

Zastosowanie techniki pomiarowej TDR w badaniach terenowych przy wykorzystaniu sond powierzchniowych

Zbigniew Suchorab ¹, Zbyšek Pavlík ², Robert Černý ³

*¹ Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska,
e-mail: Z.Suchorab@wis.pol.lublin.pl*

*² Politechnika Czeska w Pradze, Wydział Inżynierii Budowlanej,
e-mail: pavlikz@fsv.cvut.cz*

*³ Politechnika Czeska w Pradze, Wydział Inżynierii Budowlanej,
e-mail: cernyr@fsv.cvut.cz*

Streszczenie: W artykule przedstawiono możliwość wykonywania pomiarów terenowych wilgotności murów za pomocą techniki TDR (ang. Time Domain Reflectometry). W celu wyeliminowania dotychczasowych wad niniejszej techniki, do których należy zaliczyć przede wszystkim jej inwazyjny charakter i konieczność wykonywania nawierceń w murach, opracowano i wykonano kilka prototypów sondy powierzchniowej. Dzięki zastosowaniu takiego rozwiązania czujnika, możliwe było przeprowadzenie badań na zasadzie dotykowej z pełnym wykorzystaniem potencjału techniki pomiarowej TDR – szybkości odczytu oraz braku wrażliwości na zasolenie badanego ośrodka. Pomiary wykonano w murach z cegły ceramicznej pełnej budynku zlokalizowanego przy ul. Pierwszego Maja 20 w Lublinie.

Słowa kluczowe: pomiary wilgotności, sonda powierzchniowa TDR, technika reflektometryczna.

1. Wstęp

Nadmierna wilgotność murów to poważny problem eksploatacyjny wielu obiektów budowlanych. Jest on szczególnie uciążliwy w przypadku budynków wzniesionych w czasach, kiedy nie dbano o właściwe zabezpieczenie przegród budowlanych przed szkodliwym działaniem wody. W związku z powyższym wiele obiektów o znaczeniu historycznym jest dzisiaj dotknięte problemem nadmiernej zawartości wody. Zbyt duża zawartość wody w przegrodzie wywołana jest najczęściej zjawiskiem podciągania kapilarnego wody z gruntu, ale również takimi czynnikami jak kondensacja pary wodnej wewnątrz przegród, deszcze, powodzie, czy też awarie instalacji sanitarnych. Odrębne, ważne zagadnienie stanowi także wilgoć technologiczna, wynikająca z samego procesu wznoszenia budynków. Jej występowanie nie jest możliwe do wyeliminowania i dlatego, szczególnie w początkowej fazie eksploatacji obiektu należy dbać o to, aby woda nagromadzona w przegrodach miała możliwość odparowania.

Nadmierne zawilgocenie przegród budowlanych przyczyn obniża parametry jakościowe obiektu zarówno w sensie konstrukcyjnym jak i higieniczno-sanitarnym.

Woda w murach prowadzi do zniszczenia struktury materiału budowlanego. Powodują to głównie wielokrotne procesy zamarzania i rozmarzania w okresie zimowym. Dodatkowo, woda powoduje rozkład drewna, przyspieszoną korozję stalowych elementów zbrojeniowych. Odrębną uciążliwością, bezpośrednio związaną z przepływem wody wewnątrz struktury przegród budowlanych jest transport oraz krystalizacja soli rozpuszczonych w przenoszonej wodzie. Zjawisko to, podobnie jak przemiany fazowe wody niszczy strukturę muru, powodując jego przyspieszoną degradację, w znaczącym stopniu utrudniając lub nawet uniemożliwiając prowadzenie skutecznych zabiegów renowacyjnych.

Istotnym problemem jest również to, że woda zawarta w przegrodach negatywnie oddziałuje na środowisko wewnętrzne pomieszczeń, tworząc podłoże do rozwoju szkodliwych mikroorganizmów oraz grzybów pleśniowych. W konsekwencji przyczynia się to do powstawania chorób dróg oddechowych, infekcji, alergii oraz podrażnień oczu i skóry użytkowników obiektów dotkniętych zjawiskiem zawilgocenia.

