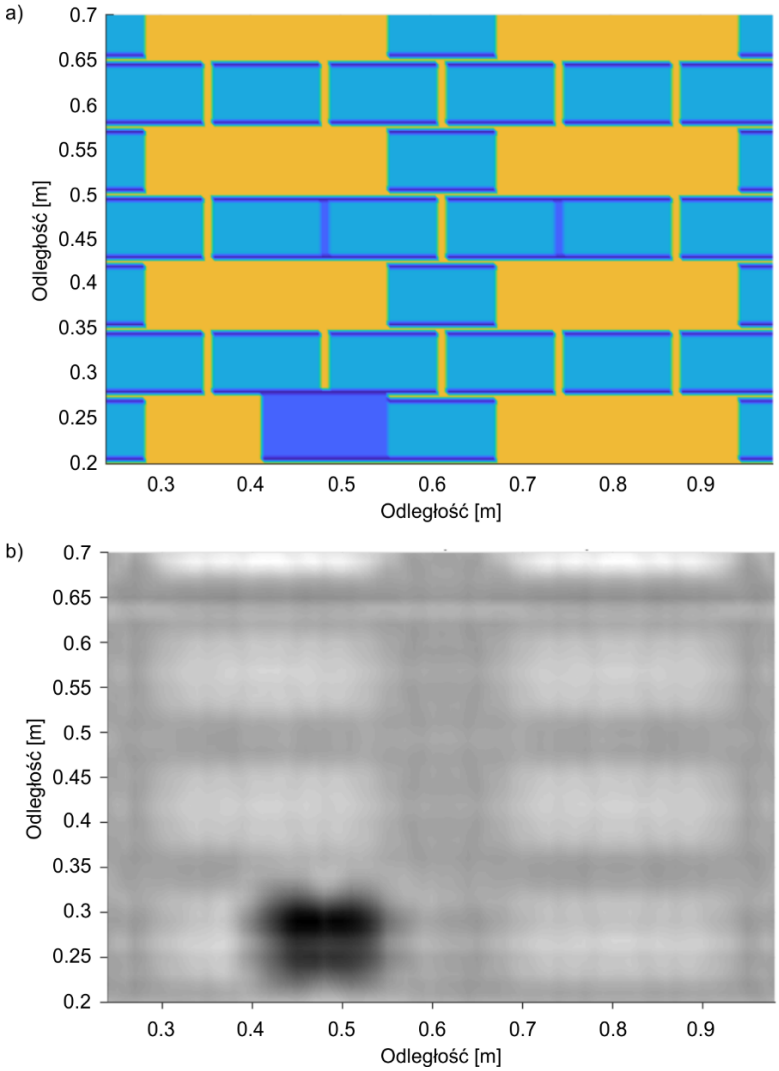


Rys. 6.47. Wynik pomiaru georadarowego dla ósmej warstwy

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

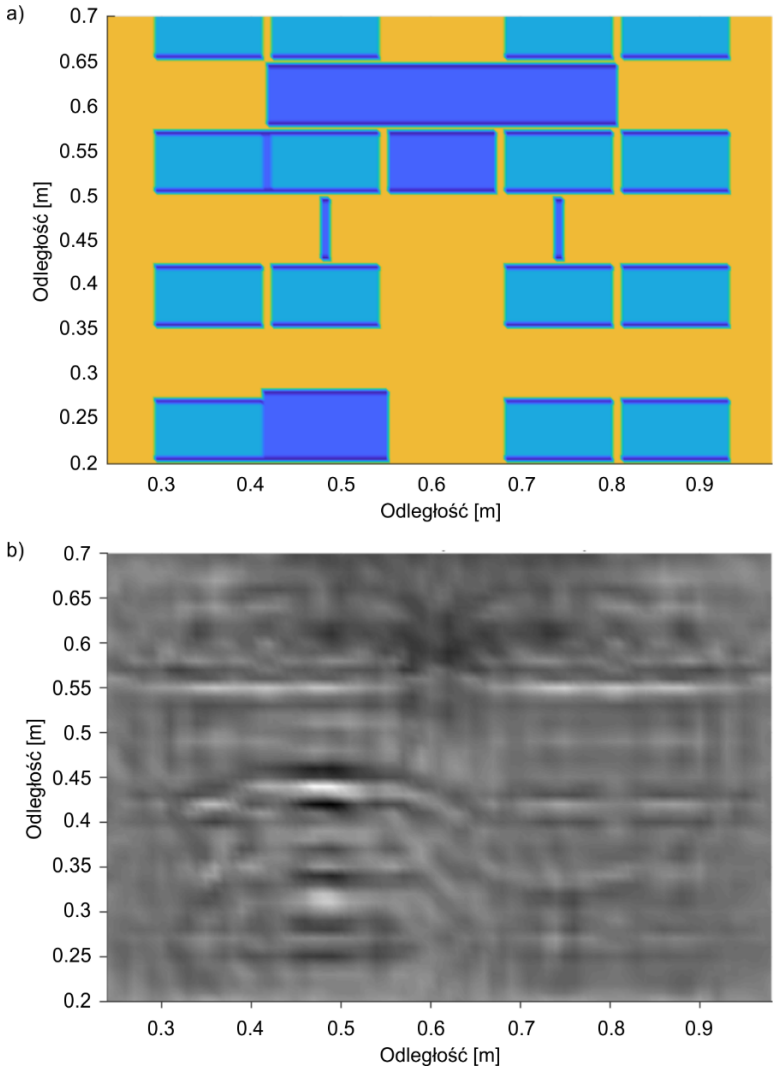
6.2.4.2. Profilowanie poprzeczne

Dla trójwymiarowego modelu numerycznego wykonano symulacje z gęstym profilowaniem. Przeprowadzono obliczenia dla 86 tras poprzecznych, prowadzonych co 1 cm, uzyskując w ten sposób 3825 skanów typu A. Obliczenia trwały 3 miesiące (komputer PC, 4 rdzenie 8 wątków CPU 3.40 GHz, 16 GB pamięci RAM). Na rys. 6.48 oraz 6.49 przedstawiono uzyskane zobrazowania tomograficzne wraz z odpowiadającymi im przekrojami modelu numerycznego. Tomografia na głębokości pustki powietrza (rys. 6.48b) pozwala zidentyfikować odbicie od pustki powietrza (czarny kolor) oraz fragmenty zaprawy (najjaśniejszy szary kolor). Zobrazowania typu C na głębokości końca pierwszego rzędu cegieł (rys. 6.49b) ujawnia jedynie wielokrotne odbicia od brzegów muru, uniemożliwiając detekcję uszkodzeń w postaci braku zaprawy.

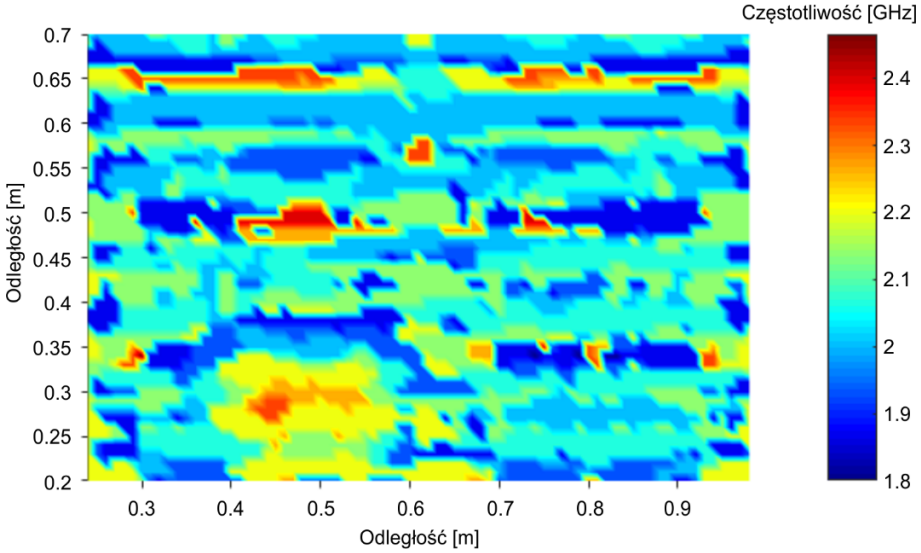


Rys. 6.48. Symulacje numeryczne dla profilowania poprzecznego: a) przekrój przez model, b) numeryczna tomografia na głębokości pustki powietrza (12 cm)

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

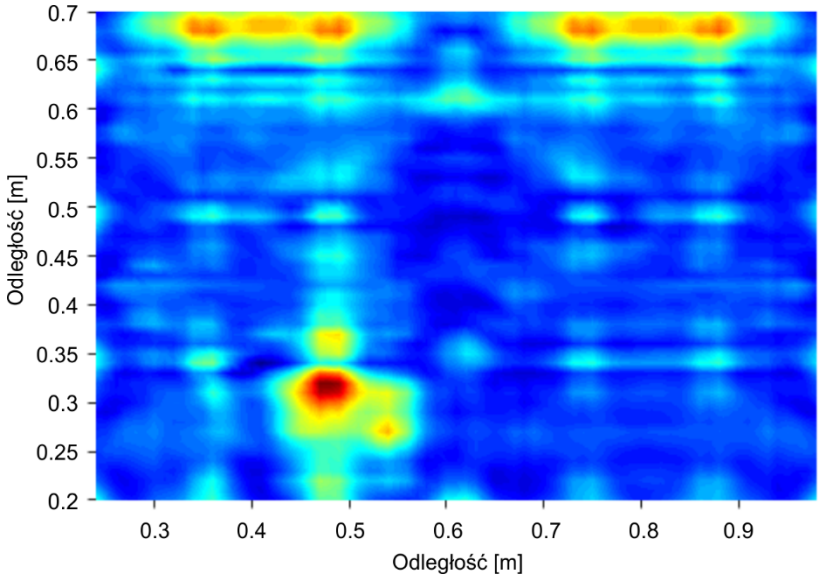


Rys. 6.49. Symulacje numeryczne dla profilowania poprzecznego: a) przekrój przez model, b) numeryczna tomografia na głębokości końca pierwszego rzędu cegieł (25 cm)



Rys. 6.50. Rozkład głównych częstotliwości pojedynczych numerycznych skanów typu A rozłożonych na obszarze skanowania

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



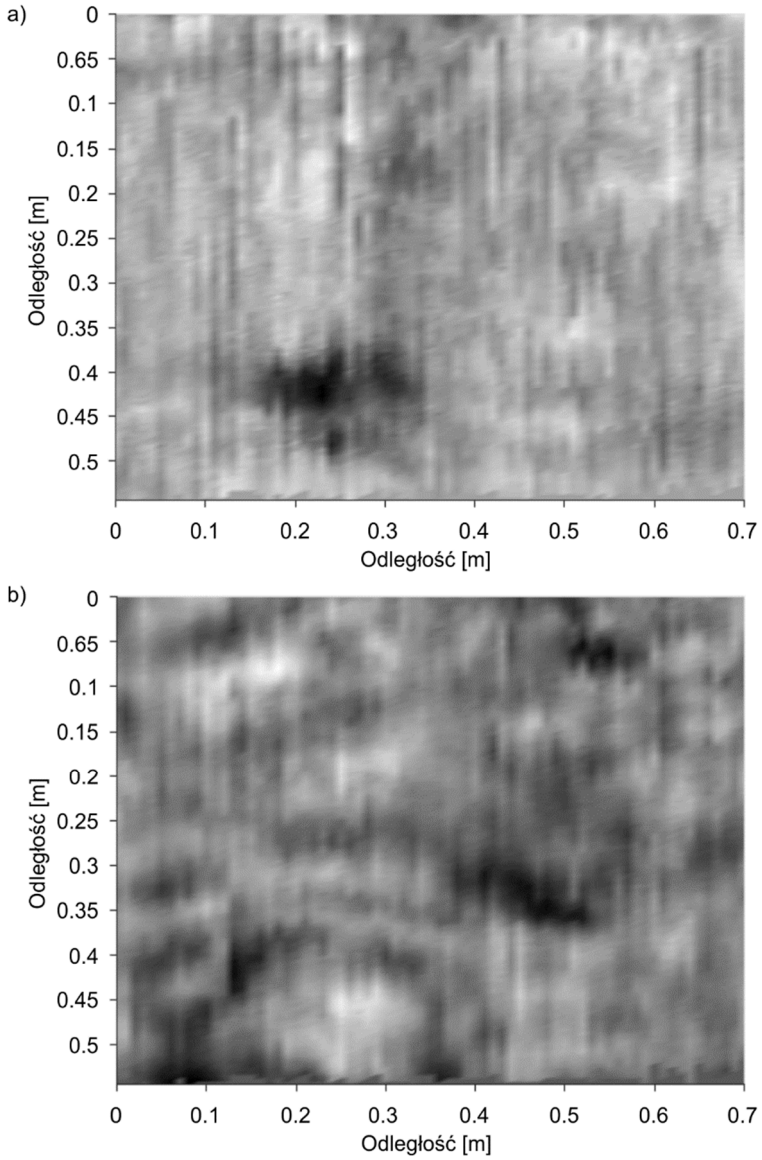
Rys. 6.51. Rozkład wartości RMS pojedynczych numerycznych skanów typu A rozłożonych na obszarze skanowania

Obliczone dane numeryczne zebrano i przeanalizowano pod kątem różnych metod przetwarzania sygnałów. Pierwszym testowanym narzędziem była transformacja Fouriera. Każdą obliczoną trasę georadarową (bez fali wejściowej) poddano transformacji, a następnie zapisano częstotliwość, której znormalizowana amplituda była największa. W ten sposób powstała nowa mapa, która obrazuje główne częstotliwości dla każdego skanu typu A (rys. 6.50). W miejscu braku cegły ujawniają się wyższe częstotliwości. Ponadto w kilku miejscach bez uszkodzeń również pojawiły się wyższe częstotliwości. Drugim narzędziem zastosowanym do analizy zestawu radagramów była wartość skuteczna RMS. Dla każdego skanu typu A obliczono wartość RMS generując w ten sposób nową mapę (rys. 6.51), która wyraźnie ujawnia miejsce uszkodzenia w postaci braku cegły.

Przeprowadzone pomiary doświadczalne, w gęstym profilowaniu co 1 cm (por. rys. 6.31), pozwoliły uzyskać tomografię (zobrazowanie typu C) przeskanowanego obszaru. Na rys. 6.52 przedstawiono dwie tomografie na różnych głębokościach. Rysunek 6.52a pokazuje skan typu C na głębokości pustki powietrznej. Wyraźnie widać ciemniejsze miejsce ilustrujące uszkodzenie muru. Tomografia na głębokości końca pierwszego rzędu cegieł (rys. 6.52b) nie ujawnia żadnych większych anomalii. Widać natomiast wielokrotne odbicia od brzegów konstrukcji.

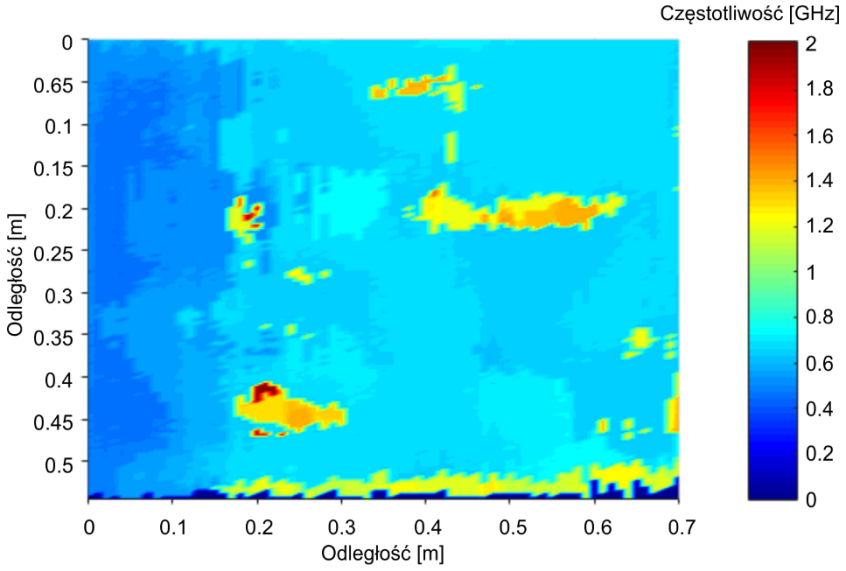
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Podobnie, jak dla danych numerycznych użyto dwóch narzędzi do przetwarzania danych. Mapa przedstawiająca główne częstotliwości (rys. 6.53), uzyskana z transformacji Fouriera dla skanowanego obszaru, ujawnia znacznie mniej miejsc uszkodzeń niż w przypadku danych numerycznych. Należy jednak podkreślić, że obraz ten jest bardziej czytelny, niż ten uzyskany z danych numerycznych. Ponadto ujawniają się obszary o większych częstotliwościach, gdzie nie zostały zadane uszkodzenia. Mapa przedstawiająca wartości RMS dla każdego z pomierzonych skanów typu A (rys. 6.54), nie ujawnia miejsca pustki powietrznej, jak w przypadku symulacji numerycznych. Można się jedynie dopatrzeć wzrostu wartości RMS dla obszaru bez uszkodzeń, tego samego, który ujawnił wzrost częstotliwości (por. rys. 6.53).

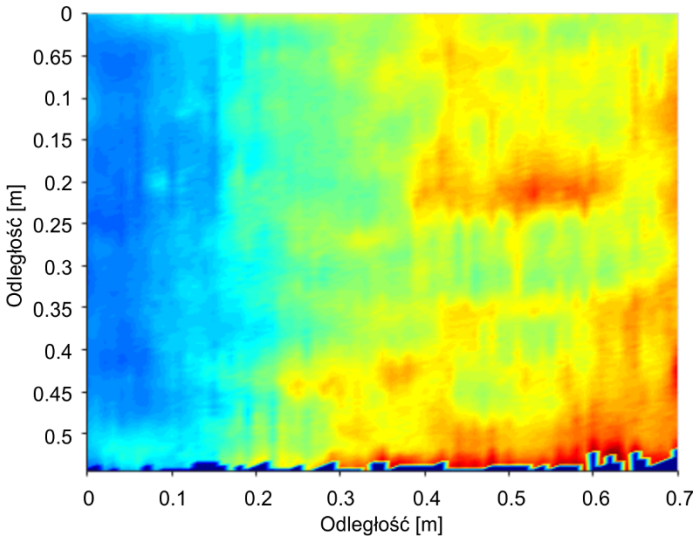


Rys. 6.52. Doświadczalne zobrazowanie tomograficzne: a) na głębokości pustki powietrza (12 cm), b) na głębokości końca pierwszego rzędu cegieł (25 cm)

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 6.53. Rozkład głównych częstotliwości pojedynczych skanów typu A rozłożonych na obszarze skanowania



Rys. 6.54. Rozkład wartości RMS pojedynczych skanów typu A rozłożonych na obszarze skanowania

6.2.5. Podsumowanie

Pomiary doświadczalne przeprowadzone na testowej konstrukcji ceglanej, pozwoliły zidentyfikować prędkość fali elektromagnetycznej w cegle, wykorzystując autorskie modele dyfrakcji, a także sprawdzić możliwości detekcji poszczególnych zadanych uszkodzeń. Symulacje numeryczne przeprowadzono z wykorzystaniem modeli dwu i trójwymiarowych, w celu weryfikacji możliwości wykrycia zadanych uszkodzeń, a także porównania obu sposobów modelowania. Uzyskano tomografię doświadczalną i numeryczną skanowanego obszaru, a także poddano je procesowi przetwarzania danych

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

za pomocą transformacji Fouriera i wartości skutecznej RMS. Na podstawie wykonanych badań można sformułować następujące wnioski:

- Przeprowadzone analizy na danych doświadczalnych pozwoliły uzyskać wartość prędkości propagacji fali elektromagnetycznej w cegle. Wartość ta została określona za pomocą trzech różnych metod. Wartość referencyjna została określona na podstawie odbić od końca pierwszego i drugiego rzędu cegieł. Wyniki aproksymacji punktów dyfrakcji na pionowych spoinach oraz ramion hiperboli tworzących charakterystyczny kształt „X" były bliskie wartości referencyjnej, co potwierdziło słuszność wyprowadzonych zależności.
- Analizując uzyskane skany podłużne dla ośmiu warstw cegieł udało się ustalić jedynie istnienie i położenie pustki powietrznej. Defekty w postaci braku zaprawy pozostały niewykryte.
- Uzyskane skany typu C, również pozwoliły na wykrycie jedynie dużej pustki powietrza. Obiecujące są jednak wyniki głównych częstotliwości dla skanowanego obszaru, które ujawniły uszkodzenia, a także możliwe obszary innych nie zdefiniowanych uszkodzeń. W przypadku analizy wartości RMS, pomimo obiecujących wyników dla danych numerycznych, dane doświadczalne nie ujawniły żadnych uszkodzeń.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

7. Przykłady zastosowania metody georadarowej w diagnostyce konstrukcji

Rozdział poświęcony jest praktycznym zastosowaniom metody georadarowej w diagnostyce obiektów inżynierskich. Pierwsza część rozdziału poświęcona jest diagnostyce konstrukcji żelbetowych, czyli dwóm kładkom dla pieszych nad Pomorską Koleją Metropolitalną w Gdańsku [64, 66–69]. Pomiary były prowadzone w krótkim czasie po zakończeniu budowy i dzięki dostępowi do dokumentacji technicznej, posłużyły jako obiekty pozwalające sprawdzić wypracowane algorytmy. Druga część rozdziału jest poświęcona diagnostyce obiektu zabytkowego, który jest wykonany w konstrukcji ceglanej wzmocnionej elementami żelbetowymi. Badania przeprowadzono na wieży Bazyliki Mariackiej w Gdańsku [109], największym obiekcie sakralnym z cegły w Europie, oraz na filarach wewnątrz kościoła.

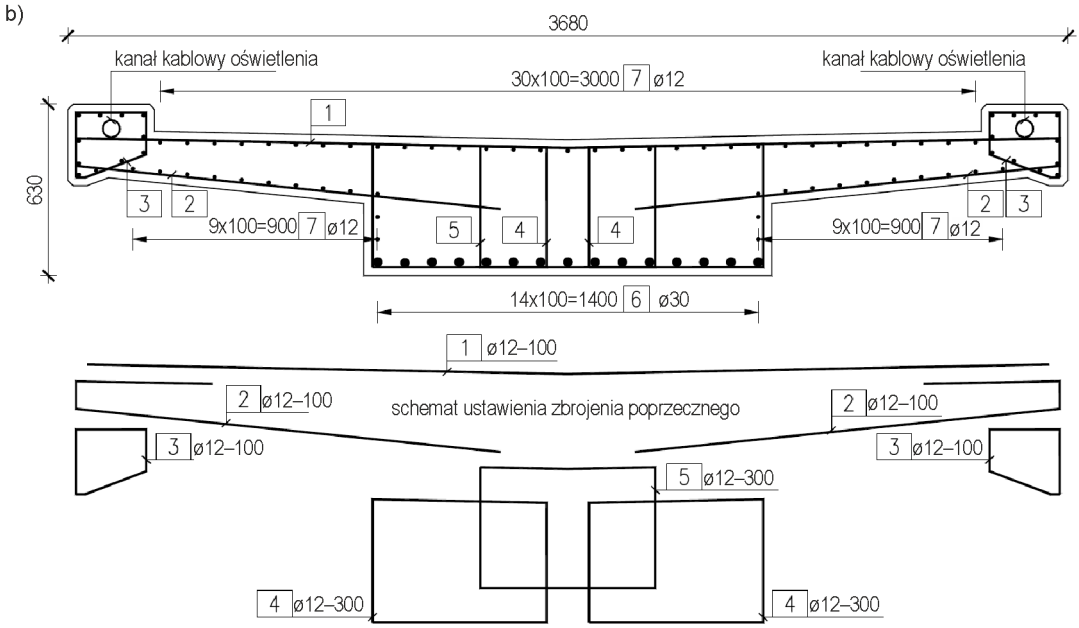
7.1. Ramowo-łukowa kładka dla pieszych

7.1.1. Opis konstrukcji i problemu badawczego

Badaniom metodą georadarową została poddana kładka dla pieszych (rys. 7.1), wybudowana w ciągu trasy pieszej nad linią Pomorskiej Kolei Metropolitalnej w Gdańsku. Obiekt został zaprojektowany jako żelbetowy układ ramowo-łukowy, o rozpiętości teoretycznej 28 m. Pojedynczy dźwigar łukowy został bezprzegubowo zakotwiony w ławach fundamentowych, a w kluczu połączony monolitycznie z płytą pomostu opartą na przyczółkach. Dźwigar płyty pomostu charakteryzuje się stałą grubością o wartości 50 cm, ze wspornikami po obu stronach o zmiennej grubości od 20 cm do 25 cm. Na powierzchni płyty pomostu wykonano nawierzchnię na bazie żywic epoksydowych. Badaną konstrukcję wybrano ze względu na zaprojektowany rozkład zbrojenia.

Rysunek 7.1b przedstawia rozkład zbrojenia, udokumentowany w projekcie wykonawczym obiektu mostowego. Główne zbrojenie górnej strefy płyty pomostu w badanym przekroju składa się z prętów o średnicy 12 mm, umieszczonych w rozstawie 10 cm. Dolne zbrojenie płyty zostało zaprojektowane jako pręty o średnicy 32 mm, ułożone w rozstawie 10 cm. Zbrojenie poprzeczne o średnicy 12 mm, składa się z trzech rzędów prętów zbrojeniowych: dwóch rzędów strzemion w płycie pomostu

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



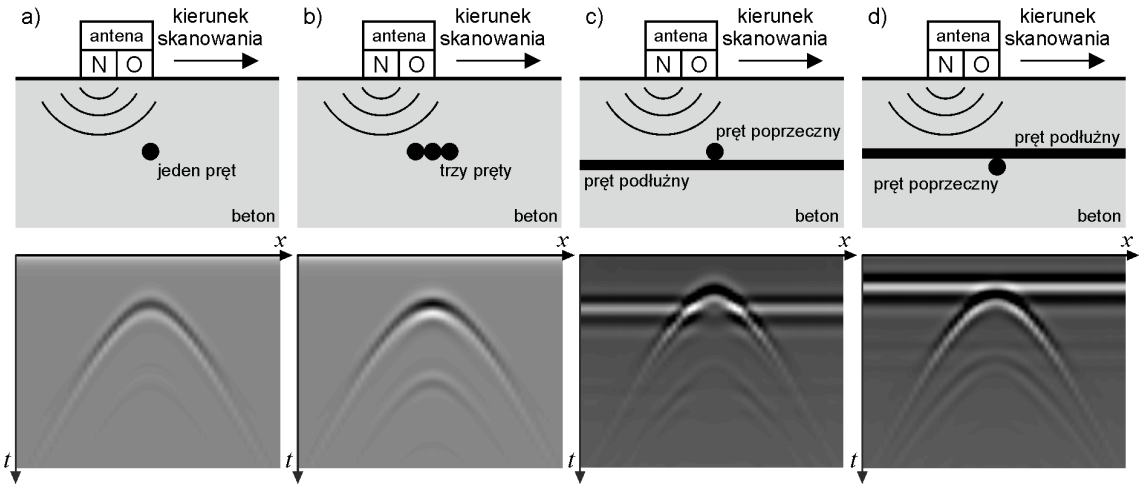
Rys. 7.1. Badana żelbetowa kładka dla pieszych (Gdańsk, Polska, 54 ° 21'32,4 "N 18 ° 34'01.8" E): a) widok ogólny, b) przekrój obiektu mostowego z rysunkiem zbrojenia (wymiary w mm)

i jednego zakrzywionego pręta w części wspornikowej. Konstrukcja została wykonana z betonu klasy C30/37.

Zaprojektowany układ zbrojeniowy dobrze obrazuje kilka problemów, które mogą pojawić się w interpretacji danych GPR rzeczywistych obiektów o konstrukcji żelbetowej. Pierwszy problem dotyczy liczby prętów, które ułożone są bezpośrednio obok siebie. Rysunek 7.2a pokazuje przekrój przez konstrukcję betonową z pojedynczym prętem. W takim przypadku odwzorowaniem pręta na mapie georadarowej jest hiperbola dyfrakcyjna. Gdy w betonowym przekroju osadzonych jest kilka przylegających do siebie prętów, krzywa hiperboliczna ulega deformacji, a odbity sygnał ma większą amplitudę (rys. 7.2b). Kolejnym problemem, który ujawnia się w większości układów zbrojeniowych jest wzajemne ustawienie podłużnych i poprzecznych prętów. Pręt

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

nazywany jest podłużnym, gdy jest usytuowany równolegle do kierunku skanowania, natomiast pręt poprzeczny jest umieszczony prostopadle. Jeżeli pręt poprzeczny znajduje się nad zbrojeniem podłużnym, hiperbola zostaje odcięta na poziomie podłużnego pręta (rys. 7.2c). Jeżeli natomiast usytuowanie prętów względem siebie jest odwrotne, wówczas hiperbola pojawia się pod podłużnym odbiciem bez większych zmian (rys. 7.2d).



Rys. 7.2. Różne sytuacje położenia prętów: a) pojedynczy pręt, b) trzy przylegające do siebie pręty, c) pręt poprzeczny nad prętem podłużnym, d) pręt poprzeczny pod prętem podłużnym

7.1.2. Symulacje numeryczne

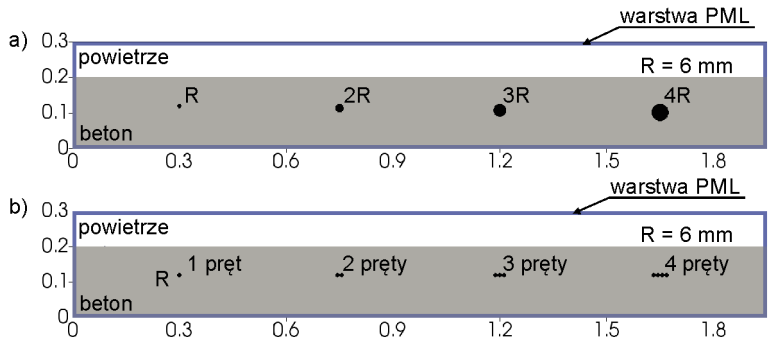
Analizy numeryczne propagacji fal elektromagnetycznych przeprowadzono przy użyciu oprogramowania gprMax [32, 146], wykorzystującego metodę różnic skończonych w dziedzinie czasu (FDTD) [157]. Obliczenia przeprowadzono za pomocą modeli dwu i trójwymiarowych. Zaletą modeli 2D jest stosunkowo krótki czas obliczeń, co pozwala na stosowanie małych siatek Yee, które mogą dokładniej odzwierciedlić małe obiekty. Geometria modelu 2D w prostopadłym (trzecim) kierunku jest nieskończona, więc konieczne jest utworzenie osobnego modelu dla każdej trasy skanowania, jeśli obiekt ma zmienną geometrię. Można zatem stwierdzić, iż modele 2D są odpowiednie do obliczeń konstrukcji betonowych z prostym układem zbrojeniowym, bez prętów zbrojeniowych równoległych do trasy skanowania. Zaletą zaś modeli 3D jest fakt, że budowana jest tylko jedna geometria, a trasy skanowania można wybierać na niej dowolnie. Są one zatem odpowiedniejsze do analizy konstrukcji ze złożonym systemem zbrojeniowym. Jednakże w celu skrócenia czasu obliczeniowego stosuje się większe

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

siatki Yee, co może spowodować mniej dokładne odzwierciedlenie małych prętów zbrojeniowych i być powodem dyspersji numerycznej.

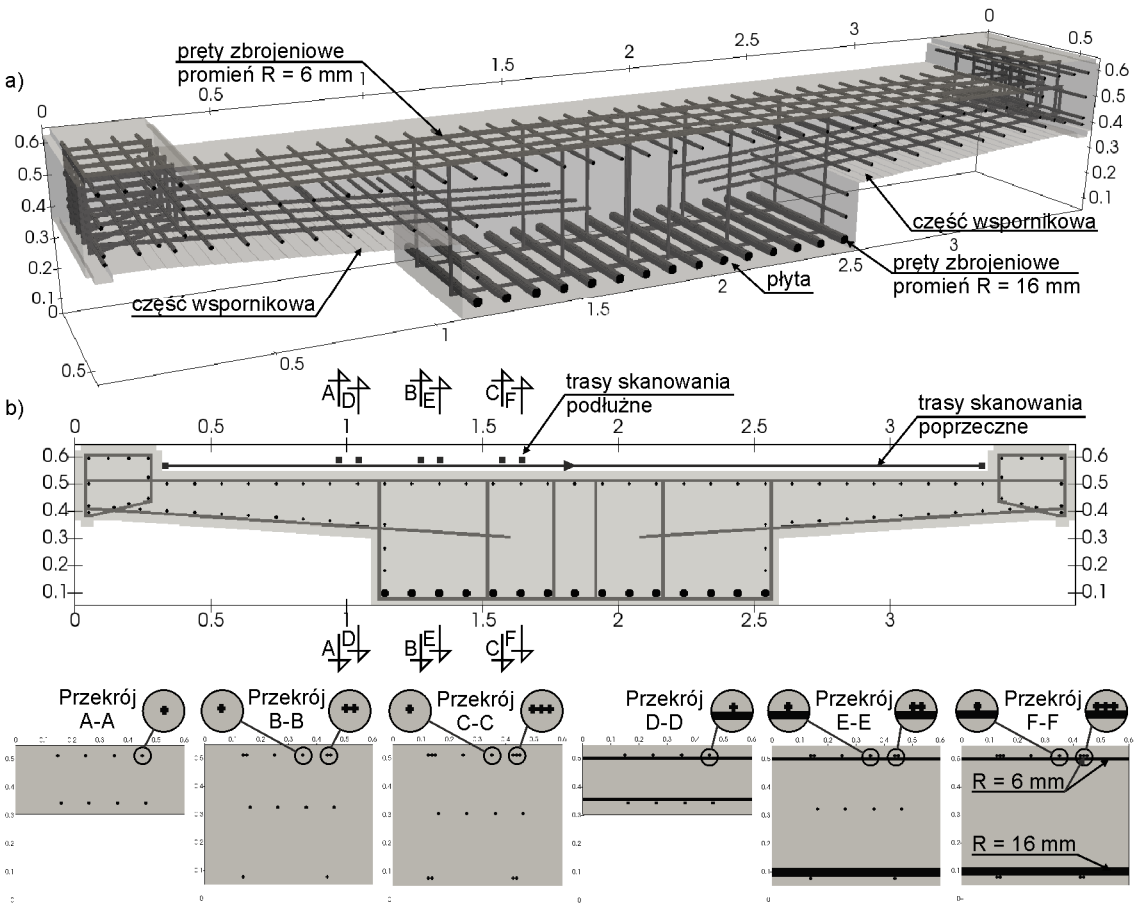
W celu przeanalizowania wybranych problemów identyfikacji prętów zbrojeniowych, przeprowadzono obliczenia propagacji fali elektromagnetycznej w przykładowej płycie żelbetowej i rozpatrywanym obiekcie mostowym. Parametry materiałowe zostały przyjęte zgodnie z wynikami badań *in situ*. Wartość przenikalności elektrycznej betonu została określona jako $\varepsilon_r = 6.25$, a przewodność betonu przyjęto jako $\sigma = 0.01$ S/m. Źródło wzbudzenia, imitujące sygnał generowany przez antenę GPR zostało przyjęte jako funkcja Rickera z częstotliwością środkową 2 GHz. Krok czasowy został wybrany automatycznie na podstawie warunku CFL. Na brzegach modelu FDTD ustawiono warunki brzegowe typu PML. Odległość między anteną nadawczą i odbiorczą w modelu została ustalona na 6 cm, podobnie jak rzeczywista odległość między nadajnikiem i odbiornikiem w wykorzystywanej antenie IDS.

Obliczenia dla modelu 2D płyty żelbetowej (rys. 7.3) o wymiarach 195 cm × 30 cm przeprowadzono w celu weryfikacji możliwości oszacowania prędkości fal elektromagnetycznych na podstawie kształtu zdeformowanej hiperboli ukazującej się na radargramach, gdzie występują pręty przylegające do siebie. W analizowanej płycie betonowej o grubości 20 cm zostały umieszczone pręty stalowe w rozstawie 45 cm. W pierwszym przypadku (model nr 1 pokazany na rys. 7.3a) płyta zawiera cztery pręty o różnym promieniu (R = 6 mm, 12 mm, 18 mm i 24 mm). W drugim przypadku (model nr 2 pokazany na rys. 7.3b), w tej samej płycie umieszczono zbrojenie o tej samej średnicy (R = 6 mm), ale zmiennej liczbie prętów przylegających do siebie. Model nr 2 odzwierciedla sytuację strzemion w konstrukcjach żelbetowych, które często umieszcza się bezpośrednio obok siebie (por. rys. 7.1b i 7.2b). Każdy pręt został ustawiony na takiej głębokości, aby odległość do powierzchni pręta była zawsze ta sama (7.4 cm).



