

Određivanje debljine slojeva asfalta i betona nerazornom metodom

D. Sekulić, A. Strineka, J. Putrić Brkić

Ključne riječi

asfaltni sloj,
betonski sloj,
debljina,
zvučni valovi,
uzorak,
probno polje

Key words

asphalt layer,
concrete layer,
thickness,
sound waves,
sample,
test section

Mots clés

couche d'enrobé,
couche de béton,
épaisseur,
ondes sonores,
échantillon,
plot d'essai

Ключевые слова

асфальтовый слой,
бетонный слой,
толщина,
звуковые волны,
образец,
пробное поле

Schlüsselworte

Asphaltschicht,
Betonschicht,
Dicke,
Schallwellen,
Probe,
Probefeld

D. Sekulić, A. Strineka, J. Putrić Brkić

Izvorni znanstveni rad

Određivanje debljine slojeva asfalta i betona nerazornom metodom

Prikazano je istraživanje mogućnosti uporabe nerazorne metode ispitivanja zasnovane na refleksiji i transmisiji zvučnih valova u svrhu mjerenja debljine asfaltnih i betonskih slojeva. Opisana teorija odziva slojevitih konstrukcija na točkasti udarac male energije potvrđena je mjerenjima na uzorcima i probnom polju. Utvrđeno je da je moguće mjerenje debljine slojeva asfalta i betona uz ograničenja vezana uz temperaturu pri ispitivanju i razlike akustičnih impedancija slojeva.

D. Sekulić, A. Strineka, J. Putrić Brkić

Original scientific paper

Determining thickness of asphalt and concrete layers by non-destructive method

The study of possible use of a non-destructive method of testing, based on reflection and transmission of sound waves, for measuring thickness of asphalt and concrete layers, is presented. The described theory of response of multi-layer structures to low-energy point impact has been confirmed through measurements on samples and test section. It has been established that measurement of thickness of asphalt and concrete layers is possible, with limitations relating to testing temperature and differences in acoustic impedance of layers.

D. Sekulić, A. Strineka, J. Putrić Brkić

Ouvrage scientifique original

Détermination d'épaisseur des couches d'enrobé et de béton par méthode non-destructive

L'étude d'emploi possible d'une méthode non-destructive d'essai, basée sur la réflexion et la transmission des ondes sonores, pour mesurer l'épaisseur des couches d'enrobé et de béton, est présentée. La théorie décrite de la réponse des structures à couches multiples au choc ponctuel à basse énergie a été confirmée par mesures faites sur échantillons et sur plot d'essai. Il a été constaté que l'épaisseur des couches d'enrobé et de béton peut être mesurée, avec limitations concernant la température d'essai et les différences dans l'impédance acoustique des couches.

Д.Секулич, А.Стринека, Ї.Путрич Бркич

Оригинальная научная работа

Определение толщины слоев асфальта и бетона неразрушающим методом

Приведено исследование возможности использования неразрушающего метода испытаний, базирующегося на рефлексии и трансмиссии звуковых волн, в целях измерения толщины асфальтовых и бетонных слоев. Описана теория отклика слоевых конструкций на точечный удар малой энергии, подтвержденная измерениями на образцах и пробном поле. Установлено, что измерение толщины слоев асфальта и бетона возможно с ограничениями, связанными с температурой при проведении испытаний и различиями акустических импеданций слоев.

D. Sekulić, A. Strineka, J. Putrić Brkić

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Bestimmung der Dicke von Asphalt- und Betonschichten mit zerstörungsfreier Methode

Dargestellt ist eine Untersuchung der Anwendungsmöglichkeit einer zerstörungsfreien Prüfungsprobe begründet auf der Reflexion und Transmission von Schallwellen im Zweck der Messung der Dicke von Asphalt- und Betonschichten. Die beschriebene Theorie des Widerhalls von Schichtenkonstruktionen auf punktartigen Schlag mit niederer Energie wurde durch Messungen an Proben und am Probefeld bestätigt. Festgelegt wurde dass die Messung der Schichtdicke von Asphalt und Beton möglich ist, mit Begrenzung hinsichtlich der Temperatur bei der Untersuchung und der Unterschiede der akustischen Impedanzen der Schichten.