Powyżej przedstawione, negatywne skutki obecności wody w przegrodach budowlanych wymuszają na eksploatatorach konieczność podejmowania prób naprawczych istniejącego stanu rzeczy. Jedną z pierwszych czynności naprawczych jest zawsze oszacowanie skali zjawiska tj. ilościowe określenie zawartości wody w murze oraz określenie jej rozkładu w przegrodzie. Powyższe rozpoznanie umożliwia wykrycie przyczyny zjawiska oraz jego zasięgu, a w rezultacie ułatwia podjęcie decyzji odnośnie wyboru procedury naprawczej. Tradycyjną metodą pomiaru wilgotności murów jest metoda grawimetryczna zwana popularnie suszarko-wagową. Jest to metoda bezpośrednia i bardzo dokładna. Jednak ze względu na konieczność pobierania próbek i długi czas badania jest ona uciążliwa w stosowaniu, tym bardziej, że praktycznie nie jest możliwe przy jej wykorzystaniu określenie rozkładu wilgoci w przegrodzie. Metody pośrednie są z kolei mniej dokładne, jednak umożliwiają szybki pomiar wilgotności bez znacznej ingerencji w strukturę dotkniętych obiektów. Do najpowszechniej stosowanych obecnie technik wykrywania wody w murach zaliczamy metody elektryczne. Wśród nich najszerze uznanie znajdują metody rezystancyjne oraz pojemnościowe. Są one tanie i umożliwiają szybkie pomiary wilgotności w różnych punktach przegrody, tym samym mogą ułatwić wykrycie przyczyny zjawiska zawilgocenia. Ich wadą jest natomiast nadmierna czułość na koncentrację jonów soli, co w przypadku przegród o dużej jej zawartości może prowadzić do poważnych błędów pomiarowych. Wadą powyższą nie jest obarczona metoda TDR (ang. Time Domain Reflectometry). Technika ta od wielu lat stosowana była do pomiarów wilgotności ośrodków gruntowych i od pewnego czasu podejmowano próby jej zastosowania w odniesieniu do materiałów i przegród budowlanych. Inwazyjny charakter metody w większości przypadków uniemożliwiał jej praktyczne wykorzystanie lub był przyczyną wielu problemów technicznych. Dopiero zastąpienie tradycyjnych czujników stosowanych w dotychczasowych pomiarach sondami powierzchniowymi umożliwiło bezinwazyjne pomiary wilgotności materiałów budowlanych, a tym samym zwiększyło potencjał tej metody w badaniach na obiektach rzeczywistych.