Rys. 7.3. Płyta betonowa zbrojona stalowymi prętami: a) model nr 1 (cztery pojedyncze pręty o różnym promieniu), b) model nr 2 (1, 2, 3 i 4 przylegające do siebie pręty o tym samym promieniu)

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 7.4. Trójwymiarowy numeryczny model rozpatrywanego obiektu: a) widok 3D, b) widok 2D z zaznaczonymi przekrojami A-A, B-B, C-C, D-D, E-E, F-F

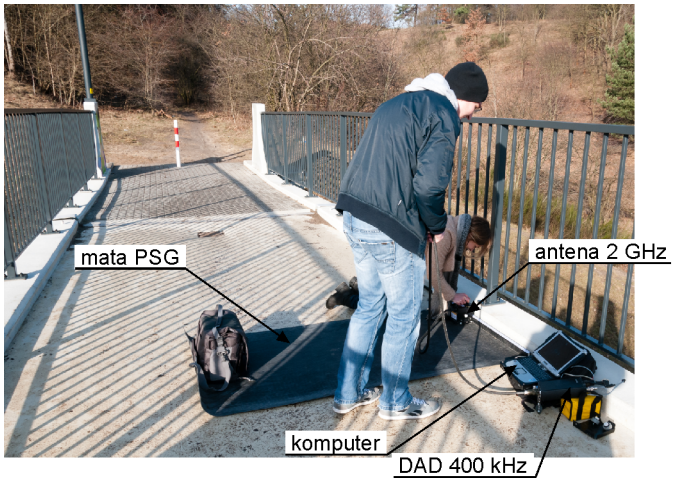
Trójwymiarowy model żelbetowej kładki dla pieszych został wykonany w zgodności z dokumentacją techniczną, ze szczególnym uwzględnieniem rozkładu zbrojenia poprzecznego (por. rys. 7.1b). Uproszczenie jakie przyjęto w modelu, dotyczyło pominięcia nachylenia poprzecznego pomostu kładki oraz braku uwzględnienia warstwy nawierzchni. Na rys. 7.4 przedstawiono model numeryczny o wymiarach zewnętrznych: 368 cm × 65 cm × 60 cm, który zdyskretyzowano za pomocą sześciennych kostek Yee o wielkości boku równym 3 mm. Symulacje przeprowadzono dla dwóch skanów poprzecznych (w poprzek przekroju kładki) i sześciu podłużnych (wzdłuż długości kładki). Obliczenia dla jednego skanowania poprzecznego trwały 99 godzin (komputer PC, 4 rdzenie 8 wątków CPU 3.40 GHz, 16 GB pamięci RAM). Profile poprzeczne założono dokładnie nad i pomiędzy strzemionami. Profile podłużne przeprowadzono w sześciu przekrojach kładki, zaznaczonych na rys. 7.4b, w celu przeanalizowania możliwości wykrycia prętów przylegających do siebie, a także ich wzajemnego ustawienia. Przekroje A-A, B-B i C-C pokazują przypadki prętów poprzecznych sąsiadujących ze sobą odpowiednio dla jednego, dwóch i trzech prętów zbrojeniowych.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Przekroje D-D, E-E i F-F pokazują przypadki, gdy skan jest prowadzony bezpośrednio nad zbrojeniem podłużnym dla jednego, dwóch i trzech sąsiadujących strzemion.

7.1.3. Badania doświadczalne

Pomiary *in situ* rozpatrywanej kładki (rys. 7.1) przeprowadzono za pomocą zestawu georadarowego z anteną bipolarną działającą z częstotliwością środkową 2 GHz. Parametry badania były następujące: zakres 32 ns, 1024 próbki/skan oraz krok zapisu 10 mm. Dane GPR zebrano za pomocą oprogramowania K2 FastWave i przetworzono w oprogramowaniu GRED HD. Podczas badań doświadczalnych profile poprzeczne wykonywano w poprzek kładki, w przekrojach podporowych oraz przęsłowych. Wzdłuż całej kładki przeprowadzono podłużne profile na części wspornikowej i na płycie pomostu. W celu dokładnej weryfikacji zbrojenia poprzecznego obiektu mostowego, zastosowano dedykowaną matę do prowadzenia gęstych profilowań. Rysunek 7.5 przedstawia płytę pomostu podczas pomiarów georadarowych z użyciem maty PSG. Mata z równoległymi rowkami rozmieszczonymi co 0.78 cm pozwoliła na dokładne przeprowadzenie 110 poprzecznych skanów, dzięki czemu niektóre skany zostały poprowadzone dokładnie nad zbrojeniem poprzecznym.



Rys. 7.5. Ramowo-łukowa kładka dla pieszych podczas pomiaru georadarowego z użyciem maty PSG

7.1.4. Wyniki

7.1.4.1. Identyfikacja prędkości propagującej fali elektromagnetycznej

Celem symulacji przeprowadzonych na modelach żelbetowej płyty (rys. 7.3) była ocena możliwości oszacowania prędkości propagacji fali elektromagnetycznej w betonie dla nieznanej liczby przylegających do siebie prętów, na podstawie kształtu hiperboli

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

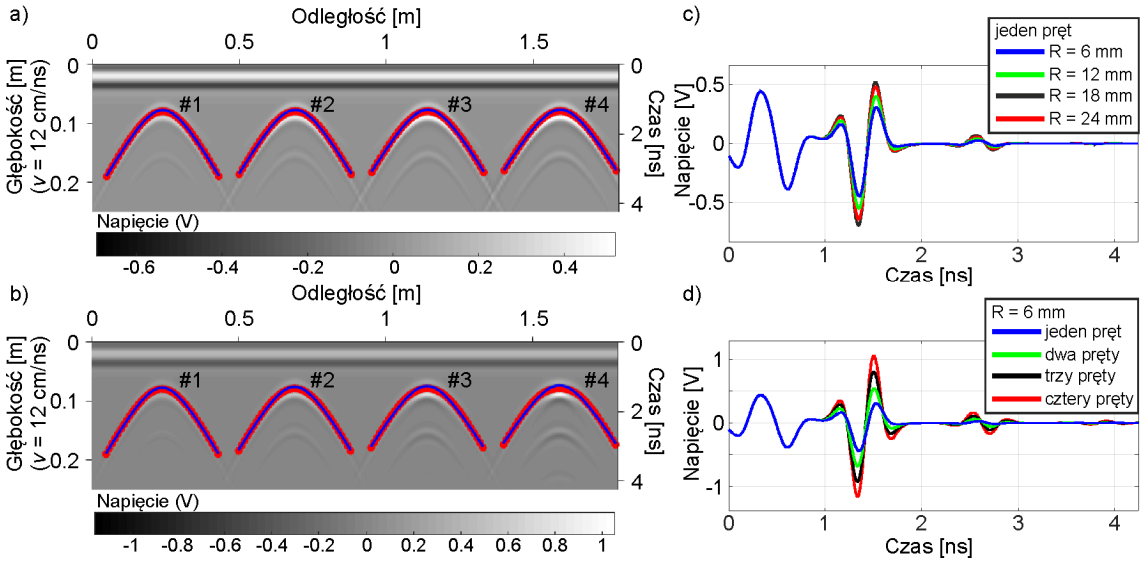
dyfrakcyjnej. Do analizy przyjęto pięć modeli matematycznych hiperbol opisanych w rozdziale 5.2. Dla kształtu hiperboli opisanej zależnością (5.5) (v_{mod1}) do aproksymacji stosowano metodę najmniejszych kwadratów. Natomiast dla pozostałych modeli hiperbol (wzór (5.7) – v_{mod2}, wzór (5.9) – v_{mod3}, wzór (5.11) – v_{mod4} oraz wzór (5.16) – v_{mod5}) użyto nieliniowej metody aproksymacji Levenberga-Marquardta [84]. Punkty hiperbol przyjęte do aproksymacji wybrano z map georadarowych za pomocą metody prostokątnej (por. rozdział 6.1.3). Dane numeryczne przetworzono w środowisku MATLAB®.

Proces dopasowania hiperbol wykonano dla trzech różnych zestawów warunków brzegowych w nieliniowej metodzie aproksymacji. W pierwszym etapie warunki brzegowe były dobrane tak, by każda z poszukiwanych zmiennych mogła przyjmować dowolną wartość. Dla prędkości fali v warunkami brzegowymi były wartości od 0.01 cm/ns do 30 cm/ns, dla położenia pręta x_0 były to granice mapy od 0.01m do 2.00 m oraz dla głębokości pręta (czyli opóźnienia czasowego t_0) przyjęto wartości ograniczone czasem trwania analiz numerycznych od 0.01 ns do 5 ns. Warunki brzegowe dla promienia pręta R ustalono od wartości 3 mm do 100 mm. Natomiast parametry początkowe (v, x_0, t_0) były dobierane dla każdej hiperboli oddzielnie, jako wartości wynikowe z aproksymacji metodą najmniejszych kwadratów (v_{mod1}). W drugim etapie zmieniono warunek brzegowy dla wartości promienia, przyjmując dla modelu nr 1 wartości stałe zgodne z promieniami prętów (R = 6 mm, 12 mm, 18 mm i 24 mm). Natomiast dla modelu nr 2 zastosowano wartości zastępcze promienia, odpowiadające sumie wartości promieni przylegających do siebie prętów. W trzecim etapie przywrócono poprzednie warunki brzegowe dla promienia (3 mm – 100 mm), jednocześnie przyjmując stałą wartość prędkości (v_{rze} = 12 cm/ns). Numeryczne radargramy z zaznaczonymi punktami i dopasowanymi hiperbolami dla modeli nr 1 i nr 2 zostały przedstawione odpowiednio na rys. 7.6a i b. W zależności od liczby prętów i wartości promienia zmienia się siła odbicia, co zostało pokazane na rys. 7.6c i d, które pokazują pojedyncze trasy georadarowe odpowiadające wierzchołkom hiperbol. W modelu nr 1, w którym położone są pręty o różnej średnicy, obserwuje się nieznaczny wzrost napięcia wraz ze wzrostem średnicy pręta (rys. 7.6c). Natomiast w modelu nr 2, w którym liczba przylegających do siebie prętów jest zmienna, można zaobserwować znaczny wzrost amplitudy wraz ze wzrostem liczby prętów (rys. 7.6d).

W tabeli 7.1 zestawiono wyniki aproksymacji hiperbol z radargramów obliczonych dla dwóch analizowanych modeli numerycznych, dla warunków brzegowych umożliwiających przyjmowanie dowolnej wartości zmiennych (v, x_0, t_0, R). Otrzymane

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

wyniki pozwalają stwierdzić, iż korzystając z najprostszego opisu matematycznego hiperboli (v_{mod1}) uzyskuje się znaczne przeszacowanie wartości prędkości dla prętów o większych średnicach, a także w przypadku większej liczby przylegających do siebie prętów. Wykorzystanie do aproksymacji modeli hiperbol uwzględniających promień pręta oraz rozstaw między anteną nadawczą i odbiorczą (v_{mod4}, v_{mod5}), pozwala na uzyskanie wartości prędkości bliższych wartości rzeczywistej (v_{rze}), co pokazuje również większa wartość współczynnika korelacji r. Jedynie w przypadku czterech prętów przylegających do siebie uzyskano niedoszacowane wyniki, co jest spowodowane najprawdopodobniej silnym zniekształceniem hiperboli dyfrakcyjnej. W tabeli 7.2 pokazano wyniki aproksymacji krzywych dyfrakcyjnych dla warunków brzegowych uwzględniających stałą wartość promienia kołowej inkluzji, zgodnie z rozmiarem założonym w modelu numerycznym. Spowodowało to znaczny wzrost oszacowanych wartości prędkości. W tabeli 7.3 przedstawiono wyniki aproksymacji hiperbol dla warunków brzegowych ze stałą wartością prędkości. Celem tego podejścia była próba oszacowania wartości promienia pręta zbrojeniowego, używając matematycznych modeli hiperbol uwzględniających promień kołowej inkluzji (v_{mod3}, v_{mod4}, v_{mod5}). Stwierdzono duże błędy w ustalaniu promienia. Jedynie dla autorskiego modelu hiperboli (v_{mod5}) zbliżono się do 30% błędu dla największej średnicy pręta w modelu numerycznym z prętami o różnych średnicach. W przypadku typowych średnic stosowanych w konstrukcjach żelbetowych nie uzyskano prawidłowych wyników.



Rys. 7.6. Numeryczne mapy georadarowe dla modelu żelbetowej płyty z zaznaczonymi punktami i dopasowanymi hiperbolami: a) model nr 1, b) model nr 2 oraz numeryczne skany typu A odpowiadające wierzchołkom hiperbol: c) model nr 1, d) nr model nr 2

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Tabela 7.1. Wyniki aproksymacji hiperbol dla warunków brzegowych umożliwiających przyjmowanie dowolnej wartości zmiennych v, x_0, t_0 oraz R

		Model z przylegającymi do siebie prętami				Model z prętami o różnych średnicach			
		#1	#2	#3	#4	#1	#2	#3	#4
v_{rze}	[cm/ns]	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
v_{mod1}	[cm/ns]	13.16	13.68	14.25	14.88	13.16	13.47	13.78	14.07
r	[-]	0.9997	0.9992	0.9982	0.9964	0.9997	0.9996	0.9994	0.9994
v_{mod2}	[cm/ns]	13.09	13.55	14.24	14.88	13.09	13.32	13.64	13.94
r	[-]	0.9999	0.9994	0.9980	0.9952	0.9999	0.9998	0.9996	0.9995
v_{mod3}	[cm/ns]	11.53	12.70	11.03	10.47	11.53	11.44	11.28	11.22
R	[cm]	3.5	2.1	7.1	10.0	3.5	4.4	5.4	6.2
r	[-]	0.9999	0.9995	0.9995	0.9985	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
v_{mod4}	[cm/ns]	12.11	11.09	11.89	10.40	12.11	11.97	11.64	11.58
R	[cm]	1.8	5.3	4.7	10.0	1.8	2.8	4.3	5.0
r	[-]	0.9999	0.9999	0.9994	0.9988	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
v_{mod5}	[cm/ns]	12.3	11.7	10.3	10.0	12.3	12.3	12.1	12.1
R	[cm]	1.3	3.7	8.1	10.0	1.3	2.1	3.1	3.5
r	[-]	0.9999	0.9999	0.9999	0.9995	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
δ_{mod1}		8.80%	12.25%	15.80%	19.36%	8.80%	10.93%	12.89%	14.69%
δ_{mod2}		9.09%	12.91%	18.64%	24.00%	9.09%	11.00%	13.66%	16.17%
δ_{mod3}		4.04%	5.53%	8.83%	14.66%	4.04%	4.91%	6.42%	6.91%
δ_{mod4}		0.91%	8.17%	0.96%	15.41%	0.91%	0.27%	3.14%	3.64%
δ_{mod5}		2.46%	2.91%	16.53%	20.06%	2.46%	2.11%	0.48%	0.91%

Tabela 7.2. Wyniki aproksymacji hiperbol dla warunków brzegowych umożliwiających przyjmowanie dowolnej wartości zmiennych v, x_0, t_0 oraz stałej wartości zmiennej R

		Model z przylegającymi do siebie prętami				Model z prętami o różnych średnicach			
		#1	#2	#3	#4	#1	#2	#3	#4
v_{rze}	[cm/ns]	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
v_{mod1}	[cm/ns]	13.16	13.68	14.25	14.88	13.16	13.47	13.78	14.07
r	[-]	0.9997	0.9992	0.9982	0.9964	0.9997	0.9996	0.9994	0.9994
v_{mod2}	[cm/ns]	13.09	13.55	14.24	14.88	13.09	13.32	13.64	13.94
r	[-]	0.9999	0.9994	0.9980	0.9952	0.9999	0.9998	0.9996	0.9995
v_{mod3}	[cm/ns]	12.98	13.15	13.46	13.82	12.98	12.93	12.95	13.03
R	[cm]	0.6	1.2	1.8	2.4	0.6	1.2	1.8	2.4
r	[-]	0.9997	0.9992	0.9980	0.9956	0.9997	0.9997	0.9996	0.9997
v_{mod4}	[cm/ns]	12.72	12.86	13.24	13.59	12.72	12.76	12.76	12.81
R	[cm]	0.6	1.2	1.8	2.4	0.6	1.2	1.8	2.4
r	[-]	0.9999	0.9996	0.9987	0.9966	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
v_{mod5}	[cm/ns]	12.7	12.8	13.2	13.5	12.7	12.8	12.8	12.7
R	[cm]	0.6	1.2	1.8	2.4	0.6	1.2	1.8	2.4
r	[-]	0.9999	0.9997	0.9989	0.9970	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
δ_{mod1}		8.80%	12.25%	15.80%	19.36%	8.80%	10.93%	12.89%	14.69%
δ_{mod2}		9.09%	12.91%	18.64%	24.00%	9.09%	11.00%	13.66%	16.17%
δ_{mod3}		7.57%	8.74%	10.83%	13.14%	7.57%	7.18%	7.32%	7.89%
δ_{mod4}		5.69%	6.67%	9.35%	11.70%	5.69%	5.94%	5.93%	6.33%
δ_{mod5}		5.41%	6.33%	8.96%	11.29%	5.41%	6.11%	5.95%	5.83%

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Tabela 7.3. Wyniki aproksymacji hiperbol dla warunków brzegowych umożliwiających przyjmowanie dowolnej wartości zmiennych x_0, t_0, R oraz stałej wartości zmiennej v

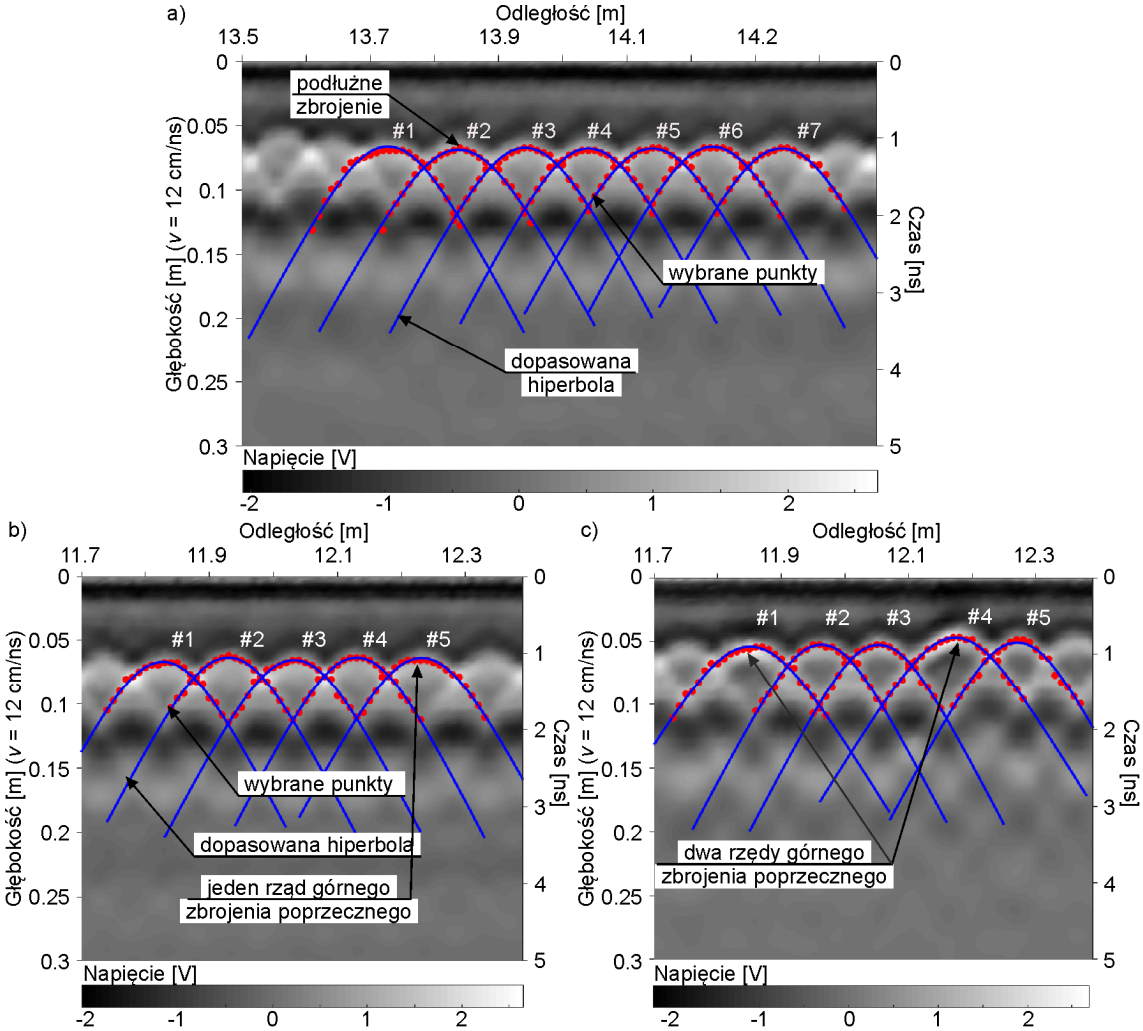
		Model z przylegającymi do siebie prętami				Model z prętami o różnych średnicach			
		#1	#2	#3	#4	#1	#2	#3	#4
R_{rze}	[cm]	0.60	1.20	1.80	2.40	0.60	1.20	1.80	2.40
v_{mod3}	[cm/ns]	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
R	[cm]	2.7	3.5	5.0	6.3	2.7	3.5	4.1	4.8
r	[-]	0.9999	0.9995	0.9991	0.9976	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
v_{mod4}	[cm/ns]	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
R	[cm]	1.9	3.4	4.5	5.9	1.9	2.7	3.7	4.3
r	[-]	0.9999	0.9997	0.9994	0.9979	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
v_{mod5}	[cm/ns]	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
R	[cm]	1.7	3.3	4.4	5.5	1.7	2.3	3.1	3.6
r	[-]	0.9999	0.9999	0.9997	0.9985	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
δ_{mod3}		77.92%	66.18%	63.75%	61.94%	77.92%	65.48%	55.58%	50.07%
δ_{mod4}		67.87%	64.23%	60.05%	59.37%	67.87%	55.54%	51.96%	43.96%
δ_{mod5}		64.96%	63.17%	59.16%	56.31%	64.96%	48.39%	42.27%	32.94%

Proces aproksymacji hiperbol przeprowadzono również w celu oszacowania prędkości propagacji fali elektromagnetycznych w konstrukcji na podstawie wyników pomiarów *in situ*. Dopasowanie hiperbol wykonano dla dwóch zestawów warunków brzegowych. W pierwszym etapie przyjęto warunki brzegowe umożliwiające przyjmowanie dowolnej wartości zmiennych. Dla promienia kołowej inkluzji R warunki ustalono od 3 mm do 100 mm, dla głębokości pręta (czyli opóźnienia czasowego t_0) były to wartości od 0.01 ns do 6 ns oraz dla położenia pręta x_0 były to granice mapy od 0.01m do 1.00 m. Warunki brzegowe dla prędkości fali v przyjęto od 0.01 cm/ns do 30 cm/ns. W kolejnym etapie zmieniono warunek brzegowy dla wartości promienia, przyjmując wartość stałą $R = 6$ mm, zgodnie z dokumentacja techniczną. Poziomem referencyjnym dla oszacowanych prędkości była wartość v = 11.85 cm/ns, która została otrzymana przy użyciu metody „*depth to known reflector method*" [130].

Oszacowania wartości prędkości przeprowadzono na doświadczalnych mapach georadarowych dla skanowania podłużnego i poprzecznego (rys. 7.7). Ekstrakcji punktów hiperbol dokonano używając metody jednej krzywej (por. rozdział 6.1.3). Rysunek 7.7a przedstawia poprzeczną mapę georadarową bez żadnego wzmocnienia i filtrów, na której zaznaczono wybrane punkty wraz z dopasowanymi hiperbolami. Uzyskane wartości prędkości z procesu aproksymacji dla siedmiu hiperbol podano w tabeli 7.4, przy warunkach brzegowych umożliwiających przyjmowanie dowolnej wartości zmiennych (v, x_0, t_0, R). Stwierdzono, iż oszacowane wartości prędkości przy

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

użyciu najprostszego modelu hiperboli (v_{mod1}) są najbliższe wynikom rzeczywistym, w porównaniu do pozostałych modeli matematycznych. Poprawę efektów oszacowania prędkości uzyskano w wyniku przyjęcia w warunkach brzegowych aproksymacji stałej wartości promienia (tabela 7.5). W tym przypadku uzyskano zbieżne wyniki z rzeczywistą wartością prędkości, używając modeli hiperbol, które uwzględniają promień pręta oraz rozstaw między anteną nadawczą i odbiorczą (v_{mod4}, v_{mod5}). Rysunki 7.7b i c przedstawiają dwa podłużne radargramy, na których zaznaczone zostały wybrane punkty wraz z dopasowanymi hiperbolami. Jedna z map georadarowych została wykonana wzdłuż kładki nad częścią wspornikową (rys. 7.7b), gdzie według dokumentacji technicznej znajdują się pojedyncze pręty. Dwa przylegające do siebie strzemiona powinny się ujawnić na drugim radargramie (rys. 7.7c), przedstawiającym skan wzdłuż kładki nad płytą pomostu, gdzie co trzecie strzemię powinno być podwójne.



Rys. 7.7. Mapy georadarowe z zaznaczonymi punktami i dopasowanymi hiperbolami dla skanowania: a) w kierunku poprzeczny, b) w kierunku podłużnym nad częścią wspornikową, c) w kierunku podłużnym nad płytą pomostu

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Tabela 7.4. Wyniki aproksymacji hiperbol z poprzecznej mapy georadarowej dla warunków brzegowych umożliwiających przyjmowanie dowolnej wartości zmiennych v, x_0, t_0 oraz R

		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
v_{rze}	[cm/ns]	11.85	11.85	11.85	11.85	11.85	11.85	11.85
v_{mod1}	[cm/ns]	12.79	13.11	12.91	12.76	13.10	12.97	13.09
r	[-]	0.9848	0.9934	0.9931	0.9910	0.9924	0.9955	0.9897
v_{mod2}	[cm/ns]	12.88	13.14	12.75	12.80	12.91	12.63	12.78
r	[-]	0.9787	0.9904	0.9893	0.9878	0.9884	0.9934	0.9838
v_{mod3}	[cm/ns]	8.05	8.32	9.19	7.84	8.06	7.93	8.00
R	[cm]	10.0	10.0	7.0	10.0	10.0	10.0	10.0
r	[-]	0.9857	0.9940	0.9905	0.9918	0.9911	0.9949	0.9871
v_{mod4}	[cm/ns]	7.90	9.55	7.98	7.66	9.44	8.20	7.81
R	[cm]	10.0	6.9	9.5	10.0	6.2	8.8	10.0
r	[-]	0.9865	0.9936	0.9910	0.9923	0.9907	0.9950	0.9876
v_{mod5}	[cm/ns]	6.83	7.27	8.94	6.09	11.38	9.47	6.32
R	[cm]	10.0	10.0	5.8	10.0	2.1	4.8	10.0
r	[-]	0.9938	0.9957	0.9913	0.9973	0.9903	0.9951	0.9910
δ_{mod1}		7.34%	9.63%	8.21%	7.14%	9.51%	8.66%	9.45%
δ_{mod2}		8.65%	10.89%	7.61%	8.00%	8.97%	6.55%	7.81%
δ_{mod3}		47.12%	42.44%	28.89%	51.12%	47.11%	49.44%	48.18%
δ_{mod4}		50.01%	24.04%	48.59%	54.65%	25.58%	44.51%	51.71%
δ_{mod5}		73.39%	62.96%	32.59%	94.45%	4.17%	25.12%	87.61%

Tabela 7.5. Wyniki aproksymacji hiperbol z poprzecznej mapy georadarowej dla warunków brzegowych umożliwiających przyjmowanie dowolnej wartości zmiennych v, x_0, t_0 oraz stałej wartości zmiennej R

		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
v_{rze}	[cm/ns]	11.85	11.85	11.85	11.85	11.85	11.85	11.85
v_{mod1}	[cm/ns]	12.79	13.11	12.91	12.76	13.10	12.97	13.09
r	[-]	0.9848	0.9934	0.9931	0.9910	0.9924	0.9955	0.9897
v_{mod2}	[cm/ns]	12.88	13.14	12.75	12.80	12.91	12.63	12.78
r	[-]	0.9787	0.9904	0.9893	0.9878	0.9884	0.9934	0.9838
v_{mod3}	[cm/ns]	12.89	13.24	12.83	12.77	12.94	12.69	12.84
R	[cm]	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
r	[-]	0.9747	0.9890	0.9877	0.9847	0.9864	0.9919	0.9812
v_{mod4}	[cm/ns]	12.66	12.73	12.29	12.14	12.40	12.24	12.26
R	[cm]	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
r	[-]	0.9796	0.9909	0.9895	0.9880	0.9887	0.9937	0.9841
v_{mod5}	[cm/ns]	12.56	12.66	12.21	12.45	12.34	12.19	12.31
R	[cm]	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
r	[-]	0.9803	0.9911	0.9897	0.9887	0.9890	0.9939	0.9846
δ_{mod1}		7.34%	9.63%	8.21%	7.14%	9.51%	8.66%	9.45%
δ_{mod2}		8.65%	10.89%	7.61%	8.00%	8.97%	6.55%	7.81%
δ_{mod3}		8.10%	10.49%	7.64%	7.23%	8.43%	6.61%	7.73%
δ_{mod4}		6.38%	6.91%	3.57%	2.39%	4.43%	3.20%	3.35%
δ_{mod5}		5.64%	6.43%	2.97%	4.79%	3.96%	2.75%	3.74%

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Tabela 7.6. Wyniki aproksymacji hiperbol z podłużnych map georadarowych dla warunków brzegowych umożliwiających przyjmowanie dowolnej wartości zmiennych v, x_0, t_0 oraz R

	Mapa nad płytą pomostu					Mapa nad częścią wspornikową kładki				
	#1	#2	#3	#4	#5	#1	#2	#3	#4	#5
v_{rze}	11.85	11.85	11.85	11.85	11.85	11.85	11.85	11.85	11.85	11.85
v_{mod1}	13.08	13.00	12.91	12.78	13.26	15.25	13.28	13.12	15.47	13.64
r	0.992	0.998	0.993	0.997	0.989	0.992	0.995	0.997	0.997	0.994
v_{mod2}	12.81	12.53	12.59	12.31	12.98	14.98	12.82	12.66	15.03	13.08
r	0.987	0.995	0.988	0.994	0.984	0.988	0.992	0.995	0.995	0.984
v_{mod3}	7.80	12.77	12.90	12.63	7.95	9.49	10.90	11.75	12.37	13.45
R	10.0	0.3	0.3	0.3	10.0	10.0	3.4	1.9	4.1	0.3
r	0.988	0.996	0.987	0.994	0.987	0.991	0.992	0.994	0.995	0.988
v_{mod4}	7.61	12.32	12.47	12.18	7.77	9.31	12.52	12.43	14.11	12.89
R	10.0	0.3	0.3	0.3	10.0	10.0	0.3	0.3	1.1	0.3
r	0.989	0.995	0.988	0.994	0.987	0.991	0.992	0.995	0.995	0.984
v_{mod5}	8.69	12.28	12.07	12.15	6.49	10.90	12.52	12.47	14.79	12.73
R	5.8	0.3	0.6	0.3	9.3	5.5	0.3	0.3	0.3	0.3
r	0.989	0.994	0.988	0.994	0.991	0.991	0.992	0.994	0.995	0.983
δ_{mod1}	9.40%	8.86%	8.21%	7.30%	10.63%	22.27%	10.74%	9.71%	23.40%	13.12%
δ_{mod2}	8.09%	5.70%	6.20%	3.92%	9.57%	26.42%	8.15%	6.85%	26.83%	10.38%
δ_{mod3}	51.95%	7.22%	8.15%	6.17%	49.14%	24.85%	8.74%	0.85%	4.23%	11.92%
δ_{mod4}	55.70%	3.85%	4.98%	2.72%	52.47%	27.30%	5.38%	4.70%	15.99%	8.09%
δ_{mod5}	36.34%	3.48%	1.85%	2.43%	82.52%	8.68%	5.36%	4.99%	19.86%	6.89%

Tabela 7.7. Wyniki aproksymacji hiperbol z podłużnych map georadarowych dla warunków brzegowych umożliwiających przyjmowanie dowolnej wartości zmiennych v, x_0, t_0 oraz stałej wartości zmiennej R

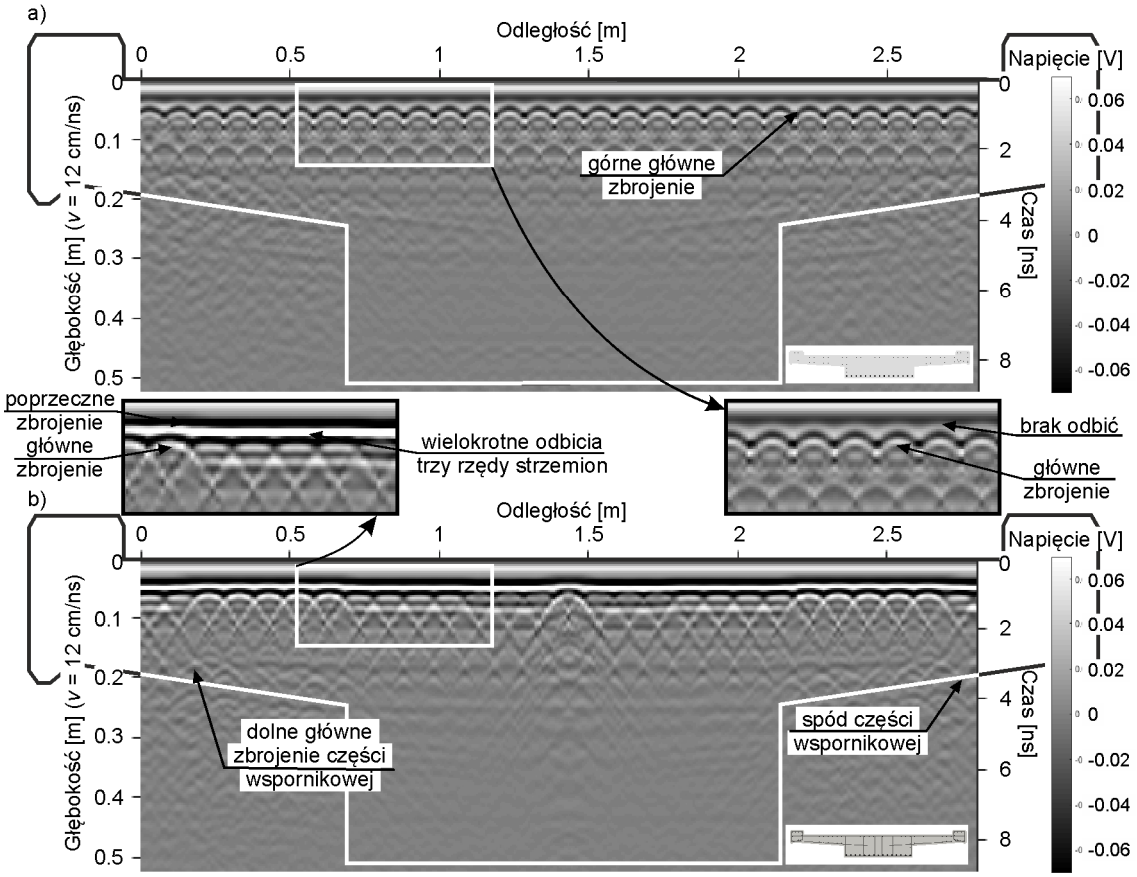
	Mapa nad płytą pomostu					Mapa nad częścią wspornikową kładki				
	#1	#2	#3	#4	#5	#1	#2	#3	#4	#5
v_{rze}	11.85	11.85	11.85	11.85	11.85	11.85	11.85	11.85	11.85	11.85
v_{mod1}	13.08	13.00	12.91	12.78	13.26	15.25	13.28	13.12	15.47	13.64
r	0.992	0.998	0.993	0.997	0.989	0.992	0.995	0.997	0.997	0.994
v_{mod2}	12.81	12.53	12.59	12.31	12.98	14.98	12.82	12.66	15.03	13.08
r	0.987	0.995	0.988	0.994	0.984	0.988	0.992	0.995	0.995	0.984
v_{mod3}	12.63	12.58	12.71	12.42	13.12	14.98	12.92	12.80	15.12	12.99
R	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
r	0.985	0.996	0.987	0.994	0.980	0.986	0.991	0.994	0.994	0.988
v_{mod4}	12.10	12.13	12.17	11.95	12.42	14.45	12.30	12.22	14.53	12.62
R	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
r	0.987	0.994	0.988	0.994	0.984	0.989	0.992	0.994	0.995	0.983
v_{mod5}	12.04	12.07	12.06	11.93	12.57	14.49	12.27	12.16	14.49	12.50
R	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
r	0.988	0.994	0.988	0.994	0.985	0.989	0.992	0.994	0.995	0.982
δ_{mod1}	9.40%	8.86%	8.21%	7.30%	10.63%	22.27%	10.74%	9.71%	23.40%	13.12%
δ_{mod2}	8.09%	5.70%	6.20%	3.92%	9.57%	26.42%	8.15%	6.85%	26.83%	10.38%
δ_{mod3}	6.18%	5.84%	6.77%	4.57%	9.68%	20.89%	8.26%	7.44%	21.63%	8.79%
δ_{mod4}	2.10%	2.30%	2.65%	0.84%	4.60%	18.01%	3.65%	3.00%	18.45%	6.10%
δ_{mod5}	1.56%	1.84%	1.71%	0.63%	5.74%	18.20%	3.39%	2.58%	18.21%	5.22%

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Wyniki aproksymacji hiperbol z podłużnych map georadarowych dla dwóch zestawów warunków brzegowych przedstawiono w tabeli 7.6 oraz 7.7. Stwierdzono, iż dla obu zestawów warunków brzegowych uzyskano wartości prędkości bliższe rzeczywistej, używając matematycznych modeli hiperbol, opisanych zależnościami (5.11) (v_{mod4}) oraz (5.16) (v_{mod5}). Jednakże dla warunków brzegowych uwzględniających stałą wartość promienia uzyskano mniejszy błąd oszacowania. Wyjątek stanowią dwie hiperbole, których wynik aproksymacji ujawnił znacznie podwyższoną wartość prędkości w porównaniu do pozostałych. W ten sposób bardzo wyraźna staje się różnica między pojedynczym prętem, a kilkoma prętami przylegającymi do siebie.

