

INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW

Zakład Diagnostyki Nawierzchni

SPRAWOZDANIE

z realizacji pracy pt.:

**„Ocena wpływu zagęszczenia warstwy asfaltowej na
uzyskiwane wartości stałej dielektrycznej”.**

SPRAWOZDNIĘ CZĘŚCIOWE

Etap I – zadanie 1

Zlecniodawca: Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad

Umowa nr 3102/2011 z dnia 18.11.2011 roku

Opracowali:

mgr inż. Jacek SUDYKA

Kierownik Zakładu

Diagnostyki Nawierzchni



mgr inż. Tomasz MECHOWSKI

Warszawa, listopad 2011

Spis treści

1	Wstęp.....	4
2	Teoretyczna analiza możliwości wykorzystania obliczonych wartości stałej dielektrycznej w ocenie jednorodności zagęszczenia warstwy asfaltowej	6
2.1	Cechy elektryczne ośrodka.....	6
2.2	Propagacja fal elektromagnetycznych	10
2.3	Teoretyczna zależność między stałą dielektryczną a zagęszczeniem.....	13
3	Podsumowanie.....	14
	Bibliografia.....	16

Spis ilustracji

Rysunek 2.1 Rodzaje polaryzacji: (a) elektryczna, (b) jonowa, (c) molekularna i (d) międzyfazowa (Scaffer, i inni, 1995).....	8
Rysunek 2.2 Mechanizmy rozpraszania fali: (a) odbicie kierunkowe, (b) refrakcja (załamanie), (c) dyfrakcja, (d) rezonans.....	11
Rysunek 2.3 Odbicie i przenikanie fali: (a) TE i (b) TM.....	12
Rysunek 2.4 Korelacja wyników uzyskanych z badań laboratoryjnych (oś x) oraz pomiarami GPR (oś y) (Saarenketo, 2000).....	13
Rysunek 2.5 Pomiar radarowy zawartości wolnych przestrzeni na odcinku testowym. Widoczne piki pochodzą od umieszczonych w nawierzchni czujników metalowych (Saarenketo, 2000).....	14
Rysunek 2.6 Zależność między zmianami wartości stałej dielektrycznej (oś x) a zawartością wolnych przestrzeni (oś y) (Sebesta, i inni, 2002)	14

Spis tabel

Tabela 2.1 Typowe wartości stałej dielektrycznej, przewodności, prędkość fali i tłumienia wybranych materiałów geologicznych (Moorman, 2001)(Morey, 1998)	9
---	---

1 Wstęp

Dobór materiałów, projektowanie składu, produkcja i wbudowanie mieszanek mineralno-asfaltowych jest procesem bardzo złożonym i skomplikowanym. O końcowym sukcesie, czyli uzyskaniu nawierzchni spełniającej postawione wymagania techniczne, trwałej, bezpiecznej i komfortowej dla użytkownika decyduje każdy element tego procesu. Jednym z najważniejszych parametrów wykonanej nawierzchni, który ma wpływ na jej trwałość, odporność na uszkodzenia, bezpieczeństwo i walory eksploatacyjne jest zagęszczenie warstwy.

Niedogęszczenie nawierzchni skutkuje mniejszą odpornością na działanie wody i mrozu, na skutek możliwości penetracji i zalegania wody w nawierzchni oraz mniejszej wytrzymałości na rozciąganie w niskich temperaturach. Zbyt niski wskaźnik zagęszczenia to również ryzyko powstania trwałych deformacji plastycznych w warstwach asfaltowych, tzw. kolein. W takim przypadku oprócz mniejszej odporności na siły ścinające powodujące powstawanie kolein również może zająć zjawisko dogęszczenia nawierzchni pod ruchem pojazdów.

Zagęszczenie nawierzchni ma również duży wpływ na jej trwałość zmęczeniową. Zwiększenie zawartości wolnych przestrzeni powoduje znaczne obniżenie trwałości zmęczeniowej. Przy zawartości wolnych przestrzeni większej o 1% v/v, trwałość zmęczeniowa w zależności od mieszanki i konstrukcji może zmniejszyć się o kilkadziesiąt lub nawet kilkaset tysięcy osi obliczeniowych, co w praktyce skraca okres trwałości o nawet kilka lat. Bardzo ważnym czynnikiem, który praktycznie jest bardzo trudny do sprawdzenia w konwencjonalny sposób jest jednorodność zagęszczenia. Lokalne występowanie miejsc o mniejszym zagęszczeniu potencjalnie może powodować powstanie lokalnych uszkodzeń (spękań, deformacji), które obniżają komfort jazdy i zagrażają bezpieczeństwu użytkowników.

Badanie zagęszczenia jest badaniem kontrolnym, które wykonywane jest poprzez odniesienie gęstości objętościowej próbki odwierconej z danej warstwy do gęstości objętościowej wyprodukowanej mieszanki mineralno-asfaltowej. Miarą zagęszczenia jest wskaźnik zagęszczenia. Oprócz badań odwiertów znane są jeszcze inne metody do oceny zagęszczenia, jak np. metody nieniszczące NDT (Non-Destructive Testing) z użyciem nuklearnego miernika gęstości (Burati, i inni, 1987) czy metoda energii rozproszonej - stosunkowo nowa metoda polegająca na pomiarze elektrycznej oporności pozornej nawierzchni i odniesieniu jej do gęstości (Apkarian, i inni, 1997). Pierwsza z wymienionych metod dostarcza wprawdzie dane o gęstości, ale jej stosowanie związane jest z kilkoma utrudnieniami: specjalne pozwolenia i zasady przechowywania materiałów radioaktywnych, właściwa kalibracja i odpowiednio długi kontakt z nawierzchnią. Metoda energii rozproszonej jest stosunkowo nowa i wymaga udoskonaleń.