Autori: Mr. sc. **Dalibor Sekulić**, dipl. ing. fiz.; dr. sc. **Andrea Strineka**, dipl. ing. kem. teh.; **Jasna Putrić Brkić**, dipl. ing. kem. teh., Institut IGH, d.d., Zagreb

1 Uvod

Utvrđivanje debljine slojeva kolničke konstrukcije vrlo je značajno za kontrolu kvalitete izvedenih radova, procjenu preostalog uporabnog vijeka postojeće konstrukcije te za određivanje nosivosti konstrukcije.

Vađenje jezgri i izravno utvrđivanje debljine slojeva pouzdana je metoda, ali se njezinom primjenom oštećuje kolnik.

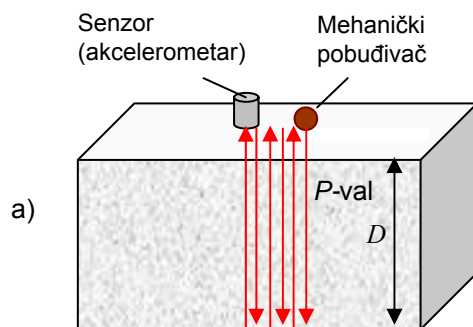
Primjena nerazornih metoda određivanja debljine kolnika omogućuje brzo dobivanje velikog broja pouzdanih rezultata mjerenja te predstavlja zadovoljavajuće rješenje za kontrolu kvalitete kolnika.

Stoga se metoda refleksije zvučnih valova (P-valova) nameće kao jedna od nerazornih metoda pogodnih za određivanje debljine slojeva asfalta i betona.

2 Teorijske osnove ispitne metode

Zvučni se valovi uvode u kolničku konstrukciju mehaničkim putem - udaranjem malom čeličnom kuglicom. Tako stvoreni valovi šire se kroz ispitivani materijal te se pri nailasku na plohu koja spaja dva različita medija reflektiraju [1]. Na taj način dolazi do niza refleksija na nasuprotnim plohama koje izazivaju male pomake koji se detektiraju pomoću piezoelektričnog pretvornika ili akcelerometra. Uređaj bilježi valni oblik pomaka što sadrži informacije o frekvencijama višestrukih refleksija. Slika 1.a) prikazuje refleksije između nasuprotnih ploha elementa konstrukcije za slučaj kada su plohe omeđene zrakom, slika 1.b) prikazuje valni oblik - rezultat mjerenja u vremenskoj domeni, a slika 1.c) spektar - rezultat mjerenja nakon transformacije u frekvencijsku domenu [2].

U spektru (slika 1.c) vidljiv je dominantni maksimum za frekvenciju f_p . Ova se frekvencija izrazom (1) povezuje s debljinom elementa konstrukcije [1, 3].



Slika 1. a) Niz refleksija od rubnih ploha ispitivanog elementa, b) rezultat u vremenskoj domeni (valni oblik), c) rezultat u frekvencijskoj domeni (spektar)

$$D = \frac{V_p}{2f_p} \quad (1)$$

gdje je:

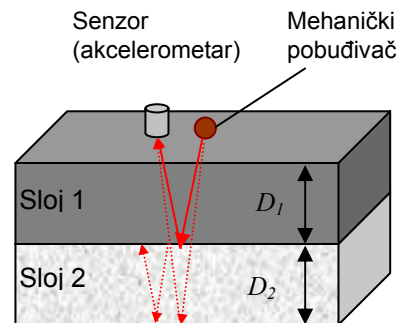
D - debljina elementa konstrukcije

V_p - brzina P-vala

f_p - frekvencijski maksimum

Dakle, uz poznavanje brzine P-valova u materijalu može se proračunati debljina elementa konstrukcije.

U slučaju ispitivanja uslojenih konstrukcija dolazi do refleksija na spoju dvaju slojeva i na nasuprotnoj strani elementa konstrukcije (slika 2.) [4].