7.1.4.2. Identyfikacja prętów zbrojeniowych

Numeryczne mapy georadarowe dla tras poprzecznych prowadzonych dokładnie nad prętami zbrojenia poprzecznego oraz pomiędzy nimi, zostały przedstawione na rys. 7.8. Na obu radargramach widoczne są silne i regularne hiperbole, które potwierdzają obecność głównego zbrojenia w strefie przy powierzchni skanowania. Nie stwierdzono

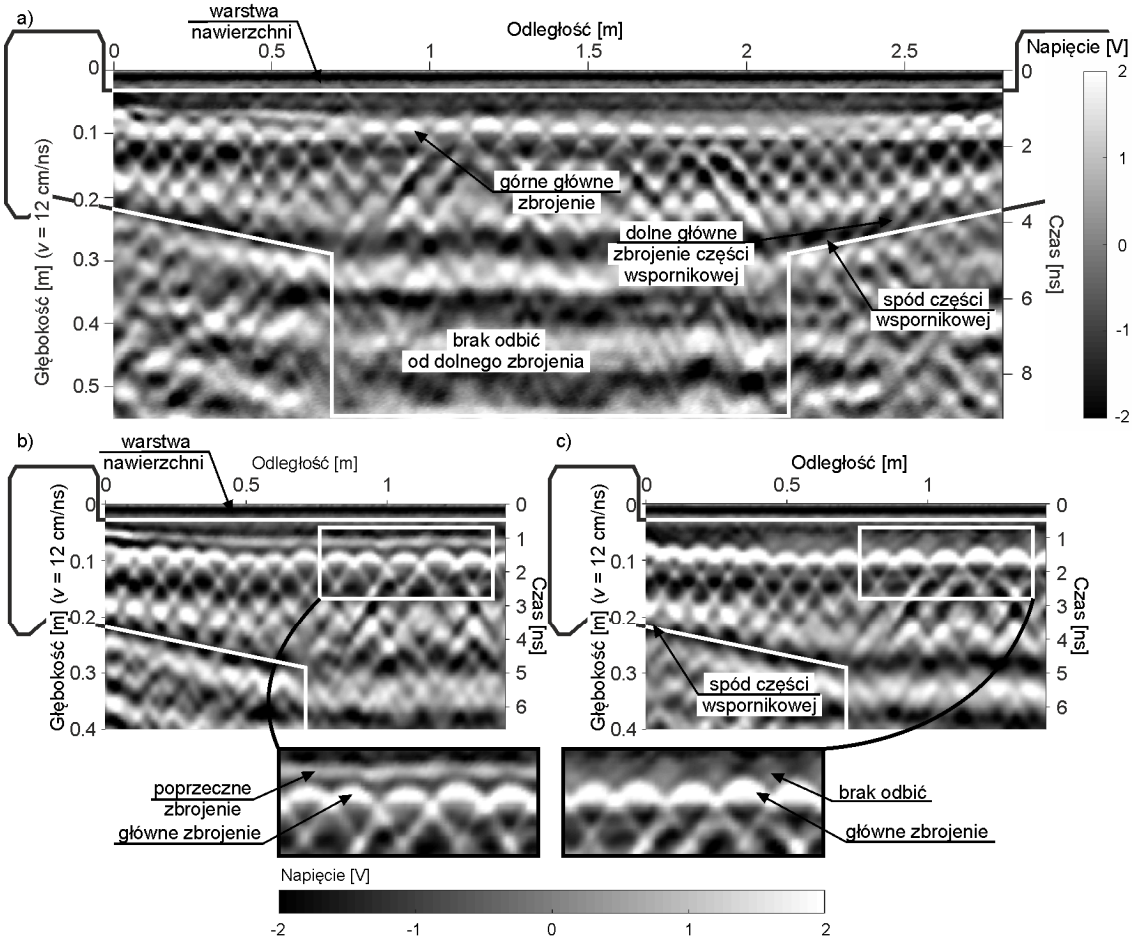


Rys. 7.8. Numeryczne mapy georadarowe dla skanowania poprzecznego: a) trasa skanowania między zbrojeniem poprzecznym, b) trasa skanowania dokładnie nad zbrojeniem poprzecznym

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

występowania dyfrakcji, świadczących o dolnym zbrojeniu płyty pomostu. Widoczne są natomiast hiperbole obrazujące dolne zbrojenie części wspornikowej kładki. Warto zwrócić uwagę na różnice między skanem prowadzonym dokładnie nad prętami zbrojenia poprzecznego (rys. 7.8b) i pomiędzy nimi (rys. 7.8a). Na całej długości radargramów, nad rzędem hiperbol, pojawia się podłużne odbicie, które ujawnia obecność poprzecznego pręta. Ponadto, w miejscach, w których występuje więcej niż jeden rząd strzemion, można zauważyć wielokrotne i silniejsze odbicie podłużne, które deformuje kształt niżej występującej hiperboli.

Wyniki badań *in situ* dla skanowania poprzecznego pokazano na rys. 7.9. Rysunek 7.9a przedstawia pojedynczy skan poprzeczny wykonany w poprzek kładki. Można zaobserwować regularne, mocne i wyraźne odbicia od górnego zbrojenia w strefie przypowierzchniowej. Ponadto wyraźnie widoczne jest odbicie od spodu części wspornikowej, powyżej którego można zauważyć hiperboliczne dyfrakcje ujawniające obecność dolnego zbrojenia części wspornikowej kładki. Mapy georadarowe uzyskane

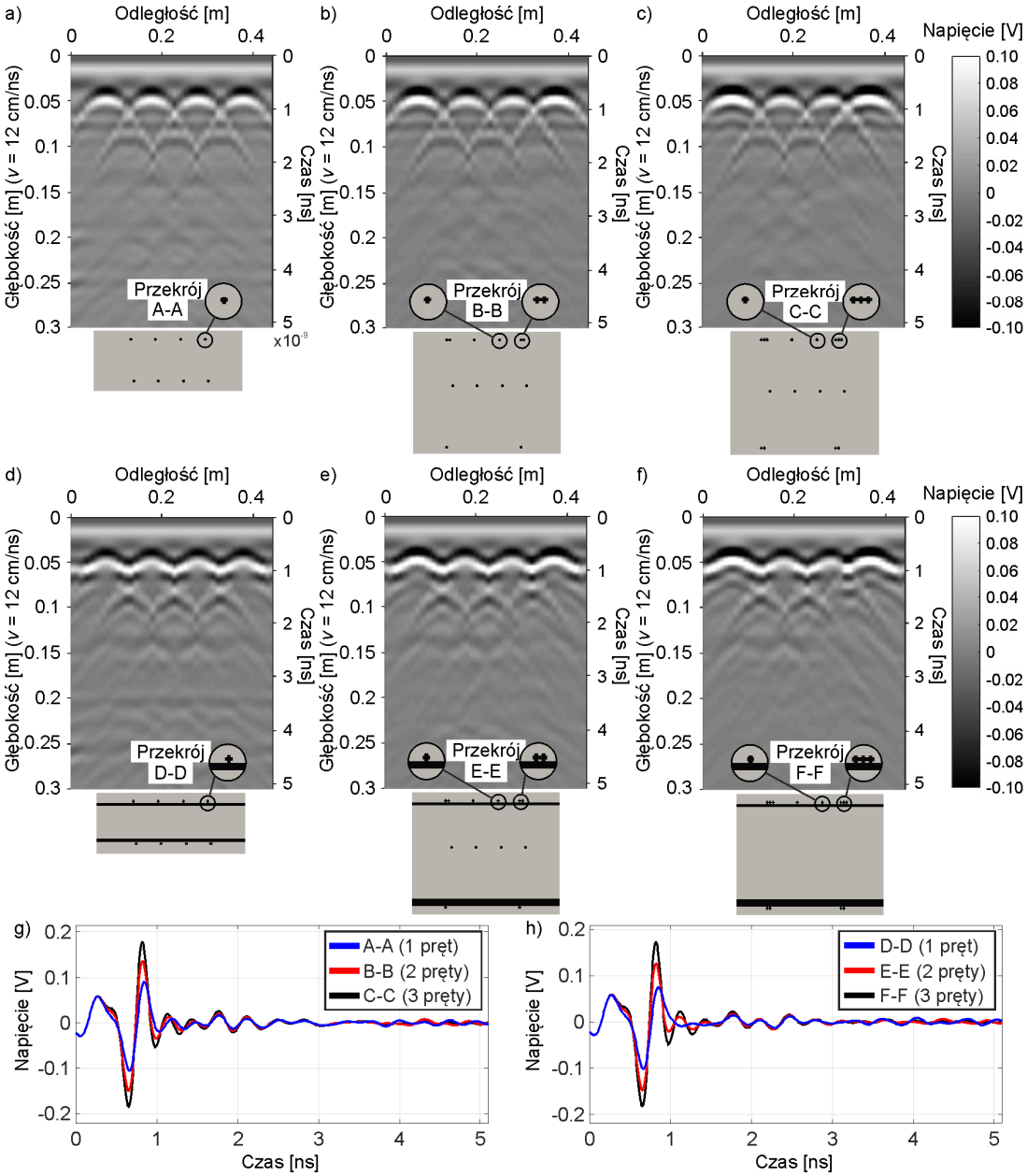


Rys. 7.9. Poprzeczne mapy georadarowe dla trasy skanowania: a) na całym przekroju poprzecznym, b) dokładnie nad zbrojeniem poprzecznym, c) pomiędzy zbrojeniem poprzecznym

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

w pomiarach za pomocą maty PSG pokazano na rys. 7.9b i c. Radargram, który został wykonany dokładnie nad prętem poprzecznym (rys. 7.9a) wyraźnie różni się od skanu wykonanego między strzemionami (rys. 7.9b). Zbrojenie poprzeczne można zidentyfikować jako podłużne odbicie występujące nad hiperbolami.

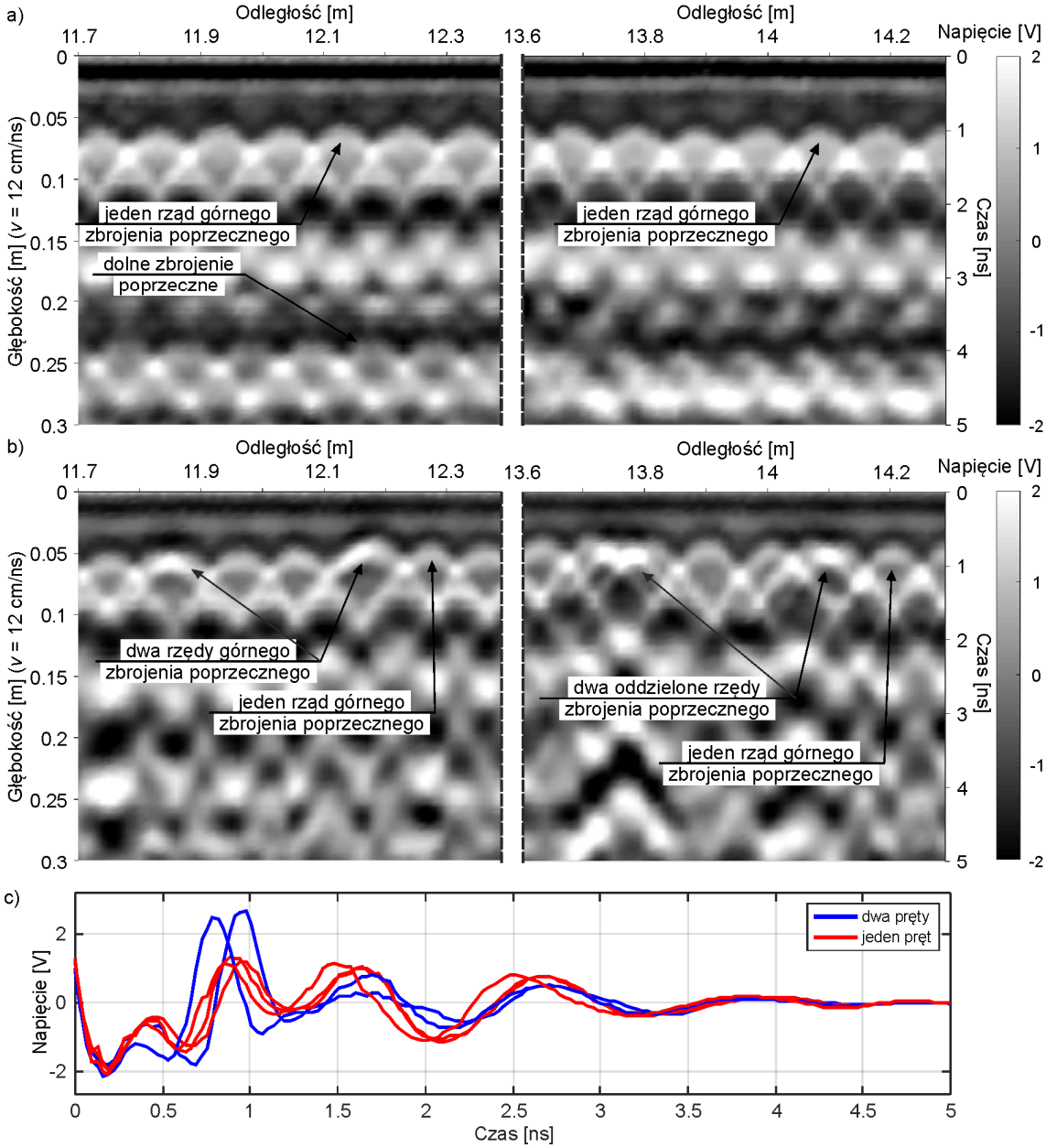
Rysunek 7.10 pokazuje numeryczne mapy georadarowe obliczone wzdłuż przekrojów zaznaczonych na rys. 7.4. Na radargramie z przekroju A-A, prowadzonym nad wspornikową częścią kładki (rys. 7.10a) ukazują się cztery hiperbole odzwierciedlające



Rys. 7.10. Numeryczne mapy georadarowe dla skanowania podłużnego wzdłuż przekroju: a) A-A, b) B-B, c) C-C, d) D-D, e) E-E, f) F-F oraz numeryczne skany typu A odpowiadające pierwszej hiperboli dla przekroju: g) A-A, B-B, C-C, h) D-D, E-E, F-F

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

zbrojenie poprzeczne w strefie przypowierzchniowej. W przekrojach B-B (rys. 7.10b) i C-C (rys. 7.10c), gdzie ustawione są dwa i trzy przyległe do siebie pręty zbrojeniowe, dyfrakcja, powstająca na mapie georadarowej, jest silniejsza niż w przypadku pojedynczego pręta. Zwiększoną amplitudę odbicia można zaobserwować również na rys. 7.10g, na którym pokazano numeryczne skany typu A odpowiadające pierwszej hiperboli. Wyniki dla przekrojów D-D, E-E i F-F, zawierających zbrojenie podłużne ułożone poniżej jednego, dwóch i trzech sąsiadujących ze sobą strzemion, przedstawiono odpowiednio na rys. 7.10d, e i f. Oprócz faktu, że amplituda odbitego sygnału wzrasta



Rys. 7.11. Podłużne mapy georadarowe dla trasy skanowania: a) nad częścią wspornikową, b) na płycie pomostu oraz c) skany typu A odpowiadające dwóm przylegającym do siebie prętom (kolor niebieski) i jednemu pojedynczemu (kolor czerwony)

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

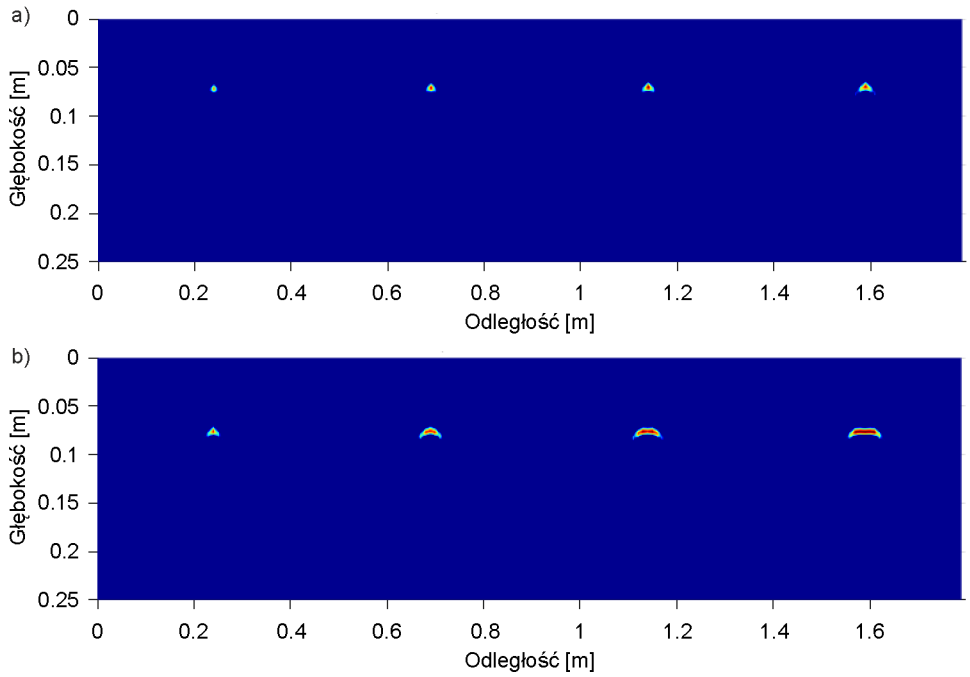
wraz z liczbą sąsiadujących prętów, jest też nieznacznie zwiększona ze względu na obecność podłużnego pręta pod strzemionami (rys. 7.10h). Ponadto na rys. 7.10d, e i f można zaobserwować charakterystyczne odcięcie hiperboli poniżej odbicia od podłużnego pręta. Należy również zauważyć, że wraz ze wzrostem liczby sąsiadujących prętów odbicia od podłużnego zbrojenia stają się mniej widoczne.

Przetworzone mapy georadarowe, uzyskane w wyniku skanowania podłużnego dla płyty pomostu oraz części wspornikowej, zostały przedstawione na rys. 7.11. Pokazane zostały wybrane fragmenty radargramów w dwóch przedziałach tj. od 11.7 m do 12.4 m oraz od 13.6 m do 14.3 m. Dla mapy georadarowej uzyskanej na części wspornikowej, możliwe było zidentyfikowanie górnych i dolnych prętów zbrojeniowych (rys. 7.11a). Natomiast analizując radargram wykonany na płycie pomostu (rys. 7.11b), nie stwierdzono anomalii świadczących o dolnych prętach zbrojeniowych. Dwie zniekształcone hiperbole dyfrakcyjne widoczne na rys. 7.11b, między 11.7 m a 12.4 m, wskazują na obecność dwóch sąsiadujących ze sobą strzemion. Jednakże w dalszej części mapy georadarowej między 13.6 m a 14.3 m widoczne są liczne hiperboliczne dyfrakcje w nierównomiernym rozstawie. Może to być spowodowane prawdopodobnym oddzieleniem zbrojenia poprzecznego lub pojawieniem się dodatkowego strzemienia. Należy podkreślić, że w miejscach występowania dwóch przylegających do siebie prętów zbrojeniowych, stwierdzono znaczny wzrost amplitudy odbicia, co pokazują skany typu A przedstawione na rys. 7.11c.

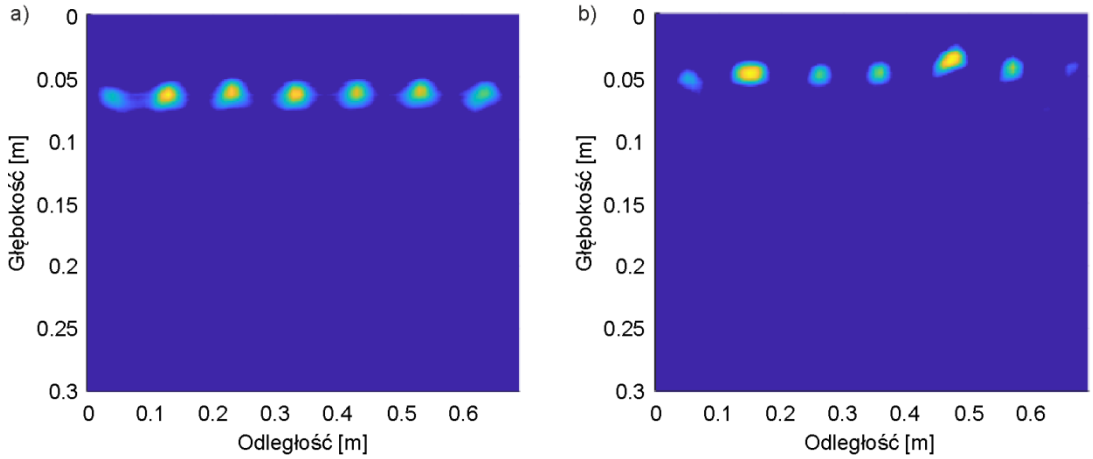
Szczególnie przydatnym procesem przetwarzania danych georadarowych dla konstrukcji żelbetowych jest migracja, dzięki której pręty zbrojeniowe są przedstawione za pomocą anomalii punktowych. Do procesu migracji wybranych map georadarowych posłużono się algorytmem sumowania hiperbol opisanym w rozdziale 4.4.6. Na rys. 7.12 przedstawione zostały numeryczne mapy georadarowe, uzyskane z obliczeń dla modelu nr 1 i nr 2, które poddano migracji. Zobrazowanie to pokazuje, że dla modelu z przylegającymi do siebie prętami (rys. 7.12b), można zidentyfikować miejsce występowania większej liczby prętów. Natomiast w przypadku mapy georadarowej, poddanej migracji dla modelu z różnymi średnicami prętów (rys. 7.12a), kształt anomalii pozostaje kołowy. Można natomiast zaobserwować zależność, iż wraz ze wzrostem średnicy pręta kołowa anomalia się zwiększa. Na rys. 7.13 przedstawiono podłużne mapy georadarowe, uzyskane z pomiarów doświadczalnych (por. rys. 7.11a i b) poddane procesowi migracji. Można zauważyć, iż dla mapy georadarowej, pomierzonej nad płytą pomostu (rys. 7.13b) pojawiają się dwie anomalie punktowe, które wskazują na obecność

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

więcej niż jednego pręta. W przypadku skanu wykonanego nad częścią wspornikową (rys. 7.13a) anomalie pozostają kołowe o zbliżonych rozmiarach. Proces migracji przeprowadzono również dla danych doświadczalnych, uzyskanych z gęstego profilowania na macie PSG. Przetwarzaniu poddano mapy podłużne, jak i mapy poprzeczne, wygenerowane z anteny bipolarnej za pomocą programu GRED HD. Przetworzone mapy georadarowe zostały zestawione, tworząc trójwymiarową wizualizację układu górnego zbrojenia na badanym obszarze (rys. 7.14).

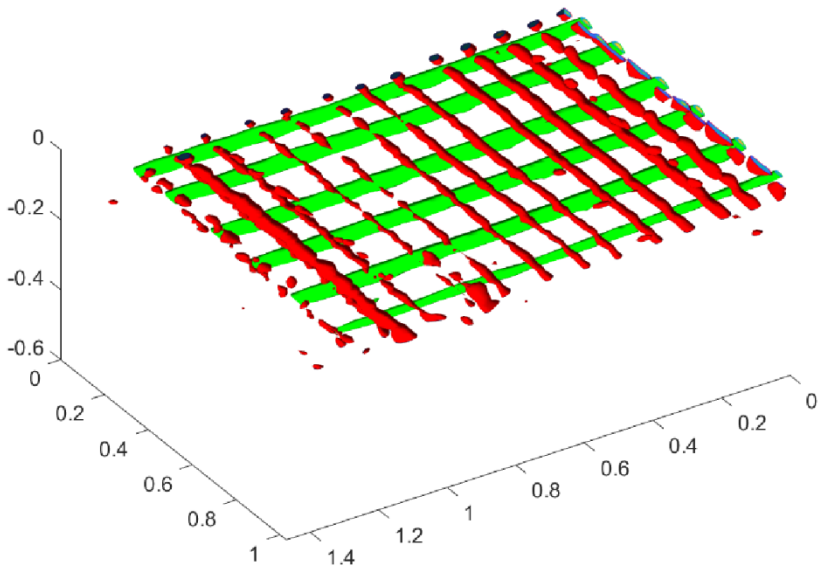


Rys. 7.12. Numeryczne mapy georadarowej dla modelu żelbetowej płyty poddane procesowi migracji:
a) model nr 1 (cztery pojedyncze pręty o różnym promieniu),
b) modelu nr 2 (1, 2, 3 i 4 przylegające do siebie pręty o tym samym promieniu)



Rys. 7.13. Podłużne mapy georadarowe poddane procesowi migracji dla trasy skanowania:
a) nad częścią wspornikową, b) na płycie pomostu

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 7.14. Trójwymiarowa wizualizacja układu górnego zbrojenia wspornikowej części kładki w miejscu pomiaru georadarowego na macie PSG

7.1.5. Podsumowanie

W rozdziale przedstawiono doświadczalne i numeryczne analizy propagacji pola elektromagnetycznego we fragmencie kładki dla pieszych. Za pomocą opisanych modeli hiperbol dokonano oszacowania prędkości fali na danych numerycznych i doświadczalnych. Wykonano dokładny trójwymiarowy model numeryczny fragmentu kładki, który pozwolił przeanalizować propagację fali elektromagnetycznej w przypadku skomplikowanego systemu zbrojeniowego. Poddano analizie wpływ wzajemnego położenia prętów podłużnych i poprzecznych, a także liczby przylegających do siebie prętów na mapę georadarową. Przeprowadzono proces migracji map georadarowych, który umożliwił dokładne zobrazowanie siatki zbrojeniowej. Na podstawie wykonanych badań można sformułować następujące wnioski:

– Proces aproksymacji hiperbol z numerycznych map georadarowych ujawnił, iż wartości prędkości uzyskiwane przy użyciu najprostszego opisu matematycznego hiperboli były znacznie przeszacowane. Ponadto, zidentyfikowana prędkość rosła wraz ze wzrostem promienia pręta lub liczbą przylegających do siebie prętów. Zastosowanie modeli hiperbol uwzględniających promień pręta i rozstaw między antenami pozwoliły uzyskać wartość prędkości bliższą rzeczywistej. Stwierdzono, że prędkość można w przybliżeniu oszacować dla maksymalnie trzech przylegających do siebie prętów. W przypadku czterech prętów hiperbola staje się silnie zniekształcona, co uniemożliwia prawidłowe określenie wartości

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

prędkości. W przypadku, gdy promień pręta jest znany, można uzyskać wartości prędkości bliższe rzeczywistej.

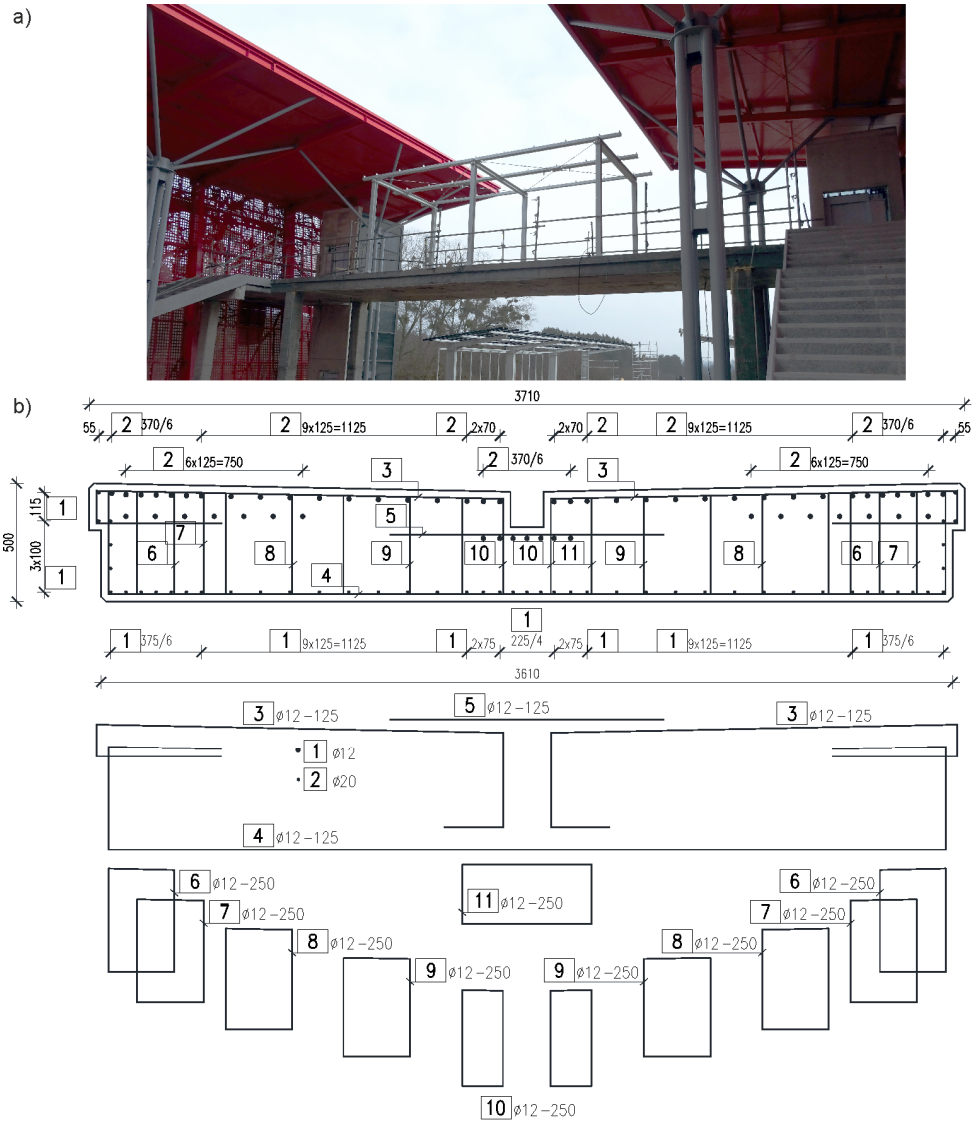
- Dopasowanie hiperbol na podstawie danych doświadczalnych pokazało, iż najprostszy model hiperboli, pomijający rozmiar inkluzji, jest mniej wrażliwy na szum pomiarowy i nakładające się hiperbole od pozostałych opisów matematycznych krzywej hiperbolicznej. Jednakże poprawę wyników oszacowania prędkości uzyskano, gdy w warunkach brzegowych metody aproksymacji uwzględniono stałą wartość promienia. Spowodowało to, iż modele hiperboli uwzględniające rozmiar inkluzji oraz rozstaw między antenami prowadziły do wyników bliższych rzeczywistej wartości prędkości. Ponadto zaobserwowano, że na mapach georadarowych, na których badano dwa przylegające do siebie pręty, uzyskiwano wyższe wartości prędkości niż na radargramach, gdzie skanowano tylko pojedyncze pręty.
- Przylegające do siebie pręty spowodowały deformację kształtu hiperboli dyfrakcyjnej. Zaobserwowano znaczący wzrost amplitudy odbitego sygnału wraz ze wzrostem liczby przylegających do siebie prętów.
- Pręty ułożone równolegle do trasy skanowania, a znajdujące się poniżej zbrojenia prostopadłego do trasy skanowania, powodowały odcięcie hiperboli dyfrakcyjnej powstającej na poprzecznym pręcie. Odcięcie ramion hiperboli pojawiało się na głębokości występowania podłużnego odbicia od pręta równoległego do trasy skanowania. W sytuacji odwrotnej, gdy pręt poprzeczny znajdował się pod zbrojeniem równoległym, na mapie georadarowej zaobserwowano podłużne odbicie nad rzędem hiperbol.
- Przeprowadzony proces migracji umożliwił dokładne określenie rozkładu zbrojenia, a także zidentyfikowanie miejsc, w których występował więcej niż jeden pręt. Dodatkowo uzyskano trójwymiarową wizualizację układu zbrojenia wspornikowej części kładki, pod skanowanym obszarem z użyciem maty PSG.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

7.2. Ramowa kładka dla pieszych

7.2.1. Opis konstrukcji i problemu badawczego

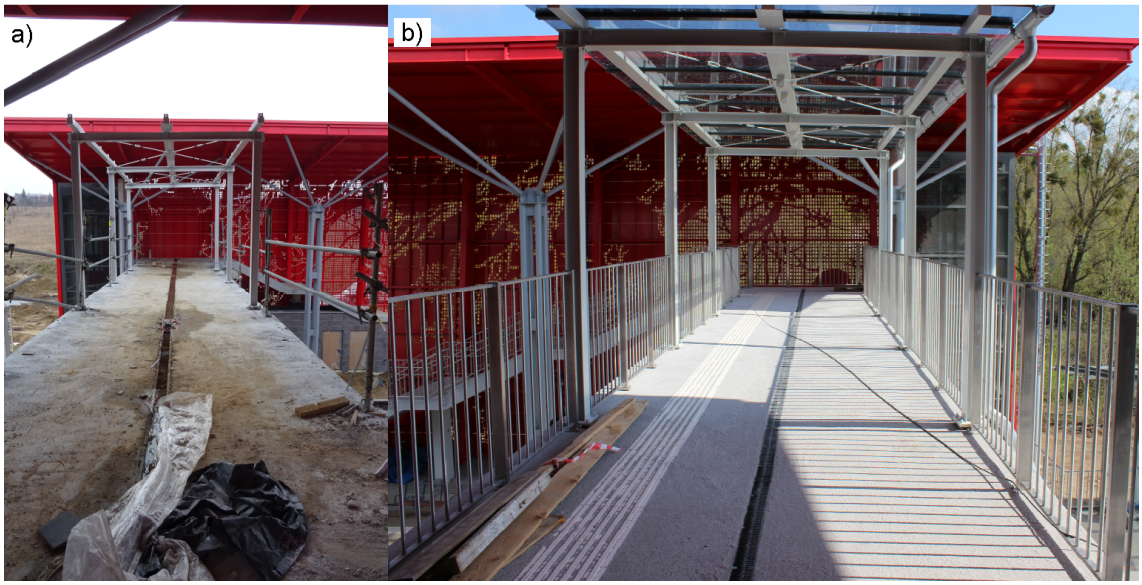
Pomiary metodą georadarową przeprowadzono na żelbetowej kładce dla pieszych, będącą częścią przystanku Pomorskiej Kolei Metropolitalnej (PKM) „Kiełpinek" w Gdańsku. Ramową konstrukcję nośną tworzy żelbetowa płyta o grubości 50 cm i szerokości 371 cm, monolitycznie połączona z układem słupów. Schody oraz szyby windowe zostały doprowadzone do przewieszeń kładki z obu peronów. Odwodnienie zostało zaprojektowane, jako ściek liniowy w osi konstrukcji. Na rys. 7.15 przedstawiono widok kładki w trakcie budowy wraz z rysunkiem wykonawczym, na którym pokazano zbrojenie przekroju podporowego.



Rys. 7.15. Ramowa kładka dla pieszych (Gdańsk, Polska, 54°21'19.0"N 18°31'44.2"E): a) widok ogólny, b) przekrój podporowy

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Opisany obiekt mostowy został poddany badaniom georadarowym ukierunkowanym na analizę wpływu wody zawartej w betonie na wyniki pomiaru. Badania doświadczalne przeprowadzono dwukrotnie, po raz pierwszy (rys. 7.16a) w niedługim czasie po wybudowaniu konstrukcji (bezpośrednio przed tymi badaniami wystąpiły duże opady atmosferyczne) oraz po raz drugi dwa miesiące później (rys. 7.16b), kiedy nawierzchnia kładki została już wykonana. W analizach wykorzystano autorski model hiperboli do oszacowania prędkości oraz autorski heterogeniczny model numeryczny betonu.



Rys. 7.16. Pomiary georadarowe kładki dla pieszych: a) po wybudowaniu, b) dwa miesiące później

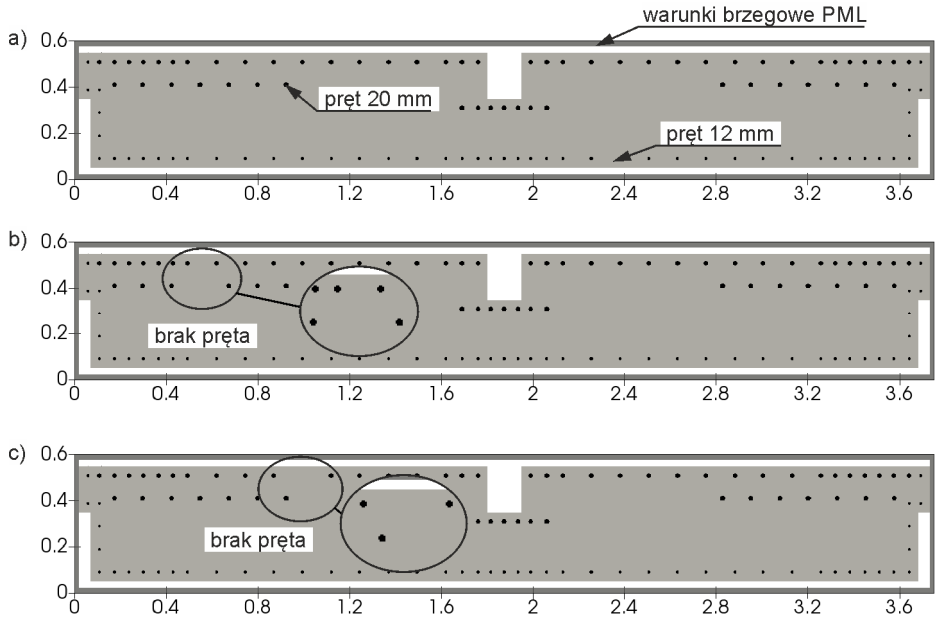
7.2.2. Symulacje numeryczne

Analizy numeryczne przeprowadzono za pomocą programu GprMax [146]. Do wzbudzenia fali elektromagnetycznej użyto funkcji Rickera o centralnej częstotliwości 2 GHz, przyjmując odstęp między anteną nadawczą i odbiorczą jako 6 cm.