Szybki rozwój technologii cyfrowych pozwala na wdrożenie innej, nieniszczącej metody pomiarowej. Technika radarowa GPR (Ground Penetrating Radar) daje możliwości identyfikacji uszkodzeń powierzchniowych takich jak rozwarstwienia, ubytki powierzchniowe, spękania, jednorodność zagęszczenia i stopień zawilgocenia. Rezultaty

wdrożeniowych badań w ocenie tego rodzaju uszkodzeń przedstawiono między innymi przez (Saarenketo, i inni, 2000), (Sculion, i inni, 1995), (Sculion, 2006), (Colagrande, i inni, 2009) i (Benedetto, i inni, 2009). Jak podają autorzy tych prac wyniki przeprowadzonych badań należy traktować jako wstępne, a sama metodyka pomiaru i oceny wymaga ciągłego rozwoju.

W literaturze fachowej (pochodzącej głównie z USA) podawane są zależności między wynikami pomiaru radarowego, a danymi z badań laboratoryjnych zagęszczenia nawierzchni. Próby oceny zależności stałej dielektrycznej od temperatury nawierzchni podejmowane były jedynie w Stanach Zjednoczonych, ostatnio między innymi w ramach programu SHRP2. Przedstawiane wyniki są jednak bardzo zawężone, bazujące na danych opisujących specyfikę nawierzchni rzadko spotykanych w Europie. Są one też podawane z dużym uproszczeniem, co jest wynikiem ograniczonego zakresu badań podejmowanych do tej pory. Tymczasem możliwe jest opisanie w/w zależności funkcjami ściślejszymi, dającymi dokładniejsze wyniki obliczeń. Dokonać tego można poprzez zastosowanie zestawu anten o częstotliwościach 1-2 GHz oraz wykonanie badań na reprezentatywnej, licznej próbie, obejmującej nawierzchnie o różnych parametrach powierzchniowych. Ważne jest też aby w badaniach uwzględnić zmienne warunki zewnętrzne oraz ich wpływ na uzyskiwane wyniki badań.

Celem pracy jest opracowanie zależności pomiędzy laboratoryjnymi metodami oceny zagęszczenia nawierzchni, a pomiarami nieinwazyjnymi wykonywanymi w warunkach terenowych. Połączenie technik pomiarowych takich jak pomiar prędkości rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w przypowierzchniowej warstwie nawierzchni, pomiar promieniowania podczerwonego nawierzchni oraz ich "kalibracja" względem wyników otrzymywanych metodami klasycznymi pozwoli na oszacowanie jednorodności całej powierzchni nawierzchni, a nie tylko losowo wybranych punktów. Analiza tych parametrów pozwoli wnioskować co do jakości cech powierzchniowych nawierzchni decydujących o jej trwałości. Ustalenie zależności pomiędzy tymi parametrami pozwoli na szybką i skuteczną ocenę jednorodności zagęszczenia wierzchnich warstw asfaltowych. Przygotowaną w ramach niniejszej pracy metodykę pomiarową będzie można wykorzystać w badaniach odbiorczych nowych warstw asfaltowych. Uzyskane rezultaty badań posłużą wszystkim administratorom dróg w ocenie jakości wbudowywanych warstw asfaltowych na remontowanych lub nowo wykonywanych odcinkach.

2 Teoretyczna analiza możliwości wykorzystania obliczonych wartości stałej dielektrycznej w ocenie jednorodności zagęszczenia warstwy asfaltowej

2.1 Cechy elektryczne ośrodka

Cechy elektryczne ośrodka są charakteryzowane przez przenikalność elektryczną ε , podatność magnetyczną μ i przewodność (konduktywność) σ . Wielkości te mogą być tensorami zależnymi od kierunku w przestrzeni, a także posiadać wartości zespolone ze względu na różne mechanizmy strat. Na potrzeby techniki radarowej można przyjąć, że są to wielkości skalarne, które są współczynnikami w tzw. równaniach materiałowych:

$$\vec{D} = \varepsilon * \vec{E} \quad (2.1)$$

$$\vec{B} = \mu * \vec{H} \quad (2.2)$$

$$\vec{J} = \sigma * \vec{E} \quad (2.3)$$

gdzie:

$\vec{D}$ - wektor indukcji elektrycznej,

$\vec{E}$ - wektor natężenia pola elektromagnetycznego,

$\vec{B}$ - wektor indukcji magnetycznej,

$\vec{H}$ - wektor natężenia pola magnetycznego,

$\vec{J}$ - gęstość prądu elektrycznego,

ε - przenikalność elektryczna,

μ - podatność magnetyczna,

σ - przewodność.