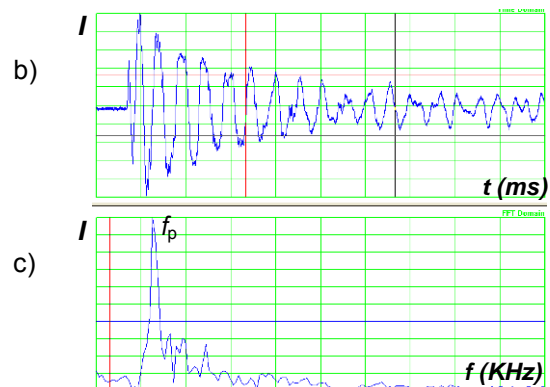


Slika 2. Refleksije valova zvuka u uslojenoj konstrukciji

Mogućnost određivanja slojeva metodom refleksije ovisi o razlici akustičnih impedancija materijala. Akustična impedancija Z definira se kao umnožak brzine elastičnog vala i gustoće materijala:

$$Z = v_p \cdot \rho \quad (2)$$

Za materijale koji su zanimljivi pri ispitivanju asfaltnih kolničkih konstrukcija, akustične su impedancije prikazane u tablici 1. [5].



Tablica 1. Akustične impedancije za različite medije

Materijal	Specifična akustična impedancija Z [kg/(m ² s)]
zrak	0,4
tlo	(0,3 do 4) x 10 ⁶
beton	(7 do 10) x 10 ⁶
asfalt	(3 do 8) x 10 ⁶
tvrdna podloga	4,2 x 10 ⁶
meka podloga	1,6 x 10 ⁶

Elastični se valovi reflektiraju na rubnim ploham dvaju medija ako imaju različitu akustičnu impedanciju Z . Amplitude reflektiranog i transmitiranog vala ovise o relativnoj razlici akustičnih impedancija dvaju medija i opisuju se izrazima [6]:

$$A_{refleksije} = A_i \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (3)$$

$$A_{transmisije} = A_i \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (4)$$

gdje je:

Z_1 – akustična impedancija medija iz kojeg val dolazi

Z_2 – akustična impedancija medija u koji val dolazi

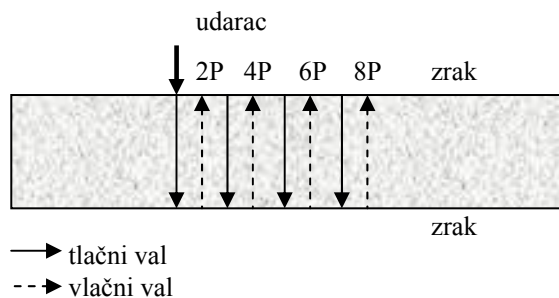
U tablici 2. prikazani su koeficijenti refleksije za rubne plohe različitih medija koji su predmet provedenih istraživanja.

Tablica 2. Koeficijenti refleksije za različite vrste graničnih ploha

Granica	Koeficijent refleksije
beton - zrak	-1
beton - tlo	-0,4 do -0,9
asfalt - beton	0,1 do 0,6

2.1 Odziv elementa konstrukcije omeđenog zrakom ($Z_2 \ll Z_1$)

Kod elemenata konstrukcije omeđenih zrakom amplituda reflektiranog vala ($A_{refleksije}$) jednaka je amplitudi ulaznog vala ali s negativnim predznakom ($-A_i$). Ovo je najčešći slučaj pri ispitivanju i pojavljuje se kada je rubna ploha beton – zrak. Kako je u tom slučaju koeficijent refleksije -1, pri nailasku vala na rubnu plohu dolazi do promjene faze za π . To znači da se tlačni val reflektira kao vlačni val i obrnuto. Kako je i druga ploha konstrukcijskog elementa omeđena zrakom dolazi do niza refleksija i pri svakoj od njih faza vala se mijenja (slika 3.).



Slika 3. Fazne promjene elastičnog vala kada su oba reflektora zrak

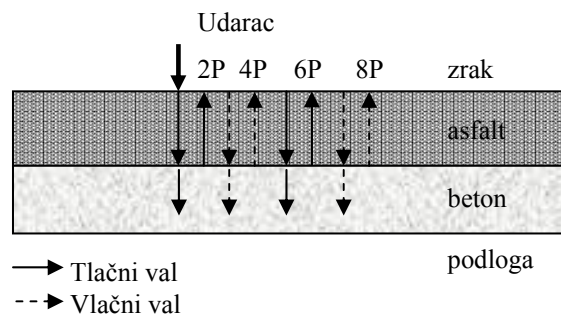
Nailazak tlačnog vala uzrokuje pomak površine konstrukcijskog elementa prema van, a vlačnog prema unutra pa se na gornjoj plohi, gdje je smješten detektor, događaju uzastopni pomaci prema unutra [6].