W pierwszym etapie analiz numerycznych skupiono uwagę na możliwości wykrywania zbrojenia i uszkodzeń w badanej kładce, wykonując profilowanie poprzeczne. Wykonano model obliczeniowy 2D przekroju poprzecznego kładki na podstawie projektu wykonawczego (rys. 7.15b), z dokładnym odwzorowaniem zbrojenia bez żadnych uszkodzeń. W modelu nie uwzględniono nachylenia poprzecznego. Na jego podstawie wykonano dwa kolejne modele, w których usunięto wybrany pręt zbrojeniowy w górnej i środkowej warstwie (por. rys. 7.17b i c). Całkowity obszar obliczeniowy o wymiarach 375 cm × 60 cm został podzielony siatką Yee o wymiarach 2 mm × 2 mm. Płyta pomostu o szerokości 371 cm i wysokości 50 cm została wymodelowana jako

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

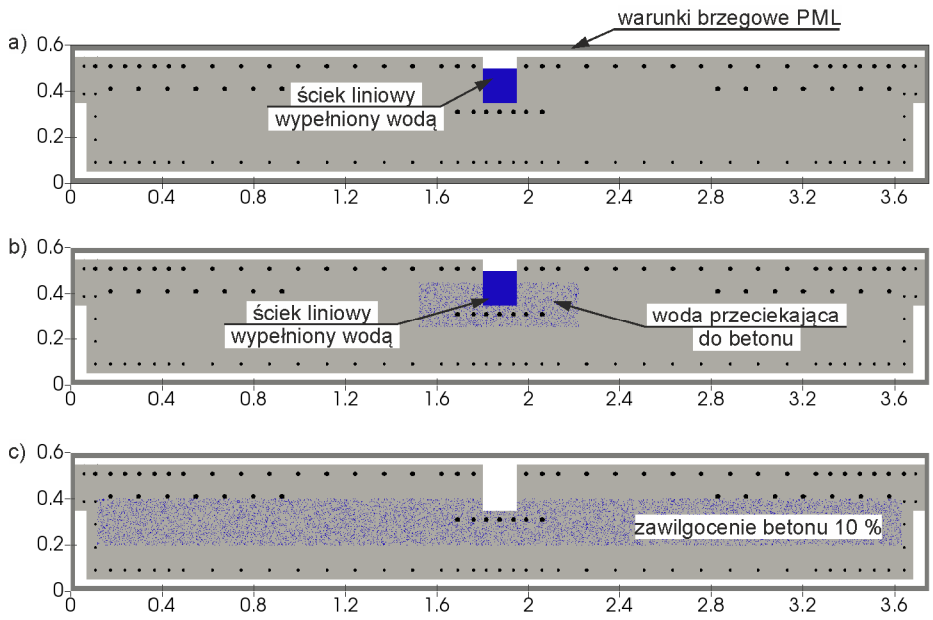
materiał homogeniczny o wartości przenikalności równej $\varepsilon_r = 5.76$ (zgodnie z pomiarami doświadczalnymi wykonanymi w drugim terminie) oraz przewodności $\sigma = 0.01$ S/m. Pręty zostały przyjęte jako materiał o idealnej przewodności elektrycznej.



Rys. 7.17. Modele numeryczne kładki dla pieszych: a) brak uszkodzeń, b) brak pręta w środkowej warstwie, c) brak pręta w górnej warstwie

W kolejnym etapie analiz numerycznych skupiono uwagę na wpływie zawilgocenia na czytelność map georadarowych. Tak, jak opisano w rozdziale 3.6.2 beton jest materiałem heterogenicznym, którego struktura i wilgotność ma wpływ na wyniki pomiarów georadarowych. Ze względu na rozmiar modeli numerycznych, uproszczono fazę stałą i gazową do materiału homogenicznego, natomiast fazę ciekłą wprowadzono za pomocą pojedynczych oczek Yee, umieszczając je w modelu w sposób pseudolosowy. Do właściwości elektrycznych wody wykorzystano zaimplementowany w programie gprMax model dyspersji Debye'a (rys. 2.1). Wykonano trzy modele numeryczne (rys. 7.18), w celu przeanalizowania wpływu wody na wyniki pomiarów georadarowych. W pierwszym modelu założono, że woda znajduje się wyłącznie w ścieku liniowym (rys. 7.18a), a izolacja zabezpiecza przed wsiąkaniem wody do betonu. Drugi model ilustruje niesprawny system odwodnienia, przez który woda wsiąka do konstrukcji (rys. 7.18b). Założono, że woda w obszarze wsiąkania zajmuje 10% objętości betonu. Ostatni model ukazuje zwiększoną wilgotność w wewnętrznych obszarach konstrukcji (rys. 7.18c). Założono, że woda odparowuje z zewnętrznych warstw konstrukcji i pozostaje tylko w środkowej części zajmując 10% objętości betonu.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

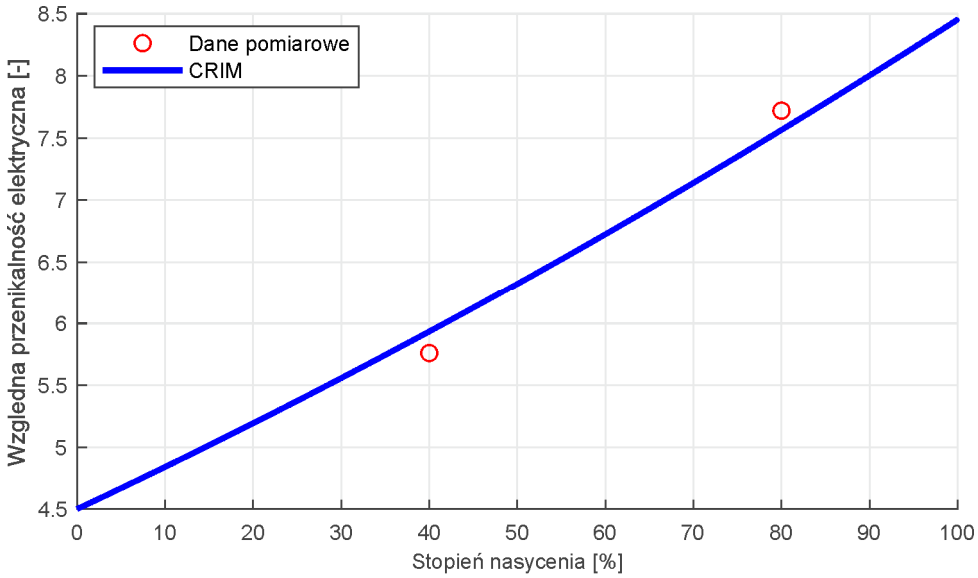


Rys. 7.18.Modele numeryczne kładki dla pieszych: a) woda w ścieku liniowym, b) woda przesiąkająca ze ścieku liniowego, c) woda w wewnętrznej warstwie konstrukcji

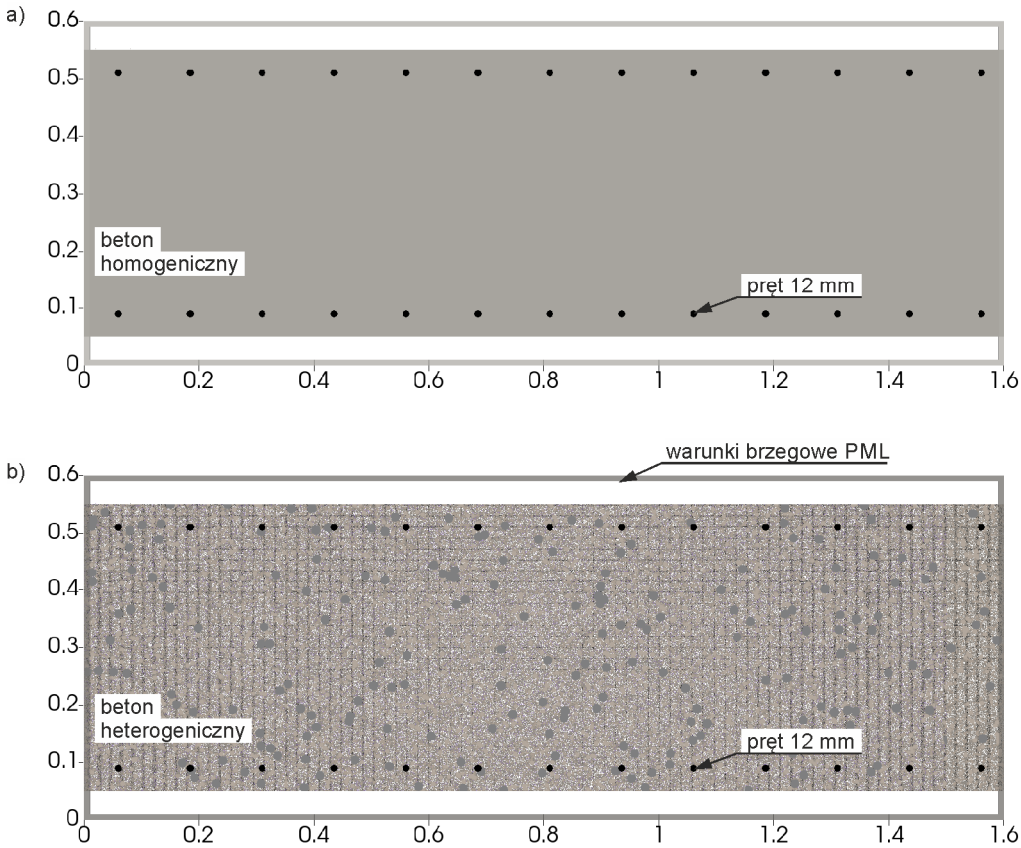
W ostatnim etapie przeprowadzono symulacje numeryczne dla profilowania podłużnego. Do analizy przyjęto wybrany fragment kładki o długości 1.6 m, dzięki czemu możliwe było zastosowanie heterogenicznego modelu betonu. Wykonano cztery modele. Dwa uwzględniały homogeniczny model betonu dla pomiarów w pierwszym i drugim terminie (rys. 7.20a), a kolejne dwa prezentowały heterogeniczny beton, również dla obu terminów (rys. 7.20b). Identyfikacja parametrów elektrycznych betonu pozwoliła ustalić, iż w pierwszym terminie efektywna przenikalność elektryczna wyniosła $\varepsilon_r = 7.72$, natomiast w drugim terminie była równa $\varepsilon_r = 5.76$. Proces uzyskiwania parametrów elektrycznych przeprowadzono tak, jak dla testowej próbki żelbetowej przedstawionej w rozdziale 6.1. W celu stworzenia numerycznego modelu założono, iż dla badanej konstrukcji, porowatość betonu wynosiła 20%, a nasiąkliwość objętościowa była równa 10%. Przyjęto, iż ustalone parametry elektryczne dla pierwszego terminu badań można przyrównać do 80% stopnia nasycenia (nasiąkliwość objętościowa 8%). Wyniki z drugiego terminu pomiarów przyrównano do 40% stopnia nasycenia (nasiąkliwość objętościowa 4%). Na tej podstawie dokonano wpasowania modelu CRIM (zależność (3.48)) za pomocą nieliniowej aproksymacji. Dla powietrza przyjęto $\varepsilon_a = 1$ oraz dla wody przyjęto $\varepsilon_{sw} = 79.1 + i8.6$, uzyskując dla fazy stałej wartość $\varepsilon_m = 5.46$ (rys. 7.19). Następnie zgodnie ze wzorem (3.54) przyjęto zastępcze wartości przenikalności elektrycznej fazy

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

stałej i ciekłej, uwzględniając tłumiące właściwości wody (wzór (6.1)), poprzez wprowadzenie przewodności ($\varepsilon_a = 1$, $\varepsilon_m = 5.46$, $\varepsilon_{sw} = 39.86$ oraz $\sigma = 0.95$ S/m).



Rys. 7.19. Zależność przenikalności elektrycznej od stopnia nasycenia

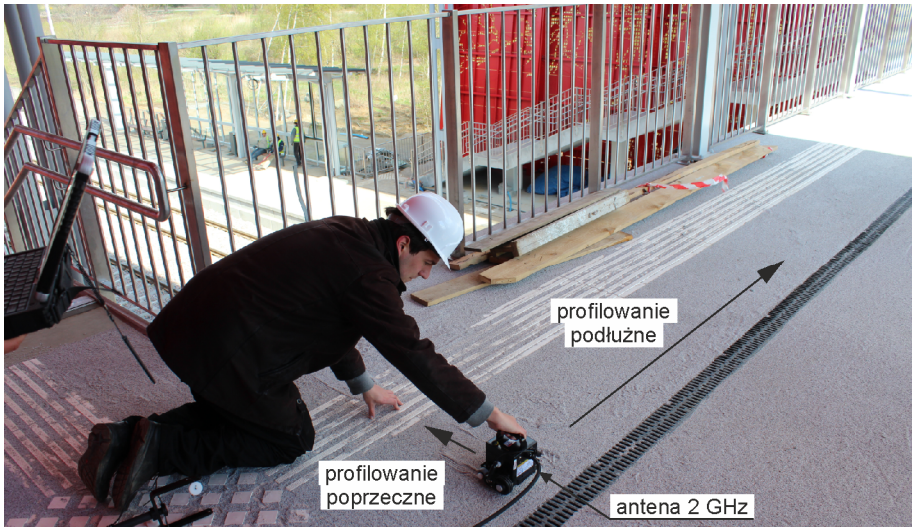


Rys. 7.20.Modele numeryczne kładki dla pieszych w profilowaniu podłużnym:
a) model homogeniczny, b) model heterogeniczny

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

7.2.3. Badania doświadczalne

Badania doświadczalne przeprowadzono na żelbetowej kładce prowadząc profile poprzeczne i podłużne (rys. 7.21). W pierwszym terminie prowadzono je bezpośrednio na warstwie konstrukcyjnej, mając dostęp jedynie do części konstrukcji (bez ścieku liniowego). W drugim terminie pomiary wykonano również nad ściekiem liniowym, jednak bez stref przy barierkach, z uwagi na prowadzone w ich pobliżu prace wykończeniowe. Zapisywano odcinek czasowy długości 32 ns, rejestrując 1024 próbki/skan z krokiem zapisu 10 mm.



Rys. 7.21. Ramowa kładka dla pieszych podczas pomiarów w drugim terminie

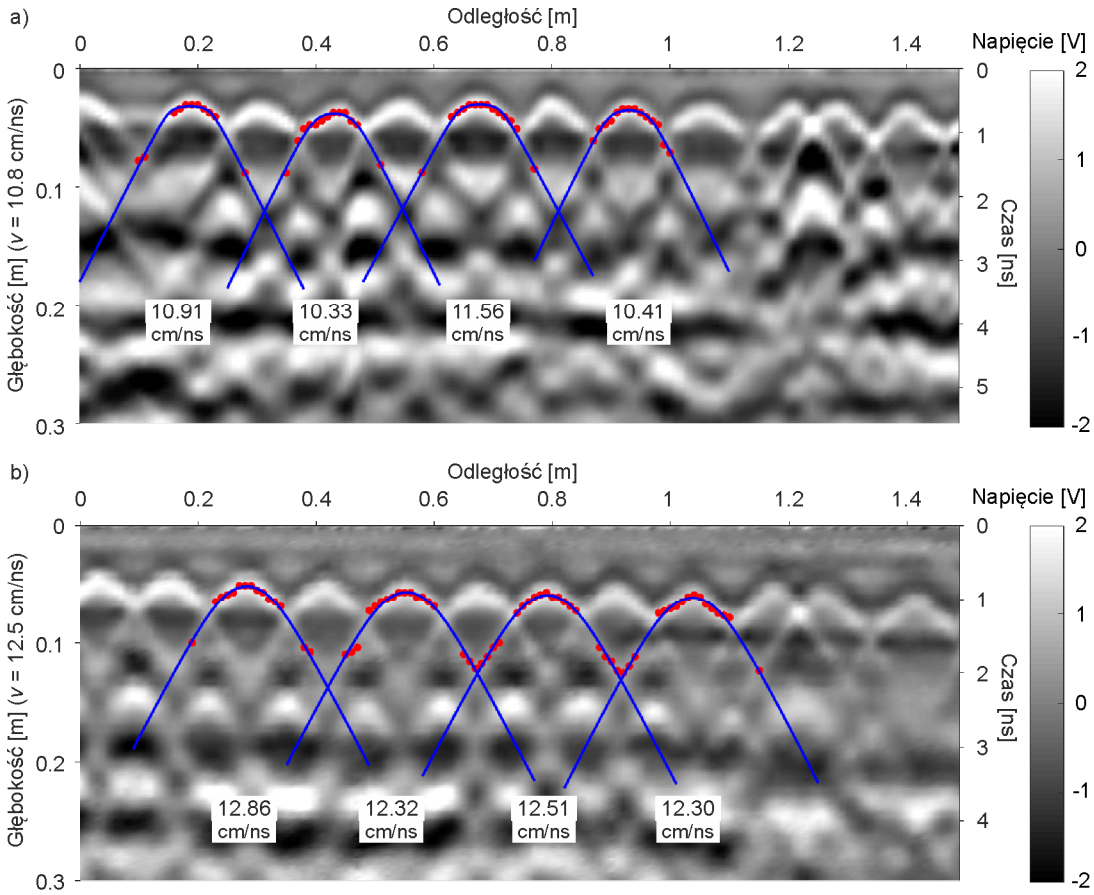
7.2.4. Wyniki

7.2.4.1. Identyfikacja parametrów elektrycznych

Parametry elektryczne mieszanki betonowej ustalono na podstawie identyfikacji prędkości propagacji fali elektromagnetycznej. Do analizy przyjęto dwie mapy georadarowe z profilowania podłużnego, które zostały wykonane podczas dwóch terminów pomiarów. Dokonano ekstrakcji wybranych czterech hiperbol za pomocą metody dwóch krzywych (por. rozdział 6.1.3). Proces aproksymacji wybranych punktów przeprowadzono za pomocą metody Levenberga-Marquardta [84], używając autorskiego modelu hiperboli (wzór (5.16)). Warunki brzegowe dla prędkości fali v przyjęto od 0.01 cm/ns do 30 cm/ns, dla położenia pręta x_0 od 0.01m do 2.00 m oraz dla głębokości pręta (czyli opóźnienia czasowego t_0) od 0.01 ns do 6 ns. Promień pręta przyjęto jako wartość stałą równą R = 6 mm, zgodnie z projektem wykonawczym kładki. Parametry

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

początkowe były dobierane dla każdej hiperboli oddzielnie jako wartości wynikowe z liniowej aproksymacji zależnością (5.5). Na rys. 7.22 przedstawiono dwa radargramy z zaznaczonymi punktami i hiperbolami. Proces aproksymacji dla pomiarów z pierwszego terminu (rys. 7.22a) pozwolił ustalić średnią prędkość jako v = 10.8 cm/ns, co zgodnie z zależnością (5.3) przekłada się na wartość przenikalności elektrycznej równej $\varepsilon_r = 7.72$. Dla mapy georadarowej wykonanej w drugim terminie oszacowano średnią prędkość jako v = 12.50 cm/ns, uzyskując wartość przenikalności $\varepsilon_r = 5.76$.



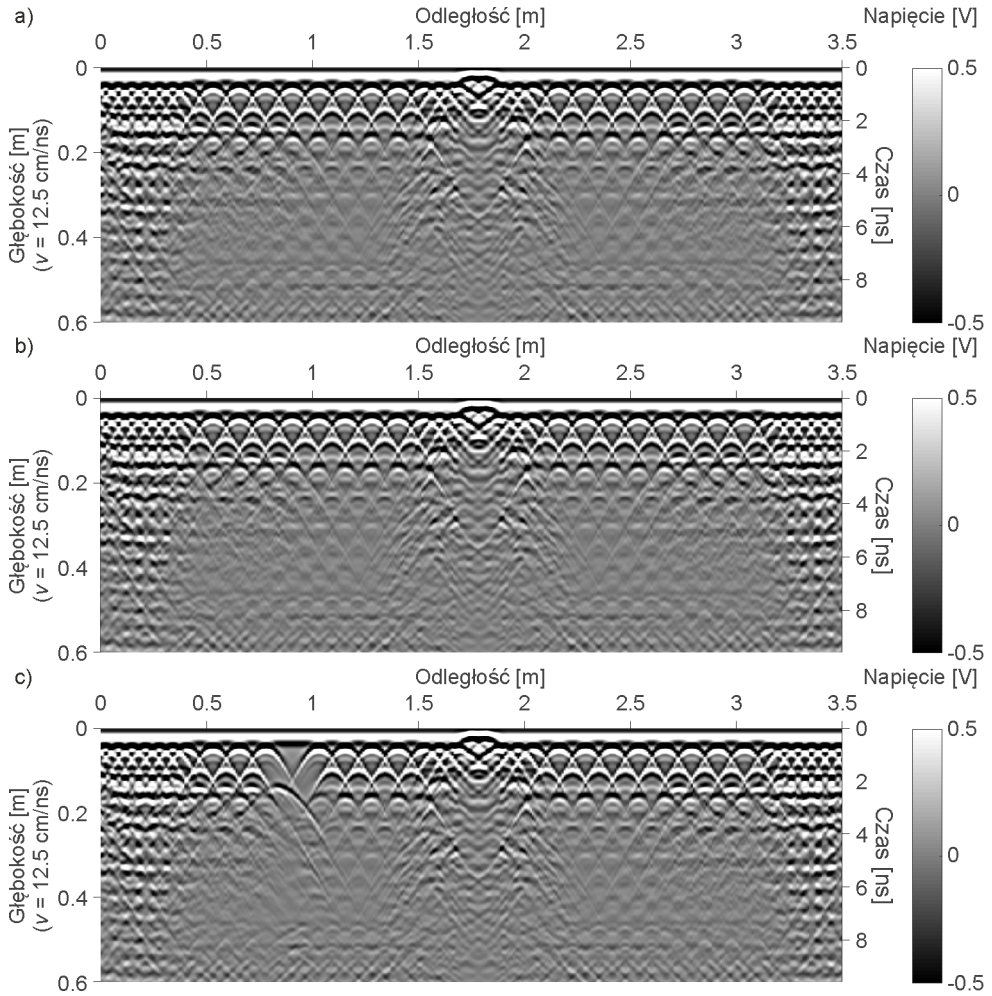
Rys. 7.22. Mapy georadarowe z zaznaczonymi punktami i hiperbolami dla pomiaru: a) w pierwszym terminie, b) w drugim terminie

7.2.4.2. Profilowanie poprzeczne

Rysunek 7.23 przedstawia obliczone mapy georadarowe dla trzech modeli numerycznych. Radargram obliczony dla modelu bez żadnych uszkodzeń (rys. 7.23a) pokazuje wyraźne i mocne odbicia dla górnej warstwy prętów. Przy gęstszym ułożeniu prętów (strefa barierki) większa część energii jest zatrzymywana na zbrojeniu i nie jest przepuszczana dalej w głąb konstrukcji. Dolne zbrojenie jest bardzo słabo widoczne ze względu na stratność betonu, która została wprowadzona do modelu poprzez określenie

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

przewodności. Warto zauważyć, że okolice ścieku liniowego ze względu na liczne ugięcia i odbicia fali pozostają nieczytelne. W przypadku modelu, w którym usunięto pręt w górnej warstwie zbrojenia (rys. 7.23c), brak jednej z hiperbol dyfrakcyjnych jest wyraźnie zauważalny. Natomiast w modelu bez jednego z prętów w warstwie środkowej (rys. 7.23b), brak hiperboli jest bardzo słabo zauważalny z uwagi na nakładające się odbicia od górnej warstwy zbrojenia.

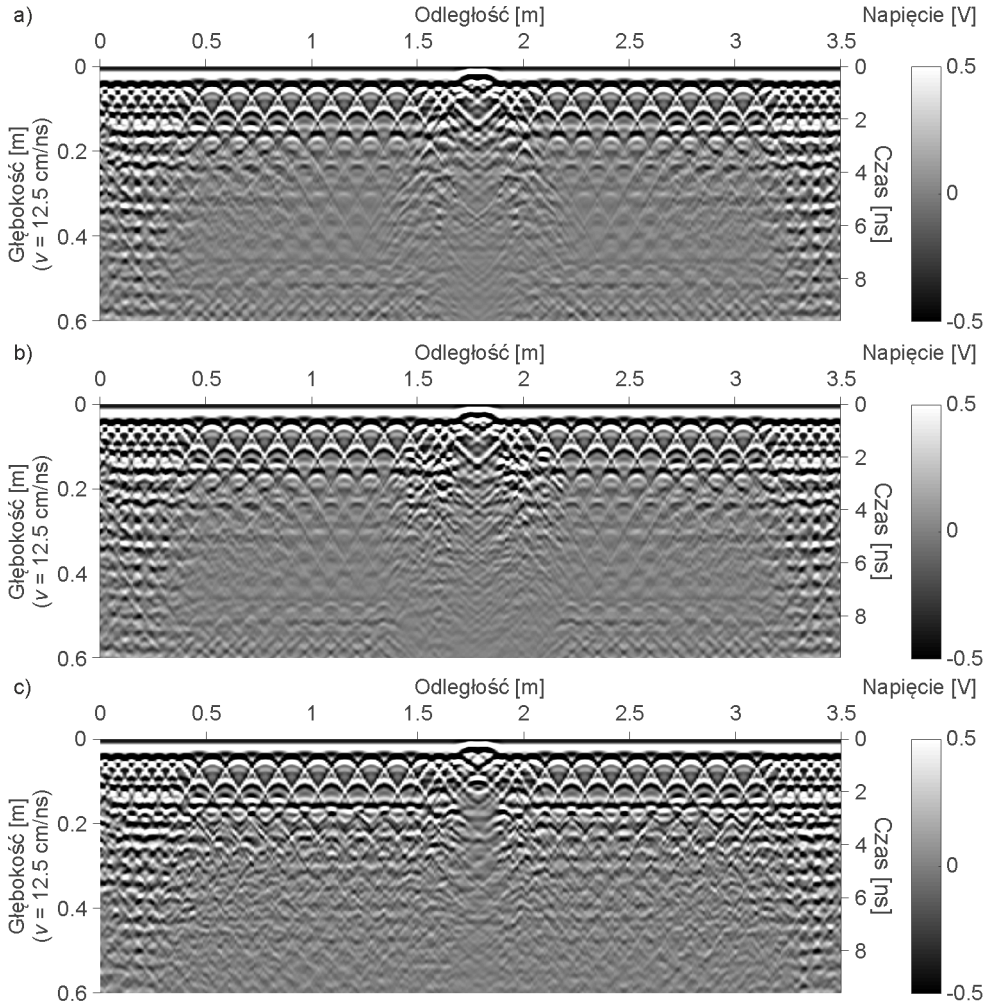


Rys. 7.23. Numeryczne mapy georadarowej dla modelu: a) brak uszkodzeń, b) brak pręta w środkowej warstwie, c) brak pręta w górnej warstwie

Numeryczne mapy georadarowe dla modeli uwzględniających wodę w betonie zostały pokazane na rys. 7.24. Radargram dla modelu, w którym woda zalega w ścieku liniowym, a izolacja nie przepuszcza wody do wewnątrz konstrukcji (rys. 7.24a), nie wykazuje większych różnic w porównaniu z mapą georadarową dla modelu bez uszkodzeń (por. rys. 7.23a). Liczne ugięcia i odbicia fali w okolicach ścieku liniowego tworzą obraz nieczytelny również w modelu bez wody. Jednakże dla modelu, w którym woda dostaje się przez nieszczelną izolację ścieku liniowego do wnętrza konstrukcji (rys. 7.24b)

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

wyraźnie widać, iż na obszarze zawilgocenia występuje pewnego rodzaju odcięcie sygnału. Poniżej obszaru zawilgoconego nie widać żadnych istotnych odbić. Najbardziej zbliżoną mapą numeryczną do map eksperymentalnych uzyskano przy użyciu modelu, w którym uwzględniono wodę w całej konstrukcji (rys. 7.24c). Widoczne są odbicia od górnego zbrojenia, a wykrywalność środkowych prętów zależy od stopnia zawilgocenia betonu. Ciekawym zjawiskiem jest również odbicie na głębokości około 12 cm, które ilustruje odbicie od warstwy wody ze względu na jej regularny kształt w modelu numerycznym (por. rys. 7.18c).

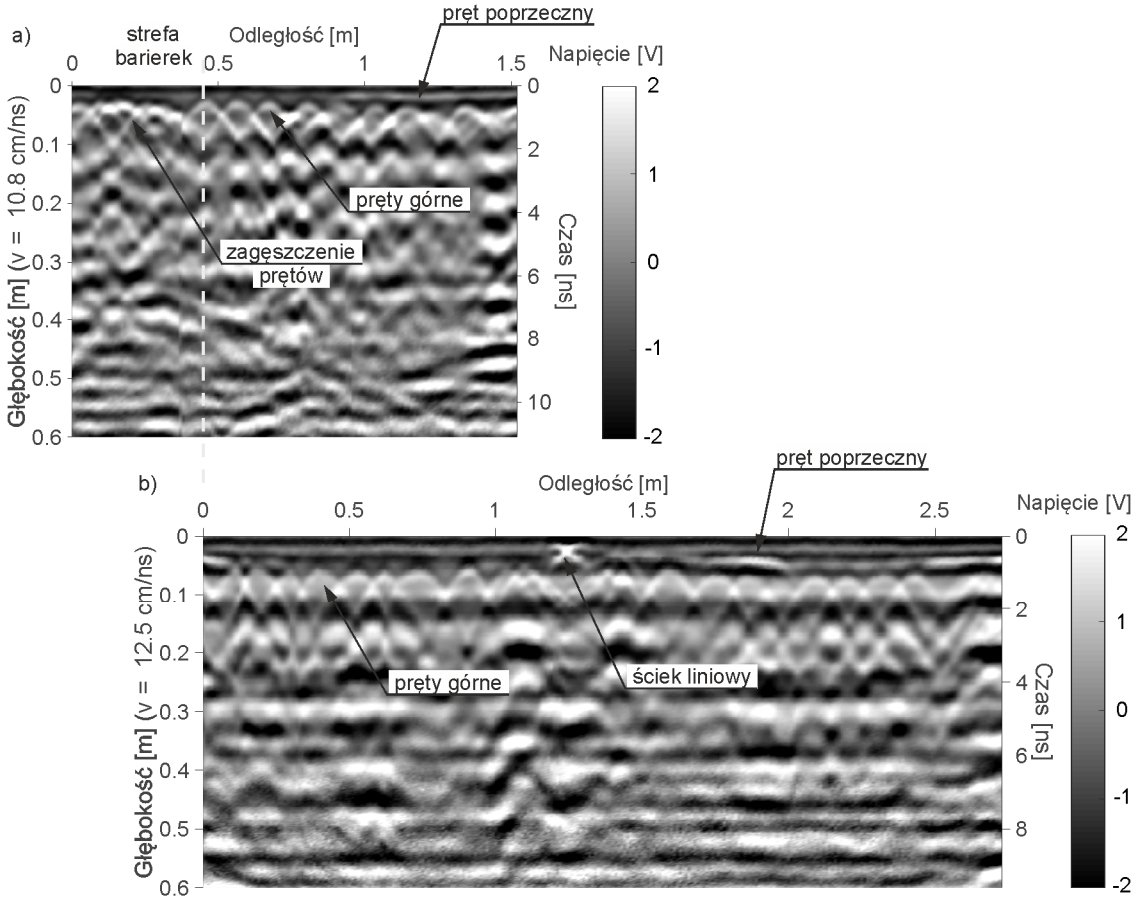


Rys. 7.24. Numeryczne mapy georadarowe dla modelu: a) woda w ścieku liniowym, b) woda przesiąkająca ze ścieku liniowego, c) woda w wewnętrznej warstwie konstrukcji

Uzyskane z pomiarów mapy georadarowe przetworzono i przedstawiono na rys. 7.25. W obu przypadkach zidentyfikowano średni rozstaw górnego zbrojenia jako ok. 13 cm. Dla obu pomiarów efektywna głębokość penetracji fali wyniosła ok. 40 cm. Na mapie georadarowej wykonanej w pierwszym terminie (rys. 7.25a) zaobserwowano zagęszczenie zbrojenia w obszarze barierek ochronnych. Na długości między 1 m a 1.5 m

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

widoczne jest także podłużne odbicie, które prawdopodobnie obrazuje zbrojenie poprzeczne. Na radargramie wykonanym na całej szerokości kładki (rys. 7.25b) widoczne jest zagęszczenie zbrojenia przy ścieku liniowym. Poza tym, w obszarze wypełnionego wodą ścieku liniowego można zaobserwować liczne odbicia i wzmocnienia sygnału, ze względu na obecność wody. Widoczne są również podłużne odbicia sygnalizujące obecność zbrojenia poprzecznego.



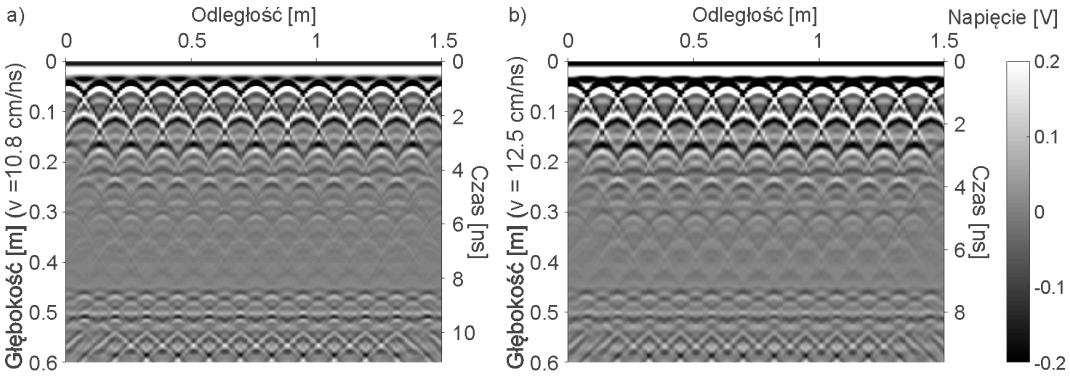
Rys. 7.25. Doświadczalna mapa georadarowa z profilowania poprzecznego dla badania: a) po wybudowaniu, b) dwa miesiące później

7.2.4.3. Profilowanie podłużne

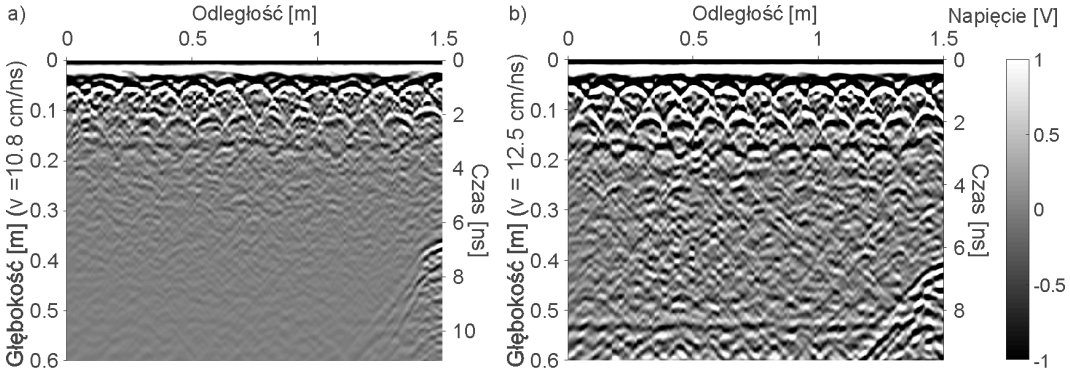
Numeryczne mapy georadarowe z profilowania podłużnego dla badania w pierwszym i drugim terminie, przedstawiono na rys. 7.26. Można na nich zaobserwować mocne odbicia od górnej warstwy prętów zbrojeniowych. Hiperbole dyfrakcyjne powstałe na dolnych prętach pozostają mniej widoczne. Dodatkowo można zauważyć podłużne odbicie od spodu konstrukcji. Jedyną różnicą między radargramami jest czas symulacji, ze względu na różne wartości przenikalności elektrycznej betonu. Na rys. 7.27 pokazano numeryczne radargramy dla modelu heterogenicznego z różnym stopniem nasycenia.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

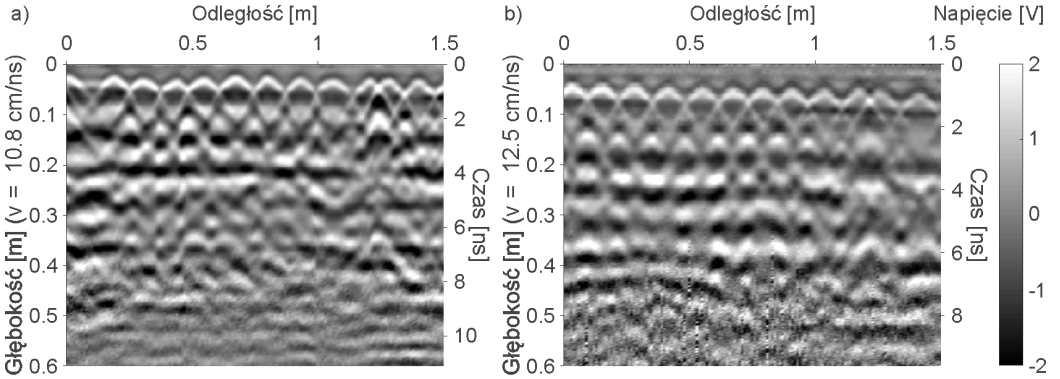
Model uwzględniający 80% stopnia nasycenia (rys. 7.27a) ukazuje silne odbicia od górnych prętów. Natomiast silne parametry tłumiące wody sprawiają, iż poniżej prętów amplituda odbitego sygnału drastycznie maleje. Na mapie georadarowej, obliczonej dla modelu uwzględniającego 40% stopnia nasycenia (rys. 7.27b), który odpowiada badaniu w drugim terminie, można zauważyć już odbicie od spodu konstrukcji. Ponadto obszar betonu ujawnia wiele odbić, od poszczególnych frakcji betonu.