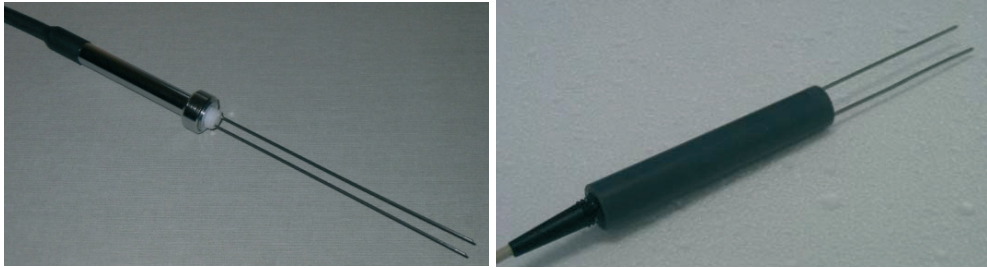
2. Opis techniki pomiarowej

Od ponad 30 lat technika pomiarowa TDR jest stosowana do wyznaczania wilgotności gruntów [1]. Jest ona stale rozwijana poprzez wprowadzenie ciągłych udoskonaleń sprzętu, elektroniki, oprogramowania oraz samych technik kalibracji czujników [2,3]. Istota jej działania polega na pomiarze czasu propagacji impulsu elektromagnetycznego wzdłuż falowodu jakim jest pręt pomiarowy umieszczony w mierzonym ośrodku, stąd bierze się jej nazwa – Time Domain Reflectometry – Reflektometria w Domenie Czasu. Zmierzony przez miernik TDR czas propagacji zależy od szybkości propagacji impulsu, a ta z kolei od właściwości elektrycznych otoczenia – przenikalności dielektrycznej ośrodka. Przenikalność dielektryczna zależy od udziałów poszczególnych faz tworzących badany ośrodek, przy czym dominującym czynnikiem jest tutaj woda, której przenikalność dielektryczna wynosi 80 i jest kilkadziesiąt razy większa od przenikalności fazy stałej oraz powietrznej. W związku z powyższym nawet jej niewielkie ilości w materiale zwiększają czas przelotu impulsu w czujniku otoczonym wilgotnym ośrodkiem. Dodatkowo należy tutaj podkreślić, że rozpuszczone jony soli w zakresie częstotliwości w którym operuje technika TDR (ok. 1GHz) nie wpływają na czas propagacji impulsu, mogą najwyżej obniżyć napięcie impulsu [4]. W związku z tym, że istotą techniki TDR jest pomiar czasu propagacji, można uznać, że w znacznym zakresie technika ta nie jest wrażliwa na zakłócenia wywołane nieokreśloną koncentracją jonów soli w materiale. W rzeczywistości obniżone napięcie impulsu może mieć pewien wpływ na większy rozrzut uzyskanych odczytów, a tym samym na zmniejszenie dokładności pomiaru. Należy jednak podkreślić, że nie ma to wpływu na podstawowy odczytywany parametr – przenikalność dielektryczną, a pośrednio na wilgotność. W celu przeliczenia odczytów z miernika TDR na wilgotność ośrodka stosuje się szereg formuł kalibracyjnych. Są to zarówno teoretyczne modele fizyczne jak i empiryczne formuły kalibracyjne uzyskane w wyniku badań eksperymentalnych.

Technika TDR dobrze sprawdziła się w pomiarach ośrodków gruntowych, ponieważ ich luźna struktura umożliwiała wygodne pomiary w warunkach terenowych. Podstawy fizyczne działania techniki TDR sugerowały, że można ją również wykorzystać do wyznaczania wilgotności materiałów i przegród budowlanych, jednak konstrukcje sond w praktyce uniemożliwiały to zadanie. Typowe sondy składają się bowiem z dwóch cienkich prętów pomiarowych o znacznej długości, przedstawiono je na Rys. 1. W związku z powyższym nie możliwe jest ich bezpośrednie wprowadzenie do struktury materiału, a wszelkie czynności przygotowawcze polegające na nawiercaniu, prowadzą do zmiany struktury materiału, a tym samym jego właściwości wodnych.

W literaturze światowej przedstawiono rezultaty badania na materiałach budowlanych z wykorzystaniem tradycyjnych czujników TDR [5]. Pewien wkład w ten zakres badań mają również autorzy niniejszego opracowania [6,7]. Opisane badania dotyczą jednak głównie miękkich materiałów budowlanych takich jak beton komórkowy i ukazują pomiary w ujęciu laboratoryjnym. Ponadto, jak to już wcześniej wspomniano, stosowane w tych przypadkach techniki przygotowania próbek (np. nawiercanie) z twardszych materiałów mogą zmienić ich strukturę, powodując tym samym zmianę ich właściwości wodnych w zasięgu czułości sondy. Wszystkie powyżej wymienione słabości techniki TDR w odniesieniu do materiałów budowlanych skłoniły do zbudowania czujników powierzchniowych umożli-

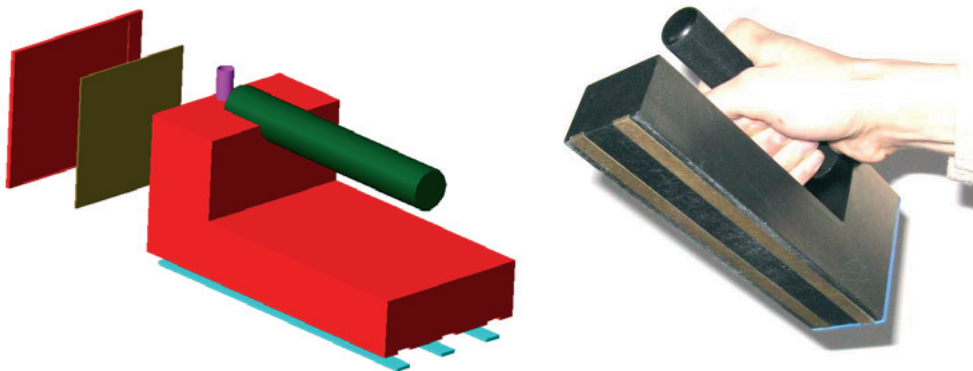
wiających pomiary techniką TDR również w terenie bez konieczności instalowania ich wewnątrz materiału.