2.2 Odziv uslojene konstrukcije asfalt - beton ($Z_2 > Z_1$)

Odziv uslojene konstrukcije asfalt - beton sastoji se od odziva gornjeg sloja asfalta, odziva donjeg sloja betona i odziva kompozitne ploče (uslojene konstrukcije kao cjeline).

2.2.1 Odziv gornjeg sloja (asfalta)

Pri ispitivanju uslojene konstrukcije asfalt/beton gornji sloj ima manju akustičnu impedanciju od donjeg sloja. Tlačni se val djelomično prenosi kroz spoj asfalta i betona, a djelomično reflektira. Prilikom refleksije ne dolazi do faznog pomaka i tlačni se val reflektira kao tlačni, a vlačni val kao vlačni. Kada val naiđe na gornju rubnu plohu omeđenu zrakom dolazi do faznog pomaka za π radijana (slika 4.).



Slika 4. Fazne promjene elastičnog vala u asfaltu kada je donji reflektor beton, a gornji reflektor zrak

U opisanom slučaju svaki drugi val bit će vlačni i izaziva pomak prema unutra, stoga, val prije nego što je detektiran prelazi put jednak četverostrukoj debljini asfaltnog sloja. Jednadžba za proračun debljine sloja asfalta jest:

$$D_A = \frac{V_P}{4f_p} \quad (5)$$

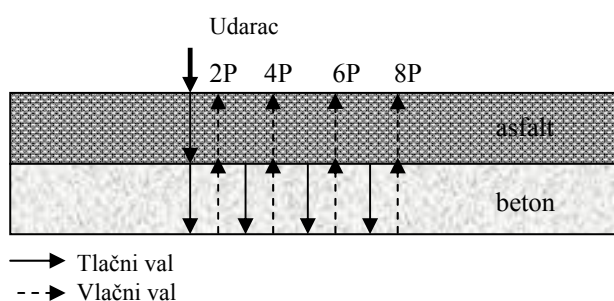
Izraz (4) vrijedi samo u slučaju savršenog spoja asfalta i betona. U praksi je između asfalta i betona tanki sloj zraka pa se primjenjuje faktor 2 u nazivniku izraza (5) [6].

2.2.2 Odziv donjeg sloja (betona)

U betonu dolazi do višestruke refleksije prenesenih P-valova (slika 5.). Kako su i donja i gornja ploha betonske ploče omeđene materijalima manje akustične impedancije, tlačni se val u betonu reflektira kao vlačni, a vlačni kao tlačni što uzrokuje uzastopne pomake površine asfalta prema dolje.

Dakle, debljina betonske ploče može se odrediti iz jednadžbe:

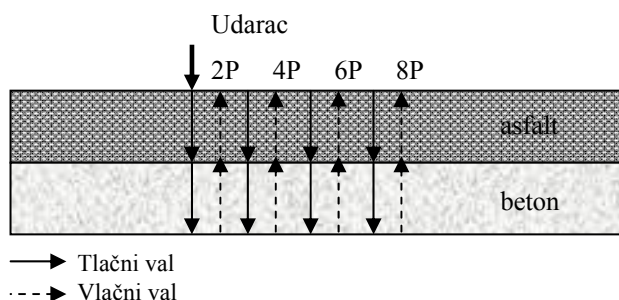
$$D_B = \frac{V_P}{2f_p} \quad (6)$$



Slika 5. Odziv donjeg sloja

2.2.3 Odziv kompozitne ploče

Tlačni val prenesen iz asfalta u beton nastavlja se širiti kroz beton kao tlačni val. Tek pri refleksiji na donjoj rubnoj plohi betona mijenja mu se faza, dakle reflektira se kao vlačni val koji se dalje prenosi preko spoja beton - asfalt bez fazne promjene i stiže do detektora (slika 5.).



Slika 6. Odziv kompozitne ploče

Izmjereni frekvencijski maksimum koji odgovara odzivu dvoslojne ploče jest:

$$f_K = \frac{1}{t_A + t_B} \quad (7)$$

Gdje je t_A vrijeme širenja vala kroz asfalt, a t_B vrijeme širenja vala kroz beton.