Rys. 7.26. Numeryczna mapa georadarowa dla modelu homogenicznego z profilowania podłużnego dla badania: a) w pierwszym terminie, b) w drugim terminie



Rys. 7.27. Numeryczna mapa georadarowa dla modelu heterogenicznego z profilowania podłużnego dla badania: a) w pierwszym terminie, b) w drugim terminie



Rys. 7.28. Doświadczalna mapa georadarowa z profilowania podłużnego dla badania: a) w pierwszym terminie, b) w drugim terminie

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Przetworzone mapy georadarowe z profilowania podłużnego uzyskane z pomiarów w pierwszym i drugim terminie, zostały przedstawione na rys. 7.28. Na obu radagramach ujawniają się hiperbole od górnych prętów zbrojeniowych. Na żadnej mapie nie można zaobserwować odbicia od dolnych prętów, ani od spodu konstrukcji. Należy podkreślić, iż najbliższe radargramom doświadczalnym są mapy georadarowe uzyskane dla modeli numerycznych z wykorzystaniem heterogenicznego modelu betonu.

7.2.5. Podsumowanie

W rozdziale przedstawiono doświadczalne i numeryczne analizy propagacji fali elektromagnetycznej we fragmencie kładki dla pieszych dla dwóch różnych stopni jej zawilgocenia. Dokonano identyfikacji prędkości fali elektromagnetycznej za pomocą autorskiego opisu matematycznego hiperboli. W symulacjach FDTD przenalizowano wpływ uszkodzeń w postaci braku pręta, a także wykorzystano heterogeniczny model betonu. Na podstawie wykonanych badań można sformułować następujące wnioski:

- Zawilgocenie konstrukcji ma silny wpływ na wyniki pomiarów doświadczalnych, powodując zmianę prędkości propagacji fali elektromagnetycznej. Przeprowadzone pomiary pokazują, iż wartość prędkości należy identyfikować każdorazowo dla każdego terminu pomiaru. Potwierdzono, iż silne właściwości tłumiące wody sprawiają, iż wraz ze wzrostem głębokości amplituda odbitego sygnału znacznie maleje.
- Wyniki obliczeń dla modelu poprzecznego kładki pokazały, że brak jednej z hiperbol dyfrakcyjnych był możliwy do zaobserwowania jedynie w modelu, w którym usunięto pręt w górnej warstwie zbrojenia. Natomiast w modelu bez jednego z prętów w warstwie środkowej brak hiperboli był bardzo słabo zauważalny z uwagi na nakładające się odbicia od warstwy górnego zbrojenia. Wyniki obliczeń dla modelu z uwzględnieniem zawilgocenia betonu umożliwiły uzyskanie radargramów zbliżonych do wyników doświadczalnych, na podstawie których zidentyfikowano jedynie górną warstwę prętów.
- Pomiary doświadczalne przeprowadzone w dwóch rożnych terminach na konstrukcji kładki o różnym stopniu nasycenia, umożliwiły wykonanie heterogenicznego modelu numerycznego betonu.
- Wyniki obliczeń dla profilowania podłużnego pokazały, iż opracowany w ramach niniejszej rozprawy heterogeniczny model betonu, jest zdecydowanie bliższy pomiarom doświadczalnym niż zazwyczaj stosowany model homogeniczny.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

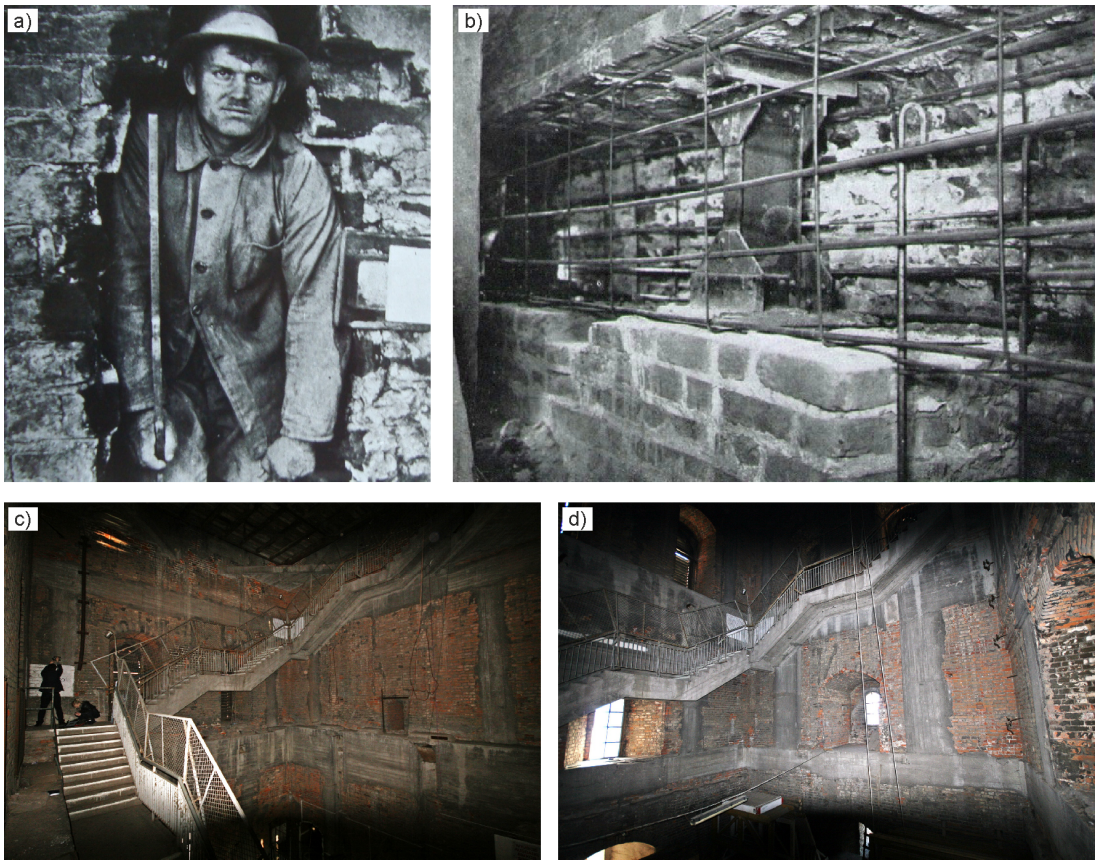
7.3. Wieża Bazyliki Mariackiej w Gdańsku

7.3.1. Opis konstrukcji i problemu badawczego

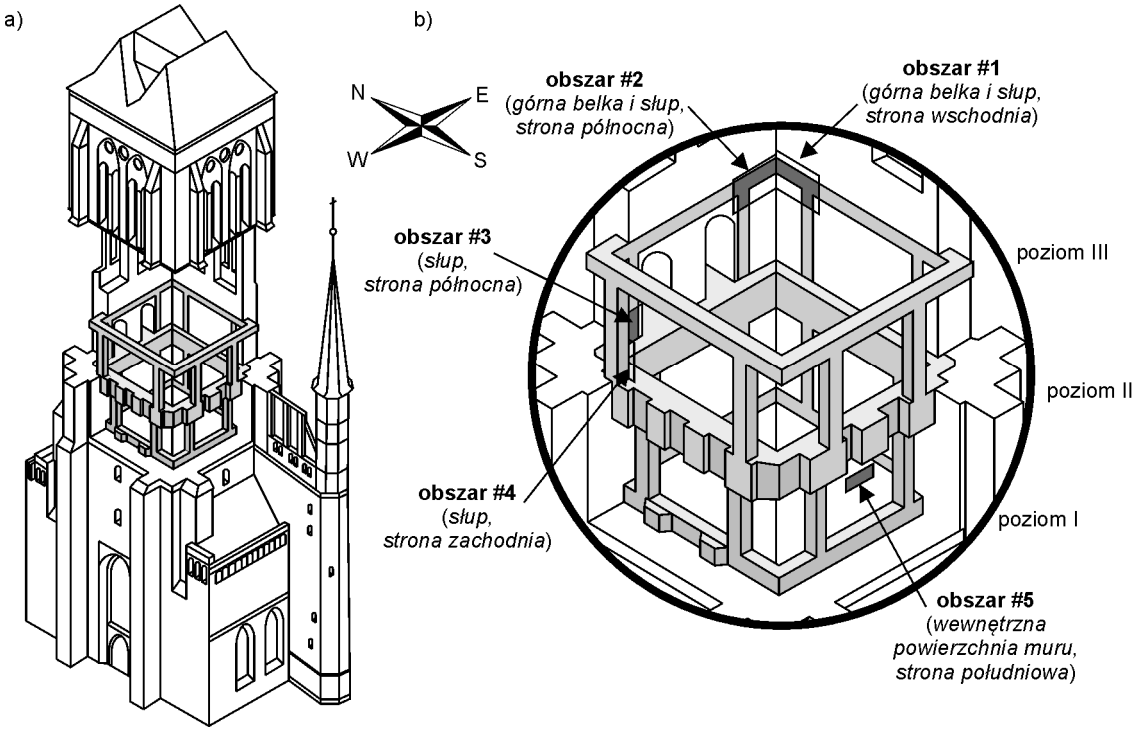
Konkatedralna Bazylika Wniebowzięcia Najświętszej Marii Panny, położona w sercu Gdańska (rys. 7.29), znana jest jako największy ceglany obiekt sakralny na świecie [18]. Kościół ten był budowany w kilku etapach przez 159 lat (1343-1502) [38]. Dominującym elementem architektonicznym Bazyliki Mariackiej jest wieża dzwonna wzniesiona na planie prostokąta [19]. Z biegiem lat wzdłuż całej wysokości wieży powstały rysy i pęknięcia. Niektóre z nich były takiej szerokości (rys. 7.30a), że mógł się w nich zmieścić człowiek [19, 168]. Proces odbudowy rozpoczął się w 1928 roku [39]. Zgodnie z projektem prof. Kohnke – inżyniera budowlanego z Technische Hochschule der Freien Stadt Danzig (obecnie: Politechnika Gdańska) – uszkodzona wieża miała zostać wzmocniona żelbetową ramą (rys. 7.30 i 7.31). Rama składa się z trzech pierścieni belek wokół wieży, połączonych ośmioma słupami (rys. 7.31). Prace renowacyjne rozpoczęły się od wycięcia bruzd w ścianach ceglanych, w celu uformowania belek i słupów. Następnie w bruzdach umieszczono pręty zbrojeniowe oraz krótkie słupki stalowe o profilu dwuteowym, aby zapobiec zapadnięciu się konstrukcji (rys. 7.30b). W końcowym etapie bruzdy wypełniono mieszanką betonową (rys. 7.30c, d). Kościół Mariacki został w dużym stopniu zniszczony w 1945 roku na skutek ostrzału artyleryjskiego oraz pożaru. Pożar objął również wieżę, był on tak intensywny, że topiły się cegły [19], jednak dzięki żelbetowej ramie wzmacniającej wieża nie uległa zawaleniu.

Rys. 7.29. Bazylika Mariacka (Gdańsk, Polska, 54°20'59.5"N 18°39'11.1"E)

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 7.30. Wzmocnienie wieży dzwonnicy Bazyliki Mariackiej: a) rozmiar uszkodzeń [168], b) część żelbetowego pierścienia przed betonowaniem [39], c) rama żelbetowa (poziom III i poziom II, strona północna i wschodnia), d) rama żelbetowa (poziom II i poziom I, strona zachodnia i południowa)



Rys. 7.31 Dzwonnica Bazyliki Mariackiej: a) ogólny widok wieży z układem wzmacniającym (przerysowany na podstawie [39]); b) rama żelbetowa z lokalizacjami pięciu obszarów badań GPR [109]

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

7.3.2. Symulacje numeryczne

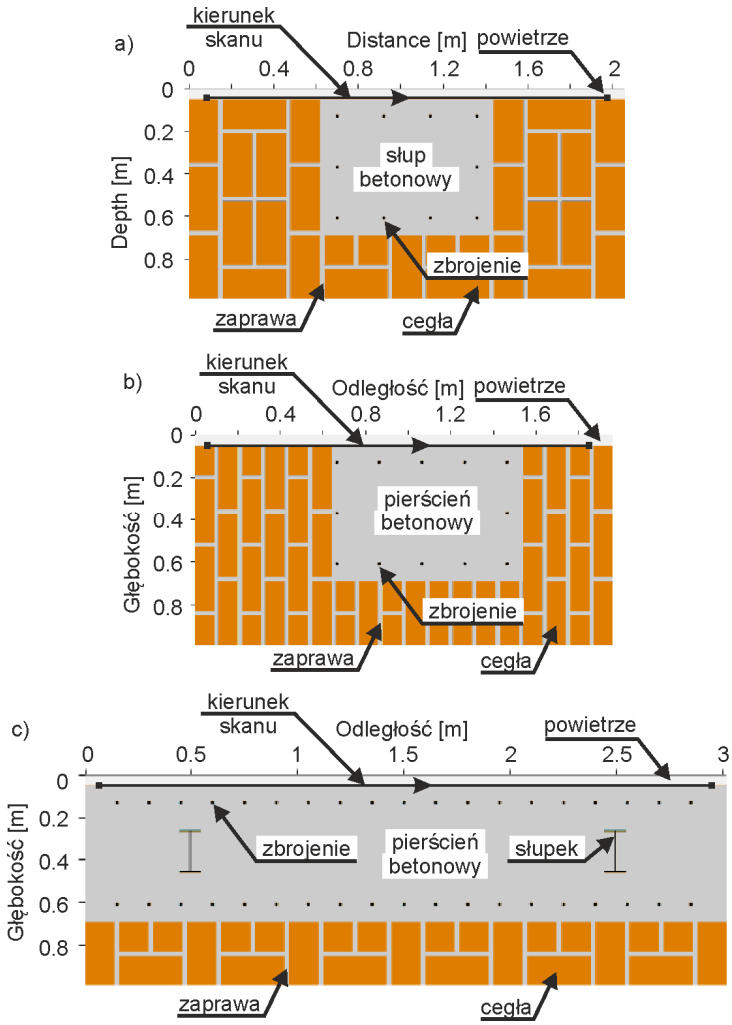
Analizy numeryczne propagacji fali elektromagnetycznej przeprowadzono w celu zapewnienia poprawnej interpretacji wyników badań doświadczalnych oraz zidentyfikowania źródeł powstałych odbić. Szczególną uwagę zwrócono na kształt zarejestrowanych odbić i ugięć fali na granicy między ośrodkami o różnych właściwościach elektrycznych. Obliczenia wykonano metodą FDTD z wykorzystaniem oprogramowania GprMax v2 [32]. Wykonano trzy modele numeryczne (rys. 7.32), które odpowiadają sytuacji przedstawionej na rys. 7.30b (połączenie belki ze słupem). Ściany murowane zostały wykonane z gotyckich cegieł (30 cm × 14 cm × 9 cm) w wiązaniu flamandzkim. Na obrzeżach obszaru numerycznego zastosowano absorbujące warunki brzegowe Higdona trzeciego rzędu. Modele zdyskretyzowano za pomocą siatki Yee o wymiarach 2 mm × 2 mm. Impuls wygenerowano przy użyciu funkcji Rickera o centralnej częstotliwości 2 GHz. Odstęp między anteną nadawczą i odbiorczą przyjęto jako 6 cm.

Pierwszym rozważanym przypadkiem jest model ilustrujący sytuację poziomego profilowania ściany wraz ze słupem żelbetowym (rys. 7.32a), co oznacza, iż trasa skanowania jest równoległa do warstw cegieł i jednocześnie prostopadła do żelbetowego słupa. Model 2D o wymiarach 0.99 m × 2.06 m składa się z warstwy powietrza o grubości 5 cm i warstwy muru wzmocnionego słupem żelbetowym. W części betonowej (słup), o wymiarach 0.82 m × 0.64 m, umieszczone zostały pręty zbrojeniowe o średnicy 16 mm. Drugi model przedstawia żelbetowy pierścień osadzony w murze ceglanym (rys. 7.32b), który odpowiada sytuacji pionowego profilowania, to znaczy, że trasa skanowania jest prostopadła do warstw cegieł i jednocześnie prostopadła do żelbetowego pierścienia (belki). Ściana murowana o wymiarach 0.99 m × 1.64 m została wzmocniona żelbetowym pierścieniem o wymiarze 0.96 m × 0.64 m, w którym dolne pręty zostały ustawione w odległości 2 cm od cegieł. Wartość ta została ustalona na podstawie fotografii żelbetowego pierścienia przed betonowaniem (por. rys. 7.30b), na której można zauważyć, iż główne zbrojenie ułożone jest na strzemionach, które są bezpośrednio ułożone na murze. Górne pręty zbrojeniowe natomiast umieszczono w odległości 7 cm od cegieł. Ostatni model przedstawia poziome profilowanie żelbetowego pierścienia o długości 3.02 m i szerokości 0.64 m (rys. 7.32c), co oznacza, iż trasa skanowania jest równoległa do żelbetowego pierścienia (belki). W modelu uwzględniono strzemiona oraz

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

dwa stalowe słupki o przekroju dwuteowym, które miały podtrzymywać wyższe części muru przed betonowaniem (por. rys. 7.30b).

W modelach numerycznym przyjęto wartości względnej przenikalności betonu $\varepsilon_r = 5.3$ i cegły $\varepsilon_r = 3.5$ zgodnie z uzyskanymi prędkościami z pomiarów *in situ*. Wartości prędkości propagacji fali elektromagnetycznej uzyskano na podstawie dopasowania ugiętych hiperbol, opisanych zależnościami (5.23) i (5.24), widocznych na mapach georadarowych uzyskanych z pomiarów doświadczalnych. Dla zaprawy przyjęto, że wartość względnej przenikalności wynosi $\varepsilon_r = 4.0$. Przewodność dla wszystkich założonych materiałów została przyjęta jako $\sigma = 0.02$ S/m.



Rys. 7.32. Model numeryczny: a) trasa skanowania równoległa do warstw cegieł i prostopadła do żelbetowego słupa, b) trasa skanowania prostopadła do warstw cegieł i prostopadła do żelbetowego pierścienia, c) trasa skanowania równoległa do żelbetowego pierścienia

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

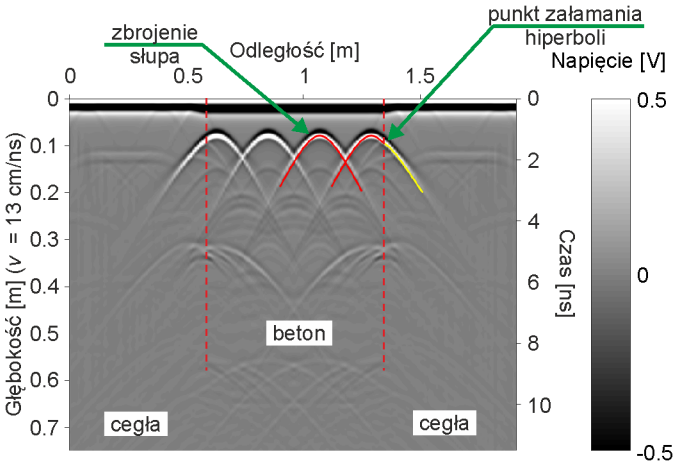
7.3.3. Badania doświadczalne

Badania georadarowe przeprowadzono w pięciu obszarach wskazanych na rys. 7.31b. W każdym obszarze były wykonywane profile podłużne (L) i poprzeczne (T) w odstępie 10 cm. Pierwszy badany obszar (#1) znajdował się na najwyższym poziomie betonowej ramy po wschodniej stronie, przy połączeniu belki i słupa. Wykonano osiemnaście profili poprzecznych i podłużnych. Drugie badane miejsce (#2) znajdowało się w tym samym narożniku ramy, ale po stronie północnej, gdzie wykonano osiemnaście profili poprzecznych i szesnaście skanów podłużnych. Obszar #3 (16 skanów L i 10 skanów T) i #4 (13 skanów L i 9 skanów T) były umieszczone na słupach między górnym i środkowym pierścieniem w północno-zachodniej części wieży. Ostatni obszar #5 (8 skanów L) znajdował się pomiędzy środkowym i dolnym pierścieniem w miejscu, w którym zgodnie ze szkicem nie powinien występować żaden element konstrukcyjny żelbetowej ramy. Zarejestrowany zakres czasu wynosił 32 ns, a liczba próbek pobranych podczas rejestracji pojedynczego sygnału wynosiła 512 dla kroku zapisu 10 mm.

7.3.4. Wyniki

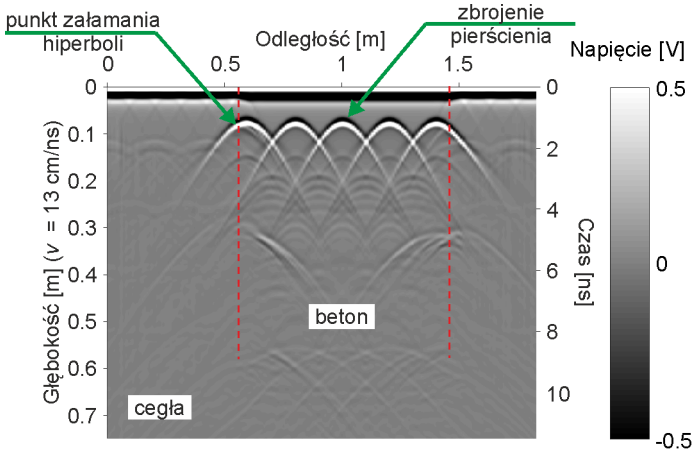
Rysunek 7.33 przedstawia numeryczną mapę georadarową dla modelu poziomego profilowania, w którym trasa skanowania jest równoległa do warstw cegieł i prostopadła do żelbetowego słupa (por. rys. 7.32a). Na radargramie można zauważyć cztery hiperbole, które powstały w wyniku odbicia od czterech najbliższych prętów zbrojeniowych. Dwie wewnętrzne hiperbole są symetryczne, natomiast pierwsza i ostatnia hiperbola wyraźnie ukazują punkt ugięcia jednej z ramion hiperboli na granicy materiałów cegły i betonu. Kierunek ugięcia się hiperboli zależy od relacji pomiędzy względną przenikalnością dwóch sąsiadujących ze sobą ośrodków. W przypadku gdy materiał w którym znajduje się inkluzja ma wyższą wartość przenikalności od sąsiadującego ośrodka, ramię hiperboli unosi się (por. rys. 5.10). Korzystając z zależności (5.23) i (5.24), które opisują ugiętą hiperbolę dyfrakcyjną, zaznaczono na numerycznej mapie georadarowej dwie hiperbole (rys. 7.33). Kształt hiperboli niezdeformowanej opisuje zależność (5.23) (czerwona krzywa na rys. 7.33). Natomiast ugięta część krzywej hiperbolicznej zdefiniowana jest wzorem (5.24). Na rys. 7.33 ugięta hiperbola dyfrakcyjna została podzielona na dwie części: czerwoną część hiperboli opisaną przez równanie (5.23) oraz żółte ugięte ramię hiperboli określone zależnością (5.24).

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 7.33. Numeryczna mapa georadarowa dla modelu trasy skanowania równoległej do warstw cegieł i prostopadłej do żelbetowego słupa

Rysunek 7.34 ilustruje numeryczną mapę georadarową dla modelu pionowego profilowania, dla którego trasa skanowania jest prostopadła do warstw cegieł i prostopadła do żelbetowego pierścienia (por. rys. 7.32b). Na radargramie można zaobserwować pięć hiperbol, które obrazują pięć prętów zbrojeniowych, umiejscowionych przy powierzchni skanowania. Na ostatniej hiperboli można wyraźnie zidentyfikować punkt ugięcia hiperboli na granicy między betonem i murem. Natomiast punkt ugięcia na pierwszej hiperboli jest prawie niewidoczny z powodu małej odległości między stalowym prętem, a krawędzią muru.

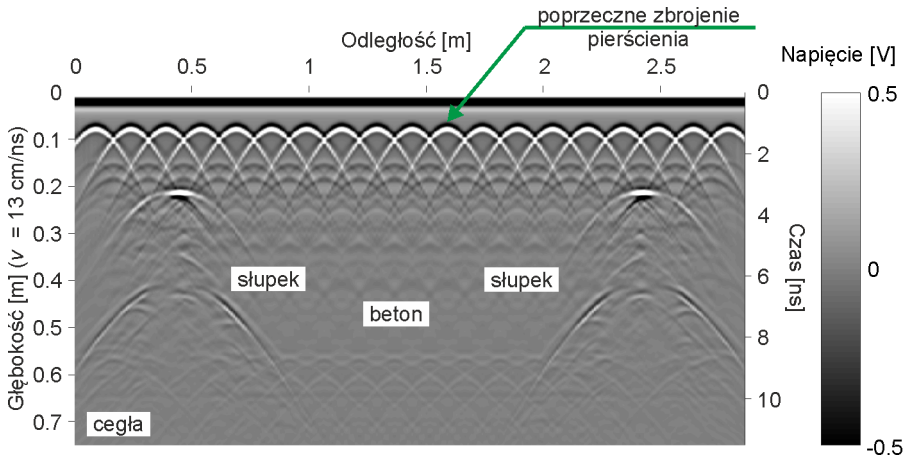


Rys. 7.34. Numeryczna mapa georadarowa dla modelu trasy skanowania prostopadłej do warstw cegieł i prostopadłej do żelbetowego pierścienia

Numeryczny radargram dla modelu poziomego profilowania, w którym trasa skanowania jest równoległa do żelbetowego pierścienia (por. rys. 7.32c), przedstawiono na rys. 7.35. Na mapie georadarowej widać podłużne odbicie o nieznacznej amplitudzie na głębokości 64 cm, które wskazuje na granicę między betonem a ścianą murowaną.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Poza tym po obu stronach mapy georadarowej widać wyraźne odbicia od dwóch stalowych słupków. Odbicia w postaci krzywych hiperbolicznych są widoczne na głębokości odpowiadającej górnej i dolnej półce dwuteownika.



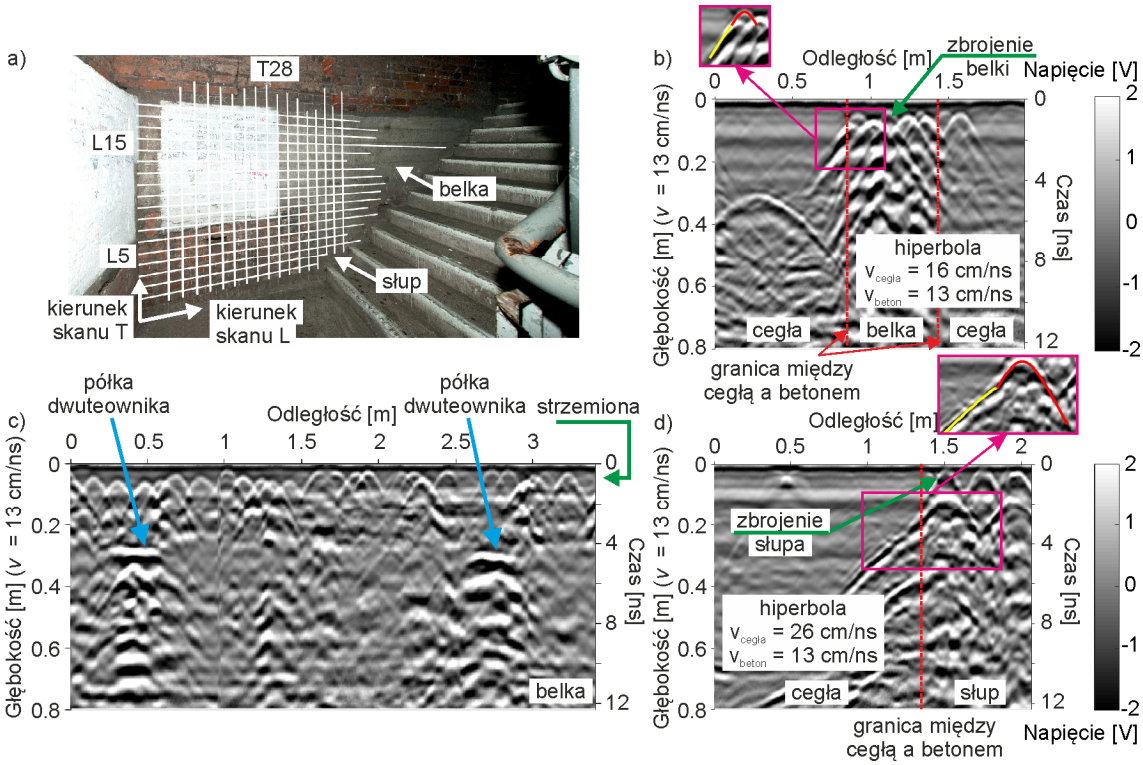
Rys. 7.35. Numeryczna mapa georadarowa dla modelu trasy skanowania równoległej do żelbetowego pierścienia

Rysunek 7.36 pokazuje widok na badany obszar #1 wraz z wybranymi mapami georadarowymi. W tym miejscu, na trzecim poziomie żelbetowej ramy, przebadano połączenie belki i słupa. Skan poprzeczny T28 (rys. 7.36b) został wykonany na murze ceglanym, następnie na belce, a na końcu ponownie na części murowej, co odpowiada analizie numerycznej przeprowadzonej na modelu pokazanym na rys. 7.32b. Radargram T28 (rys. 7.36b) ujawnia trzy charakterystyczne części odpowiadające różnym ośrodkom. W części środkowej (betonowej), hiperbole w pobliżu powierzchni skanowania wskazują na nieregularny rozkład głównych prętów zbrojeniowych. Korzystając z dwóch zidentyfikowanych punktów ugięcia hiperboli, wskazujących granicę między murem a betonem, oszacowano wysokość belki jako 70 cm. Ponadto w pierwszej części (ceglanej) można zauważyć hiperboliczną anomalię na głębokości ok. 30 cm, która może wskazywać na prawdopodobne uszkodzenie. Skan podłużny L15 wykonany wzdłuż belki (rys. 7.36c) pokazuje obecność zbrojenia poprzecznego (strzemion) w nieregularnym rozkładzie. Profil ten jest analogiczny do modelu numerycznego przedstawionego na rys. 7.32c. Dodatkowo radargram L15 wskazuje na obecność słupków o przekroju dwuteowym (por. rys. 7.30b), użytych podczas budowy do zabezpieczenia ściany. Odbicia od górnej i dolnej półki tych dwuteowników są widoczne na głębokości odpowiednio około 30 cm i 50 cm (rys. 7.36c) i pozostają w zgodności z wynikami uzyskanymi z symulacji FDTD (rys. 7.35). Rysunek 7.36d przedstawia mapę

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

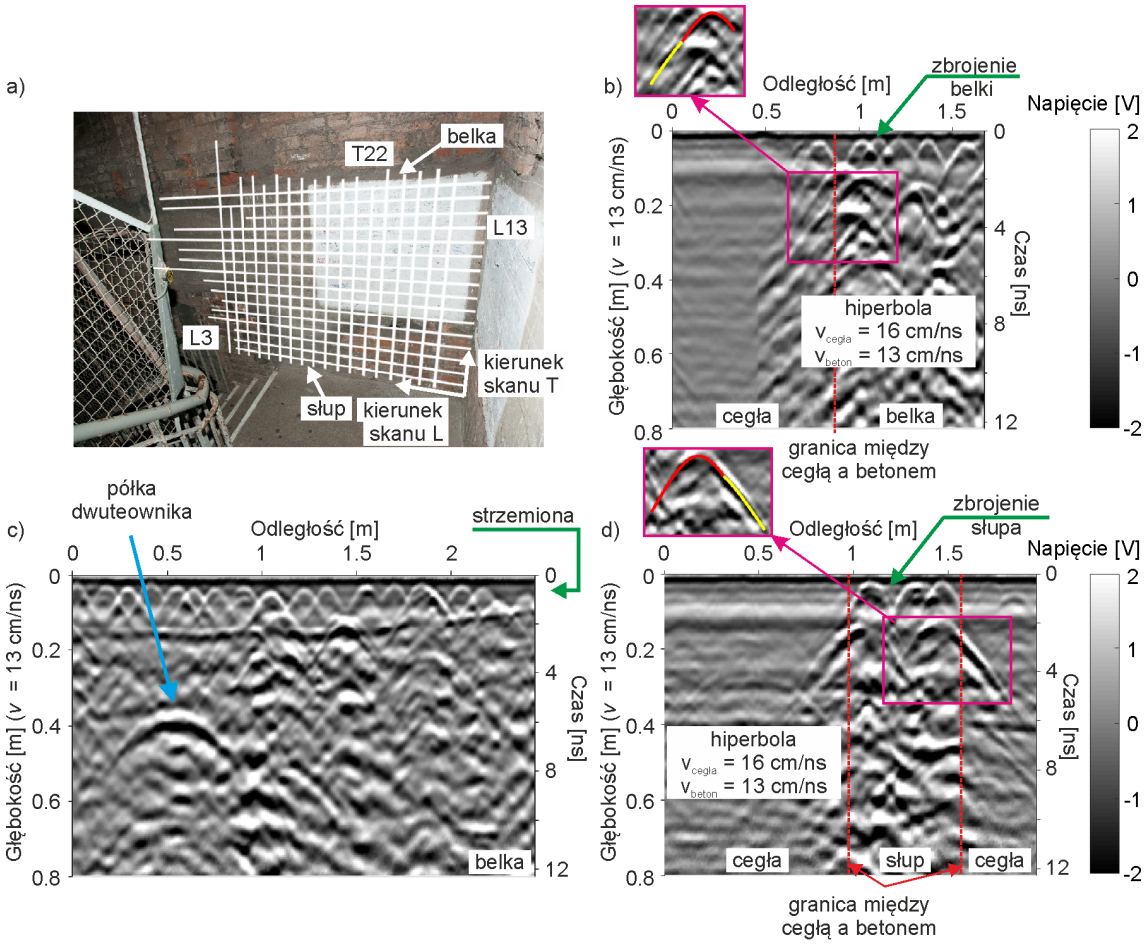
georadarową wykonaną na części murowej i części żelbetowego słupa, co odpowiada sytuacji numerycznej przedstawionej na rys. 7.32a. Można zauważyć, że główne zbrojenie jest rozmieszczone równomiernie w odległości 15 cm. Ponadto wyraźnie widoczny jest drugi rząd zbrojenia z dwoma prętami po obu stronach słupa. Na mapie georadarowej L5 (rys. 7.36d) widoczna jest także anomalia przy powierzchni w odległości 0.5 m, która wskazuje na brak cegły w tym miejscu.

Skan poprzeczny T28 pokazuje bardzo wyraźnie punkty ugięcia się hiperboli. Pozwala to na identyfikację ugiętej krzywej refrakcyjno-dyfrakcyjnej, którą obliczono stosując równanie (5.23) oraz (5.24) i wrysowano na mapę georadarową (rys. 7.36b) uzyskując prędkość fali w betonie równą v = 13 cm/ns, a w cegle równą v = 16 cm/ns. Jednakże po wrysowaniu ugiętej hiperboli na skanie podłużnym L5 (rys. 7.36d) uzyskano znacznie większą wartość prędkości w części betonowej (v = 26 cm/ns). Należy podkreślić, iż zawyżona wartość została zidentyfikowana tylko w jednym miejscu i może być ona wynikiem uszkodzenia części murowej lub uproszczeń, które zostały przyjęte w opisie matematycznym.