Dla ośrodka określa się również względną przenikalność elektryczną ε_r i względną podatność magnetyczną μ_r :

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (2.4)$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.5)$$

gdzie:

$\varepsilon = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r''$ - przenikalność elektryczna

ε_0 - przenikalność elektryczna próżni ($8,854187817 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}^1$)

ε_r' - część rzeczywista (definiuje właściwości ośrodka),

¹ Według International Council for Science: Committee on Data for Science and Technology, <http://www.codata.org/>

ε_r'' - część urojona (odpowiada za straty w ośrodku),

μ_0 - podatność magnetyczna próżni ($1.26 \cdot 10^{-6}$ H/m).

Najważniejszą właściwością elektryczną wpływającą na wyniki badań techniką radarową jest przenikalność elektryczna i związana z nią prędkość fali w ośrodku. Jest też ważna ze względu na precyzyjne określenie sposobu obliczenia poprawnej głębokości obiektu. Względna przenikalność elektryczna (nazywana również stałą dielektryczną) jest liczbą zespoloną i wyraża zgodnie z wzorem 2.4 stosunek przenikalności elektrycznej do przenikalności elektrycznej w próżni.

Podatność magnetyczna gruntu lub materiałów występujących w warstwach nawierzchni drogowych uważa się za równą podatności w próżni ($\mu_r = 1$) i dlatego nie ma ona wpływu na propagację fali w tego rodzaju ośrodkach. Tym nie mniej znane są badania, między innymi (Olhoeft, i inni, 1994), dowodzące przypadki, w których podatność magnetyczna wpływa na elektryczne właściwości gruntów.

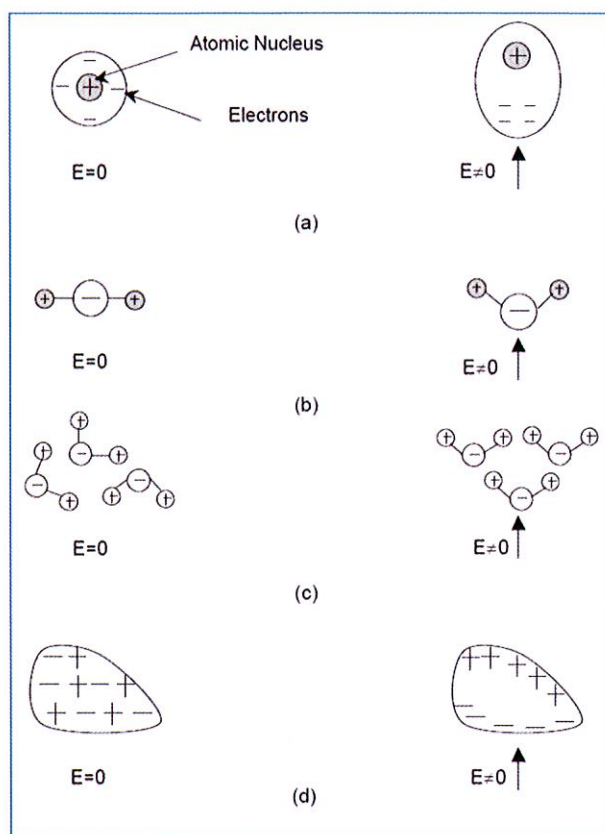
Przewodność elektryczna w ośrodkach takich jak grunty powoduje ruch nośników ładunków z wolnym lub ograniczonym przemieszczeniem, które może być powodowane przez różne zjawiska. Większość jonowo lub kowalencyjnie² związanych skał formujących minerały, takich jak kwarc lub mika, nie są przewodnikami. W momencie zetknięcia z wodą tworzą się na ich powierzchni elektrolity zdolne do przewodzenia prądu elektrycznego poprzez ruch wolnych jonów, generowany przez pole elektryczne. Ruch jonów jest proporcjonalny do wielkości pola elektrycznego i zależy od temperatury, koncentracji jonów i ich wielkości. Przewodność elektryczna ośrodka wpływa na tłumienie fali elektromagnetycznej i w pewnym zakresie na jej odbicie.

Polaryzacja jest to zjawisko nierównomiernego rozkładu cząstek ładunku elektrycznego na atomach połączonych wiązaniem chemicznym. W materiałach znajdujących się w polu elektrycznym mamy do czynienia z tzw. polaryzacją wymuszoną. Ma ona miejsce w sytuacji gdy na cząsteczkę działa silne pole elektryczne i cząsteczka znajduje się w otoczeniu innych silnie polarnych cząsteczek lub wiązanie zostało wzbudzone promieniowaniem elektromagnetycznym, którego działanie nie spowodowało jego rozerwania. Istnieją cztery różne mechanizmy polaryzacji, które przedstawiono na Rysunku 2.1.

Dla ośrodków takich jak skały definiuje się również oporność właściwą jako odwrotność przewodności:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} [\Omega \cdot m] \quad (2.6)$$

² Wiązanie kowalencyjne to rodzaj wiązania chemicznego, którego istotą jest istnienie pary elektronów, współdzielonych w porównywalnym stopniu przez oba atomy tworzące to wiązanie.



Rysunek 2.1 Rodzaje polaryzacji: (a) elektryczna, (b) jonowa, (c) molekularna i (d) międzyfazowa (Scaffer, i inni, 1995)

Parametry, które należy dodatkowo zdefiniować to impedancja falowa ośrodka, określana jako stosunek składowych wektorów pól elektrycznego i magnetycznego prostopadłych do siebie i do kierunku propagacji fali oraz stratność ośrodka, definiowana jako stosunek prądu przewodzenia związanego z ruchem ładunków do prądu przesunięcia związanego ze zmianą indukcji w czasie (Morawski, i inni, 1985). Na podstawie analizy tych parametrów przeprowadzonej przez (Karczewski, 2007) można określić dwie, istotnie z punktu widzenia zastosowania techniki radarowej w drogownictwie, cechy tj. współczynnik tłumienia fali oraz impedancja ośrodka małostratnego (takiego jak np. piaski, żwiry). Współczynnik tłumienia fali jest wprost proporcjonalny do przewodności i przyjmuje w przybliżeniu postać:

$$\alpha = \frac{1,69 \cdot 10^3 \cdot \sigma}{\sqrt{\epsilon_r}} [dB/m] \quad (2.7)$$

natomiast impedancja ośrodka małostratnego zależy jedynie od stałej dielektrycznej ośrodka i przyjmuje uproszczoną postać:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (2.8)$$

Tłumienie fali elektromagnetycznej jest zjawiskiem istotnym dla zakresu penetracji głębokościowej metody radarowej. Im większe tłumienie tym mniejsza głębokość pomiaru i odwrotnie, mniejsze tłumienie ośrodka pozwala uzyskać lepszą penetrację. Jak

podaje między innymi (A-CUBED, 1983) największy wpływ na tłumienie mają przewodność i stała dielektryczna ośrodka, które z kolei zależą od jego składu mineralnego, porowatości, wilgotności, składu chemicznego, temperatury i częstotliwości fali emitowanej w głąb ośrodka. W Tabeli 2.1 przedstawiono typowe wartości stałych dielektrycznych, przewodności, prędkości fali i współczynników tłumienia wybranych materiałów.

Tabela 2.1 Typowe wartości stałej dielektrycznej, przewodności, prędkość fali i tłumienia wybranych materiałów geologicznych (Moorman, 2001)(Morey, 1998)

ośrodek	stała dielektryczna ϵ_r	przewodność σ [mS/m]	prędkość fali v [cm/ns]	tłumienie α [dB/m]
powietrze	1	0	30	0
woda destylowana	80	0,01	3,3	0,002
słodka woda	80	0,5	3,3	0,1
słona woda	80	30000	1	1000
lód	3-4	0,01	16	0,01
suchy piasek	3-5	0,01	15	0,01
piasek nasycony wodą	20-30	0,1-1	6	0,03-0,3
gлина	5-40	2-1000	6	1-300
wapień	4-8	0,5-2	12	0,4-1,0
muł	5-30	1-100	7	1-100
asfalt	2,5-3,5	0,5-1,5	16-19	0,05-0,5
beton	3-9	1-3	10-17	0,5-1,5
granit	4-6	0,01-1	13	0,1-1
łupki	5-15	1-100	9	1-100

Bardzo ważnym parametrem jest prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w ośrodku małoprotnym. Dzięki zdefiniowaniu tego parametru możliwe jest określenie prędkości fali w ośrodku przy znanej stałej dielektrycznej ośrodka. Korzystając z definicji prędkości fazowej:

$$v_f = \frac{\omega}{k} = \frac{\omega}{\beta} (\sigma \ll \omega \cdot \epsilon) \quad (2.9)$$

gdzie:

ω - częstotliwość kątowna (pulsacja), k - liczba falowa, β - współczynnik fazy,

i zależności prędkości fali elektromagnetycznej w próżni c :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad (2.10)$$

otrzymujemy następujący wzór:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.11)$$

gdzie:

$$\mu_r = 1.$$

2.2 Propagacja fal elektromagnetycznych

Propagację fal elektromagnetycznych w dowolnym ośrodku opisują prawa opracowane przez szkockiego fizyka Jamesa Clarka Maxwella (Rysunek 2.2).

Prawa te ujęte zostały w czterech podstawowych równaniach elektromagnetyzmu, opisujących własności pola elektrycznego i magnetycznego oraz zależności między tymi polami. Z równań tych wynika m.in. istnienie fal elektromagnetycznych, których powstawanie jakościowo można wyjaśnić następująco (Rysunek 2.3): jeżeli w pewnym obszarze przestrzeni istnieje zmienne w czasie pole elektryczne $E(r,t)$, powoduje ono, zgodnie z II równaniem Maxwella, powstanie w tym obszarze wirowego pola magnetycznego $H(r,t)$, na ogół również zmiennego w czasie. Zmienne pole magnetyczne $H(r,t)$ wytwarza z kolei zmienne pole elektryczne $E(r,t)$, zgodnie z I równaniem Maxwella, itd. W ten sposób w przestrzeni rozchodzi się fala elektromagnetyczna.

Poniżej przedstawiono układ równań Maxwella przy pewnych założeniach dotyczących ośrodka geologicznego, a mianowicie: ośrodek jest nieograniczony, linowy, izotropowy, jednorodny, stratny i nie ma w nim ładunków i prądów. Przy takich założeniach układ równań przedstawiał się będzie następująco (Karczewski, 2007):

$$\Delta \cdot \vec{E} = 0 \quad (2.12)$$

$$\Delta \cdot \vec{H} = 0 \quad (2.13)$$

$$\Delta \times \vec{E} = -\mu \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2.14)$$

$$\Delta \times \vec{H} = \sigma \cdot \vec{E} + \epsilon \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.15)$$

gdzie:

$\Delta \cdot \vec{E}$ - dywergencja wektora $\vec{E}$,

$\Delta \times \vec{E}$ - przenikalność magnetyczna próżni.