Vrijeme širenja vala kroz sloj asfalta debljine D_A jest:

$$t_A = \frac{2D_A}{v_A}, \quad (8)$$

a kroz sloj betona debljine D_B :

$$t_B = \frac{2D_B}{v_B} \quad (9)$$

gdje su:

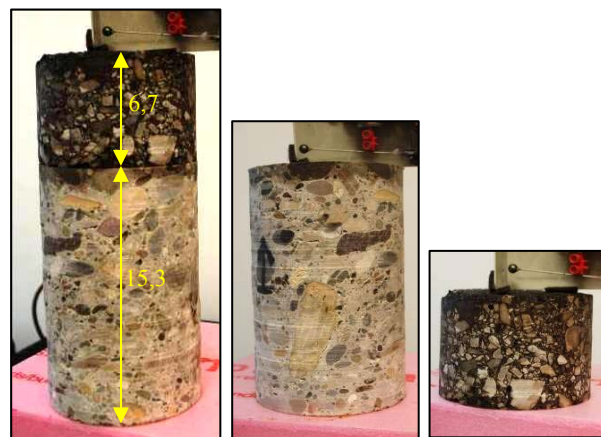
- v_B i v_A brzine širenja elastičnih valova kroz asfalt i beton.

Uvrštavanjem izraza (8) i (9) u jednadžbu (7) dobiva se jednadžba koja povezuje izmjerene frekvencijski maksimum s debljinama slojeva asfalta i betona [4]:

$$f_K = \frac{1}{\frac{2D_B}{v_B} + \frac{2D_A}{v_A}} \quad (10)$$

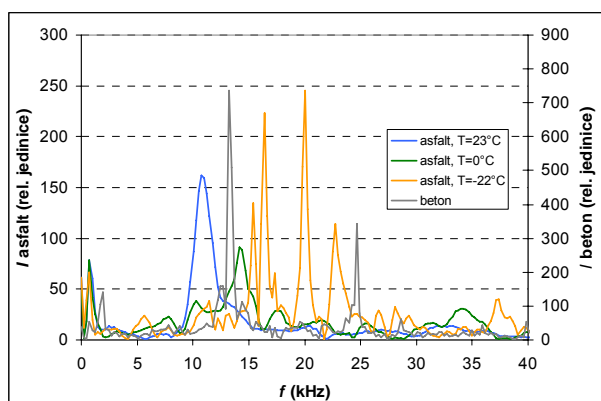
3 Eksperimentalna ispitivanja na valjcima

U svrhu potvrde iznesene teorije provedena su ispitivanja valjka kao kompozitnog sustava (slojevi asfalt + beton) nakon čega su slojevi razdvojeni, a ispitivanja slojeva asfalta i betona provedena zasebno (slika 7.).



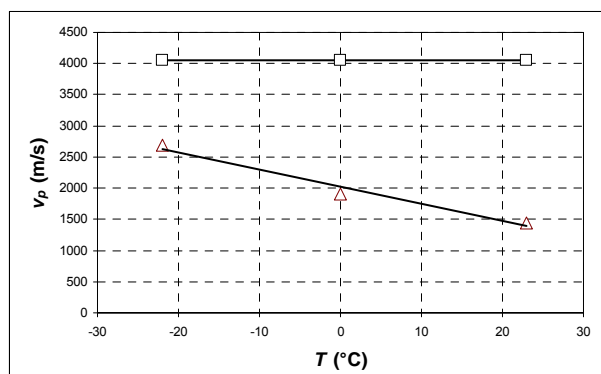
Slika 7. Ispitivanje valjaka: a) kompozit; b) beton; c) asfalt

Na slici 8. prikazani su rezultati mjerenja betonskog i asfaltnog uzorka pri temperaturama od $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kod betonskog uzorka frekvencijski je maksimum $f_B = 13,2\text{ kHz}$ i neovisan je o temperaturi ispitivanja, dok je kod asfaltnog uzorka frekvencijski maksimum ovisan o temperaturi i iznosi: $f_A = 20\text{ kHz}$ pri $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$, $14,2\text{ kHz}$ pri $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $10,8\text{ kHz}$ pri $23\text{ }^{\circ}\text{C}$.



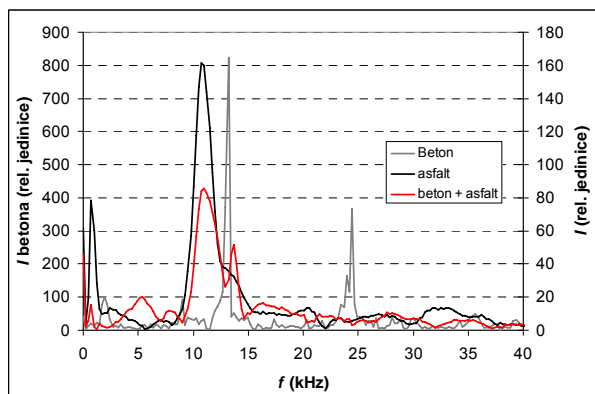
Slika 8. Rezultati ispitivanja uzoraka asfalta i betona pri temperaturama od -22 °C, 0 °C i 23 °C

Iz frekventijskih maksimuma, primjenom izraza (1), određene su brzine P-valova (slika 9.). Vidljivo je da je u betonu, u temperaturnom području od -22 °C do +23 °C, brzina valova stalna (4050 m/s), dok se u asfaltu s porastom temperature brzina smanjuje od 2700 m/s do 1400 m/s.



Slika 9. Prikaz brzina elastičnih valova u betonu i asfaltu

Rezultati ispitivanja kompozitnog valjka (sloja asfalta na podlozi od betona), valjka od asfalta i valjka od betona pri temperaturi 22 °C prikazani su na slici 10.



Slika 10. Rezultati ispitivanja kompozitnog valjka, valjka od asfalta i valjka od betona

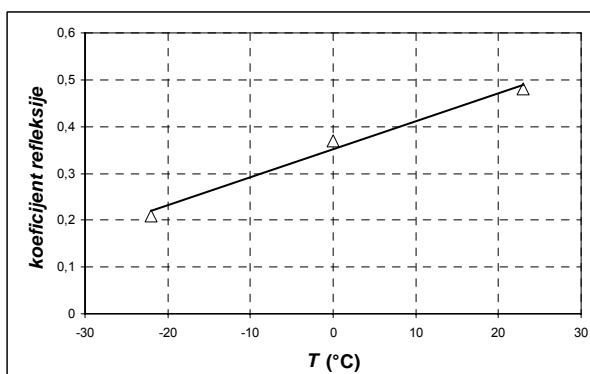
Dobiveni spektri pokazuju frekventijske maksimume $f_A = 10,8$ kHz kod ispitivanja asfalta i $f_B = 13,2$ kHz pri ispitivanju betona. Ispitivanjem kompozitnog valjka dobivena su tri maksimuma $f_{A+B} = 5,8$ kHz (odziv sustava asfalt+beton), $f_A' = 11,0$ kHz (odziv asfaltnog sloja) i $f_B' = 13,7$ kHz (odziv betonskog sloja).

Vidljivo je da se frekventijski maksimum f_A dobro podudara s frekventijskim maksimumom f_A' , a frekventijski maksimum f_B s frekventijskim maksimumom f_B' što dokazuje da je teorijsko razmatranje o refleksijama u gornjem asfaltnom sloju i u donjem betonskom sloju ispravno. Uvrštavanjem izraza (1) u izraz (8) dobiva se izraz koji povezuje frekventijski maksimum kompozitnog uzorka s frekventijskim maksimumom asfalta i frekventijskim maksimumom betona.

$$f_{A+B} = \frac{1}{\frac{1}{f_B} + \frac{1}{f_A}} \quad (11)$$

Frekventijski maksimum kompozitnog sustava f_{A+B} proračunan izrazom (11) iznosi 6,1 kHz i dobro se podudara s izmjerenim frekventijskim maksimumom (5,8 kHz).

Slika 11. prikazuje koeficijent refleksije proračunan iz izraza (3), ispitivanog sustava asfalt-beton. Koeficijent refleksije raste s porastom temperature, pa se na višim temperaturama očekuju jači odzivi valova reflektiranih u asfaltu.



Slika 11. Koeficijent refleksije na spoju asfalt – beton

S druge strane, s povećanjem temperature asfalt postaje manje elastičan pa se uvodi manja energija valova zvuka. Prema [6], da bi se reflektirani valovi mogli odrediti koeficijent refleksije mora biti $> 0,2$, pa se očekuje da se za mjerene kompozite ne mogu detektirati refleksije u asfaltu pri temperaturi nižoj od -22 °C.

4 Mjerenja na probnom polju

Na probnom polju kolničke konstrukcije (asfalt na betonskoj podlozi), na više mjernih mjesta, također su provedena ispitivanja.



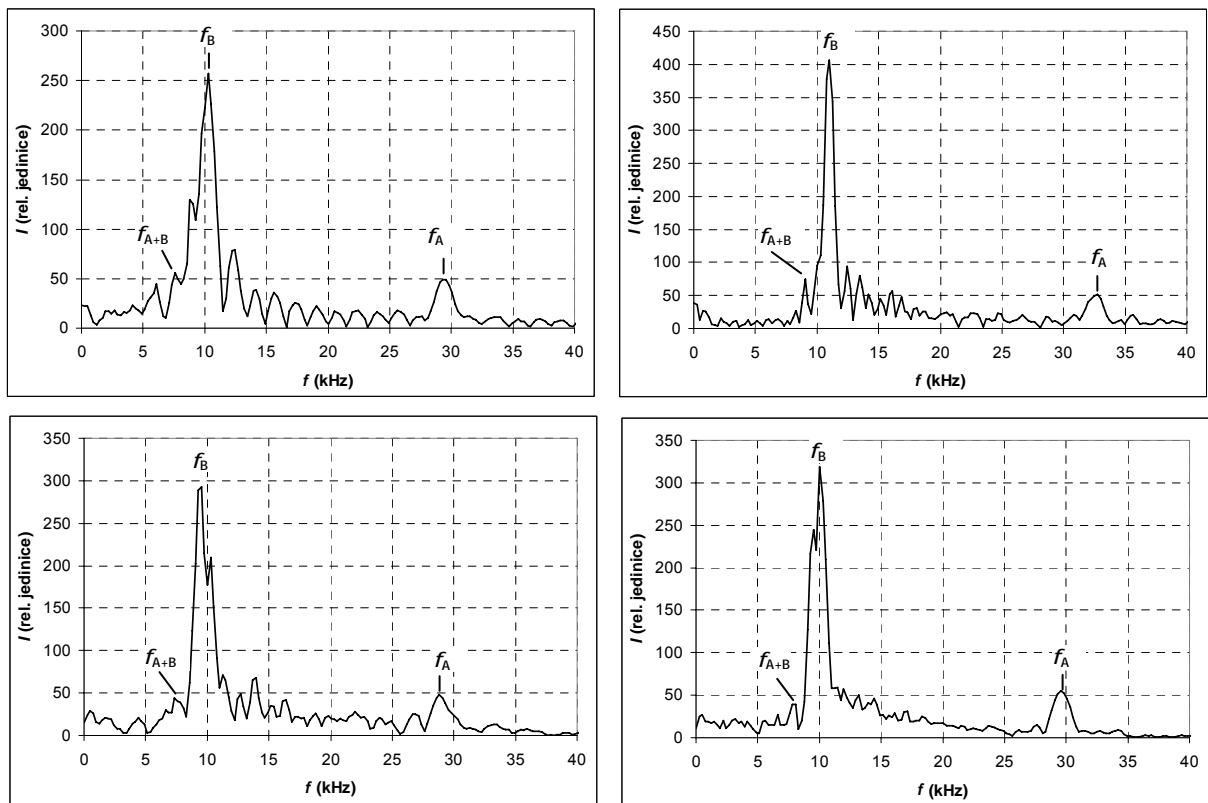
Slika 12. Ispitivanje na probnom polju

Na slici 13. prikazani su rezultati mjerenja.

Na dobivenim spektrima (slika 13.) vide se tri karakteristična

odziva na frekvencijama f_{A+B} – odziv sustava asfalt + beton, na f_B – odziv betona i na f_A – odziv asfalta. Intenzitet frekvencijskih maksimuma asfaltnog sloja znatno je manji od intenziteta frekvencijskih maksimuma betona jer se na spoju asfalta i betona reflektira oko 20 % energije vala, a 80 % se prenosi u donji betonski sloj. U tablici 3. prikazane su numeričke vrijednosti frekvencijskih maksimuma f_{A+B} , f_B i f_A . Uvrštavanjem f_B i f_A i brzina v_B i v_A u izraz (1) proračunate su debljine slojeva asfalta i betona D_A i D_B . Debljina sloja betona određena je i iz frekvencijskih maksimuma sustava asfalt+beton, f_{A+B} i frekvencijskih maksimuma asfalta f_A izrazom (12) izvedenim iz izraza (10).