Rys. 7.36. Badanie georadarowe na obszarze #1 (górna belka i słup, strona wschodnia): a) widok ogólny, b) skan poprzeczny T28, c) skan podłużny L15, d) skan podłużny L5

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



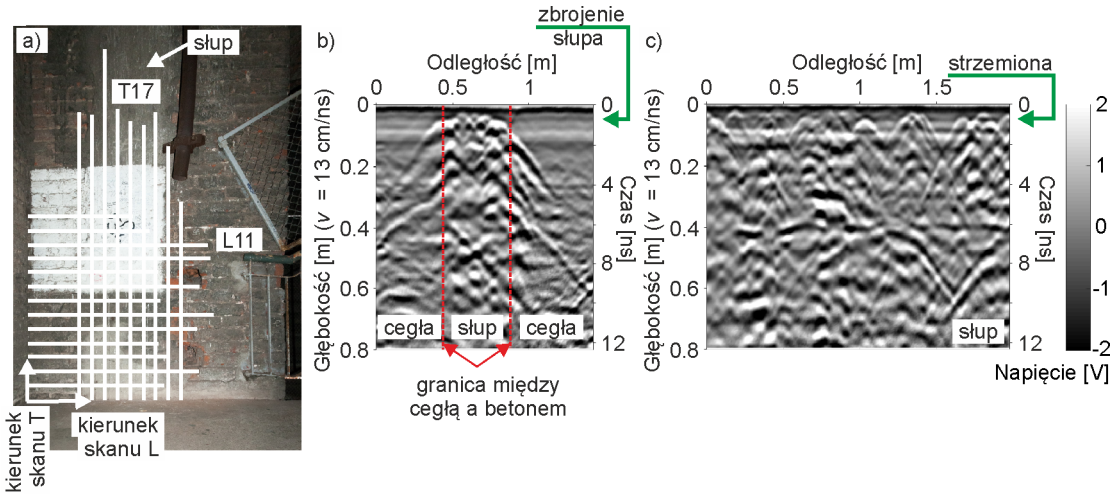
Rys. 7.37. Badanie georadarowe na obszarze #2 (górna belka i słup, północna strona): a) widok ogólny, b) skan poprzeczny T22, c) skan podłużny L13, d) skan podłużny L3

Po północnej stronie wieży prowadzono pomiary na obszarze #2 (rys. 7.37a), ponownie analizując połączenie belki ze słupem. Rysunek 7.37b przedstawia skan poprzeczny T22 wykonany na części murowej i belce żelbetowej. Silne i czyste hiperbole dyfrakcyjne na głębokości około 3 cm obrazują główne pręty zbrojeniowe belki w średnim rozstawie 12 cm. Nie zidentyfikowano odbicia od końca części betonowej, co uniemożliwiło ustalenie wymiaru w głąb belki. W części murowej nie stwierdzono anomalii wskazujących na uszkodzenie cegieł. Podłużny skan L13 (rys. 7.37c), prowadzony wzdłuż belki wskazuje równomierny rozkład zbrojenia poprzecznego w średnim odstępie 15 cm. Dodatkowo w odległości 0.5 m zidentyfikowano jeden stalowy słupek na głębokości ok. 40 cm. Ponadto można zaobserwować podłużne i nachylone odbicie na długości całego skanu na głębokości od 18 cm do 10 cm, które może wskazywać na rozwarstwienie struktury betonu. Radargam podłużny L3 został przedstawiony na rys. 7.37d. Na podstawie punktów ugięcia hiperboli ustalono szerokość słupa jako około 55 cm. Na mapie georadarowej widoczne są również trzy hiperbole na

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

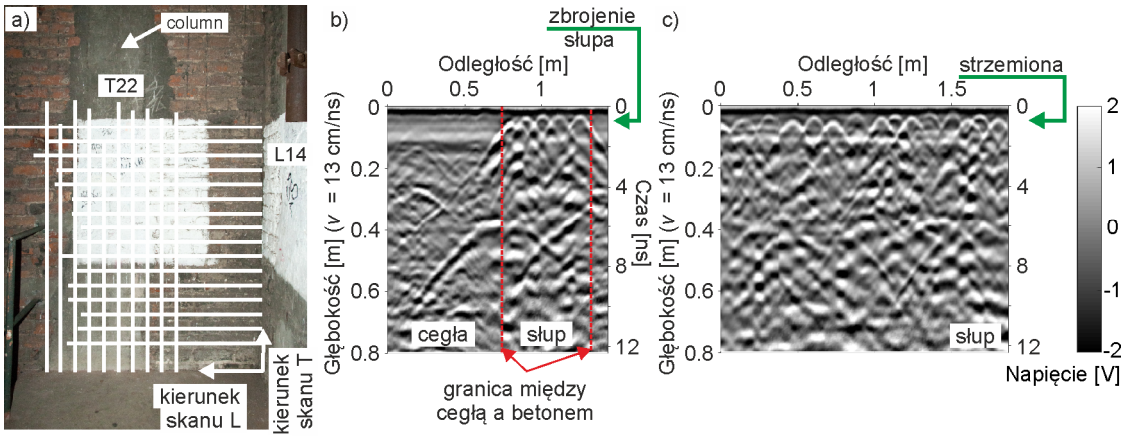
głębokości około 3 cm wskazujące na obecność prętów głównego zbrojenia oraz dwie hiperbole na głębokości około 10 cm, które mogą świadczyć o zbrojeniu po obu stronach słupa. Na skanie podłużnym L3 (rys. 7.37d) i poprzecznym (rys. 7.37b) wrysowano ugięte krzywe refrakcyjno-dyfrakcyjne, co pozwoliło potwierdzić wartość prędkości fali w cegle (v = 16 cm/ns) i w betonie (v = 13 cm/ns), oszacowanych na podstawie pomiarów z obszaru #1.

Rysunki 7.38 i 7.39 przedstawiają wyniki pomiarów georadarowych odpowiednio na obszarze #3 oraz #4, gdzie badano żelbetowe słupy między trzecim a drugim poziomem pierścienia ramy wzmacniającej. Na rys. 7.38b i 7.39b pokazane zostały skany podłużne (L11 i L14), na których można zidentyfikować szerokość słupów oraz rozkład głównych prętów zbrojeniowych. Na radargramie L11 (rys. 7.38b) wykonanym na obszarze #3 stwierdzono występowanie nieregularnych dyfrakcji hiperbolicznych, wskazujących na nierównomierne rozmieszczenie prętów. Ponadto na podstawie punktów ugięcia hiperboli oszacowano szerokość słupa jako około 45 cm. Na mapie georadarowej L14 (rys. 7.39b) z obszaru #4 zidentyfikowano szerokość słupa jako 55 cm oraz główne zbrojenie w średnim rozstawie 10 cm. Na rys. 7.38c i 7.39c przedstawiono skany poprzeczne (T17 i T22), które ukazują zbrojenie poprzeczne słupów. Radargram T17 (rys. 7.38c) poprzez charakter dyfrakcji hiperbolicznych ujawnia nieregularne położenie prętów zbrojeniowych. Mapa georadarowa T22 (rys. 7.39c) z obszarzu #4 pokazuje wyraźną i regularną hiperbolę dyfrakcyjną wskazującą pręty zbrojeniowe w średnim odstępie 12 cm.



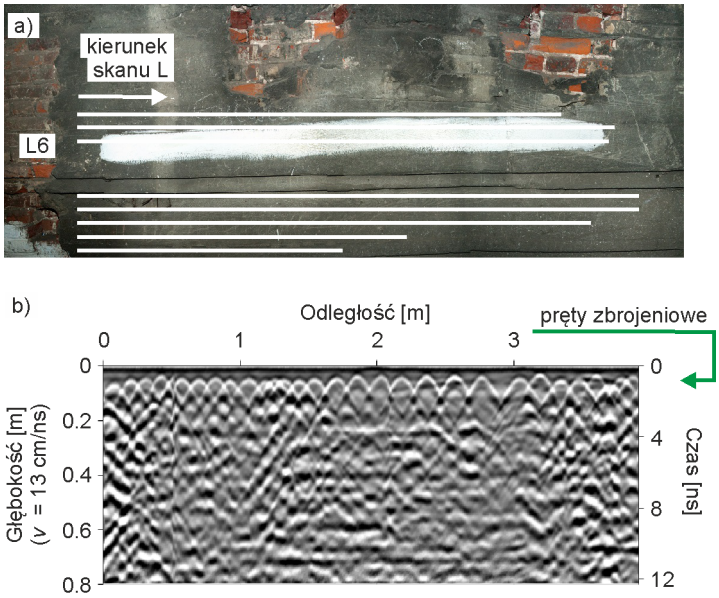
Rys. 7.38 Badanie georadarowe na obszarze #3 (kolumna, strona północna):
a) widok ogólny, b) skan podłużny L11, c) skan poprzeczny T17

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 7.39 Badanie georadarowe na obszarze #4 (słup, strona zachodnia):
a) widok ogólny, b) skan podłużny L14, c) skan poprzeczny T22

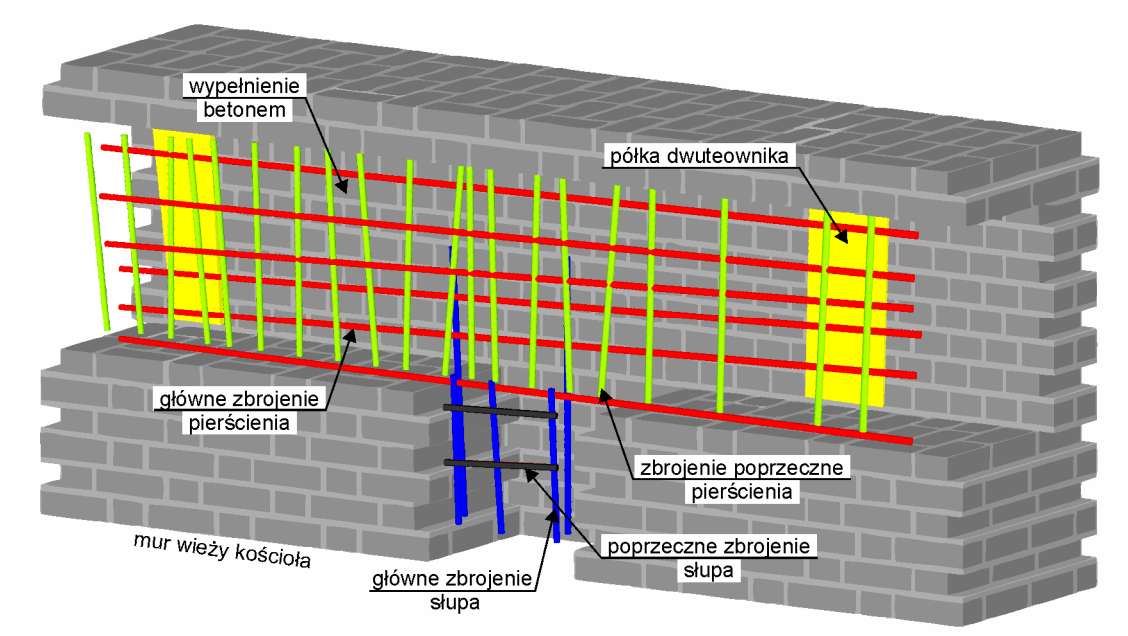
Wybrany radargram dla pomiaru georadarowego na obszarze #5 został przedstawiony na rys. 7.40. Badanie zostało przeprowadzone w celu stwierdzenia, czy wzmocnienie zlokalizowane między pierwszym, a drugim poziomem pierścienia ramy wzmacniającej (por. rys. 7.31) ma charakter powierzchniowy, czy zawiera element konstrukcyjny ramy żelbetowej. Mapa georadarowa L6 (rys. 7.40b) umożliwia identyfikację prętów zbrojeniowych na głębokości około 5 cm w równomiernej rozstawie około 12 cm. Nie wykryto żadnych anomalii, które pozwalałyby stwierdzić rozwarstwienie. Nie wykryto także żadnych punktów ugięcia, które mogłyby wskazywać na istnienie elementów konstrukcyjnych ramy żelbetowej.



Rys. 7.40 Badanie georadarowe na obszarze # 5 (wewnętrzna powierzchnia muru, strona południowa):
a) widok ogólny, b) skan podłużny L6

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Rysunek 7.41 przedstawia trójwymiarową wizualizację z zidentyfikowanymi elementami zbrojenia wykrytymi na mapach georadarowych uzyskanych w obszarze #1. Ze względu na fakt, że dane eksperymentalne zostały zebrane wzdłuż siatki ortogonalnej, możliwe było narysowanie wykrytych elementów zbrojenia za pomocą oprogramowania GRED HD. Na mapach georadarowych zidentyfikowano rozkład głównego i poprzecznego zbrojenia pierścienia (czerwone i zielone linie) oraz słupa (niebieskie i czarne linie). Poza tym wykryto półki dwuteowników, które wskazują położenie stalowych słupków (por. rys. 7.30a).



Rys. 7.41 Wizualizacja 3D wyników badań georadarowych przeprowadzonych na obszarze #1 wrysowanych w ścianę murowaną

7.3.5. Podsumowanie

W rozdziale przedstawiono unikatowe badania doświadczalne i numeryczne przeprowadzone na wzmocnionej wieży Bazyliki Mariackiej w Gdańsku. Badania pozwoliły wykorzystać opracowaną metodę określania granicy między ośrodkami, w jednym z których znajduje się kołowa inkluzja. Na podstawie wykonanych badań można sformułować następujące wnioski:

– Przeprowadzone obliczenia numeryczne dla trzech różnych sytuacji analizowanych podczas pomiarów georadarowych, pomogły w interpretacji doświadczalnych danych, a także wyjaśniły pochodzenie poszczególnych odbić.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

- Wyniki pomiarów doświadczalnych pozwoliły ustalić rozkład, położenie i liczbę prętów zbrojeniowych w żelbetowych elementach wzmacniających wieżę kościoła. Dodatkowo mapy georadarowe uzyskane na pierścieniu żelbetowym umożliwiły określenie położenia i rozkładu słupków stalowych. Wykorzystując zestaw danych doświadczalnych wykonano trójwymiarowe zobrazowanie układu zbrojenia.
- Opracowana procedura określania granicy między dwoma ośrodkami, z których jeden z nich zawiera kołową inkluzję pozwoliła na ustalenie szerokości badanych elementów żelbetowych. Zjawisko ugięcia fali analizowano numerycznie i eksperymentalnie. Hiperbola powstająca w wyniku odbicia fali elektromagnetycznej na stalowym pręcie ujawniła wyraźny punkt ugięcia na granicy między betonem a ceglaną ścianą. Symulacje FDTD pokazały, że ugięcie ramienia hiperboli zależy od związku między względną przenikalnością dwóch sąsiednich ośrodków.

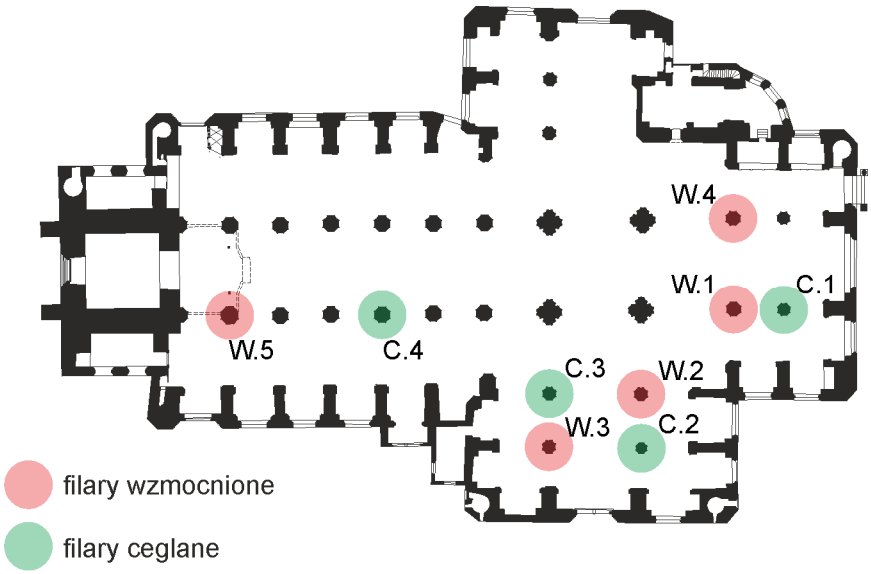
MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

7.4. Filary Bazyliki Mariackiej w Gdańsku

7.4.1. Opis konstrukcji i problemu badawczego

Sklepienie sufitu Bazyliki Mariackiej wsparte jest na 26 filarach ceglanych o przekroju ośmiokątnym (rys. 7.42 i 7.43). Pod koniec II wojny światowej, w marcu 1945 roku kościół został w znacznym stopniu zniszczony. W tym czasie runęło około 40% sklepień, jednak wszystkie filary przetrwały w całości [19].

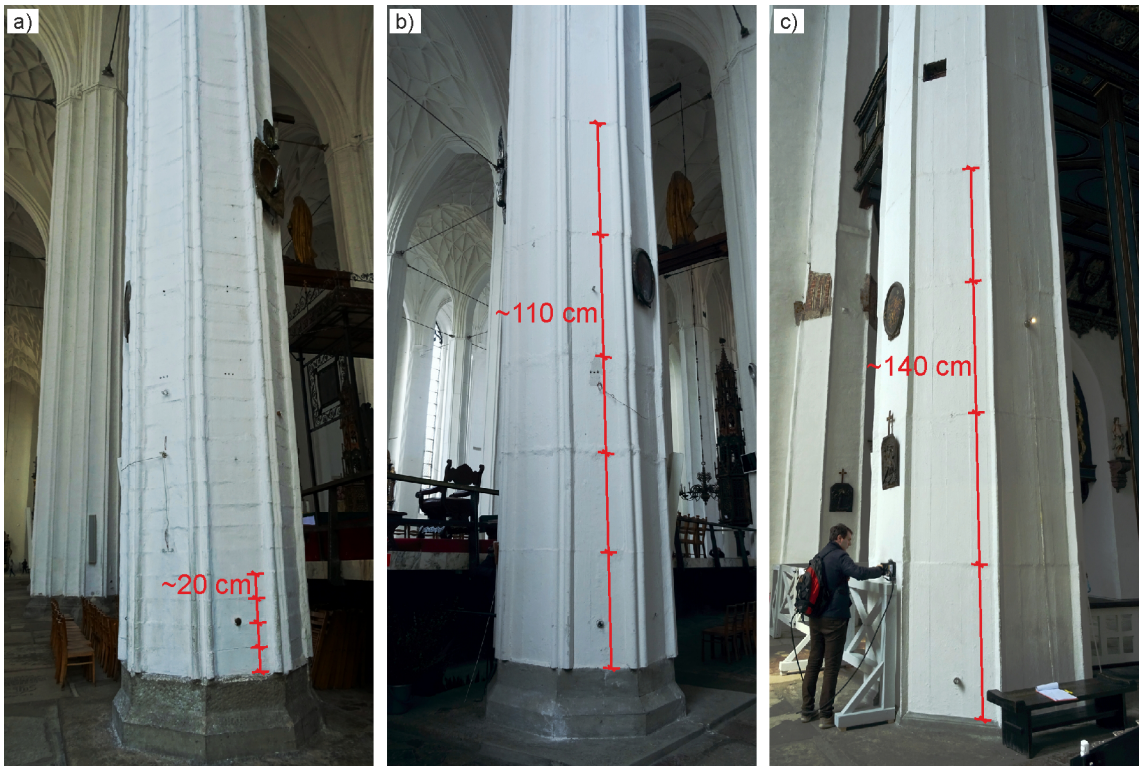
Rys. 7.42. Zdjęcie wnętrza Bazyliki Mariackiej w Gdańsku



Rys. 7.43. Rzut poziomy kościoła (przerysowany na podstawie [19]) ze wskazanymi lokalizacjami pomiarów georadarowych

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Przebudowa dachu i sklepień rozpoczęła się w 1947 roku. Podczas prac rekonstrukcyjnych pięć filarów zaczęło pękać i odbiegać od pionu [19]. Wszystkie uszkodzone filary zostały wzmocnione za pomocą opaski żelbetowej (por. np. [54]). Na rys. 7.43 zaznaczono kolorem czerwonym filary, które zostały wzmocnione. Jako pierwszy, w 1948 roku, zabezpieczono filar W.1 z wykorzystaniem elementów prefabrykowanych (rys. 7.44a). Przygotowano formy, a następnie wykonano 500 prefabrykatów o wysokości 20 cm, które zostały ułożone jeden na drugim na wysokości 18 m wzdłuż filaru. Proces wzmocnienia trwał 3 miesiące. Rok później, podczas rekonstrukcji sklepień, pojawiły się pęknięcia na filarze W.4 i zaczęły szybko postępować, skutkując ostatecznie nagłym poziomym uszkodzeniem. W tej sytuacji konieczne było natychmiastowe wzmocnienie filara, dlatego użyto technologii monolitycznej. Zbrojenie uszkodzonej strefy wykonano w ciągu 24 godzin. Betonowanie odbywało się w kilku etapach, każdy o wysokości przekroju około 110 cm (rys. 7.44b). Pozostałe trzy filary (W.2, W.3, W.5) zostały również wzmocnione w technologii monolitycznej.

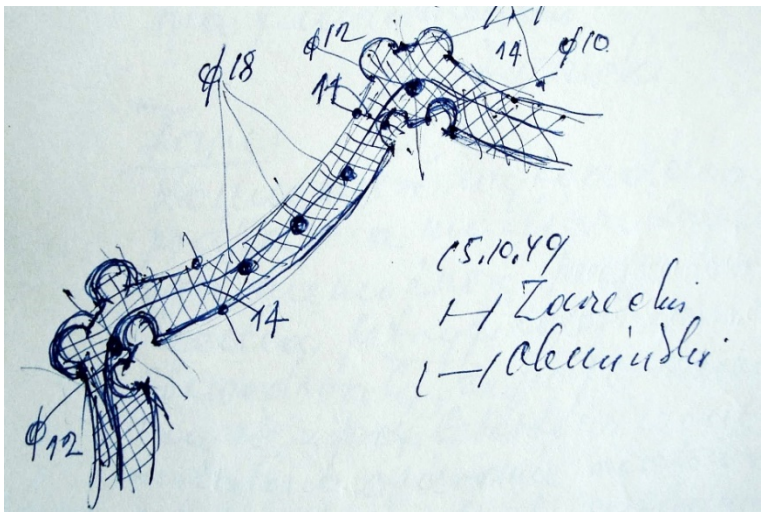


Rys. 7.44. Fotografie wzmocnionych filary: a) filar W.1, b) filar W.4, filar W.5

Podobnie jak w przypadku wielu innych zabytków, dostępność dokumentacji technicznej z przeszłości dla Bazyliki Mariackiej jest bardzo ograniczona. Nielicznymi

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

źródłami wiedzy na temat rekonstrukcji filarów są wspomnienia dotyczące przebudowy głównego miasta [141] oraz szkic z dziennika budowy pokazującego żelbetową opaskę (rys. 7.45). Dodatkową trudnością jest fakt, iż struktura filarów jest ukryta pod warstwą tynku. Jednakże kilka miejsc zostało odkrytych, umożliwiając obserwację wewnętrznej struktury. Na rys. 7.46 przedstawiono dwa szczegóły przedstawiające ustawienie cegieł oraz układ prętów zbrojeniowych w dwóch filarach. W takiej sytuacji badania nieniszczące są jedynymi metodami diagnozy i oceny stanu technicznego filarów.



Rys. 7.45. Szkic filaru wzmocnionego w technologii monolitycznej (zdjęcie z dziennika budowy)

Rys. 7.46. Otynkowane filary z odkrytymi miejscami pokazującymi szczegóły muru i zbrojenia

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

7.4.2. Badania doświadczalne

Badania georadarowe zostały przeprowadzone na dziewięciu filarach (jak zaznaczono na rys. 7.43), w tym czterech filarach ceglanych (C.1 do C.4) oraz pięciu filarach wzmocnionych (W.1 do W.5). Badane filary były zróżnicowane względem rozmiaru przekroju poprzecznego, który został wykonany na bazie ośmiokąta foremnego. W zależności od filara wymiar jednego z boku wynosił od 50 cm do 67 cm. Tylko dla dwóch filarów był większy i wynosił 88 cm (filar C.4) i 98 cm (filar W.5). Na każdym filarze przeprowadzono profile podłużne (L) i poprzeczne (T). Każde skanowanie poprzeczne składało się z ośmiu profili wykonanych z każdej strony ośmiokątnego przekroju. Dodatkowo przeprowadzono dwa lub trzy skany podłużne (w zależności od obecności przeszkód, takich jak głośniki lub rzeźby) wzdłuż każdej strony filara (rys. 7.47). Zarejestrowane sygnały miały długość czasową 32 ns, 1024 próbki/skan z krokiem zapisu 4 mm.

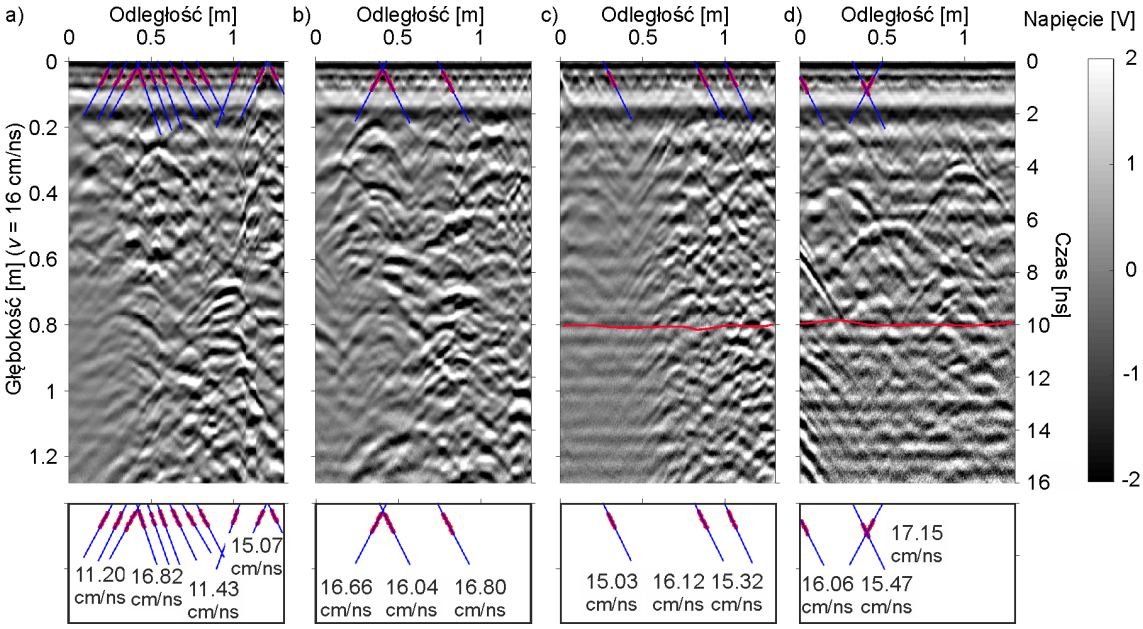
Rys. 7.47. Pomiar georadarowy wzdłuż filaru C.2

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

7.4.3. Wyniki

7.4.3.1. Filary ceglane

Identyfikację prędkości fali elektromagnetycznej w filarach ceglanych przeprowadzono na podstawie opisanego w rozdziale 5.3.1 zjawiska dyfrakcji fali na pionowej inkluzji według zależności (5.19). W przypadku niektórych filarów powyższe zjawisko było ledwo zauważalne ze względu na prawdopodobnie niewielką różnicę w wartościach przenikalności elektrycznej cegieł i zaprawy. Jednakże dla każdego filaru, w którym zidentyfikowano podobną dyfrakcję, dokonano liniowej aproksymacji wybranych punktów. Wyniki oszacowania prędkości fali elektromagnetycznej na podstawie dyfrakcji zaobserwowanych na podłużnych radargramach pokazano na rys. 7.48. Można zauważyć, że średnia prędkość dla każdego filaru wynosi około v = 16 cm/ns. Interesujące zjawisko zaobserwowano dla filaru C.1, gdzie następuje zmiana wartości prędkości na niektórych odcinkach wzdłuż wysokości filara. Spadek wartości może być spowodowany wzrostem wilgotności w materiale. Dzieje się tak dlatego, że przenikalność elektryczna, która wpływa na prędkość fali elektromagnetycznej, ma znacznie wyższą wartość dla wody ($\varepsilon_r = 80.1$), niż dla cegły ($\varepsilon_r = 3.5$). Dodatkowo, na radargramach wykonanych na filarach C.3 i C.4, można



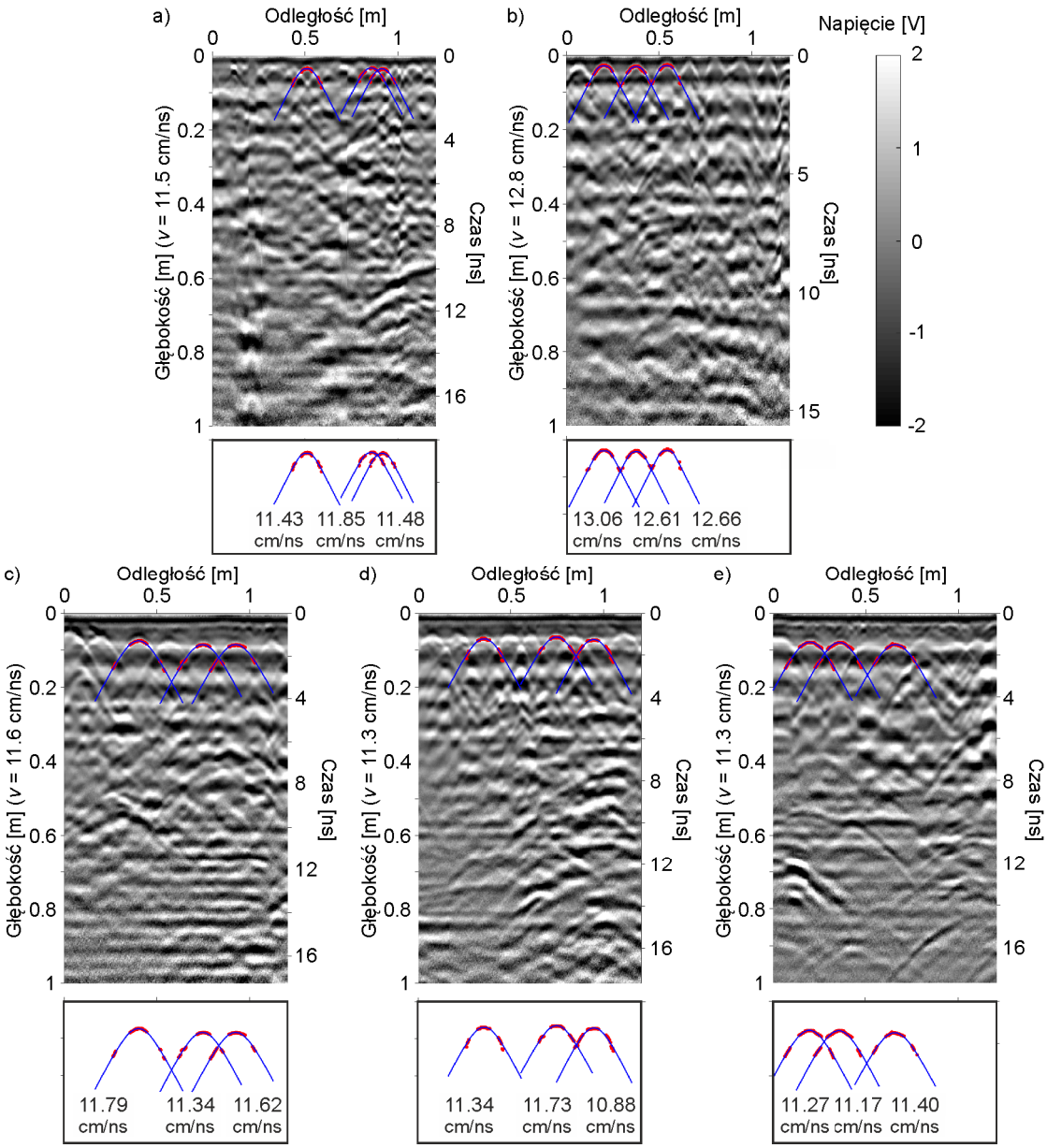
Rys. 7.48. Podłużne mapy georadarowe z oszacowanymi wartościami prędkości dla pomiarów filarów ceglanych: a) filar C.1, b) filar C.2, c) filar C.3, d) filar C.4

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

zaobserwować podłużne odbicie prawdopodobnie od końca warstwy cegieł z opóźnieniem około 10 ns. Oznacza to, iż uwzględniając oszacowane wartości prędkości można stwierdzić, że grubość tej warstwy wynosi około 75 cm.

7.4.3.2. Filary wzmocnione opaską żelbetową

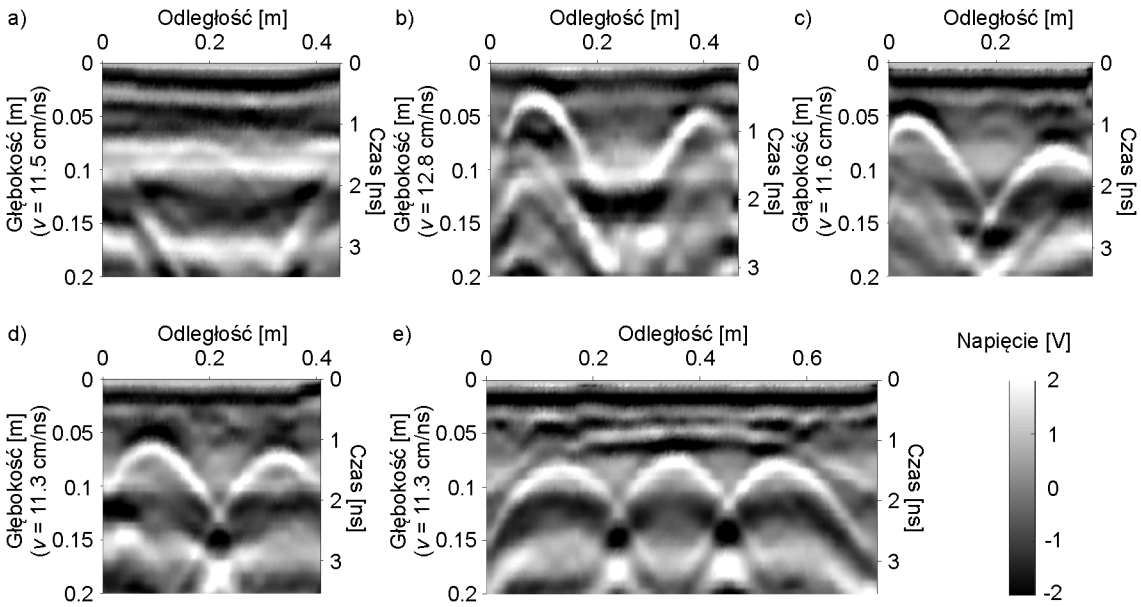
W celu oszacowania prędkości propagacji fali elektromagnetycznej w opasce żelbetowej zastosowano metodę dopasowania hiperbol. Dla każdego wzmocnionego filaru przeprowadzono nieliniową aproksymację wybranych hiperbol za pomocą algorytmu Levenberga-Marquardta [84], zgodnie z autorskim modelem hiperboli



Rys. 7.49. Podłużne mapy georadarowe z oszacowanymi wartościami prędkości dla pomiarów wzmocnionych filarów ceglanych: a) filar W.1, b) filar W.2, c) filar W.3, d) filar W.4, e) filar W.5

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

dyfrakcyjnej (por. rozdział 5.2.5). Dla każdego radargramu wybrano trzy hiperbole (najmniej zniekształcone i najbardziej reprezentatywne), które zostały poddane procesowi aproksymacji. Ekstrakcji hiperbol dokonano za pomocą metody jednej krzywej (por. rozdział 6.1.3). Rysunek 7.49 przedstawia podłużne mapy georadarowe, wykonane wzdłuż każdego wzmocnionego filaru z zaznaczonymi hiperbolami i prędkościami wynikającymi z procesu aproksymacji. W przypadku filarów W.1, W.3, W.4 i W.5 w procesie aproksymacji otrzymano podobne średnie wartości prędkości (około v = 11.4 cm/ns). W przypadku filaru W.2 określono średnią prędkość jako v = 12.8 cm/ns. Zgodnie ze zidentyfikowanymi wartościami średniej prędkości, dokonano zmiany skali czasowej na skalę przestrzenną dla podłużnych (rys. 7.49) i poprzecznych (rys. 7.50) map georadarowych.



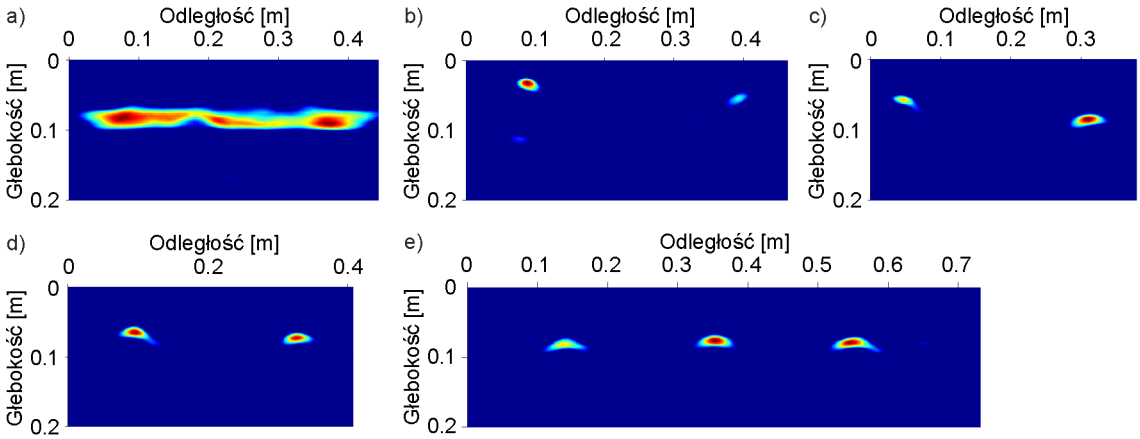
Rys. 7.50. Poprzeczne mapy georadarowe prędkości dla pomiarów wzmocnionych filarów ceglanych: a) filar W.1, b) filar W.2, c) filar W.3, d) filar W.4, e) filar W.5

Zarówno na podłużnych (rys. 7.49), jak i poprzecznych radargramach (rys. 7.50) można zaobserwować hiperboliczne dyfrakcje wskazujące na obecność prętów zbrojeniowych. W celu dokładnego wyświetlenia rozkładu zbrojenia, proces migracji przeprowadzono za pomocą metody sumowania hiperbolicznego, zgodnie z opisanym wcześniej algorytmem (rozdział 4.4.6). Wyniki migracji przedstawiono na rys. 7.51 i 7.52, odpowiednio dla skanów poprzecznych i podłużnych. Na mapach georadarowych poddanych procesowi migracji, pręty zbrojeniowe są odzwierciedlone poprzez anomalie punktowe. Taki rodzaj wizualizacji umożliwia łatwą identyfikację głębokości położenia prętów, a także rozstawów między nimi.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

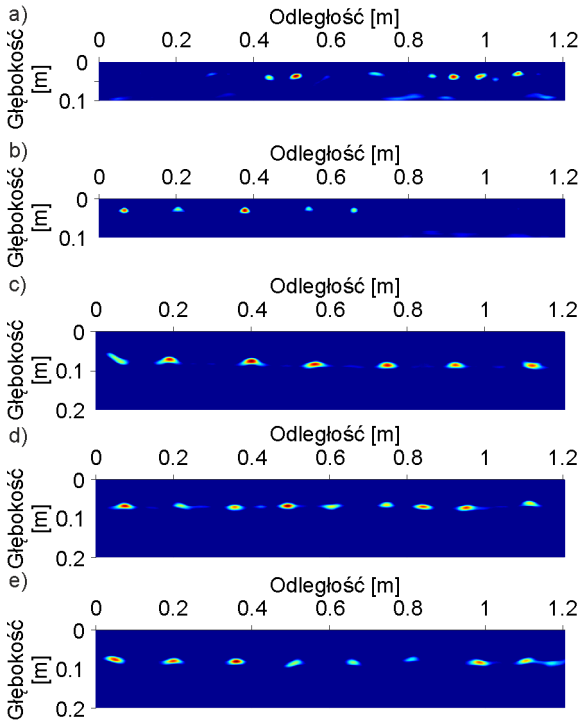
Zbrojenie główne (równoległe do wysokości filara) zidentyfikowano w przypadku czterech badanych filarów, dla których wzmocnienie wykonano w technologii monolitycznej. W filarach W.2, W.3 i W.4 stwierdzono obecność dwóch prętów w rozstawie odpowiednio 30 cm, 26 cm i 23 cm (rys. 7.51b-d). Radargram wykonany na filarze W.5 (rys. 7.51e), poddany procesowi migracji ujawnił występowanie trzech prętów w rozstawie 20 cm. W filarze W.1 nie stwierdzono obecności prętów w kierunku podłużnym (por. rys. 7.51a i 7.50a), ponieważ słup ten został wzmocniony za pomocą elementów prefabrykowanych, w których pręty zbrojeniowe występowały jedynie w kierunku poprzecznym. Jednakże, na mapie georadarowej poddanej procesowi migracji (rys. 7.51a), widoczna jest silna refleksja, która może oznaczać, iż grubość opaski żelbetowej wynosi około 10 cm.