Dla potrzeb techniki radarowej istotne jest rozwiązanie tego układu równań w postaci fali płaskiej. Możliwe jest poszukiwanie takiego „uproszczonego” rozwiązania ponieważ falę emitowaną przez antenę można traktować w przybliżeniu jako falę płaską jeżeli odległość od źródła fali wielokrotnie przekracza długość fali. Jak podaje (Karczewski, 2007) w takim przypadku rozwiązaniem jest para wektorów w następującej postaci:

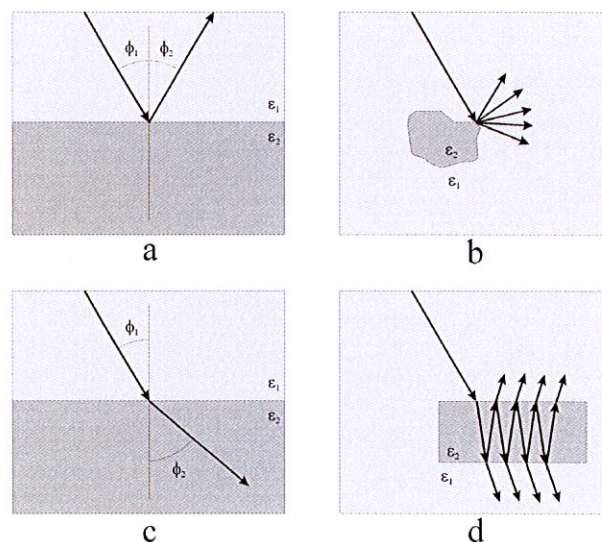
$$\vec{H} = \frac{k}{i \cdot \omega \cdot \mu} \cdot \hat{k} \times \vec{E} \quad (2.16)$$

$$\vec{E} = \frac{k}{\sigma - i \cdot \omega \cdot \varepsilon} \cdot \hat{k} \times \vec{H} \quad (2.17)$$

gdzie:

$\vec{k} = k \cdot \hat{k}$ - wektor propagacji.

Fale elektromagnetyczne rozchodzące się w ośrodkach o zmiennych właściwościach elektrycznych mogą ulegać odbiciu, refrakcji, dyfrakcji i rezonansowi (Rysunek 2.4) (Daniels, 2000). Zjawiska te wpływają zarówno pozytywnie jak i negatywnie na jakość uzyskiwanych wyników.



Rysunek 2.2 Mechanizmy rozpraszania fali: (a) odbicie kierunkowe, (b) refrakcja (załamanie), (c) dyfrakcja, (d) rezonans

W technice radarowej najbardziej istotnym jest przypadek odbicia i refrakcji (załamania) fali na granicy dwóch materiałów o różnych właściwościach. Przypadek taki przedstawiono na Rysunku 2.5. Płaszczyznę padania fali elektromagnetycznej (EM) tworzy normalna do powierzchni płaskiej i fala padająca. Poprzeczna fala elektryczna (TE), nazywana falą o polaryzacji prostopadłej, reprezentuje falę, której wektor pola elektrycznego skierowany jest prostopadle do płaszczyzny padania, natomiast wektor pola elektrycznego poprzecznej fali magnetycznej (TM) skierowany jest równolegle do płaszczyzny padania i nosi nazwę fali o polaryzacji równoległej. Spełniając warunki brzegowe równania Maxwella na powierzchni padania można wyznaczyć współczynnik odbicia fali padającej:

współczynnik odbicia fali TE

$$\gamma_{\perp} = \frac{Z_2 \cos \theta_i - Z_1 \cos \theta_t}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t} \quad (2.18)$$

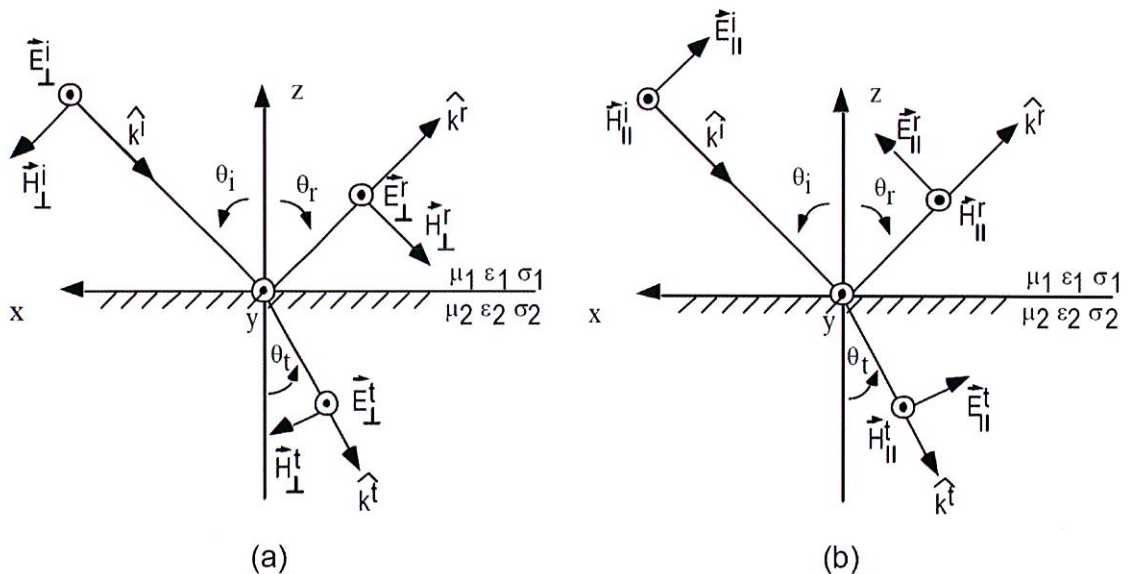
współczynnik odbicia fali TM

$$\gamma_{\parallel} = \frac{Z_2 \cos \theta_i - Z_1 \cos \theta_r}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_r} \quad (2.19)$$

gdzie:

Z_1 i Z_2 - odpowiednio impedancja fali w ośrodku 1 i 2,

θ_i i θ_r - odpowiednio kąt padania i załamania



Rysunek 2.3 Odbicie i przenikanie fali: (a) TE i (b) TM

Ponieważ większość anten stosowanych w technice radarowej jest liniowo i horyzontalnie spolaryzowanych (TE) należy rozważyć jeszcze jeden przypadek gdy płaska fala elektromagnetyczna pada na płaszczyznę pod kątem prostym ($\theta_i = \theta_r = 0^\circ$). W takim przypadku współczynnik odbicia fali będzie następujący:

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (2.20)$$

Z powyższego wynika, że współczynnik odbicia zależy od stałych dielektrycznych ośrodków, przez które propaguje fala. Jeżeli ośrodek 2 ma wyższą stałą dielektryczną od ośrodka 1, to współczynnik odbicia r będzie liczbą ujemną, co oznacza odwrotną polaryzację fali. Im wyższa bezwzględna wartość współczynnika odbicia tym silniejsze obicie od granicy między ośrodkami, większy kontrast między nimi i tym łatwiejsza identyfikacja ośrodków. Wzory (2.11) i (2.20) są najważniejszymi równaniami stosowanymi w interpretacji danych z pomiarów infrastruktury drogowej techniką radarową.

2.3 Teoretyczna zależność między stałą dielektryczną a zagęszczeniem

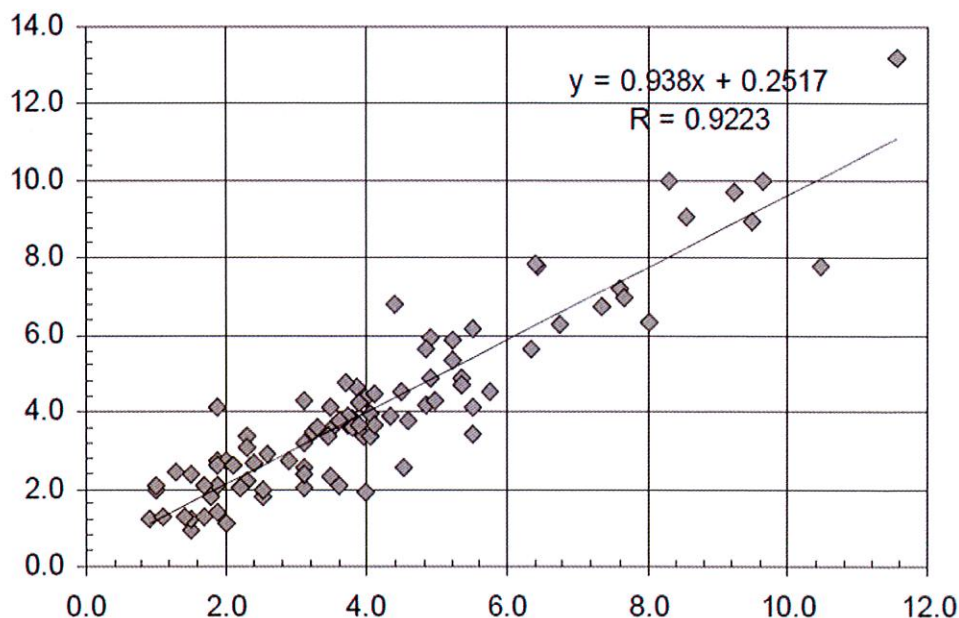
Jak wcześniej wspomniano podawane są zależności między wynikami pomiaru radarowego, a danymi z badań laboratoryjnych zagęszczenia nawierzchni. Opracowania teoretyczne, poparte ograniczonymi badaniami laboratoryjnymi przedstawiono między innymi przez (Saarenketo, i inni, 2000), (Colagrande, i inni, 2009), (Sculion, 2006). Tymczasem jak podaje między innymi (Saarenketo, 2006) możliwe jest opisanie wcześniej wymienionych zależności funkcjami ściślejszymi, dającymi dokładniejsze wyniki obliczeń. Dokonać tego można poprzez zastosowanie zestawu anten o częstotliwościach 1 i 2 GHz oraz wykonanie badań na reprezentatywnej, licznej próbie, obejmującej nawierzchnie o różnych parametrach powierzchniowych.

Autorzy niniejszego opracowania dokonali przeglądu aktualnego stanu w zakresie rozwiązań teoretycznych jak i praktycznych pomiaru zagęszczenia metodami NDT. Między innymi (Saarenketo, 2000) przedstawia zależność między stałą dielektryczną a zawartością wolnych przestrzeni w warstwie przypowierzchniowej. Zależność ta przedstawia się następująco:

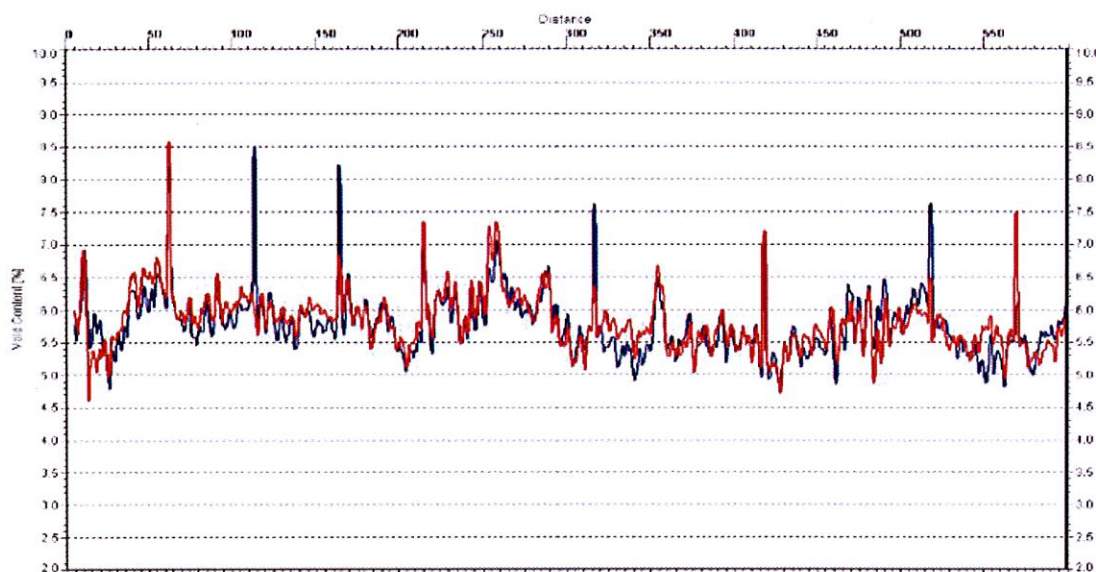
$$y = 272,93e^{-1,3012k\varepsilon_x}, \text{ przy } 1 < x < n$$

w którym: k – współczynnik kalibracyjny, ε_x – zmierzona stała dielektryczna

Przedstawiono również wyniki wstępnych badań terenowych i laboratoryjnych, które potwierdziły wysoką jakość danych obliczonych na podstawie pomiarów radarowych (Rysunki 2.4 i 2.5).

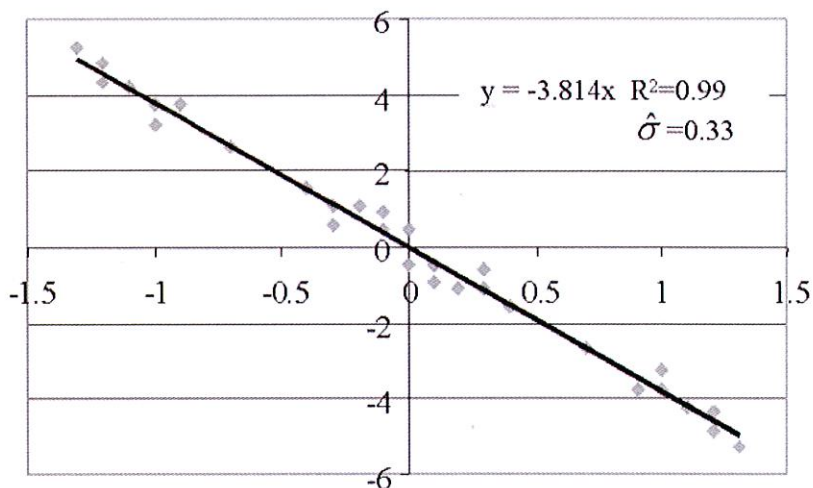


Rysunek 2.4 Korelacja wyników uzyskanych z badań laboratoryjnych (oś x) oraz pomiarami GPR (oś y) (Saarenketo, 2000)



Rysunek 2.5 Pomiar radarowy zawartości wolnych przestrzeni na odcinku testowym. Widoczne piki pochodzą od umieszczonych w nawierzchni czujników metalowych (Saarenketo, 2000)

Z kolei w pracy (Sebesta, i inni, 2002) przedstawiono zależność między zawartością wolnych przestrzeni, a zmianami wartości stałej dielektrycznej uzyskanych na podstawie pomiaru anteną typu horn o częstotliwości 1GHz. Jednocześnie autorzy opracowania stwierdzają, że lepszą teoretycznie jakość danych można uzyskać stosując anteny o wyższej częstotliwości no 2 GHz.



Rysunek 2.6 Zależność między zmianami wartości stałej dielektrycznej (oś x) a zawartością wolnych przestrzeni (oś y) (Sebesta, i inni, 2002)

3 Podsumowanie

Przedstawiona teoretyczna analiza wskazuje, że technika radarowa posiada potencjał do stosowania i wykorzystania w ocenie jednorodności zagęszczenia wierzchnich warstw asfaltowych. Wydaje się, że pomiar stałej dielektrycznej może być wykonany z precyzją wystarczającą do poprawnego wyznaczenia zmienności zagęszczenia w mierzonym

profilu i jednocześnie lepszą niż to przedstawiono w dotychczasowych badaniach prowadzonych za granicą.

Oddzielną kwestią, pozostającą w zakresie niniejszej pracy jest poprawne, jak najdokładniejsze wyznaczenie korelacji pomiędzy wynikami z badań GPR, a tymi uzyskanymi w sposób konwencjonalny, na podstawie badań laboratoryjnych. Szczególne ograniczenia mogą się pojawić na etapie badań próbek pobranych z istniejących nawierzchni, gdzie kluczową rolę będzie odgrywała precyzja lokalizacji pomiaru radarowego względem miejsca poboru próbki. Problem ten będzie musiał być rozwiązywany na etapie opracowywania i udoskonalania metodyki pomiarowej.

Przedstawione przykłady zastosowań pokazują konieczność przeprowadzenia szczegółowych badań w zdecydowanie większym zakresie niż zaprezentowano to w kilku przytaczanych pracach naukowych. Zakres ten powinien obejmować zarówno większą liczebność badanej próby jak i zastosowanie anten o wyższej częstotliwości.

W niniejszej pracy zostanie uwzględniony, dotychczas pomijany, inny parametr nawierzchni. Wprowadzony zostanie pomiar obrazu nawierzchni w podczerwieni wraz z rejestracją obrazu cyfrowego w świetle zbliżonym do naturalnego. Poszerzenie zakresu pomiarów i wzbogacenie metodyki pomiarowej o dwa inne parametry charakteryzujące jednorodność nawierzchni powinny zdecydowanie podnieść jakość i dokładność uzyskiwanych danych.

W ramach Etapu I pracy przeprowadzono następujące prace:

- analiza możliwości wykorzystania obliczonych wartości stałej dielektrycznej w ocenie jednorodności zagęszczenia warstwy asfaltowej.

W następnym etapie pracy planuje się:

- laboratoryjną ocenę dokładności stałej dielektrycznej obliczonej na podstawie pomiaru amplitudy fali elektromagnetycznej sygnału odbitego od badanej powierzchni,
- wykonanie pomiarów radarowych, pomiarów promieniowania podczerwonego oraz pobranie próbek nawierzchni wytypowanych odcinków badawczych i laboratoryjne określenie ich podstawowych parametrów,
- analizę porównawczą uzyskanych wyników badań,
- ocenę zależności między wynikami z badań laboratoryjnych a pomiarem zawartości wolnych przestrzeni przy pomocy techniki radarowej.

Bibliografia

A-CUBED General state of the art review of ground probing radar [Book Section]. - Ontario : A-CUBED, 1983.

Apkarian H and Piascik R J Testing and trial deployment of a cost-effective and real-time asphalt pavement quality indicator (density and moisture-content monitor) system // Annual progress report. - [s.l.] : IDEA, 1997.

Benedetto A and Fattorini F GPR signal processing in the frequency domain for detection of moisture variability in pavement structure [Conference] // MAIREPAV6. - Torino : Politecnico di Torino, 2009.

Burati J L and Elzoghbi G B Correction of nuclear density results with core densities. - [s.l.] : Transportation Research Board, 1987. - Vol. Transportation Research Record.

Colagrande S [et al.] Ground penetrating radar assessment for flexible road pavement degradation [Conference] // MAIREPAV6. - Torino : Politecnico di Torino, 2009.

Daniels J Ground Penetrating Radar fundamentals // Appendix to Report to United States Environmental Protection Agency. - 2000.

Karczewski Jerzy Zarys metody georadarowej [Book]. - Kraków : Wydawnictwa AGH, 2007.

Moorman Brian Ground-penetrating radar applications in paleolimnology [Conference]. - Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2001.

Morawski Tadeusz and Gwarek Wojciech Teoria pola elektromagnetycznego [Book]. - Warszawa : WNT, 1985.

Morey Rexford Ground penetrating radar for evaluating subsurface conditions for transportation facilities // NCHRP Synthesis 255. - Washington : Transportation Research Board, 1998.

Olhoeft G and Capron D Petrophysical causes of electromagnetic dispersion [Conference] // Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar. - Waterloo : Waterloo Centre of Groundwater Research, 1994. - pp. vol 1 of 3: 145-152.

Saarenketo T and Scullion T Road evaluation with Ground Penetrating Radar [Journal] // Journal of Applied Geophysics 43. - 2000. - pp. 119-138.

Saarenketo T Measuring electromagnetic properties of asphalt for pavement quality control and defect mapping. - 2000.

Saarenketo Timo Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of Ground Penetrating Radar in traffic infrastructure surveys // Praca doktorska. - Oulu : University of Oulu, 2006.

Scaffer J and Saxena A The science and design of engineering materials [Conference]. - [s.l.] : Richard D. Irwin, Inc, 1995.

Sculion T and Saarenketo T Ground Penetrating Radar Technique in Monitoring Defects in Roads and Highways [Conference] // Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, SAGEEP.. - Orlando, Florida. : Compiled by Ronald S. Bell., 1995. - pp. pp 63–72..

Sculion T Perpetual pavements in texas: state of the practice [Report]. - Washington : Federal Highway Administration, 2006.

Sebesta S and Sculion T Application of Infrared Imaging and Ground Penetrating Radar for detecting segregation in hot-mix asphalt overlays // Transportation Research Board Paper. - 2002.