$$D_B^* = \frac{1}{2} v_B \left(\frac{1}{f_K} - \frac{1}{f_A} \right) \quad (12)$$



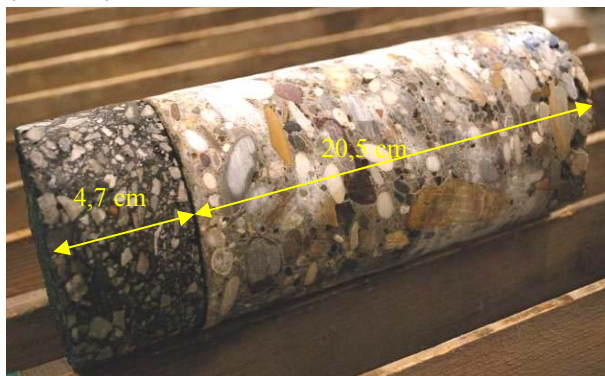
Slika 13. Rezultati mjerenja na 4 različite pozicije na probnom polju

Tablica 3. Izmjereni frekvencijski maksimumi, proračunate i stvarne debljine slojeva

Mjerno mjesto	Izmjereni frekvencijski maksimumi (kHz)			Izračunate debljine slojeva (cm)			Stvarne debljine slojeva (cm)	
	f_{A+B}	f_B	f_A	D_A	D_B	D_B^*	D_A	D_B
C1	7,331	10,020	29,326	4,4	20,5	21,0	4,7	20,5
C2	8,309	10,753	32,502	4,0	19,1	18,4		
C3	7,087	9,286	28,837	4,5	22,1	21,8		
C4	7,820	10,020	29,326	4,4	20,5	19,2		

Izračunate vrijednosti debljina slojeva prikazane su u tablici 3.

Debljina sloja asfalta na valjku bušenom između mjernih mjesta C3 i C4 iznosi 4,7 cm, a betona 20,5 cm (slika 14.).



Slika 14. Valjak izbušen u svrhu potvrde dobivenih rezultata

LITERATURA

- [1] Carino, N.J.: *The impact-echo method: an overview*, Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition, May 21-23, 2001, Washington, D.C., American Society of Civil Engineers, Reston, VA, Peter C. Chang, Editor (2001), 18-27
- [2] Sekulic, D.; Stipanovic Oslakovic, I.; Barisic, E.: *Damage Assessment of Concrete Column using Combination of Non-Destructive Methods*, NDE/NDT for Hihways and Bridges (SMT), Oakland, USA, CA, 08-12 September 2008.
- [3] Shokouhi, P.; Gucunski, N.; Maher, A.: *Applicability and Limitations of Impact Echo in Bridge Deck Condition Monitoring*, 12th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics - Near Surface, September 4, Helsinki, Finland, 2006.
- [4] Sansalone, M.; Carino, N. J.: *Detecting Delaminations in Concrete slabs with and without overlays using the impact-echo method*, ACI Materials Journal 2 (1989) 86
- [5] Sansalone, M.; Carino, N.J.: *Finite element Studies of the Impact-cho response of layered plates containing flaws*, International Advances in Nondestructive Testing (1990) 15, 312-335
- [6] Sansalone, M.J.; Street, W.B.: *Impact-Echo, Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry*, Bullbrier Press, 1997.

4 Zaključak

Provedeno istraživanje pokazuje da je metodom refleksije zvučnih valova moguće odrediti debljine asfalta i betona u kolničkim konstrukcijama sa zadovoljavajućom točnošću. Utvrđeno je da kod primjene metode postoje određena ograničenja. Zbog gornje granične frekvencije od oko 45 kHz nije moguće mjeriti debljine asfaltnih slojeva tanjih od približno 3 cm.

Za uspješno provođenje mjerenja koeficijent refleksije između asfalta i betona mora biti veći od 0,2 pa u nekim slučajevima, primjerice kod mjerenja na niskim temperaturama, koeficijent refleksije može postati premalen. S druge strane, s povećavanjem temperature smanjuje se modul elastičnosti te se zbog toga povećava prigušenje valova. Također, u asfaltu kao visko-elastičnom materijalu dolazi do faznih pomaka posljedica čega je smanjenje točnosti mjerenja s povećanjem temperature.