Na podstawie uzyskanych wyników z procesu migracji dla filaru W.1 stwierdzono, że pręty zbrojeniowe w kierunku poprzecznym (prostopadłym do wysokości filaru) znajdują się w średnim odstępie 10 cm, na głębokości około 5 cm (rys. 7.52a). W przypadku filaru W.2 zbrojenie poprzeczne zidentyfikowano na głębokości około 4 cm przy średnim rozstawie 20 cm (rys. 7.52b). Wyniki dla filaru W.3 pokazano na rys. 7.52c, na którym widoczne są poprzeczne pręty na głębokości około 8 cm ze średnim odstępem 20 cm. W przypadku filaru W.4 zaobserwowano, że zbrojenie poprzeczne znajduje się w gęstszym rozstawie około 15 cm (rys. 7.52d). Dla filaru W.5 stwierdzono poprzeczne zbrojenie w średnim odstępie 15 cm na głębokości około 8 cm.



Rys. 7.51. Poprzeczne mapy georadarowe poddane procesowi migracji:
a) filar W.1, b) filar W.2, c) filar W.3, d) filar W.4, e) filar W.5

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl



Rys. 7.52. Podłużne mapy georadarowe poddane procesowi migracji:
a) filar W.1, b) filar W.2, c) filar W.3, d) filar W.4, e) filar W.5

7.4.4. Podsumowanie

Metodę georadarową zastosowano do diagnostyki filarów w Bazylice Mariackiej w Gdańsku. Zbadano cztery filary ceglane i pięć filarów wzmocnionych opaską żelbetową. Prowadzone badania koncentrowały się na: identyfikacji prędkości fal elektromagnetycznych, zarówno w materiałach ceglanych, jak i betonowych, badaniu wewnętrznej struktury filarów oraz dokładnej identyfikacji prętów zbrojeniowych. Na podstawie wykonanych badań można sformułować następujące wnioski:

– Na podstawie anomalii, które pojawiły się na mapach georadarowych możliwe było oszacowanie prędkości propagacji fal elektromagnetycznych w filarach ceglanych, a także w opasce żelbetowej. W filarach ceglanych wykorzystano autorski model dyfrakcji na pionowych spoinach między cegłami. Uzyskana średnia prędkość fali elektromagnetycznej wynosiła około 16 cm/ns. W jednym z filarów zidentyfikowane wartości wykazywały zmienność wzdłuż wysokości, co może być spowodowane zmienną wilgotnością materiału. W obszarach o potencjalnie podwyższonej wilgotności, uzyskano wartości około 11 cm/ns. W opasce żelbetowej możliwe było oszacowanie prędkości propagacji elektromagnetycznej, na podstawie dopasowania hiperbol. Ustalono, iż średnia prędkość propagacji

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

fali wynosi około 11.4 cm/ns w czterech filarach. W jednym z filarów zidentyfikowano wartość prędkości jako 12.8 cm/ns.

- Diagnostyka wewnętrznej struktury filarów ujawniła, że w przypadku filarów ceglanych pierwsza warstwa cegieł miała grubość około 75 cm. W przypadku filarów wzmocnionych ustalono, że opaska żelbetowa miała grubość 10 cm.
- Przeprowadzony proces migracji umożliwił dokładne określenie rozkładu zbrojenia, a także grubości opaski żelbetowej. Dla wszystkich wzmocnionych filarów stwierdzono obecność prętów poprzecznych w odstępach od 15 cm do 20 cm. Podłużne pręty zostały zidentyfikowane tylko dla słupów wzmocnionych w technologii monolitycznej.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

8. Wnioski

Niniejsza rozprawa doktorska została poświęcona zagadnieniu propagacji fal elektromagnetycznych w obiektach budowlanych. Na podstawie przeprowadzonych analiz numerycznych i doświadczalnych możliwe było sformułowanie ogólnych wniosków i zaleceń dotyczących wykorzystania badań georadarowych w diagnostyce konstrukcję żelbetowych i murowych.

Modelowanie propagacji fal elektromagnetycznych przy użyciu metody różnic skończonych w dziedzinie czasu było podstawą dogłębnej interpretacji danych georadarowych. Analizy numeryczne umożliwiły wskazanie źródeł pochodzenia poszczególnych odbić i dyfrakcji dla badanych konstrukcji inżynierskich a także weryfikację autorskich algorytmów przetwarzania danych georadarowych. W przypadku konstrukcji o stosunkowo prostej geometrii uproszczenie modelowania do dwóch wymiarów oraz założenie jednorodności badanego ośrodka okazuje się być wystarczające. Podejście takie charakteryzuje się krótkim czasem obliczeń umożliwiającym szybkie przystąpienie do interpretacji danych doświadczalnych. Jednakże w sytuacji, gdy badane konstrukcję mają skomplikowaną strukturę wewnętrzną oraz złożony system zbrojenia, należy przeprowadzać symulacje na modelach trójwymiarowych. Zalety takiego podejścia zostały pokazane na przykładzie ramowo-łukowej kładki dla pieszych oraz testowego muru ceglanego, gdzie obliczenia na modelach dwuwymiarowych, mogłyby prowadzić do błędnych wniosków.

Na przykładach konstrukcji żelbetowych pokazano, że metoda georadarowa może być szczególnie przydatna w identyfikacji rozkładu i liczby prętów zbrojeniowych. Badania wykazały, iż możliwe było także wykrycie kilku przylegających do siebie prętów oraz ustalenie położenia prętów względem siebie. Wizualizację rozkładu prętów uzyskano dzięki gęstemu profilowaniu oraz zastosowaniu techniki migracyjnej. Potwierdzono dotychczas znaną wiedzę, że hiperbole dyfrakcyjne, ujawniające obecność prętów zbrojeniowych na mapie georadarowej, nie tylko pokazują ich położenie, ale także niosą informację o prędkości fali elektromagnetycznej w betonie. Identyfikacji prędkości dokonano poprzez aproksymację wybranych punktów hiperboli za pomocą kilku wybranych modeli matematycznych. Autorski model matematyczny hiperboli, w porównaniu do pozostałych znanych modeli, pozwolił oszacować wartość prędkości jako bliższą wartości rzeczywistej. Przeprowadzone badania doświadczalne na próbce

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

żelbetowej pozwoliły ustalić, iż w celu identyfikacji wartości prędkości zaleca się wykonywać pomiar na prętach położonych poniżej 4 cm od powierzchni skanowania. Badania pokazały również, iż bardzo istotnym parametrem w tym pomiarze jest ustalenie czasu zerowego. Stąd zaleca się przed badaniem każdorazowo wykonać test unoszenia anteny.

Identyfikacja parametrów elektrycznych betonu pozwoliła na opracowanie jego heterogenicznego modelu numerycznego. Uzyskane przy jego użyciu mapy georadarowe okazały się znacznie lepiej odwzorowywać pomiary doświadczalne niż radargramy obliczone na podstawie modelu homogenicznego. Dodatkowo zauważono, iż im mniejszy rozmiar siatki Yee, tym bardziej radargram przypominał rzeczywisty pomiar. W zastosowaniu praktycznym w celu użycia modelu heterogenicznego zaleca się założenie wartości przenikalności dla trzech faz betonu, tak by efektywna wartość przenikalności była zgodna z modelem CRIM.

Pomiary doświadczalne przeprowadzone na obiekcie testowym o konstrukcji ceglanej pozwoliły ustalić możliwości zastosowania metody georadarowej do detekcji uszkodzeń. Zarówno na podstawie danych doświadczalnych, jak i numerycznych możliwe było zidentyfikowanie największego defektu w postaci braku jednej cegły. Pozostałe uszkodzenia w postaci braku zaprawy nie zostały zidentyfikowane z pomiarów doświadczalnych, pomimo wykrycia ich na danych numerycznych. Szczególnie pomocna w ustaleniu położenia uszkodzenia okazała się tomografia uzyskana dzięki gęstemu profilowaniu, a także zestawienie głównych częstotliwości dla zestawu radargramów. Zaproponowane autorskie modele dyfrakcji na pionowej inkluzji oraz na narożach prostokątnego obiektu umożliwiły identyfikację prędkości fali elektromagnetycznej w każdej z badanych konstrukcji ceglanych.

Diagnostyka wykorzystująca metodę georadarową okazała się być bardzo skuteczna w ocenie stanu konstrukcji zabytkowych. Metoda ta jest szczególnie zalecana do nieniszczącej oceny murów wykonanych z różnych materiałów pokrytych warstwą wykończeniową lub murów z wbudowanymi wewnątrz elementami konstrukcyjnymi. W ramach badań prowadzonych na konstrukcjach ceglanych wzmocnionych elementami żelbetowymi opracowano matematyczny model ugiętej hiperboli dyfrakcyjnej na granicy dwóch ośrodków, z których jeden z nich zawiera kołową inkluzję. Model ten pozwala uzyskać informację o prędkości fali elektromagnetycznej w dwóch ośrodkach, a także wskazać granicę między ośrodkami.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Przyszłe prace w zakresie rozwijania diagnostyki metodą georadarowa będą prowadzone w dwóch kierunkach. Pierwszym z nich będzie opracowanie modelu hiperboli dyfrakcyjnej, który pozwoliłby na jednoczesną identyfikację prędkość fali elektromagnetycznej oraz średnicy pręta zbrojeniowego. Drugim kierunkiem będą badania doświadczalne nad parametrami elektrycznymi betonu oraz jego składników, w celu udoskonalenia i rozbudowy heterogenicznego modelu numerycznego betonu.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Bibliografia

[1] Adamczewski G., Garbacz A., Piotrowski T., Załęgowski K.: Zastosowanie komplementarnych metod NDT w diagnostyce konstrukcji betonowych. *Materiały budowlane 9*, 2013, 2–5.

[2] Akbari A., Meshinchi-asl M., Riyahi M.: An improved hyperbolic summation imaging algorithm for detection of the subsurface targets. *Geophysics & Remote Sensing 3*, 2014, 1–7.

[3] Al-Nuaimy W., Shihab S., Eriksen A.: Data fusion for accurate characterisation of buried cylindrical objects using GPR. *In: Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar*. Delft 2004, 359–362.

[4] Alani A.M., Aboutalebi M., Kilic G.: Applications of ground penetrating radar (GPR) in bridge deck monitoring and assessment. *Journal of Applied Geophysics 97*, 2013, 45–54.

[5] Annan A.P.: GPR-history, trends, and future developments. *Subsurface Sensing Technologies and Applications 3*, 2002, 253–270.

[6] Annan A.P.: Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar. *In: Ground Penetrating Radar Theory and Applications* (Editor: H. M. Jol). Elsevier B.V. 2009.

[7] Annan A.P.: Ground-Penetrating Radar. *In: Near-Surface Geophysics* (Editor: D. K. Butler). Tulsa: Society of Exploration Geophysicists 2005.

[8] Balanis C.A.: *Advanced Engineering Electromagnetics*. New York: John Wiley & Sons 1938.

[9] Bayliss A., Turkel E.: Radiation boundary conditions for wave-like equations. *Communications on Pure and Applied Mathematics 33*, 1980, 707–725.

[10] Benedetto A.: A three dimensional approach for tracking cracks in bridges using GPR. *Journal of Applied Geophysics 97*, 2013, 37–44.

[11] Berenger J.-P.: A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *Journal of Computational Physics 114*, 1994, 185–200.

[12] Bęben D., Mordak A., Anigacz W.: Ground penetrating radar application to testing of reinforced concrete beams. *Procedia Engineering 65*, 2013, 242–247.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

[13] Bęben D., Mordak A., Anigacz W.: Identification of viaduct beam parameters using the Ground Penetrating Radar (GPR) technique. *NDT and E International 49*, 2012, 18–26.

[14] Binda L., Saisi A., Tiraboschi C., Valle S., Colla C., Forde M.: Application of sonic and radar tests on the piers and walls of the Cathedral of Noto. *Construction and Building Materials 17*, 2003, 613–627.

[15] Binda L., Saisi A., Zanzi L.: Sonic tomography and flat-jack tests as complementary investigation procedures for the stone pillars of the temple of S. Nicolo 1'Arena (Italy). *NDT and E International 36*, 2003, 215–227.

[16] Binda L., Zanzi L., Lualdi M., Condoleo P.: The use of georadar to assess damage to a masonry Bell Tower in Cremona, Italy. *NDT and E International 38*, 2005, 171–179.

[17] Binda L., Lenzi G., Saisi A.: NDE of masonry structures: use of radar tests for the characterisation of stone masonries. *NDT and E International 31*, 1998, 411–419.

[18] Bogdanowicz, S., Gołasiewicz-Klat R., Klat M.: *Kościół Mariacki w Gdańsku*. Pelplin: Bernardinum 2013.

[19] Bogdanowicz S.: *Dzieła sztuki sakralnej Bazyliki Mariackiej w Gdańsku*. Gdańsk: Stella Maris 1990.

[20] Cetrangolo G.P., Domenech L.D., Moltini G., Morquio A.A.: Determination of moisture content in ceramic brick walls using Ground Penetration Radar. *Journal of Nondestructive Evaluation 36*, 2017, 1–12.

[21] Chang C.W., Lin C.H., Lien H.S.: Measurement radius of reinforcing steel bar in concrete using digital image GPR. *Construction and Building Materials 23*, 2009, 1057–1063.

[22] Clem D.J., Schumacher T., Deshon J.P.: A consistent approach for processing and interpretation of data from concrete bridge members collected with a hand-held GPR device. *Construction and Building Materials 86*, 2015, 140–148.

[23] Czarnecki L., Garbacz A., Krystosiak M.: On the ultrasonic assessment of adhesion between polymer coating and concrete substrate. *Cement and Concrete Composites 28*, 2006, 360–369.

[24] Diamanti N., Giannopoulos A., Forde M.C.: Numerical modelling and experimental verification of GPR to investigate ring separation in brick masonry arch bridges. *NDT and E International 41*, 2008, 354–363.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

[25] Drobiec Ł.: Określenie parametrów stali zbrojeniowej w konstrukcji. *W: XXIX Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji*. Szczyrk 2014, 181–256.

[26] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A.: *Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. Tom 1.* Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN 2010.

[27] Engquist B., Majda D.: Absorbing boundary conditions for the numerical simulation of waves. *Mathematics of Computation 31*, 1977, 629–651.

[28] Garbacz A.: Application of stress based NDT methods for concrete repair bond quality control. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences 63*, 2015, 77–85.

[29] Garbacz A., Piotrowski T., Courard L., Kwaśniewski L.: On the evaluation of interface quality in concrete repair system by means of impact-echo signal analysis. *Construction and Building Materials 134*, 2017, 311–323.

[30] Garg R.: *Analytical and Computational Methods in Electromagnetics*. Norwood: House, Artech 2008.

[31] Giannakis I., Giannopoulos A., Warren C.: A realistic FDTD numerical modeling framework of ground penetrating radar for landmine detection. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 9*, 2015, 37–51.

[32] Giannopoulos A.: Modelling ground penetrating radar by GprMax. *Construction and Building Materials 19*, 2005, 755–762.

[33] Giannopoulos A.: The investigation of transmission-line matrix and finite-difference time-domain methods for the forward problem of ground probing radar. *PhD thesis* 1997.

[34] Gołębiowski T.: *Zastosowanie metody georadarowej do detekcji i monitoringu obiektów o stochastycznym rozkładzie w ośrodku geologicznym*. Kraków: Wydawnictwo AGH 2012.

[35] Gołębiowski T.: 20 lat metody georadarowej w katedrze Geofizyki na wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH w aspekcie realizowanych w niej prac naukowo-badawczych. *Geologia 35*, 2009, 429–435.

[36] González-Drigo R., Pérez-Gracia V., Di Capua D., Pujades L.G.: GPR survey applied to Modernista buildings in Barcelona: The cultural heritage of the College of Industrial Engineering. *Journal of Cultural Heritage 9*, 2008, 196–202.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

[37] Goszczyńska B., Świt G., Trąmpczyński W., Krampikowska A., Tworzewska J., Tworzewski P.: Experimental validation of concrete crack identification and location with acoustic emission method. *Archives of Civil and Mechanical Engineering 12*, 2012, 23–28.

[38] Gruber, K., Keyser E.: *Die Marienkirche in Danzig. Die Baudenkmäler der Freien Stadt Danzig. Erster Teil Die Kirchliche Bauwerke. Band I. Deutscher Kunstverlag*. Berlin 1929.

[39] Gruber K.: Die Wiederherstellung der Oberpfarrkirche St. Marien in Danzig. *In: Die DenkmalpflegeDeutscher Kunstverlag* (Editor: B. Frey, D., Lampmann, G., Meier). Berlin: Anton Schroll & Co. 1931, 154–157.

[40] Halabe U., Maser K., Kausel E.: Propagation characteristics of electromagnetic waves in concrete. *Technical Report AD-A207387, Cambridge Department Civil Engineering MIT* 1989, 1–106.

[41] Hamrouche R., Klysz G., Balayssac J.-P., Rhazi J., Ballivy G.: Numerical simulations and laboratory tests to explore the potential of Ground-Penetrating Radar (GPR) in detecting unfilled joints in brick masonry structures. *International Journal of Architectural Heritage 6*, 2012, 648–664.

[42] Hamrouche R., Klysz G., Balayssac J., Rhazi J., Ballivy G., Arliguie G.: Numerical modeling of ground-penetrating radar (GPR) for the investigation of jointing defects in brick masonry structures. *In: Non-Destructive Testing in Civil Engineering*. Nantes 2009, 1–6.

[43] Hayakawa H., Kawanaka A.: Radar imaging of underground pipes by automated estimation of velocity distribution versus depth. *Journal of Applied Geophysics 40*, 1998, 37–48.

[44] Higdon R.L.: Numerical absorbing boundary conditions for the wave equation. *Mathematics of Computation 49*, 1987, 65–90.

[45] Holford K.M., Davies A.W., Pullin R., Carter D.C.: Damage location in steel bridges by acoustic emission. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures 12*, 2001, 567–576.

[46] Hoła J., Schabowicz K.: State-of-the-art non-destructive methods for diagnostic testing of building structures – anticipated development trends. *Archives of Civil and Mechanical Engineering 10*, 2010, 5–18.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

[47] Hoła J., Sadowski Ł., Schabowicz K.: Nondestructive identification of delaminations in concrete floor toppings with acoustic methods. *Automation in Construction 20*, 2011, 799–807.

[48] Hoła J., Schabowicz K.: Nieniszcząca diagnostyka obiektów budowlanych. Przegląd wybranych najnowszych metod z przykładami zastosowań. *W: 56 Konferencja naukowa KILiW PAN oraz KN PZITB*. Kielce - Krynica 2010, 189–206.

[49] Hong S., Lai W.L., Wilsch G., Helmerich R., Helmerich R., Günther T., Wiggenhauser H.: Periodic mapping of reinforcement corrosion in intrusive chloride contaminated concrete with GPR. *Construction and Building Materials 66*, 2014, 671–684.

[50] Hou J., Jankowski Ł., Ou J.: Structural health monitoring based on combined structural global and local frequencies. *Mathematical Problems in Engineering 2014*, 2014, 1–13.

[51] Hu Z., Shan W.: Landslide investigations in the northwest section of the lesser Khingan range in China using combined HDR and GPR methods. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment 75*, 2016, 591–603.

[52] Hugenschmidt J., Kalogeropoulos A., Soldovieri F., Prisco G.: Processing strategies for high-resolution GPR concrete inspections. *NDT and E International 43*, 2010, 334–342.

[53] Imposa S., Mele G.: Ground penetrating radar survey inside the S. Agata Cathedral of Catania (eastern Sicily). *International Journal of Architectural Heritage 5*, 2011, 188–197.

[54] Júlio E.S., Branco F., Silva V.D.: Structural rehabilitation of columns with reinforced concrete jacketing. *Progress in Structural Engineering and Materials 5*, 2003, 29–37.

[55] Kanli A.I., Taller G., Nagy P., Tildy P., Pronay Z., Toros E.: GPR survey for reinforcement of historical heritage construction at fire tower of Sopron. *Journal of Applied Geophysics 112*, 2015, 79–90.

[56] Karczewski J., Ortyl Ł., Pasternak M.: *Zarys metody georadarowej*. Kraków: Wydawnictwo AGH 2011.

[57] Kędra R., Rucka M.: Damage detection in a bolted lap joint using guided waves. *Procedia Engineering 199*, 2017, 2114–2119.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

[58] Kędra R., Rucka M.: Diagnostics of bolted lap joint using guided wave propagation. *Diagnostyka 15*, 2014, 35–40.

[59] Korzeniowski M., Piwowarczyk T., Maev R.G.: Application of ultrasonic method for quality evaluation of adhesive layers. *Archives of Civil and Mechanical Engineering 14*, 2014, 661–670.

[60] Kosno Ł., Sławski Ł., Świt G.: Efektywność badań georadarowych przy ocenie poprawności wykonania i stanu technicznego konstrukcji z elementów prefabrykowanych. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury 63*, 2016, 19–26.

[61] Kosno Ł., Sławski Ł., Świt G.: GPR investigation of flexible soil-steel bridge structure. *Procedia Engineering 156*, 2016, 172–179.

[62] Labropoulos K., Moropoulou A.: Ground penetrating radar investigation of the bell tower of the church of the Holy Sepulchre. *Construction and Building Materials 47*, 2013, 689–700.

[63] Lachowicz J., Rucka M.: GPR simulations for diagnostics of a reinforced concrete beam. *In: Advances in Mechanics: Theoretical, Computational and Interdisciplinary Issues - 3rd Polish Congress of Mechanics, PCM and 21st International Conference on Computer Methods in Mechanics, CMM*. Gdańsk 2016, 327–330.

[64] Lachowicz J., Rucka M.: A concept of heterogeneous numerical model of concrete for GPR simulations. *In: 2017 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR)*. Edinburgh 2017, 1–4.

[65] Lachowicz J., Rucka M.: Application of GPR method in diagnostics of reinforced concrete structures. *Diagnostyka 16*, 2015, 31–36.

[66] Lachowicz J., Rucka M.: Numerical modeling of GPR field in damage detection of a reinforced concrete footbridge. *Diagnostyka 17*, 2016, 3–8.

[67] Lachowicz J., Rucka M.: Diagnostyka żelbetowej kładki dla pieszych z zastosowaniem metody georadarowej. *W: Awarie Budowlane. zapobieganie, diagnostyka, naprawy, rekonstrukcje* (Edytor: M. Kaszyńska). Szczecin: Wydawnictwo uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie 2017, 433–442.

[68] Lachowicz J., Rucka M.: Experimental and numerical investigations for GPR evaluation of reinforced concrete footbridge. *In: 16th International Conference of Ground Penetrating Radar (GPR)*. Hong Kong 2016, 1–6.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

[69] Lachowicz J., Rucka M.: 3-D finite-difference time-domain modelling of ground penetrating radar for identification of rebars in complex reinforced concrete structures. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2018, [in press].

[70] Lachowicz J., Rucka M., Zielińska M.: Sposób wyznaczania granicy między ośrodkami stałymi, z których jeden zawiera inkluzję, zwłaszcza w obiektach budowlanych. *Zgłoszenie patentowe PL, P.414148* 2015.

[71] Lai W.L., Kind T., Wiggenhauser H.: A study of concrete hydration and dielectric relaxation mechanism using ground penetrating radar and short-time Fourier transform. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing* 2010, 1–14.

[72] Lai W.L., Kind T., Wiggenhauser H.: Frequency-dependent dispersion of high-frequency ground penetrating radar wave in concrete. *NDT and E International 44*, 2011, 267–273.

[73] Lai W.L., Kind T., Kruschwitz S., Wöstmann J., Wiggenhauser H.: Spectral absorption of spatial and temporal ground penetrating radar signals by water in construction materials. *NDT and E International 67*, 2014, 55–63.

[74] Lai W.L., Kind T., Wiggenhauser H.: Using ground penetrating radar and time–frequency analysis to characterize construction materials. *NDT and E International 44*, 2011, 111–120.

[75] Lai W.L., Kind T., Kruschwitz S., Wöstmann J., Wiggenhauser H.: Spectral absorption of spatial and temporal ground penetrating radar signals by water in construction materials. *NDT and E International 67*, 2014, 55–63.

[76] Laurens S., Balayssac J.P., Rhazi J., Klysz G., Arliguie G.: Non-destructive evaluation of concrete moisture by GPR: experimental study and direct modeling. *Materials and Structures 38*, 2005, 827–832.

[77] Leng Z., Al-Qadi I.L.: An innovative method for measuring pavement dielectric constant using the extended CMP method with two air-coupled GPR systems. *NDT and E International 66*, 2014, 90–98.

[78] Li J., Zeng Z., Huang L., Liu F.: GPR simulation based on complex frequency shifted recursive integration PML boundary of 3D high order FDTD. *Computers and Geosciences 49*, 2012, 121–130.

[79] Lin Z., Jiang W.: Estimation on underground electromagnetic wave velocity based on characteristics of shallow-buried small target echo. *In: 5th International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control*. Qinhuangdao 2015, 723–726.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

[80] Lubowiecka I., Armesto J., Arias P., Lorenzo H.: Historic bridge modelling using laser scanning, ground penetrating radar and finite element methods in the context of structural dynamics. *Engineering Structures 31*, 2009, 2667–2676.

[81] Luebbers R., Hunsberger F.P., Kunz K.S., Standler R.B., Schneider M.: A frequency-dependent finite-difference time-domain formulation for dispersive materials. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 32*, 1990, 222–227.

[82] Lyons R.G.: *Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności 1997.

[83] Maierhofer C., Leipold S.: Radar investigation of masonry structures. *NDT and E International 34*, 2001, 139–147.

[84] Marquardt D.W.: An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industral and Applied Mathematics 11*, 1963, 431–441.

[85] Mechbal Z., Khamlichi A.: Determination of concrete rebars characteristics by enhanced post-processing of GPR scan raw data. *NDT and E International 89*, 2017, 30–39.

[86] Mertens L., Persico R., Matera L., Lambot S.: Automated detection of reflection hyperbolas in complex GPR images with no a priori knowledge on the medium. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 54*, 2016, 580–596.

[87] Miśkiewicz M., Pyrzowski Ł., Chrościelewski J., Wilde K.: Structural health monitoring of composite shell footbridge for its design validation. *In: 2016 Baltic Geodetic Congress (Geomatics)*. Gdańsk 2016, 228–233.

[88] Miśkiewicz M., Pyrzowski Ł., Wilde K., Mitrosz O.: Technical monitoring system for a new part of Gdańsk deepwater container terminal. *Polish Maritime Research 24*, 2017, 149–155.

[89] Morawski T., Gwarek W.: *Pola i fale elektromagnetyczne*. Warszawa: Wydawnictwo WNT 2013.

[90] Orlando L.: Detecting steel rods and micro-piles: A case history in a civil engineering application. *Journal of Applied Geophysics 81*, 2012, 130–138.

[91] Orlando L., Slob E.: Using multicomponent GPR to monitor cracks in a historical building. *Journal of Applied Geophysics 67*, 2009, 327–334.

[92] Özdemir C., Demirci Ş., E. Y.: Practical algorithms to focus B-scan GPR images: theory and application to real data. *Progress In Electromagnetics Research B 6*,

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

2008, 109–122.

[93] Özdemir C., Demirci Ş., Yiğit E., Yilmaz B.: A review on migration methods in B-scan ground penetrating radar imaging. *In: Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings*. 2012, 789–793.

[94] Peplinski N.R., Ulaby F.T., Dobson M.C.: Dielectric Properties of Soils in the 0.3–1.3-GHz Range. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 33*, 1995, 803–807.

[95] Pérez-Gracia V., Di Capua D., Caselles O., Rial F., Lorenzo H., González-Drigo R., Armesto J.: Characterization of a romanesque bridge in Galicia (Spain). *International Journal of Architectural Heritage 5*, 2011, 251–263.

[96] Pérez-Gracia V., Caselles J.O., Clapés J., Martinez G., Osorio R.: Non-destructive analysis in cultural heritage buildings: Evaluating the Mallorca cathedral supporting structures. *NDT and E International 59*, 2013, 40–47.

[97] Pérez-Gracia V., González-Drigo R., Di Capua D.: Horizontal resolution in a non-destructive shallow GPR survey: An experimental evaluation. *NDT and E International 41*, 2008, 611–620.

[98] Piątek Z., Jabłoński P.: *Podstawy teorii pola elektromagnetycznego*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 2010.

[99] Pieraccini M., Bicci A., Mecatti D., MacAluso G., Atzeni C.: Propagation of large bandwidth microwave signals in water. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation 57*, 2009, 3612–3618.

[100] Piotrowski T., Załęgowski K., Kuszyk R., Garbacz A.: Ocena stanu betonu w konstrukcji ściany kolektora ściekowego po 50 latach użytkowania. *Przegląd Budowlany 5*, 2016, 41–44.

[101] Pla-Rucki G.F., Eberhard M.O.: Imaging of reinforced concrete: state-of-the-art review. *Journal of Infrastructure Systems 1*, 1995, 134–141.

[102] Ristic A.V., Petrovacki D., Govedarica M.: A new method to simultaneously estimate the radius of a cylindrical object and the wave propagation velocity from GPR data. *Computers and Geosciences 35*, 2009, 1620–1630.

[103] Robert A.: Dielectric permittivity of concrete between 50 MHz and 1 GHz and GPR measurements for building materials evaluation. *Journal of Applied Geophysics 40*, 1998, 89–94.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

[104] Rucka M., Wilde K.: Application of continuous wavelet transform in vibration based damage detection method for beams and plates. *Journal of Sound and Vibration 297*, 2006, 536–550.

[105] Rucka M., Wilde K.: Ultrasound monitoring for evaluation of damage in reinforced concrete. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences 63*, 2015, 65–75.

[106] Rucka M., Zima B., Kędra R.: Application of guided wave propagation in diagnostics of steel bridge components. *Archives of Civil Engineering 60*, 2014, 493–515.

[107] Rucka M.: Experimental and numerical study on damage detection in an L-joint using guided wave propagation. *Journal of Sound and Vibration 329*, 2010, 1760–1779.

[108] Rucka M., Lachowicz J.: Zastosowanie metody georadarowej w badaniach konstrukcji podłogi posadowionej na gruncie. *Inżynierska Morska i Geotechnika* 2014, 452–458.

[109] Rucka M., Lachowicz J., Zielińska M.: GPR investigation of the strengthening system of a historic masonry tower. *Journal of Applied Geophysics 131*, 2016, 94–102.

[110] Rucka M., Wilde K.: Experimental study on ultrasonic monitoring of splitting failure in reinforced concrete. *Journal of Nondestructive Evaluation 32*, 2013, 372–383.

[111] Rucka M., Wilde K.: Non-destructive diagnostics of concrete centilever beam and slab by impact echo method. *Diagnostyka 3*, 2010, 63–68.

[112] Rucka M., Wojtczak E., Lachowicz J.: Damage imaging in Lamb wave-based inspection of adhesive joints. *Applied Sciences 8*, 2018, 1–9.

[113] Sadiku M.N.O.: *Numerical Techniques in Electromagnetics, Second Edition*. Boca Raton: CRC Press 2001.

[114] Sagnard F., Tarel J.-P.: Template-matching based detection of hyperbolas in ground-penetrating radargrams for buried utilities. *Journal of Geophysics and Engineering 13*, 2016, 491–504.

[115] Sangoju B., Ramanjaneyulu K.: Estimation of rebar diameter in concrete structural elements using ground penetrating radar. *In: NDE2015*. Hyderabad 2015, 1–10.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

[116] Santos-Assunçao S., Perez-Gracia V., Caselles O., Clapes J., Salinas V.: Assessment of complex masonry structures with GPR compared to other non-destructive testing studies. *Remote Sensing 6*, 2014, 8220–8237.

[117] Schabowicz K., Ranachowski Z., Jóźwiak-Niedźwiedzka D., Radzik Ł., Kudela S., Dvorak T.: Application of X-ray microtomography to quality assessment of fibre cement boards. *Construction and Building Materials 110*, 2016, 182–188.

[118] Schneider J.B.: *Understanding the Finite-Difference Time-Domain Method*. www.eecs.wsu.edu/~schneidj/ufdtd 2014.

[119] Sfarra S., Bendada A., Ibarra-Castanedo C., Ambrosini D., Paoletti D., Maldague X.: Santa Maria di Collemaggio Church (L'Aquila, Italy): Historical reconstruction by non-destructive testing techniques. *International Journal of Architectural Heritage 9*, 2015, 367–390.

[120] Shihab S., Al-Nuaimy W.: Radius estimation for cylindrical objects detected by ground penetrating radar. *Subsurface Sensing Technologies and Applications 6*, 2005, 151–166.

[121] Singh S.K., Rathore B.P., Bahuguna I.M.: Estimation of glacier ice thickness using Ground Penetrating Radar in the Himalayan region. *Current Science 103*, 2012, 68–73.

[122] Sison M., Duke J.C., Lozev M.G., Cleme G.G.: Analysis of Acoustic Emissions from a steel bridge hanger. *Research in Nondestructive Evaluation 10*, 1998, 123–145.

[123] Sławski L., Kosno L., Świt G.: Evaluation of precast pre-post-tensioned concrete bridge beams with the use of GPR method. *Procedia Engineering 156*, 2016, 443–450.

[124] Smitha N., Ullas Bharadwaj D.R., Abilash S., Sridhara S.N., Singh V.: Kirchhoff and F-K migration to focus ground penetrating radar images. *International Journal of Geo-Engineering 7*, 2016, 1–12.

[125] Solla M., Lorenzo H., Novo A., Caamaño J.C.: Structural analysis of the Roman Bibei bridge (Spain) based on GPR data and numerical modelling. *Automation in Construction 22*, 2012, 334–339.

[126] Solla M., Lorenzo H., Rial F.I., Novo A.: GPR evaluation of the Roman masonry arch bridge of Lugo (Spain). *NDT and E International 44*, 2011, 8–12.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

[127] Solla M., González-Jorge H., Álvarez M.X., Arias P.: Application of non-destructive geomatic techniques and FDTD modeling to metrical analysis of stone blocks in a masonry wall. *Construction and Building Materials 36*, 2012, 14–19.

[128] Solla M., Lorenzo H., Rial F.I., Novo A.: Ground-penetrating radar for the structural evaluation of masonry bridges: Results and interpretational tools. *Construction and Building Materials 29*, 2012, 458–465.

[129] Stadler S.: *A forward modeling study for the investigation of the vertical water-content distribution of using guided GPR waves*. Freiberg University of Mining and Technology, Germany: Master Thesis 2017.

[130] Stryk J., Alani A.M., Matula R., Pospisil K.: Innovative inspection procedures for effective GPR surveying of critical transport infrastructures (pavements, bridges and tunnels). *In: Civil engineering applications of Ground Penetrating Radar* (Editors: A. Benedetto and L. Pajewski). Springer 2015, 71–95.

[131] Stryk J., Matula R., Pospisil K.: Possibilities of ground penetrating radar usage within acceptance tests of rigid pavements. *Journal of Applied Geophysics 97*, 2013, 11–26.

[132] Sullivan D.M.: *Electromagnetic Simulations Using the FDTD Method*. New York: IEEE PRESS, 2000.

[133] Świt G.: *Metoda emisji akustycznej w analizie uszkodzeń konstrukcji betonowych wstępnie sprężonych*. Kielce: Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej 2008.