Rys. 1. Klasyczna sonda TDR (Easy Test/ Lublin). Z lewej sonda do pomiarów laboratoryjnych (LP/ms), z prawej do pomiarów polowych (FP/mts), (źródło opracowanie własne).

Fig. 1. Classic TDR probe (Easy Test/ Lublin). From the left: the probe for laboratory measurements (LP/ms), from the right: the probe for *in-situ* measurements (FP/mts).

W celu prowadzenia badań terenowych przy wykorzystaniu pełnego potencjału techniki pomiarowej TDR, wykonano prototypowe egzemplarze sond TDR [8,9] różniące się od siebie konstrukcją – długością i rozstawem prętów pomiarowych, ilością prętów pomiarowych (sondy dwu- i trójprętowe), czy wreszcie kształtem pręta pomiarowego (kątownik, płaskownik) i użytym materiałem (pleksi, poliamid, ertacetal). W wyniku badań testowych i prac wykonawczych, okazało się, że najlepszym rozwiązaniem do badań twardych wilgotności materiałów budowlanych jest sonda powierzchniowa dwuprętowa o falowodach w kształcie płaskownika wykonana z ertacetalu. Połączenie pomiędzy przewodem koncentrycznym, a elementami pomiarowymi stanowi płytka drukowana z bardzo prostą elektroniką. Rys. 2 przedstawia budowę przykładowych sond powierzchniowych TDR wykorzystywanych w badaniach terenowych.



Rys. 2. Sonda powierzchniowa TDR. Z lewej model sondy trójprętowej. Z prawej prototyp sondy powierzchniowej dwuprętowej wykorzystanej w opisywanych badaniach terenowych, (źródło: opracowanie własne).

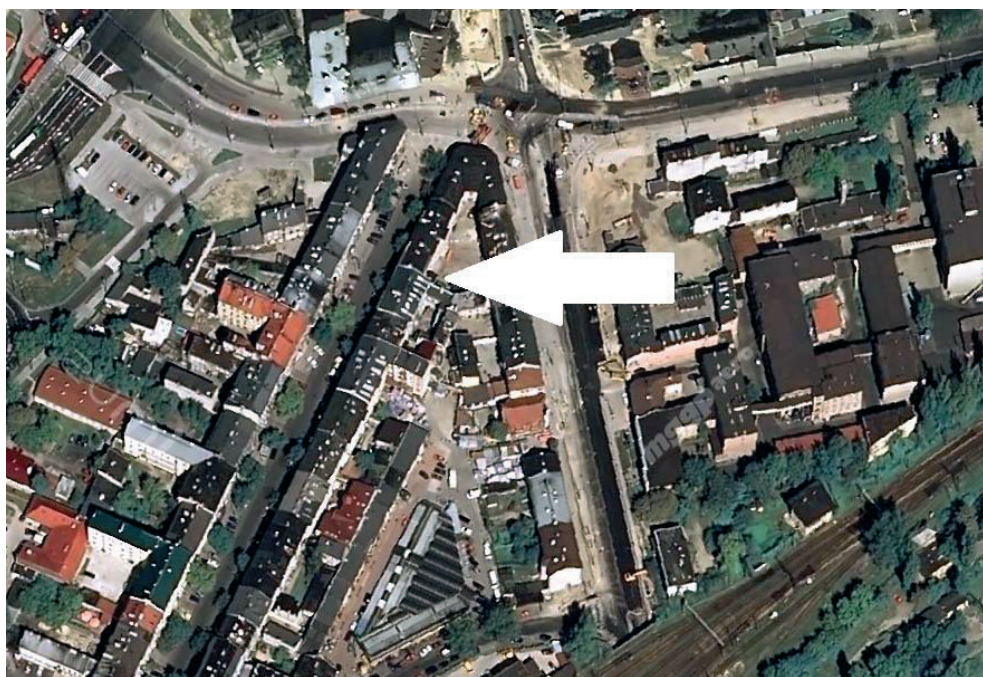
Fig. 2. The surface TDR probe. On the left: three-rod probe model. On the right: surface two-rod prototype probe used in the *in-situ* measurements.

Pomiary wilgotności przy wykorzystaniu czujników powierzchniowych w zasadzie nie różnią się od tradycyjnych. Również w tym przypadku mierzony jest

czas propagacji impulsu wzdłuż falowodu, który tutaj jednak nie jest całkowicie umieszczony w badanym ośrodku. Różnica sprowadza się do właściwej interpretacji sygnału na etapie obróbki uzyskanych odczytów. W przypadku sondy tradycyjnej cały pręt pomiarowy jest umieszczony w badanym materiale i odczyt z takiego czujnika pozwala na określenie rzeczywistej wartości przenikalności dielektrycznej ośrodka. W przypadku sondy powierzchniowej można odczytać natomiast efektywną przenikalność dielektryczną bardziej skomplikowanego ośrodka, na którą zawierają się przenikalności badanego materiału (wartość poszukiwana) i ertacetalu (wartość stała równa 3,8). W celu określenia wilgotności materiału należy rozdzielić wymienione powyżej wartości wpływające na efektywną przenikalność dielektryczną ośrodka. Najprostszą i zarazem najbardziej dokładną metodą jest tutaj kalibracja empiryczna, polegająca na korelowaniu odczytów TDR z wilgotnością wyznaczoną metodą suszarko-wagową.

3. Metodyka

Do pomiarów wybrano budynek dotknięty zjawiskiem podciągania kapilarnego. Jest to obiekt zlokalizowany w Lublinie, przy ul. Pierwszego Maja 20 (Rys. 3).



Rys. 3. Lokalizacja badanego obiektu, (źródło: www.zumi.pl, 2011).

Fig. 3. Location of the test object (source: www.zumi.pl, 2011).

Badany obiekt pochodzi z początków XX wieku. Ostony zewnętrzne wzniesiono z cegły ceramicznej pełnej na zaprawie wapiennej. Charakteryzują się one brakiem izolacji termicznej oraz brakiem zabezpieczenia przed zjawiskami podciągania kapilarnego i wpływem wód opadowych. W związku z powyższym na przegrodach widoczna jest korozja biologiczna, odpadanie tynku, kruszenie muru (Rys. 4).



Rys. 4. Powierzchnia zewnętrzna omawianej przegrody (prostokątem oznaczono badany obszar) z wyraźnymi oznakami zniszczenia i korozji biologicznej wywołanymi podciąganiem kapilarnym, (źródło: opracowanie własne).

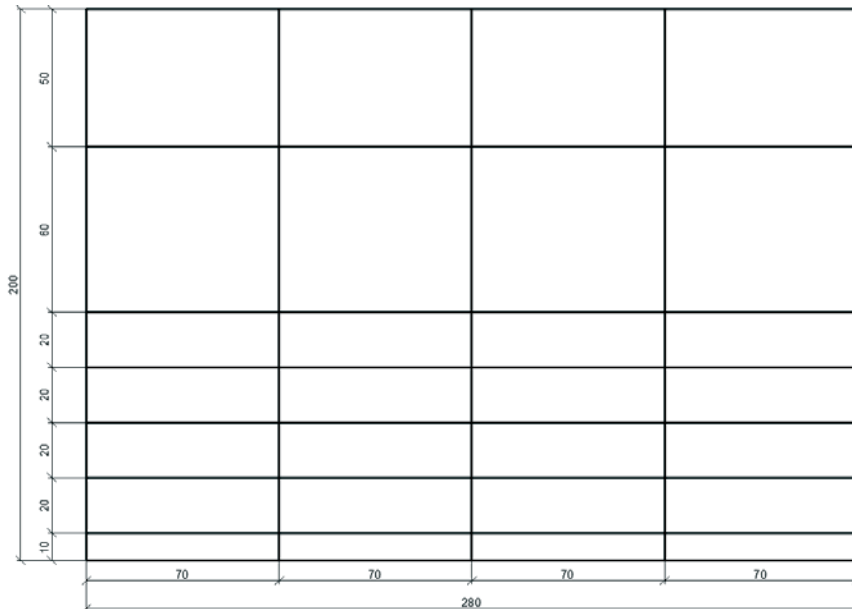
Fig. 4. The outer surface of the presented partition (the test area is marked by the rectangular) with clear signs of destruction and biological corrosion caused by capillary rise.

W celu wyznaczenia wilgotności w poszczególnych punktach badanej przegrody i określenia rozkładu wilgoci w przegrodzie, wydzielono siatkę pomiarową (Rys. 5) składającą się z 7 poziomów i 4 pionowych kolumn. Szerokość kolumn była stała i wynosiła 70 cm, zaś wysokość zależała od widocznego zawilgocenia i wynosiła 10 cm w najniższych warstwach, 20 cm w warstwach pośrednich oraz ok. 50 cm w najwyższych warstwach, gdzie wartość wilgotności była mniejsza. Całkowita powierzchnia pomiarowa wynosiła 5,6 m² (2,8 m szerokość, 2,0 m wysokość). Odczytów wilgotności dokonywano w centralnych punktach każdego prostokąta siatki pomiarowej.

Badania wykonano w słoneczny dzień w okresie letnim 2010 roku. Zestaw pomiarowy wykorzystany do badań składał się z następujących elementów:

- miernik przenośny TDR – FOM (Field Operated Multimeter – Easy Test/Lublin),
- komputer przenośny jako stacja sterująca (komunikacja z FOM przez port RS-232 przez przelotkę USB),
- kabel koncentryczny łączący sondę z miernikiem,
- sonda powierzchniowa TDR (Rys. 2).

Do sterowania miernikiem i odczytem danych zastosowano samodzielnie opracowaną aplikację do pomiarów reflektometrycznych z wykorzystaniem sond powierzchniowych TDR Reflectometer v.1.0.



Rys. 5. Siatka pomiarowa.

Fig. 5. Measurement grid.

4. Dyskusja wyników

Zadaniem programu TDR Reflectometer v.1.0 było zarówno sterowanie miernikiem TDR – FOM, lecz również odczyty i czasów propagacji impulsu w prętach sondy powierzchniowej. Jednorazowo dokonywane były trzy pomiary, a ostateczny wynik był uśredniany i przeliczany na wilgotność objętościową [%_{vol}] na podstawie poniższej formuły:

$$\theta = -6,6 \cdot 10^{-9} \cdot t_{TDR}^3 + 6,1 \cdot 10^{-5} \cdot t_{TDR}^2 - 0,16 \cdot t_{TDR} + 130 \quad (1)$$

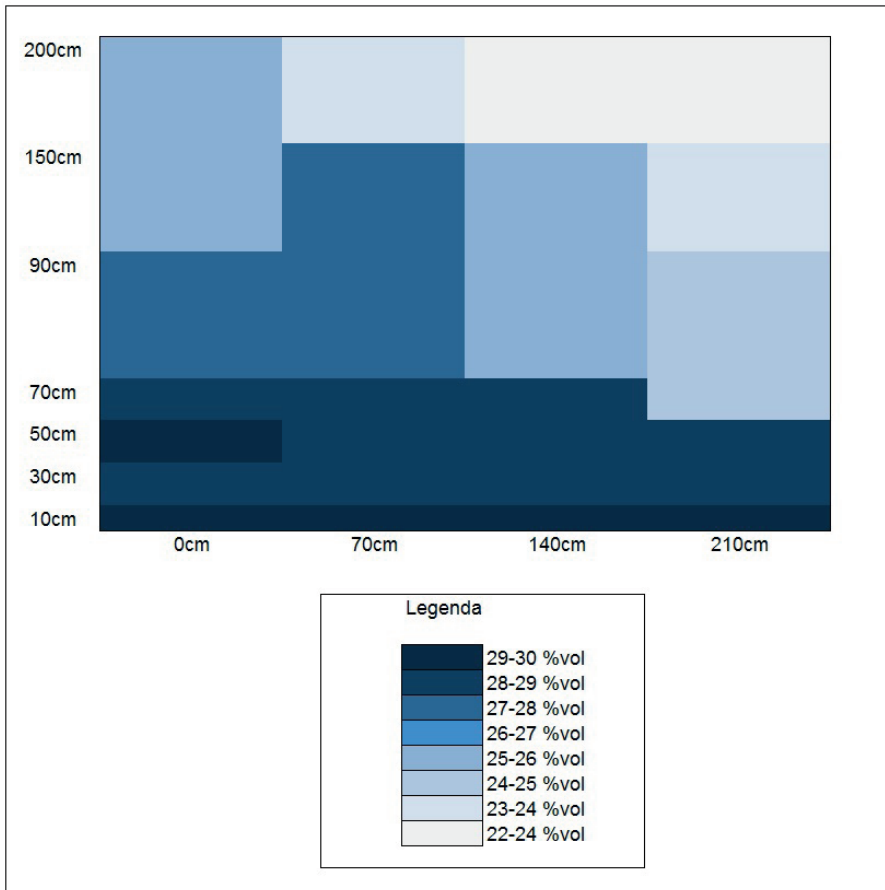
gdzie: θ – wilgotność objętościowa badanego materiału, %_{vol}, t_{TDR} – czas przelotu impulsu elektromagnetycznego wzdłuż falowodu pomiarowego, ps.

Powyższa formuła empiryczna została wyprowadzona za pomocą badań kalibracyjnych dla cegły ceramicznej pełnej przed rozpoczęciem właściwych badań terenowych. Uzmiennia ona wilgotność badanego materiału budowlanego od czasu przelotu impulsu w falowodach konkretnego modelu sondy.

Czas przelotu rejestrowany przez miernik jest ustalany na podstawie analizy odpowiedzi z czujnika TDR i jest przeliczany automatycznie na wilgotność przez wspomnianą wcześniej aplikację TDR Reflectometer v.1.0 do obsługi sond TDR. Dodatkowo w programie zaimplementowano bazę charakterystyk kalibracyjnych do wyznaczania wilgotności mierzonych materiałów uzyskanych w drodze badań laboratoryjnych. W związku z powyższym program jednocześnie może podawać odczyty czasów przelotu impulsu przez sondę, efektywne przenikalności dielektryczne jak i właściwe odczyty wilgotności. Podgląd przelotu impulsu przez sondę w postaci tzw. reflektogramu jest przydatny celem wychwycenia ewentualnych problemów pomiarowych (nieprzewidzianych odbić impulsu, zakłóceń), które

mogłyby spowodować niewłaściwą interpretację sygnału przez aplikację tym samym zafałszować wynik.

W rezultacie przeprowadzonych badań uzyskano tzw. mapę wilgotności objętościowej muru dotkniętego zjawiskiem podciągania kapilarnego.



Rys. 6. Mapa wilgotności.

Fig. 6. Map of moisture.

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że badany obiekt dotknięty jest zjawiskiem podciągania kapilarnego. Już wizualna ocena obiektu pozwala na określenie przyczyny problemu – odpadające powłoki tynku oraz korozja biologiczna świadczą o powyższym zagrożeniu. Przeprowadzone pomiary pozwoliły na ilościową ocenę zagrożenia i potwierdziły, iż w dolnych partiach przegrody, najbardziej narażonych na obecność wód gruntowych wilgotność objętościowa jest zbliżona do 30%_{vol}, co jest stanem zbliżonym do całkowitego nasycenia większości cegieł ceramicznych pełnych. W wyższych partiach przegrody odczytano również duże stany wilgotności, jednak nie przekraczały one 20%_{vol}. Biorąc pod uwagę fakt, że badania prowadzono w okresie bez opadów deszczu należy uznać, że główną przyczyną powyższego zjawiska jest podciąganie kapilarne wód gruntowych wynikające z niewłaściwego wykonania lub braku izolacji wodochronnych.

5. Wnioski

Zastosowanie powierzchniowych sond TDR w znacznym stopniu rozszerza możliwości pomiarowe tej techniki umożliwiając prowadzenie pomiarów w terenie. Przy wykorzystaniu tradycyjnych czujników było to bardzo trudne do wykonania i w zasadzie wykluczało tą technikę w dziedzinie pomiarów wilgotności materiałów budowlanych charakteryzujących się dużą twardością. Zastosowanie sond powierzchniowych wyeliminowało konieczność wprowadzania stalowych prętów pomiarowych w strukturę badanego materiału i pozwoliło na pomiary bezinwazyjne.

Rozdzielczość metody TDR przy wykorzystaniu sond powierzchniowych waha się w przedziale od 0,3%vol do 0,6%vol w zależności od typu użytej sondy i zależy od długości czujnika. Jest to wartość pozwalająca na precyzyjne odczyty wilgotności objętościowej materiału.

Do minusów metody należy zaliczyć duży rozrzut uzyskanych wyników w trakcie prowadzonych badań terenowych. Wynika on z konieczności precyzyjnego dociśnięcia sondy do lica przegrody, co w przypadku murów jest trudne do uzyskania.

Technika pomiarowa TDR dzięki zastosowaniu czujników powierzchniowych wkroczyła na obszar badawczy dotychczas dla niej trudno dostępny i biorąc pod uwagę ciągły spadek cen elektroniki należy się spodziewać, że może stanowić dobrą alternatywę dla innych obecnie stosowanych metod detekcji wilgoci w materiałach i przegrodach budowlanych.

Informacja

Praca powstała w ramach realizacji umowy między rządem RP, a rządem Republiki Czeskiej o współpracy w dziedzinie nauki i techniki, nr 8501/2010.

Literatura

- [1] Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P., *Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines*, Water Resour. Res., 16 (1980) 574-582.
- [2] De Loor G.P., *Dielectric properties of heterogeneous mixtures containing water*, J. Microwave Power, 3(2) (1968) 67-73.
- [3] Malicki M.A., Plagge R., Roth C.H., *Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil*, Eur. J. Soil Sci., 47(3) (1996) 357-366.
- [4] Sobczuk H., Plagge R., *Time domain reflectometry method in environmental measurements*, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska, PAN, vol. 39, 2007, ISBN:83-89293-51-X.
- [5] Hansen E.J., Hansen M.H., *TDR measurement of moisture content in aerated concrete*, Building Physics, 6-th Nordic Symposium, 381-388, 2002.
- [6] Sobczuk H., Suchorab Z., *Calibration of TDR instruments for moisture measurement of aerated concrete. Monitoring and modelling the properties of soil as porous medium*, Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Lublin, 156-165, 2005.
- [7] Suchorab Z., Sobczuk H., Łagód G., Pavlik Z., Cerny R., *Zastosowanie metody TDR do pomiaru wilgotności materiałów budowlanych*, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, 33 (2005) 1063-1070.

- [8] Suchorab Z., Barnat-Hunek D., Sobczuk H., *Zastosowanie powierzchniowej sondy TDR do bezinwazyjnych pomiarów wilgotności materiałów budowlanych*, Materiały Budowlane, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, 65-74, 2009.
- [9] Suchorab Z., Sobczuk H., Cerny R., Pavlik Z., Plagge R., *Noninvasive moisture measurement of building materials using TDR method*, Proceedings of the 8th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (ISEMA 2009) June 1-5, Espoo, Finland, 147-155, 2009.

Application of the TDR measuring technique for *in-situ* measurements using surface probes

Zbigniew Suchorab¹, Zbyšek Pavlík², Robert Černý³

¹ Lublin University of Technology, Faculty of Environmental Engineering,
e-mail: Z.Suchorab@wis.pol.lublin.pl

² Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering,
e-mail: pavlikz@fsv.cvut.cz

³ Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering,
e-mail: cernyr@fsv.cvut.cz

Abstract: The article presents the possibility of *in-situ* measurements of building barriers moisture using the TDR technique (Time Domain Reflectometry). To minimize the previous disadvantages of the described method – invasive character, several prototypes of the surface probes were manufactured. With such a sensor solution it was possible to conduct the non-invasive measurements using the full TDR method potential – quick measurements and no sensitivity of salinity influence. The measurements were conducted on the brickworks made of red ceramic brick at the old building located on 1st of May Street in Lublin.

Keywords: moisture measurements, surface TDR probe, reflectometric technique.