[134] Świt G.: *Analiza procesów destrukcyjnych w obiektach mostowych z belek strunobetonowych z wykorzystaniem zjawiska emisji akustycznej*. Kielce: Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej 2011.

[135] Świt G., Kosno Ł.: Zastosowanie metody georadarowej do oceny poprawności wykonania konstrukcji gruntowo-powłokowej. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury 64*, 2017, 153–164.

[136] Świt G., Krampikowska A., Chinh L.M.: A prototype system for acoustic emission-based structural health monitoring of Mỹ Thuận bridge. *In: Prognostics and System Health Management Conference*. Chengdu 2016, 1–6.

[137] Taflove A.: *Computational Electrodynamics: the Finite-Difference Time-Domain Method*. Norwood: Artech House 1995.

[138] Taflove A.: Application of the finite-difference time-domain method to sinusoidal steady-state electromagnetic-penetration problems. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility EMC-22*, 1980, 191–202.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

[139] Taflove A., Brodwin M.E.: Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 23*, 1975, 623–630.

[140] Tomaszewska A., Szymczak C.: Identification of the Vistula Mounting tower model using measured modal data. *Engineering Structures 42*, 2012, 342–348.

[141] Trojanowska I.: *Wspomnienia z Odbudowy Głównego Miasta*. Marpress 1997.

[142] Utsi V., Utsi E.: Measurement of reinforcement bar depths and diameters in concrete. *In: 10th International Conference of Ground Penetrating Radar*. Delft 2004, 659–662.

[143] Varnavina A. V., Khamzin A.K., Sneed L.H., Torgashov E. V., Anderson N.L., Maerz N.H., Boyko K.J.: Concrete bridge deck assessment: Relationship between GPR data and concrete removal depth measurements collected after hydrodemolition. *Construction and Building Materials 99*, 2015, 26–38.

[144] Wai-Lok Lai W., Dérobert X., Annan P.: A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from locating and testing to imaging and diagnosis. *NDT and E International* 2017, [in press].

[145] Warren C., Giannopoulos A.: Creating finite-difference time-domain models of commercial ground-penetrating radar antennas using Taguchi's optimization method. *Geophysics 76*, 2011, G37–G47.

[146] Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I.: gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar. *Computer Physics Communications 209*, 2016, 163–170.

[147] Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I.: An advanced GPR modelling framework: The next generation of gprMax. *In: 8th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR)*. Florence 2015, 1–4.

[148] Wend M.S., Dunn S.E., Hartt W.H., Brown R.P.: Application of AE to detection of reinforcing steel corrosion in Concrete. *Corrosion-NACE 38*, 1982, 9–14.

[149] Wilde K.: *Modal diagnostics of civil engineering structures*. Gdańsk: Gdańsk University of Technology Publishers 2008.

[150] Wilde K., Rucka M., Chróścielewski J., Miśkiewicz M., Malinowski M., Jasina M., Wilde M.: System ciągłej obserwacji stanu technicznego hali Olivia'' w Gdańsku. *Inżynieria i Budownistwo 10*, 2009, 552–556.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

[151] Wiwatrojanagul P., Sahamitmongkol R., Tangtermsirikul S., Khamsemanan N.: A new method to determine locations of rebars and estimate cover thickness of RC structures using GPR data. *Construction and Building Materials 140*, 2017, 257–273.

[152] Wutke M., Konopska-Piechurska M., Jackiewicz-Rek W., Załęgowski K., Garbacz A.: Zastosowanie GPR przy ocenie stopnia zawilgocenia elementów posadowienia w prognozowaniu trwałosci betonu w parkingu podziemmnym. *W: Awarie Budowlane. zapobieganie, diagnostyka, naprawy, rekonstrukcje* (Edytor: M. Kaszyńska). Szczecin: Wydawnictwo uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie 2017, 951–961.

[153] Xiang L., Zhou H.-L., Shu Z., Tan S.-H., Liang G.-Q., Zhu J.: GPR evaluation of the Damaoshan highway tunnel: A case study. *NDT and E International 59*, 2013, 68–76.

[154] Xiao X., Ihamouten A., Villain G., Dérobert X.: Parametric study on processing GPR signals to get a dispersion curve. *In: 15th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*. Brussels 2014, 575–580.

[155] Xie X., Qin H., Yu C., Liu L.: An automatic recognition algorithm for GPR images of RC structure voids. *Journal of Applied Geophysics 99*, 2013, 125–134.

[156] Yang F., Qiao X., Zhang Y., Xu X.: Prediction method of underground pipeline based on hyperbolic asymptote of GPR image. *In: 15th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*. Brussels 2014, 674–678.

[157] Yee K.S.: Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation 14*, 1966, 302–307.

[158] Yehia S., Qaddoumi N., Farrag S., Hamzeh L.: Investigation of concrete mix variations and environmental conditions on defect detection ability using GPR. *NDT and E International 65*, 2014, 35–46.

[159] Yelf R.J.: Where is true time zero? *In: 10th International Conference on Ground Penetrating Radar*. Delft 2004, 279–282.

[160] Zanzi L., Arosio D.: Sensitivity and accuracy in rebar diameter measurements from dual-polarized GPR data. *Construction and Building Materials 48*, 2013, 1293–1301.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

[161] Zembaty Z., Kokot S., Bobra P.: Application of rotation rate sensors in an experiment of stiffness 'reconstruction'. *Smart Materials and Structures 22*, 2013, 1–5.

[162] Zhang F., Xie X., Huang H.: Application of ground penetrating radar in grouting evaluation for shield tunnel construction. *Tunnelling and Underground Space Technology 25*, 2010, 99–107.

[163] Zieliński T.P.: *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów od teorii do zastosowań*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności 2005.

[164] Zima B., Rucka M.: Guided waves for monitoring of plate structures with linear cracks of variable length. *Archives of Civil and Mechanical Engineering 16*, 2016, 387–396.

[165] Zima B., Rucka M.: Guided ultrasonic waves for detection of debonding in bars partially embedded in grout. *Construction and Building Materials 168*, 2018, 124–142.

[166] Zima B., Rucka M.: Non-destructive inspection of ground anchors using guided wave propagation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 94*, 2017, 90–102.

[167] Żak A., Radzieński M., Krawczuk M., Ostachowicz W.: Damage detection strategies based on propagation of guided elastic waves. *Smart Materials and Structures 21*, 2012, 1–18.

[168] *Rettet die Marienkirche in Danzig*. Denkschrift des Evangelischen Konsistoriums in Danzig. Berlin: Hessenlanddruck 1932.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Spis rysunków

Rys. 2.1. Zależność przenikalności elektrycznej od częstotliwości w modelu dyspersji Debye'a dla wody 23
Rys. 3.1. Kostka Yee dla symulacji trójwymiarowych 25
Rys. 3.2. Uproszczona siatka Yee dla dwóch wymiarów modu TM^z w chwili n 29
Rys. 3.3. Sygnał wejściowy zarejestrowany przez antenę odbiorczą (Aladdin, IDS, 2GHz): a) w dziedzinie czasu, b) w dziedzinie częstotliwości 33
Rys. 3.4. Funkcja Gaussa dla częstotliwości środkowej 2 GHz: a) w dziedzinie czasu, b) w dziedzinie częstotliwości 34
Rys. 3.5. Funkcja pojedynczej fali sinusa dla częstotliwości środkowej 2 GHz: a) w dziedzinie czasu, b) w dziedzinie częstotliwości 35
Rys. 3.6. Funkcja Rickera dla częstotliwości środkowej 2 GHz: a) w dziedzinie czasu, b) w dziedzinie częstotliwości 35
Rys. 3.7. Schemat dwuwymiarowego modelu FDTD z warunkami brzegowymi PML 37
Rys. 3.8. Przykładowy skład betonu i krzywa uziarnienia w autorskim heterogenicznym modelu numerycznym betonu 39
Rys. 3.9. Wizualizacja rozkładu poszczególnych frakcji w autorskim heterogenicznym modelu numerycznym betonu 40
Rys. 4.1. Schemat działania metody georadarowej 42
Rys. 4.2. Rodzaje wyników pomiarów metodą georadarową: a) pojedyncza trasa (skan typu A), b) mapa georadarowa (skan typu B), c) zestaw radargramów (skan typu C) 43
Rys. 4.3. Rozdzielczość pomiarowa georadaru: a) pionowa, b) pozioma 44
Rys. 4.4. Georadar Aladdin: a) antena, jednostka sterująca, akumulator oraz przenośny komputer, b) antena na macie badawczej PSG, c) widok spodu anteny w trybie pracy na macie PSG [109] 46
Rys. 4.5. Schemat anteny bipolarnej Aladdin o częstotliwości pracy 2 GHz (na podstawie [57]) 47
Rys. 4.6. Pomiar georadarowy poprzecznej inkluzji z polaryzacją: a) pionową (VV), b) poziomą (HH) 47
Rys. 4.7. Metodologia pomiaru: a) pojedynczy profil podłużny, b) ortogonalna siatka profili podłużnych i poprzecznych, c) gęste profilowanie podłużne 48

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Rys. 4.8. Metody ustalania czasu zerowego dla sygnału georadarowego 50
Rys. 4.9. Stanowisko dla pomiarów kalibracyjnych w celu ustalenia czasu zerowego dla anteny 2 GHz (Aladdin, IDS): a) schemat, b) zdjęcie stanowiska, c) ustawienie dla h_p = 10 cm 51
Rys. 4.10. Identyfikacja odległości anteny od stalowej płyty dla pomiaru 128 próbek/skan dla różnych metod ustalania czasu zerowego 52
Rys. 4.11. Identyfikacja odległości anteny od stalowej płyty dla pomiaru 256 próbek/skan dla różnych metod ustalania czasu zerowego 53
Rys. 4.12. Identyfikacja odległości anteny od stalowej płyty dla pomiaru 384 próbek/skan dla różnych metod ustalania czasu zerowego 53
Rys. 4.13. Identyfikacja odległości anteny od stalowej płyty dla pomiaru 512 próbek/skan dla różnych metod ustalania czasu zerowego 54
Rys. 4.14. Przykładowy sygnał numeryczny 1D propagacji fali elektromagnetycznej w stratnym ośrodku dielektrycznym (widoczne zjawisko zmiany częstotliwości fali)..... 54
Rys. 4.15. Skan typu A poddany usunięciu stałej składowej oraz średniej ruchomej 55
Rys. 4.16. Procedura wzmocnienia sygnału: a) funkcją liniową, b) funkcją wykładniczą, c) funkcją eksponencjalną 56
Rys. 4.17. Trasa georadarowa poddana filtracji pasmowo przepustowej w zakresie 500 MHz – 3000 MHz 57
Rys. 4.18. Mapa georadarowa poddana usuwaniu średniej trasy z całego profilu: a) sygnał nieprzetworzony, b) sygnał przetworzony..... 58
Rys. 4.19. Schemat algorytmu sumowania hiperbol..... 59
Rys. 4.20. Transformacja Fouriera sygnału wejściowego anteny 2 GHz w dziedzinie: a) czasu, b) częstotliwości 60
Rys. 4.21. Krótkoczasowa transformacja Fouriera dla sygnału pomierzonego w powietrzu w odległości 15 cm od stalowej płyty 61
Rys. 5.1. Schemat odbicia fali elektromagnetycznej od spodu próbki o znanej wysokości h 64
Rys. 5.2. Schemat powstania hiperboli dyfrakcyjnej na mapie georadarowej..... 65
Rys. 5.3. Model hiperboli nie uwzględniający rozmiaru pręta i rozstawu anten 66
Rys. 5.4. Model hiperboli nie uwzględniający rozmiaru pręta i uwzględniający rozstaw anten 66

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Rys. 5.5. Model hiperboli uwzględniający rozmiar pręta i nie uwzględniający rozstawu anten 67
Rys. 5.6. Model hiperboli uwzględniający rozmiar pręta i rozstaw anten 68
Rys. 5.7. Autorski model hiperboli uwzgledniający promień pręta, rozstaw między antenami oraz fakt odbicia fali od powierzchni pręta 69
Rys. 5.8. Autorski model dyfrakcji fali elektromagnetycznej na pionowej inkluzji 70
Rys. 5.9. Autorski model dyfrakcji fali elektromagnetycznej na narożach prostokątnego obiektu umieszczonego w drugim ośrodku 71
Rys. 5.10. Autorski model ugięcia się hiperboli na granicy dwóch ośrodków 72
Rys. 5.11. Modele numeryczne żelbetowej płyty z prętami zbrojeniowymi o średnicy: a) 8 mm (R = 4 mm), b) 16 mm (R = 8 mm), c) 32 mm (R = 16 mm) 74
Rys. 5.12. Modele numeryczne do analizy: a) dyfrakcji na pionowej inkluzji, b) dyfrakcji na narożach prostokątnego obiektu, c) ugiętej hiperboli dyfrakcyjnej 75
Rys. 5.13. Numeryczne mapy georadarowe dla modelu żelbetowej płyty z prętami zbrojeniowymi o średnicy: a) 8 mm (R = 4 mm) z krokiem zapisu 2 mm, b) 16 mm (R = 8 mm) z krokiem zapisu 10 mm, c) 32 mm (R = 16 mm) z krokiem zapisu 14 mm 76
Rys. 5.14. Numeryczna mapa georadarowe dla modelu żelbetowej płyty z prętami zbrojeniowymi o średnicy 32 mm (R = 16 mm) z krokiem zapisu 2 mm z zaznaczonymi punktami hiperboli 77
Rys. 5.15. Zależność oszacowanej prędkości od promienia pręta dla modeli żelbetowej płyty dla pręta na głębokości: a) 2 cm, b) 6 cm, c) 15 cm 78
Rys. 5.16. Zależność głębokości oszacowanej prędkości od położenia pręta dla modeli żelbetowej płyty z prętami o średnicy: a) 8 mm (R = 4mm), b) 16 mm (R = 8 mm), c) 32 mm (R = 16 mm) 79
Rys. 5.17. Zależność oszacowanej prędkości od kroku zapisu dla modeli żelbetowej płyty z prętami o średnicy: a) 8 mm (R = 4mm), b) 16 mm (R = 8 mm), c) 32 mm (R = 16 mm) 80
Rys. 5.18. Numeryczna mapa georadarowa dla modelu z pionową inkluzją 81
Rys. 5.19. Numeryczna mapa georadarowa dla modelu z prostokątnym obiektem 81
Rys. 5.20. Numeryczna mapa georadarowa dla modelu z kołową inkluzją w jednym z ośrodków: a) $\varepsilon_r^{lewa} < \varepsilon_r^{prawa}$, b) $\varepsilon_r^{lewa} > \varepsilon_r^{prawa}$ 82
Rys. 6.1. Próbka żelbetowa: a) projekt, b) próbka po wykonaniu wraz z wymiarami ... 85
Rys. 6.2. Próbka żelbetowa z zaznaczoną trasą skanowania 85

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Rys. 6.3. Mapa georadarowa dla pomiaru: a) krok zapisu 2 mm, 512 próbek/skan, b) krok zapisu 12 mm, 128 próbek/skan 86
Rys. 6.4. Test podnoszenia anteny: a) mapa georadarowa, b) pojedyncze trasy georadarowe ukazujące efekt przesunięcia 86
Rys. 6.5. Mapa georadarowa dla pomiaru z krokiem zapisu 10 mm i 512 próbek/skan: a) próbka umieszona na dwóch podporach, b) próbka oparta na stalowej blasze, c) skany typu A ukazujące zmianę fazy sygnału odbitego..... 87
Rys. 6.6. Schemat i zasada działania opracowanych metod ekstrakcji hiperboli: a) metoda prostokątna, b) metoda dwóch krzywych, c) metoda jednej krzywej 88
Rys. 6.7. Mapa georadarowa z zaznaczonymi hiperbolami z metody prostokątnej dla pomiaru: a) z krokiem zapisu 2 mm, 512 próbek/skan, b) z krokiem zapisu 12 mm, 128 próbki/skan..... 89
Rys. 6.8. Mapa georadarowa z zaznaczonymi hiperbolami dla pomiaru 384 próbek/skan z krokiem zapisu 10 mm dla metody: a) dwóch krzywych, b) jednej krzywej 90
Rys. 6.9. Zależność oszacowanej prędkości od kroku zapisu sygnału dla pręta położonego na głębokości 1.9 cm, 384 próbki/skan dla metody: a) prostokątnej, b) dwóch krzywych, c) jednej krzywej 90
Rys. 6.10. Zależność oszacowanej prędkości od kroku zapisu sygnału dla pręta położonego na głębokości 4.3 cm, 384 próbek/skan dla metody: a) prostokątnej, b) dwóch krzywych, c) jednej krzywej 91
Rys. 6.11. Zależność oszacowanej prędkości od liczby rejestrowanych próbek/skan dla pręta położonego na głębokości 1.9 cm z krokiem zapisu 2 mm dla metody: a) prostokątnej, b) dwóch krzywych, c) jednej krzywej 91
Rys. 6.12. Zależność oszacowanej prędkości od liczby rejestrowanych próbek/skan dla pręta położonego na głębokości 4.3 cm z krokiem zapisu 2 mm dla metody: a) prostokątnej, b) dwóch krzywych, c) jednej krzywej 92
Rys. 6.13. Zależność oszacowanej prędkości od głębokości położenia pręta dla 384 próbek/skan z krokiem zapisu 10 mm dla metody: a) prostokątnej, b) dwóch krzywych, c) jednej krzywej 92
Rys. 6.14. Wybrane skany typu A z zaznaczoną amplitudą odbicia dla różnych stopni nasycenia: a) 0%, b) 33.76%, c) 65.82%, d) 100%..... 94
Rys. 6.15. Zależność amplitudy odbitego sygnału od stopnia nasycenia 95

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Rys. 6.16. Zależność przenikalności elektrycznej od stopnia nasycenia wraz z dopasowanym modelem CRIM 95
Rys. 6.17. Spektrogram dla sygnału dla próbki z 100% stopnień nasycenia 96
Rys. 6.18. Spektrogram dla sygnału dla próbki z 65.82% stopniem nasycenia 97
Rys. 6.19. Spektrogram dla sygnału dla próbki z 0% stopniem nasycenia 97
Rys. 6.20. Heterogeniczny model numeryczny betonu dla stopnia nasycenia 60% 98
Rys. 6.21. Zasada wyznaczania czasu odbitego sygnału dla numerycznego sygnału georadarowego 99
Rys. 6.22. Zależność przenikalności elektrycznej od stopnia nasycenia 100
Rys. 6.23. Wybrane skany typu A dla modelu z tłumieniem i bez tłumienia dla próbki betonu o stopniu nasycenia 80% 101
Rys. 6.24. Modele numeryczne betonu: a) homogeniczny o stopniu nasycenia 50%, b) heterogeniczny o stopniu nasycenia 0%, c) heterogeniczny o stopniu nasycenia 50%, d) heterogeniczny o stopniu nasycenia 100% 102
Rys. 6.25. Mapa georadarowa dla stopnia nasycenia 50%: a) badania doświadczalne, b) model heterogeniczny z siatką 1 mm x 1mm, c) model heterogeniczny z siatką 0.5 mm x 0.5 mm, d) model homogeniczny z siatką 1 mm x 1mm 103
Rys. 6.26. Mapa georadarowa dla stopnia nasycenia 0% z siatką 1 mm x 1mm: a) badania doświadczalne, b) model heterogeniczny 104
Rys. 6.27. Mapa georadarowa dla stopnia nasycenia 100% z siatką 1 mm x 1mm: a) badania doświadczalne, b) model heterogeniczny 104
Rys. 6.28. Projekt obiektu badawczego (fragment muru ceglanego) 107
Rys. 6.29. Geometria modelu 2D dla warstwy: a) pierwszej, b) drugiej, c) trzeciej, d) czwartej, e) piątej, f) szóstej, g) siódmej, h) ósmej 108
Rys. 6.30. Geometria modelu 3D 109
Rys. 6.31. Obiekt badawczy z zaznaczonymi trasami skanowania 109
Rys. 6.32. Numeryczne mapy georadarowe dla pierwszej warstwy: a) model 2D, b) model 3D 111
Rys. 6.33. Numeryczne mapy georadarowe dla drugiej warstwy: a) model 2D, b) model 3D 112
Rys. 6.34. Numeryczne mapy georadarowe dla trzeciej warstwy: a) model 2D, b) model 3D 112

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Rys. 6.35. Numeryczne mapy georadarowe dla czwartej warstwy: a) model 2D, b) model 3D 112
Rys. 6.36. Numeryczne mapy georadarowe dla piątej warstwy: a) model 2D, b) model 3D 113
Rys. 6.37. Numeryczne mapy georadarowe dla szóstej warstwy: a) model 2D, b) model 3D 113
Rys. 6.38. Numeryczne mapy georadarowe dla siódmej warstwy: a) model 2D, b) model 3D 113
Rys. 6.39. Numeryczne mapy georadarowe dla ósmej warstwy: a) model 2D, b) model 3D 114
Rys. 6.40. Wynik pomiaru georadarowego dla pierwszej warstwy 116
Rys. 6.41. Wynik pomiaru georadarowego dla drugiej warstwy 116
Rys. 6.42. Wynik pomiaru georadarowego dla trzeciej warstwy 117
Rys. 6.43. Wynik pomiaru georadarowego dla czwartej warstwy 117
Rys. 6.44. Wynik pomiaru georadarowego dla piątej warstwy 118
Rys. 6.45. Wynik pomiaru georadarowego dla szóstej warstwy 118
Rys. 6.46. Wynik pomiaru georadarowego dla siódmej warstwy 119
Rys. 6.47. Wynik pomiaru georadarowego dla ósmej warstwy 119
Rys. 6.48. Symulacje numeryczne dla profilowania poprzecznego: a) przekrój przez model, b) numeryczna tomografia na głębokości pustki powietrza (12 cm) 120
Rys. 6.49. Symulacje numeryczne dla profilowania poprzecznego: a) przekrój przez model, b) numeryczna tomografia na głębokości końca pierwszego rzędu cegieł (25 cm) 121
Rys. 6.50. Rozkład głównych częstotliwości pojedynczych numerycznych skanów typu A rozłożonych na obszarze skanowania 121
Rys. 6.51. Rozkład wartości RMS pojedynczych numerycznych skanów typu A rozłożonych na obszarze skanowania 122
Rys. 6.52. Doświadczalne zobrazowanie tomograficzne: a) na głębokości pustki powietrza (12 cm), b) na głębokości końca pierwszego rzędu cegieł (25 cm) 123
Rys. 6.53. Rozkład głównych częstotliwości pojedynczych skanów typu A rozłożonych na obszarze skanowania 124

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Rys. 6.54. Rozkład wartości RMS pojedynczych skanów typu A rozłożonych na obszarze skanowania 124
Rys. 7.1. Badana żelbetowa kładka dla pieszych (Gdańsk, Polska, 54 ° 21'32,4 "N 18 ° 34'01.8" E): a) widok ogólny, b) przekrój obiektu mostowego z rysunkiem zbrojenia (wymiary w mm) 127
Rys. 7.2. Różne sytuacje położenia prętów: a) pojedynczy pręt, b) trzy przylegające do siebie pręty, c) pręt poprzeczny nad prętem podłużnym, d) pręt poprzeczny pod prętem podłużnym 128
Rys. 7.3. Płyta betonowa zbrojona stalowymi prętami: a) model nr 1 (cztery pojedyncze pręty o różnym promieniu), b) model nr 2 (1, 2, 3 i 4 przylegające do siebie pręty o tym samym promieniu) 129
Rys. 7.4. Trójwymiarowy numeryczny model rozpatrywanego obiektu: a) widok 3D, b) widok 2D z zaznaczonymi przekrojami A-A, B-B, C-C, D-D, E-E, F-F 130
Rys. 7.5. Ramowo-łukowa kładka dla pieszych podczas pomiaru georadarowego z użyciem maty PSG 131
Rys. 7.6. Numeryczne mapy georadarowe dla modelu żelbetowej płyty z zaznaczonymi punktami i dopasowanymi hiperbolami: a) model nr 1, b) model nr 2 oraz numeryczne skany typu A odpowiadające wierzchołkom hiperbol: c) model nr 1, d) nr model nr 2 133
Rys. 7.7. Mapy georadarowe z zaznaczonymi punktami i dopasowanymi hiperbolami dla skanowania: a) w kierunku poprzeczny, b) w kierunku podłużnym nad częścią wspornikową, c) w kierunku podłużnym nad płytą pomostu 136
Rys. 7.8. Numeryczne mapy georadarowe dla skanowania poprzecznego: a) trasa skanowania między zbrojeniem poprzecznym, b) trasa skanowania dokładnie nad zbrojeniem poprzecznym 139
Rys. 7.9. Poprzeczne mapy georadarowe dla trasy skanowania: a) na całym przekroju poprzecznym, b) dokładnie nad zbrojeniem poprzecznym, c) pomiędzy zbrojeniem poprzecznym 140
Rys. 7.10. Numeryczne mapy georadarowe dla skanowania podłużnego wzdłuż przekroju: a) A-A, b) B-B, c) C-C, d) D-D, e) E-E, f) F-F oraz numeryczne skany typu A odpowiadające pierwszej hiperboli dla przekroju: g) A-A, B-B, C-C, h) D-D, E-E, F-F 141

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Rys. 7.11. Podłużne mapy georadarowe dla trasy skanowania: a) nad częścią wspornikową, b) na płycie pomostu oraz c) skany typu A odpowiadające dwóm przylegającym do siebie prętom (kolor niebieski) i jednemu pojedynczemu (kolor czerwony) 142
Rys. 7.12. Numeryczne mapy georadarowej dla modelu żelbetowej płyty poddane procesowi migracji: a) model nr 1 (cztery pojedyncze pręty o różnym promieniu), b) modelu nr 2 (1, 2, 3 i 4 przylegające do siebie pręty o tym samym promieniu) 144
Rys. 7.13. Podłużne mapy georadarowe poddane procesowi migracji dla trasy skanowania: a) nad częścią wspornikową, b) na płycie pomostu 144
Rys. 7.14. Trójwymiarowa wizualizacja układu górnego zbrojenia wspornikowej części kładki w miejscu pomiaru georadarowego na macie PSG 145
Rys. 7.15. Ramowa kładka dla pieszych (Gdańsk, Polska, 54°21'19.0"N 18°31'44.2"E): a) widok ogólny, b) przekrój podporowy 147
Rys. 7.16. Pomiary georadarowe kładki dla pieszych: a) po wybudowaniu, b) dwa miesiące później 148
Rys. 7.17. Modele numeryczne kładki dla pieszych: a) brak uszkodzeń, b) brak pręta w środkowej warstwie, c) brak pręta w górnej warstwie 149
Rys. 7.18.Modele numeryczne kładki dla pieszych: a) woda w ścieku liniowym, b) woda przesiąkająca ze ścieku liniowego, c) woda w wewnętrznej warstwie konstrukcji 150
Rys. 7.19. Zależność przenikalności elektrycznej od stopnia nasycenia 151
Rys. 7.20.Modele numeryczne kładki dla pieszych w profilowaniu podłużnym: a) model homogeniczny, b) model heterogeniczny 151
Rys. 7.21. Ramowa kładka dla pieszych podczas pomiarów w drugim terminie 152
Rys. 7.22. Mapy georadarowe z zaznaczonymi punktami i hiperbolami dla pomiaru: a) w pierwszym terminie, b) w drugim terminie 153
Rys. 7.23. Numeryczne mapy georadarowej dla modelu: a) brak uszkodzeń, b) brak pręta w środkowej warstwie, c) brak pręta w górnej warstwie 154
Rys. 7.24. Numeryczne mapy georadarowe dla modelu: a) woda w ścieku liniowym, b) woda przesiąkająca ze ścieku liniowego, c) woda w wewnętrznej warstwie konstrukcji 155
Rys. 7.25. Doświadczalna mapa georadarowa z profilowania poprzecznego dla badania: a) po wybudowaniu, b) dwa miesiące później 156

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Rys. 7.26. Numeryczna mapa georadarowa dla modelu homogenicznego z profilowania podłużnego dla badania: a) w pierwszym terminie, b) w drugim terminie 157
Rys. 7.27. Numeryczna mapa georadarowa dla modelu heterogenicznego z profilowania podłużnego dla badania: a) w pierwszym terminie, b) w drugim terminie 157
Rys. 7.28. Doświadczalna mapa georadarowa z profilowania podłużnego dla badania: a) w pierwszym terminie, b) w drugim terminie 157
Rys. 7.29. Bazylika Mariacka (Gdańsk, Polska, 54°20'59.5"N 18°39'11.1"E) 159
Rys. 7.30. Wzmocnienie wieży dzwonnicy Bazyliki Mariackiej: a) rozmiar uszkodzeń [39], b) część żelbetowego pierścienia przed betonowaniem [40], c) rama żelbetowa (poziom III i poziom II, strona północna i wschodnia), d) rama żelbetowa (poziom II i poziom I, strona zachodnia i południowa) 160
Rys. 7.31 Dzwonnica Bazyliki Mariackiej: a) ogólny widok wieży z układem wzmacniającym (przerysowany na podstawie [40]); b) rama żelbetowa z lokalizacjami pięciu obszarów badań GPR [110] 160
Rys. 7.32. Model numeryczny: a) trasa skanowania równoległa do warstw cegieł i prostopadła do żelbetowego słupa, b) trasa skanowania prostopadła do warstw cegieł i prostopadła do żelbetowego pierścienia, c) trasa skanowania równoległa do żelbetowego pierścienia 162
Rys. 7.33. Numeryczna mapa georadarowa dla modelu trasy skanowania równoległej do warstw cegieł i prostopadłej do żelbetowego słupa 164
Rys. 7.34. Numeryczna mapa georadarowa dla modelu trasy skanowania prostopadłej do warstw cegieł i prostopadłej do żelbetowego pierścienia 164
Rys. 7.35. Numeryczna mapa georadarowa dla modelu trasy skanowania równoległej do żelbetowego pierścienia 165
Rys. 7.36. Badanie georadarowe na obszarze #1 (górna belka i słup, strona wschodnia): a) widok ogólny, b) skan poprzeczny T28, c) skan podłużny L15, d) skan podłużny L5 166
Rys. 7.37. Badanie georadarowe na obszarze #2 (górna belka i słup, północna strona): a) widok ogólny, b) skan poprzeczny T22, c) skan podłużny L13, d) skan podłużny L3 167
Rys. 7.38 Badanie georadarowe na obszarze #3 (kolumna, strona północna): a) widok ogólny, b) skan podłużny L11, c) skan poprzeczny T17 168
Rys. 7.39 Badanie georadarowe na obszarze #4 (słup, strona zachodnia): a) widok ogólny, b) skan podłużny L14, c) skan poprzeczny T22 169

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Rys. 7.40 Badanie georadarowe na obszarze # 5 (wewnętrzna powierzchnia muru, strona południowa): a) widok ogólny, b) skan podłużny L6 169
Rys. 7.41 Wizualizacja 3D wyników badań georadarowych przeprowadzonych na obszarze #1 wrysowanych w ścianę murowaną 170
Rys. 7.42. Zdjęcie wnętrza Bazyliki Mariackiej w Gdańsku 172
Rys. 7.43. Rzut poziomy kościoła (przerysowany na podstawie [19]) ze wskazanymi lokalizacjami pomiarów georadarowych 172
Rys. 7.44. Fotografie wzmocnionych filary: a) filar W.1, b) filar W.4, filar W.5 173
Rys. 7.45. Szkic filaru wzmocnionego w technologii monolitycznej (zdjęcie z dziennika budowy) 174
Rys. 7.46. Otynkowane filary z odkrytymi miejscami pokazującymi szczegóły muru i zbrojenia 174
Rys. 7.47. Pomiar georadarowy wzdłuż filaru C.2 175
Rys. 7.48. Podłużne mapy georadarowe z oszacowanymi wartościami prędkości dla pomiarów filarów ceglanych: a) filar C.1, b) filar C.2, c) filar C.3, d) filar C.4 176
Rys. 7.49. Podłużne mapy georadarowe z oszacowanymi wartościami prędkości dla pomiarów wzmocnionych filarów ceglanych: a) filar W.1, b) filar W.2, c) filar W.3, d) filar W.4, e) filar W.5 177
Rys. 7.50. Poprzeczne mapy georadarowe prędkości dla pomiarów wzmocnionych filarów ceglanych: a) filar W.1, b) filar W.2, c) filar W.3, d) filar W.4, e) filar W.5 178
Rys. 7.51. Poprzeczne mapy georadarowe poddane procesowi migracji: a) filar W.1, b) filar W.2, c) filar W.3, d) filar W.4, e) filar W.5 179
Rys. 7.52. Podłużne mapy georadarowe poddane procesowi migracji: a) filar W.1, b) filar W.2, c) filar W.3, d) filar W.4, e) filar W.5 180

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Spis tabel

Tabela 4.1. Specyfikacja techniczna zestawu georadarowego Aladdin firmy IDS 45
Tabela 6.1. Zestawienie masy próbki, stopnia nasycenia oraz czasu pomiaru od momentu wyjęcia próbki 94
Tabela 7.1. Wyniki aproksymacji hiperbol dla warunków brzegowych umożliwiających przyjmowanie dowolnej wartości zmiennych v, x_0, t_0 oraz R 134
Tabela 7.2. Wyniki aproksymacji hiperbol dla warunków brzegowych umożliwiających przyjmowanie dowolnej wartości zmiennych v, x_0, t_0 oraz stałej wartości zmiennej R 134
Tabela 7.3. Wyniki aproksymacji hiperbol dla warunków brzegowych umożliwiających przyjmowanie dowolnej wartości zmiennych x_0, t_0, R oraz stałej wartości zmiennej v 135
Tabela 7.4. Wyniki aproksymacji hiperbol z poprzecznej mapy georadarowej dla warunków brzegowych umożliwiających przyjmowanie dowolnej wartości zmiennych v, x_0, t_0 oraz R 137
Tabela 7.5. Wyniki aproksymacji hiperbol z poprzecznej mapy georadarowej dla warunków brzegowych umożliwiających przyjmowanie dowolnej wartości zmiennych v, x_0, t_0 oraz stałej wartości zmiennej R 137
Tabela 7.6. Wyniki aproksymacji hiperbol z podłużnych map georadarowych dla warunków brzegowych umożliwiających przyjmowanie dowolnej wartości zmiennych v, x_0, t_0 oraz R 138
Tabela 7.7. Wyniki aproksymacji hiperbol z podłużnych map georadarowych dla warunków brzegowych umożliwiających przyjmowanie dowolnej wartości zmiennych v, x_0, t_0 oraz stałej wartości zmiennej R 138

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Streszczenie

Niniejsza praca dotyczy zagadnień propagacji fal elektromagnetycznych z ukierunkowaniem na diagnostykę nieniszczącą obiektów budowlanych. Głównym celem rozprawy było opracowanie procedur umożliwiających efektywniejsze wykorzystywanie metody georadarowej w ocenie stanu konstrukcji żelbetowych i ceglanych. Szczególną uwagę poświecono sposobom identyfikacji prędkości propagacji fali elektromagnetycznej na podstawie anomalii obserwowanych na mapach georadarowych oraz wykorzystaniu modelowania numerycznego jako wsparcia w interpretacji danych georadarowych i weryfikacji autorskich algorytmów. Opracowano cztery autorskie algorytmy identyfikacji wartości prędkości wykorzystujące typowe dyfrakcje rejestrowane na radargramach. Zaproponowano także autorski heterogeniczny model numeryczny betonu, za pomocą którego analizowano wpływ zawartości wody w materiale na wyniki pomiarów metoda georadarową. Opracowane w ramach pracy modele i algorytmy zostały zweryfikowane w badaniach doświadczalnych przeprowadzonych na obiektach testowych, które zostały również wykorzystane do analizy możliwości diagnostycznych metody georadarowej.

Znaczna cześć pracy została poświęcona praktycznym zastosowaniom metody georadarowej w diagnostyce konstrukcji inżynierskich. Badaniom zostały poddane dwie żelbetowe kładki dla pieszych, dla których przeanalizowano wpływ różnych układów prętów zbrojeniowych oraz wilgotności betonu na wyniki pomiarów. Pomiary prowadzono również w Bazylice Mariackiej w Gdańsku, gdzie przeprowadzono diagnostykę ścian i filarów, które zostały wzmocnione elementami żelbetowymi. W tym przypadku analizy koncentrowały się na wyznaczeniu wartości prędkości, a także identyfikacji systemu zbrojenia i granicy między materiałami.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Summary

This work deals with propagation of electromagnetic waves aimed at non-destructive diagnostics of civil engineering objects. The main purpose of the dissertation was to develop procedures enabling more effective use of the ground penetrating radar (GPR) method in the assessment of the condition of reinforced concrete and brick structures. A particular attention was paid to methods of the identification of the electromagnetic wave velocity based on anomalies observed on GPR maps as well as the use of numerical modeling as a support in the interpretation of GPR data and the verification of developed algorithms. Four models enabling the identification of the wave velocity were developed using typical diffraction patterns recorded on radargrams. A heterogeneous numerical model of concrete was also proposed, by means of which the influence of water content in the material on the measurement results of the GPR method was analyzed. The models and algorithms developed within this thesis were verified in experimental tests carried out on test objects, which were also used to analyze the diagnostic capabilities of the GPR method.

A significant part of the work has been devoted to practical applications of the ground penetrating radar method in the diagnostics of engineering structures. Two reinforced concrete footbridges were tested, for which the influence of different reinforcing bar systems and the moisture content of concrete was analyzed. GPR measurements were also carried out in the St. Mary's Church in Gdańsk, where the inspection of strengthened walls and pillars was carried out. In this case, the analysis focused on the determination of the electromagnetic wave velocity as well as the identification of the reinforcement system and the boundary between masonry and reinforced concrete.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl