

Primljen / Received: 19.6.2017.

Ispravljen / Corrected: 5.4.2018.

Prihvaćen / Accepted: 22.10.2018.

Dostupno online / Available online: 10.3.2019.

Ocjena nosivosti sloja kolničke konstrukcije za zaštitu od smrzavanja primjenom različitih mjernih uređaja



Izv.prof.dr.sc. **Lina Bertulienė**, dipl.ing.građ.
Tehničko sveučilište Vilnius Gediminas, Litva
Zavod za prometnice
lina.bertuliene@vgtu.lt



Izv.prof.dr.sc. **Lina Juknevičiūtė-Žilinskienė**, dipl.ing.građ.
Tehničko sveučilište Vilnius Gediminas, Litva
Zavod za prometnice
lina.juknevičiute-zilinskiene@vgtu.lt



Prof.dr.sc. **Henrikas Sivilevičius**, dipl.ing.građ.
Tehničko sveučilište Vilnius Gediminas, Litva
Odjel za mehanizaciju i željeznice
henrikas.sivilevicius@vgtu.lt



Prof.dr.sc. **Alfredas Laurinavičius**, dipl.ing.građ.
Tehničko sveučilište Vilnius Gediminas, Litva
Zavod za prometnice
alfredas.laurinavicius@vgtu.lt

Prethodno priopćenje

Lina Bertulienė, Lina Juknevičiūtė-Žilinskienė, Henrikas Sivilevičius, Alfredas Laurinavičius

Ocjena nosivosti sloja kolničke konstrukcije za zaštitu od smrzavanja primjenom različitih mjernih uređaja

U ovom radu prikazan je odnos između statičkog i dinamičkog deformacijskog modula, te je uspostavljena korelacija između fizičkih svojstava i pokazatelja nosivosti sloja kolničke konstrukcije za zaštitu od smrzavanja. Prikazani su korekcijski koeficijenti dinamičkih mjerenja u odnosu na statička očitavanja. Rezultati pokazuju da u odsutnosti statičkog mjernog uređaja mogu se statička očitavanja zamijeniti očitanjima bilo kojih od tri predstavljene vrste dinamičkih uređaja, te na taj način odrediti nosivost sloja kolničke konstrukcije za zaštitu od smrzavanja.

Ključne riječi:

kolnička konstrukcija, sloj za zaštitu od smrzavanja, deformacijski modul, koeficijent filtracije

Preliminary note

Lina Bertulienė, Lina Juknevičiūtė-Žilinskienė, Henrikas Sivilevičius, Alfredas Laurinavičius

Evaluation of frost blanket layer strength using different devices

The relationship between the static and dynamic deflection modulus is presented in the paper, and a correlation between the FBL physical and strength indicators is determined. The correction coefficients of dynamic measurements, as related to static beam readings, are presented. The results show that, in the absence of a static beam, static beam readings can be replaced by the readings of any of the three analysed dynamic devices, and the FBL strength can thus be measured.

Key words:

pavement structure, frost blanket layer, deflection modulus, coefficient of filtration

Vorherige Mitteilung

Lina Bertulienė, Lina Juknevičiūtė-Žilinskienė, Henrikas Sivilevičius, Alfredas Laurinavičius

Bewertung der Tragfähigkeit der Frostschuttschicht der Fahrbahnkonstruktion durch Anwendung verschiedener Messgeräte

In dieser Abhandlung wird die Beziehung zwischen dem statischen und dem dynamischen Verformungsmodul dargestellt, und es wurde eine Korrelation zwischen den physischen Eigenschaften und den Indikatoren der Tragfähigkeit der Frostschuttschicht der Fahrbahnkonstruktion hergestellt. Dargestellt werden die Korrelationskoeffizienten der dynamischen Messungen im Vergleich zu den statischen Messwerten. Die Ergebnisse zeigen, dass beim Fehlen eines statischen Messgerätes das statische Ablesen durch das Ablesen irgendeines der drei vorgestellten dynamischen Geräte ersetzt werden kann, und man kann auf diese Weise die Tragfähigkeit der Frostschuttschicht der Fahrbahnkonstruktion bestimmen.

Schlüsselwörter:

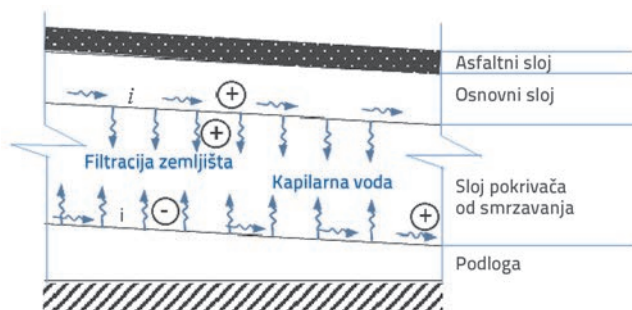
Fahrbahnkonstruktion, Frostschuttschicht, Verformungsmodul, Filtrationskoeffizient

1. Uvod

Sloj kolničke konstrukcija za zaštitu od smrzavanja (engl. *Frost Blanket Layer* - FBL sloj) nužan je u područjima s klimatskim uvjetima koje karakteriziraju velike varijacije vrijednosti temperature i vlage. FBL sloj mora izdržati opterećenja od prometa kao i same kolničke konstrukcije, te ih bez štetnih posljedica prenijeti na posteljicu. Osim toga, taj sloj služi kao drenažni i kao sloj kojim se, tijekom ugradnje, mogu ispraviti geometrijske nepravilnosti površine posteljice. Glavna funkcija FBL sloja je zaštita kolničke konstrukcije od štetnih učinaka smrzavanja. Sloj za zaštitu od smrzavanja čini tlo ili mješavina nevezanog agregata koji su neosjetljivi na smrzavanje, koji moraju biti vodonepropusni i koji mogu spriječiti kapilarno uzdizanje vode u nosivi sloj.

Za formiranje ledenih leća te povećanja volumena tla uslijed njegovog smrzavanja moraju postojati tri uvjeta: tlo osjetljivo na smrzavanje, niska temperatura koja omogućava smrzavanje i voda (koja može biti dostupna zbog: visoke razine podzemne vode, procjeđivanja vode s okolnog terena, kapilarnog uzdizanja vode). Sva tri navedena uvjeta prisutna su u mnogim sjevernim regijama [1]. Kada se voda smrzne u slojevima iznad FBL sloja, stvaraju se ledeni kristali, te dolazi do privlačenja vode iz ostalih slojeva na područje niskih temperatura. Privlačenjem vode iz ostalih slojeva i njenim smrzavanjem povećava se volumen leda sve dok se ne iscrpe zalihe vode. Negativan utjecaj na konstrukciju ceste događa se tijekom odmrzavanja [2-4]. FBL sloj sastoji se od krupnog agregata (pijesak, šljunak, te njihove mješavine), koji u sloju oblikuje nepravilne šupljine većih dimenzija [5] koje sprječavaju zadržavanje i kapilarno uzdizanje vode. Model protoka vode u kolničkoj konstrukciji sa slojem za zaštitu od smrzavanja prikazan je na slici 1.

Voda koja se procijedi iz gornjih slojeva kolničke konstrukcije može se odvoditi poprečno u ravnini gornje površine FBL sloja do bankine ili se procjeđuje u FBL sloj i odvodi poprečno u ravnini površine posteljice.



Slika 1. Utjecaj protoka vode na kolničku konstrukciju ("+" je pozitivni utjecaj vode, "-" je negativni utjecaj vode)

Kapilarna barijera je sloj s krupnozrnim materijalom ili geosintetičkim materijalom u tlima osjetljivima na smrzavanje. Takav sloj smanjuje kapilarno uzdizanje vode do kojeg dolazi pod djelovanjem usisnog gradijenta koji nastaje isparavanjem

ili smrzavanjem, te smanjuje ili sprječava ulazak vode iz gornjih slojeva u sloj tla ispod kapilarne barijere. Zrnate kapilarne barijere uspješno se primjenjuju kako bi se smanjio štetan utjecaj smrzavanja na svojstva kolničkih konstrukcija [1]. Pravilno ugrađen drenažni sustav smanjuje operativne troškove održavanja i produljuje vijek trajanja ceste [6].

U mnogim zemljama Europe [7], kako bi se procijenila kvaliteta izvedbe zemljanih radova, provodi se ispitivanje tla statičkom kružnom pločom. Rezultat ispitivanja je statički deformacijski modul tla, a minimalne vrijednosti tog modula koje je nužno postići prilikom izvedbe zemljanih radova propisane su tehničkim uvjetima. Primjerice, u Njemačkoj, Austriji i Češkoj, mjerenje statičkog deformacijskog modula tla iz drugog kruga opterećenja jedno je od osnovnih ispitivanja koje treba provesti prije ugradnje ostalih slojeva kolničke konstrukcije.

Opterećenje kotača vozila na kolničku konstrukciju jedan je od najvažnijih faktora koji određuje ponašanje kolničke konstrukcije tijekom njenog uporabnog vijeka. Kako bi se optimalno koristili resursi dostupni za izgradnju ceste [8, 9], potrebno je prikupiti podatke o svojstvima materijala koji će se koristiti, kao i o njihovoj interakciji [10-14].

Vennapusa i sur. [15] prikazali su rezultate eksperimentalnih ispitivanja tako što su usporedili rezultate mjerenja nosivosti kolnika upotrebom deflektometra s padajućim teretom (eng. *Falling Weight Deflectometer* - FWD), laganog deflektometra (eng. *Light Weight Deflectometer* - LWD), dinamičkog konusnog penetrometra (eng. *Dynamic Cone Penetrometer* - DCP) i statičkog penetracijskog pokusa (eng. *Cone Penetration Test* - CPT). Za određivanje nosivosti kolnika koriste se različiti deflektometri s padajućim teretom [16]. Tijekom izgradnje slojeva kolničke konstrukcije mogu se upotrebljavati uređaji poput laganih deflektometara kako bi se odredio deformacijski modul nevezanih slojeva [17]. Vrijednosti deformacijskog modula i gustoće posteljice znatno pridonose svojstvima ceste tijekom uporabnog vijeka. Chai i suradnici [18] su analizirali primjer u kojem je deflektometar s padajućim teretom primijenjen kako bi se procijenilo je li posteljica tijekom izvođenja radova postigla traženi deformacijski modul i gustoću. Metode mjerenja statičkog i dinamičkog progiba se primjenjuju kako bi se odredio deformacijski modul kolničke konstrukcije. Tijekom mjerenja statičkog progiba pojedini dijelovi kolničke konstrukcije postupno su izloženi opterećenju i rasterećenju, dok drugi dijelovi kolničke konstrukcije nisu opterećeni.

Osnovni pristup ocjenjivanju nosivosti kolničke konstrukcije zasniva se na nanošenju tlačnog opterećenja na površini kolnika koje, prema definiciji, odgovara utjecaju opterećenja kotača vozila. Nedostatak statičke metode jest taj što njenom primjenom, zasad nije moguće ocijeniti sposobnost kolnika da prenese dinamičke učinke koji nastaju tijekom stvarnog prometnog opterećenja. Dinamičke metode bolje simuliraju utjecaj sila koje djeluju na kolničku konstrukciju, budući da se opterećenje prenosi dok je vozilo u pokretu.

Cilj je ovog istraživanja usporediti statičke i dinamičke metode ispitivanja koje se primjenjuju za mjerenje nosivosti FBL sloja te utvrditi jesu li dinamičke metode ispitivanja učinkovitije i mogu

li zamijeniti statičke metode. U radu je uspostavljena korelacija između fizičkih svojstava FBL sloja i njegovog deformacijskog modula mjerenog statičkim i dinamičkim uređajima. Pomoću koeficijenta korekcije, određenih statističkom analizom, moguće je očitavanja dinamičkih uređaja preračunati u vrijednosti očitavanja statičkih uređaja.

2. Analiza statičkog i dinamičkog deformacijskog modula

Izrazi kojima je definirana međuovisnost dinamičkog i statičkog deformacijskog modula rijetko se primjenjuju u praksi. Najčešće se granične vrijednosti izražavaju zasebno za statičke (E_{v2}) odnosno dinamičke module (E_{vd}). Prema sadašnjim tehničkim uvjetima za izgradnju cesta u Litvi, vrijednosti deformacijskog modula nevezanih materijala određene su prema stupnju zbijenosti sloja kolničke konstrukcije [19]. Prema Bilodeau i Doréu [20, 21] prilikom ispitivanja FWD-om, dinamička sila F (N) koja se prenosi na površinu kolnika jednaka je potencijalu energije mase koja pada s određene visine h (m). Dinamička sila određuje se izrazom (1), prema [22]:

$$F = m \cdot h \cdot g \quad (1)$$

gdje "m" označava masu (kg), a "g" gravitacijsko ubrzanje (ms^{-2}). Ako je poznat promjer kružne ploče (a), naprezanje ispod ploče (σ_0) se određuje pomoću izraza (2):

$$\sigma_0 = \frac{F}{\pi a^2} \quad (2)$$

uz pretpostavku jednolike distribucije naprezanja. Za ispitivanja deflektometrom s padajućim teretom, površinski modul elastičnosti može se odrediti rješavanjem Boussinesqove jednadžbe, koristeći izmjereni progib površine kolničke konstrukcije u središtu krute kružne ploče, d_0 . Za polubeskonačni prostor, površinski modul elastičnosti E definiran je izrazom (3):

$$E = \frac{f \sigma_0 a (1 - \nu^2)}{d_0} \quad (3)$$

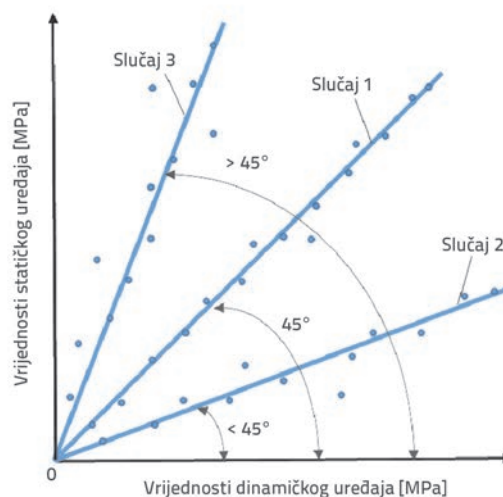
gdje ν označava Poissonov koeficijent, a f koeficijent korekcije koji ovisi o raspodjeli naprezanja (faktor raspodjele naprezanja). Budući da f iznosi 2 za jednoliku distribuciju naprezanja uslijed opterećenja kružnom pločom, Ullidtz [23] predlaže da teoretska raspodjela naprezanja ispod krute ploče koja leži na elastičnom mediju na rubovima ploče poprima beskonačnu vrijednost. Kavussi i sur. [24] ispitivali su mogućnost primjene prenosivog deflektometra s padajućim teretom (eng. *Portable Falling Weight Deflectometer* - PFWD) radi određivanja deformacijskog modula kolnika. Rezultati eksperimentalnih ispitivanja pokazuju da postoji dobra korelacija između rezultata ispitivanja prenosivim deflektometrom s padajućim teretom (PFWD) i standardnim deflektometrom s padajućim teretom (FWD).

Tompai [25] je proveo usporednu analizu statičke i dinamičke

metode. Ukratko je prikazana i opravdana mogućnost pouzdane konverzije između vrijednosti dvaju dinamičkih modula (E_{vd} , E_d) dobivene uporabom deflektometra s padajućim teretom i statičkog modula E_2 . Postavljanje graničnih dinamičkih vrijednosti kao mjere za ocjenu karakteristika sloja moglo bi otvoriti mogućnost provođenja kontrole kvalitete i procijenite nosivosti ispitivanog sloja kolničke konstrukcije, ne samo ispitivanjem statičnom kružnom pločom, što se pokazalo dugotrajnim i zahtjevnim, već i pomoću dinamičkih uređaja.

Prve rezultate istraživanja primjenom laganog deflektometra s padajućim teretom ZFG 01 objavila je Sulewska u [26]. Ona je utvrdila funkcionalnu ovisnost između dinamičkog i statičkog deformacijskog modula $E_D = f(I_s)$, $E_D = f(E_1)$, $E_D = f(E_2)$ (gdje E_D označava dinamički deformacijski modul tla, E_1 i E_2 su primarni i sekundarni moduli deformacija tla, I_s je vrijednost koja označava stupanj zbijenosti tla). U radu je zaključeno da se lagani deflektometar s padajućim teretom može koristiti kao kontrolna mjera za određivanje deformacijskog modula slojeva izgrađenih od pjeskovito-šljunkovitih materijala. U daljnjim istraživanjima Sulewska [27] je ispitivala stupanj zbijenosti nasipa primjenom laganog deflektometra s padajućim teretom. Cilj tog istraživanja bio je utvrditi korelaciju između deformacijskog modula, mjerenog deflektometrom ZFG 01, i stupnja zbijenosti tla.

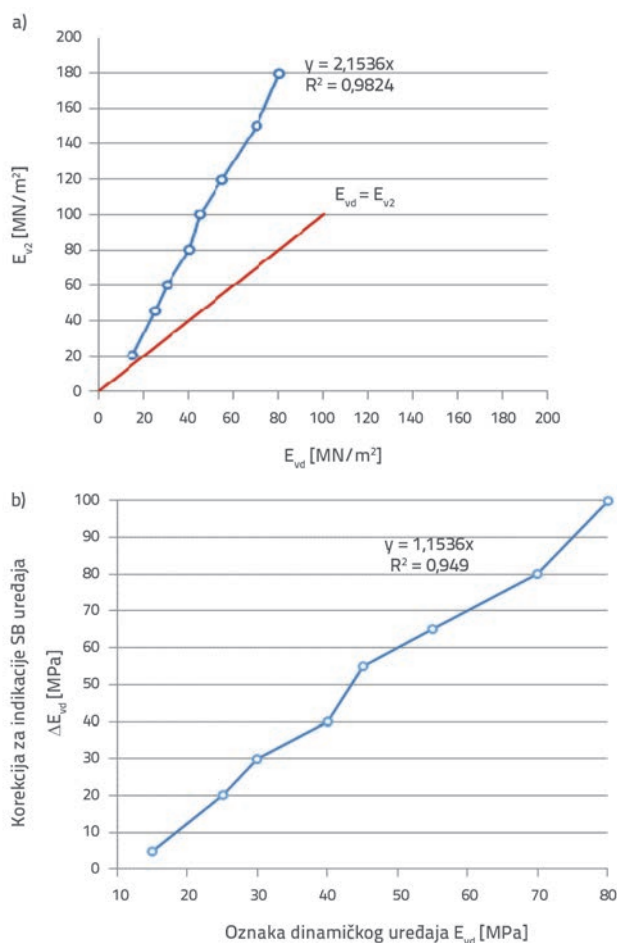
Prema autorima [28, 29], može se pretpostaviti da postoji određena međuzavisnost podataka dobivenih mjerenjem pomoću statičkih i dinamičkih uređaja. Slika 2. prikazuje teoretski model za usporedbu očitavanja pomoću statičkih i dinamičkih uređaja s obzirom na tri moguća slučaja. U prvom slučaju očitavanja sa statičkog i dinamičkog uređaja su ista, a regresijska linija je pod kutom od 45° . U drugom slučaju očitavanja dinamičkih uređaja imaju veće vrijednosti od onih dobivenih statičkim uređajem. U trećem slučaju očitavanja dinamičkih uređaja imaju niže vrijednosti od očitavanja statičkih uređaja.



Slika 2. Korelacijski modeli očitavanja statičkih i dinamičkih uređaja: (Slučaj 1: oba očitavanja su približno ista, Slučaj 2: očitavanja statičkog uređaja su niža od očitavanja dinamičkog uređaja, Slučaj 3: očitavanja statičkog uređaja imaju veće vrijednosti od očitavanja dinamičkog uređaja)

U Litvi, prosječne vrijednosti korekcije dinamičkog deformacijskog modula E_{vd} u odnosu na statički deformacijski modul E_{v2} propisane su u normi LST 1360.5:1995 [30].

Slika 3. prikazuje linearnu ovisnost između vrijednosti dinamičkog i statičkog deformacijskog modula. Što je veći dinamički deformacijski modul E_{vd} , veći je i statički deformacijski modul E_{v2} . Prema normama, dijagram odgovara trećoj liniji teorijskog modela (slika 2.). Dijagram na slici 3. ne prikazuje kojem dinamičkom uređaju odgovaraju dobivene vrijednosti deformacijskog modula. Vrlo je vjerojatno da između očitavanja različitih dinamičkih uređaja i statičkog uređaja postoje različite korelacije. Dinamičke metode mogu se uspješno primijeniti kao alternativa statičkim metodama.



Slika 3. Linearna ovisnost statičkog deformacijskog modula E_{v2} o dinamičkom deformacijskom modulu E_{vd} : a) apsolutne vrijednosti; b) dodane korekcijske vrijednosti

3. Eksperimentalno ispitivanje

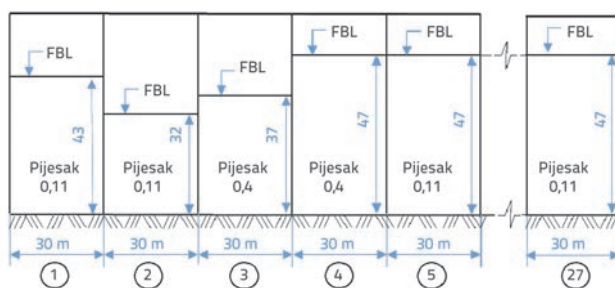
Kako bi se teoretski opravdala mogućnost primjene statičkih i dinamičkih metoda ispitivanja deformacijskog modula, te utvrdila kompatibilnost uređaja za mjerenje nosivosti FBL sloja, provedena su sljedeća eksperimentalna istraživanja:

- statička i dinamička ispitivanja deformacijskog modula mjerenjem na ispitnoj dionici
- laboratorijska ispitivanja fizičkih svojstava FBL sloja, a njihov utjecaj na deformacijske module određen je pomoću regresijskih jednačini
- određivanje međuovisnosti rezultata mjerenja statičkim i dinamičkim uređajima
- izračunane su prosječne vrijednosti koeficijenta korekcije za preračun očitavanja pojedinog dinamičkog uređaja na očitavanja statičkog uređaja.

Ispitana kolnička konstrukcija, duljine 710 metara, izgrađena je na otvorenom području u gradu Vilnius, u Litvi [31]. Predmetna dionica ceste nema horizontalnih niti vertikalnih krivina, a na cijeloj dužini prisutne su iste karakteristike odvodnje. Parametri poprečnog presjeka ispitne dionice odgovaraju cesti treće kategorije, a kolnička konstrukcija trećem razredu kolničkih konstrukcija prema [32]. Ispitna dionica građena je u nekoliko faza:

- Postojeći asfaltni kolnik je uklonjen do razine nevezanog nosivog sloja.
- Nevezani nosivi sloj je uklonjen do razine posteljice.
- Vrijednosti deformacijskih modula, veće od onih normama propisanih, postignute su tijekom rekonstrukcije posteljice i ugradnje FBL sloja [33]. Stupanj zbijenosti tla posteljice varirao je između 95-100 %, a vrijednost deformacijskog modula nije manji od 45 MPa. Vrijednosti stupnja zbijenosti FBL sloja variraju od 100 do 103 %. Propisana minimalna vrijednost deformacijskog modula za kolničke konstrukcije najvišeg razreda (SV) i razreda od prvog do četvrtoga iznosi 120 MPa, a za kolničke konstrukcije razreda petog i šestoga treba iznositi najmanje 100, odnosno 80 MPa.

Ispitna dionica duljine je 710 metara, a sastoji se od 26 poddionica (svaka duljine 30 metara), i jedne poddionice duljine 20 metara (slika 4.). Ispitna dionica predstavlja 5 različitih kolničkih konstrukcija (u ostalim kolničkim konstrukcijama postoje razlike u karakteristikama nosivih i asfaltnih slojeva, no u ovom radu se proučava samo FBL sloj).



Slika 4. Dio konstrukcijske sheme ispitne dionice ceste

Prilikom određivanja nosivosti FBL sloja na ispitnim dionicama upotrijebljeni su sljedeći uređaji: deflektometar s padajućim

Tablica 1. Usporedba normom propisanih i stvarnih fizičkih i mehaničkih svojstava posteljice i FBL sloja

Sloj kolničke konstrukcije	Vrijednost deformacijskog modula [MPa]		Koeficijent filtracije [m/danu]		Postotak prolaska kroz sito otvora 0,063 mm [%]		Postotak prolaska kroz sito otvora 2 mm [%]	
	norma	stvarno	norma	stvarno	norma	stvarno	norma	stvarno
FBL	120	113,4 - 167,1	≥ 2	4,0 - 15,0	≤ 7	0,6 - 1,1	28 - 80	73,3 - 82
Posteljica	> 45	> 100			-			

Tablica 2. Statistička svojstva deformacijskih modula

Vrijednosti deformacijskog modula	Uređaji za mjerenje deformacijskog modula			
	SB	LWD	ZORN	FWD
Maksimalna vrijednost [MPa]	167,1	139,3	50,8	236,7
Minimalna vrijednost [MPa]	113,4	49,3	28,5	151,0
Srednja vrijednost \bar{X} [MPa]	136,6	78,8	43,2	188,0
Standardna devijacija (SV) s [MPa]	15,4	16,2	5,3	22,8
Koeficijent varijacije (CoV) [%]	11,3	20,5	12,3	12,1

teretom Dynatest 8000 (FWD), lagani deflektometri s padajućim teretom Prima 100 (LWD) i ZORN ZSG 02 (ZORN) i statička ploča Strassentest (SB). Mjerenja pomoću svih uređaja provedena su u istim mjernim točkama (uz varijaciju od $\pm 0,5$ m) pri istim vremenskim uvjetima (prosječna temperatura zraka 18°C , bez oborina). Statički deformacijski modul E_{v2} dobiven je mjerenjem pomoću statičke ploče, a dinamički deformacijski moduli E_{vd} dobiveni su mjerenjem pomoću tri dinamička uređaja. Izmjereni deformacijski moduli posteljice ispitne dionice u svim su mjernim točkama veći od 45 MPa (tablica 1.). Na osnovi toga je zaključeno da je čvrstoća posteljice zadovoljavajuća, i vrlo vjerojatno neće imati utjecaj na deformaciju FBL sloja. Za izgradnju FBL sloja korišten je pijesak, frakcije 0/11 (na 25 poddionca) i frakcije 0/4 (na trećoj i četvrtoj poddionici). Debljina FBL sloja na prvoj poddionici je 43 cm, na drugoj 32 cm, na trećoj 37 cm, dok je od četvrte do dvadeset i sedme poddionice debljina sloja iznosila 47 cm.

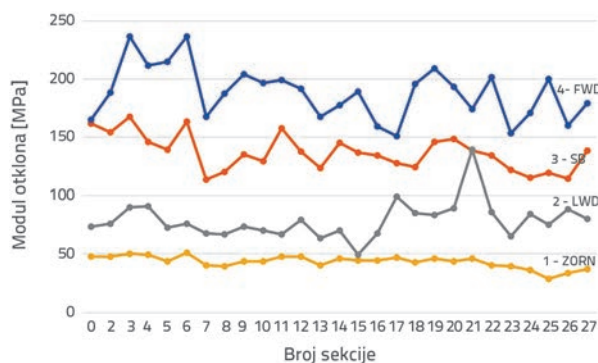
Vrijednosti koeficijenta filtracije FBL sloja na poddionicama 3 i 4 variraju od 4,0 do 4,3 m/danu (preporučena vrijednost je najmanje 2 m/danu). Na svim ostalim poddionicama ceste varira koeficijent filtracije varira između 11 i 15 m/danu. Postotak prolaska mješavina agregata FBL sloja kroz sito otvora 2 mm iznosio je između 73 i 82 % (preporučeni postotak iznosi između 28 i 80 %), a postotak prolaska kroz sito otvora 0,063 m varira između 0,6 do 1,1 % (preporučena vrijednost je do 7 %). Različite vrijednosti deformacijskog modula FBL sloja nisu samo posljedica upotrebe različitih uređaja već i različitih fizičkih svojstava: debljine sloja, koeficijenta filtracije i granulometrijskog sastava.

4. Rezultati i rasprava

4.1. Odnos između fizičkih svojstava i deformacijskog modula FBL sloja

Rezultati mjerenja deformacijskog modula FBL sloja su pokazali da se očitavanja statičkih i dinamičkih uređaja za 27 poddionica

ceste bitno razlikuju (slika 5.). Kako bi se mogli usporediti različiti skupovi podataka, izračunane su njihove aritmetičke sredine i mjere disperzije (standardna devijacija i koeficijent varijacije) (tablica 2.).



Slika 5. Deformacijski modul FBL sloja mjereno uređajima: 1 - ZORN, 2 - LWD, 3 - SB, 4 - FWD

Razlike između vrijednosti aritmetičkih sredina deformacijskog modula, koje su dobivene statičkim i dinamičkim uređajima (LWD, ZORN, FWD), izračunane su prema izrazu (4):

$$\Delta E = \frac{\bar{E}_{v2} - \bar{E}_{vd}}{\bar{E}_{v2}} \cdot 100 \% \quad (4)$$

gdje:

\bar{E}_{v2} - predstavlja aritmetičku sredinu deformacijskog modula dobivenog pomoću statičkog uređaja

\bar{E}_{vd} - označava aritmetičku sredinu deformacijskog modula dobivenog mjerenjem različitim dinamičkim uređajima.

Uređaji FWD, ZORN i SB pokazali su slične razine pouzdanosti prema vrijednostima koeficijenta varijacije, dok su najmanje pouzdani rezultati dobiveni mjerenjem laganim deflektometrom s padajućim teretom Prima 100 LWD.

Analiza rezultata pokazuje da se numeričke vrijednosti deformacijskih modula dobivene mjerenjem dinamičkim uređajima razlikuju od onih dobivenih mjerenjem statičkog uređaja. Vrijednosti mjerene deflektmetrom s padajućim teretom (E_{LWD}) približno su 42,3 % niže od vrijednosti deformacijskih modula (E_{SB}) mjerenih SB uređajem. Vrijednosti očitavanja uređajem ZORN (E_{ZORN}) su približno 68,4 % niže od očitavanja SB uređajem (E_{SB}), a vrijednosti očitavanja FWD-om (E_{FWD}) 37,6 % veće su od onih izmjerenih statičkim uređajem (SB). Analizom dobivenih rezultatima uočeno je da su najmanje prosječne vrijednosti i najmanja disperzija zabilježene tijekom mjerenja uređajem ZORN.

Utjecaj fizičkih svojstava FBL sloja (debljina sloja, koeficijent filtracije, postotak prolaska mješavine kroz sito promjera 0,063 mm i sito promjera 2 mm) na deformacijski modul određen je metodom korelacijsko - regresijske analize (slike 6. do 9.).

Deformacijski moduli mjereni statičkim uređajem i dinamičkim uređajem ZORN smanjuju se s povećanjem debljine FBL sloja (slike 6.a i 8.a). S druge strane, mjerenja uređajima LWD i FWD pokazuju suprotno, odnosno s povećanjem debljine FBL sloja povećavaju se vrijednosti deformacijskog modula (slike 7.a i 9.a).

Povećanjem koeficijenta filtracije smanjuju se vrijednosti deformacijskog modula (slike 6.b do 9.b). Porastom postotka prolaska kroz sito otvora 0,063 mm smanjuju se vrijednosti deformacijskog modula (slike 6.c do 9.c). Povećanjem postotka

prolaska kroz sito otvora 2 mm povećava se vrijednost deformacijskog modula (slike 6.d do 9.d).

Za procjenu statističke hipoteza da je vrijednost koeficijenta korelacije jednaka nuli, primijenjen je Studentov t-test, a vrijednost t je izračunana prema izrazu (5), prema [34]:

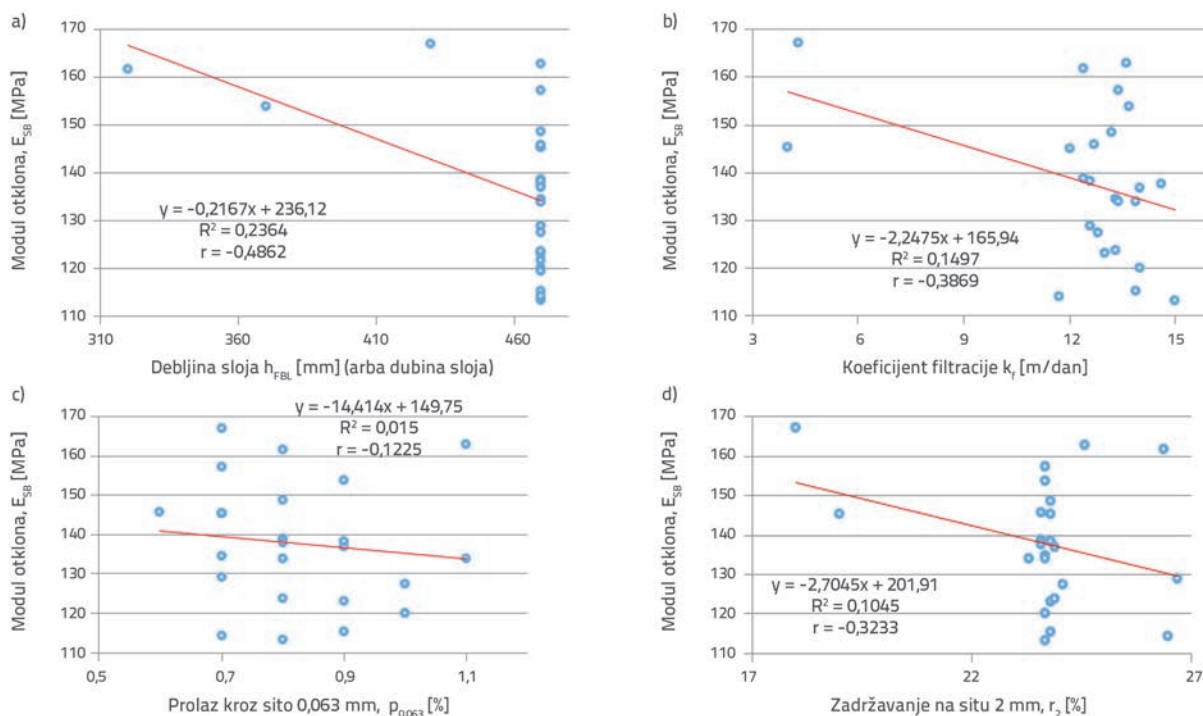
$$t_{t-\alpha, m-2} = r \cdot \sqrt{\frac{m-2}{1-r^2}} \quad (5)$$

gdje m označava broj parova ($m = 27$ - broj dionica), a r je koeficijent korelacije para.

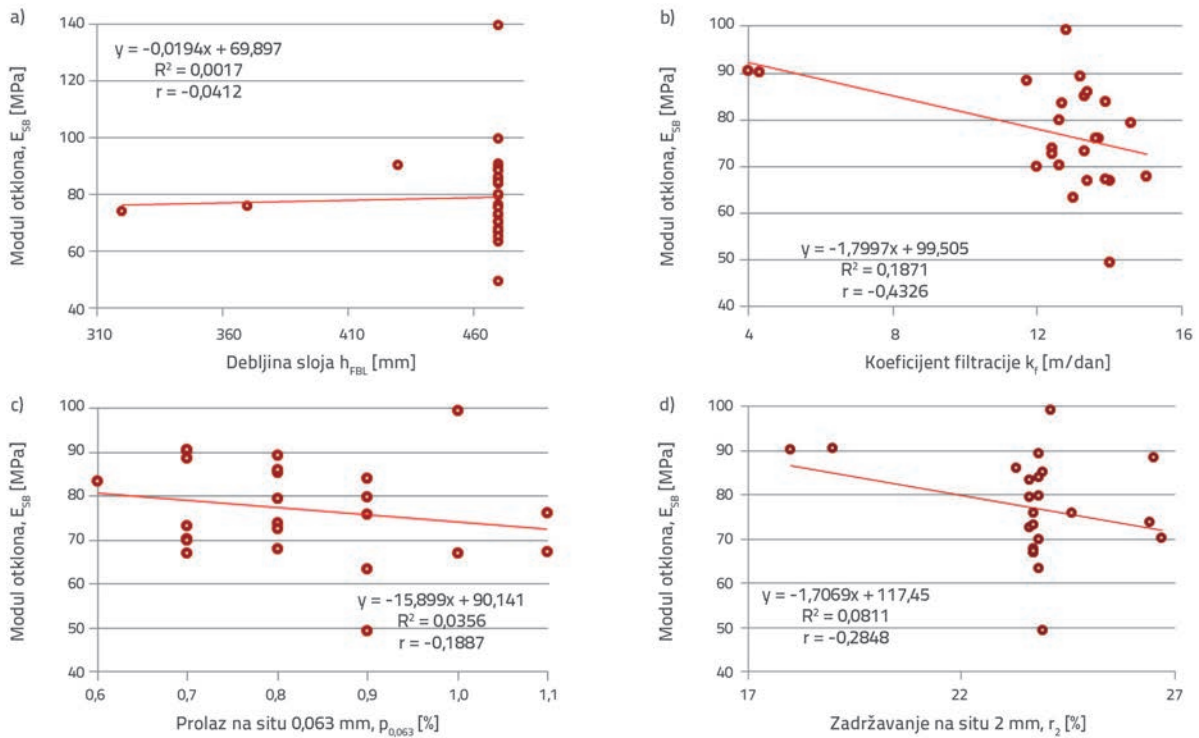
Najniža vrijednost odgovarajućeg koeficijenta korelacije para, r_{\min} , može se izračunati preslagivanjem izraza (5) na sljedeći način:

$$r_{\min} = \frac{t_{\alpha, v}}{\sqrt{m-2 + t_{\alpha, v}^2}} \quad (6)$$

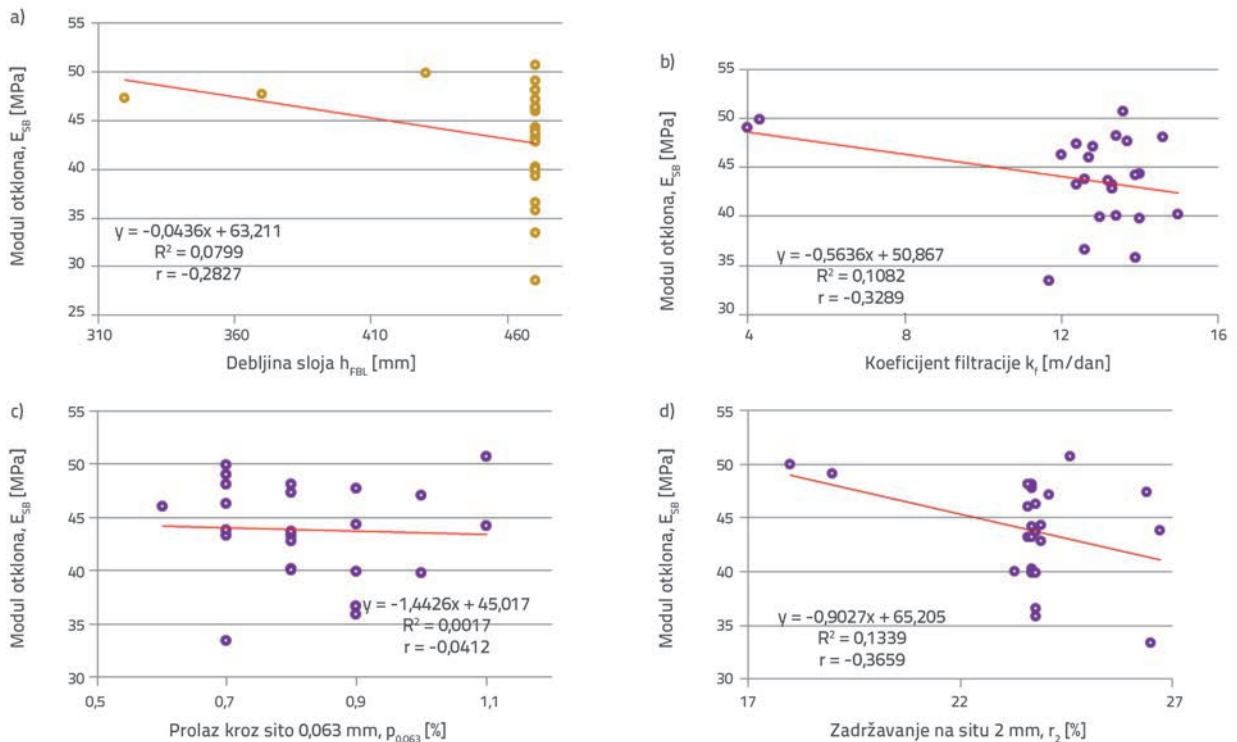
Na ispitnoj dionici ceste, koja se sastoji od 27 poddionca, za nivo signifikantnosti $\alpha = 0,05$ i $v = 27 - 1 = 26$ stupnjeva slobode, vrijednost Studentovog t-testa iznosi $t_{\alpha, v} = 2,06$. Na temelju minimalnog koeficijenta korelacije $r_{\min} = 0,381$, izračunanog pomoću izraza (6), može se zaključiti da su razmatrane vrijednosti u korelaciji.



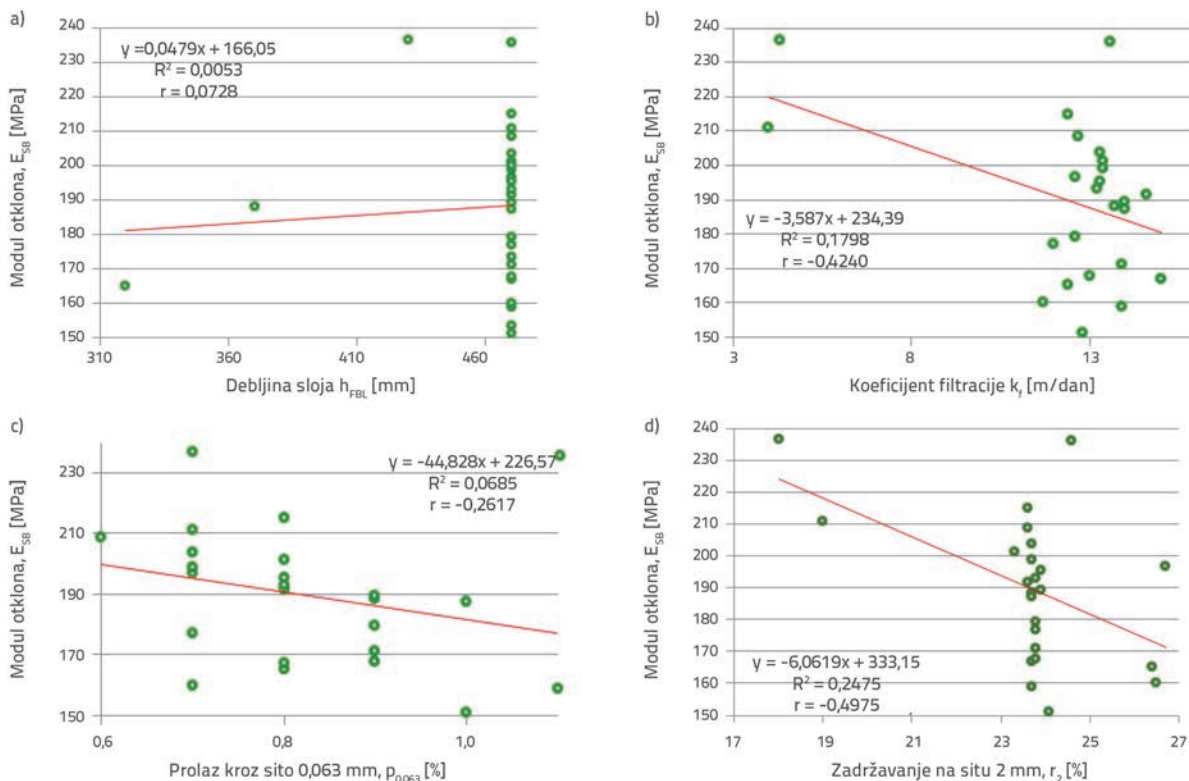
Slika 6. Utjecaj fizičkih svojstava FBL sloja na deformacijski modul E_{SgF} mjereno statičkim uređajem: a) debljina sloja; b) koeficijent filtracije; c) postotak prolaska kroz sito otvora 0,063 mm; d) postotak prolaska kroz sito otvora 2 mm



Slika 7. Utjecaj fizičkih svojstava FBL sloja na deformacijski modul E_{LWD} mjerjen dinamičkim uređajem Prima 100 LWD: a) debljina sloja; b) koeficijent filtracije; c) postotak prolaska kroz sito otvora 0,063 mm; d) postotak prolaska kroz sito otvora 2 mm



Slika 8. Utjecaj fizičkih svojstava FBL sloja na deformacijski modul E_{ZORN} mjerjen dinamičkim uređajem ZORN: a) debljina sloja; b) koeficijent filtracije; c) postotak prolaska kroz sito otvora 0,063 mm; d) postotak prolaska kroz sito otvora 2 mm



Slika 9. Utjecaj fizičkih svojstava FBL sloja na deformacijski modul E_{FWD} mjereno deflektometrom s padajućim teretom: a) debljina sloja, b) koeficijent filtracije, c) postotak prolaska kroz sito otvora 0.063 mm, d) postotak prolaska kroz sito otvora 2 mm

Tablica 3. Koeficijenti korelacije između deformacijskog modula, mjenjenog različitim uređajima i fizičkih svojstava FBL sloja

Uređaj	Koeficijent korelacije r fizičkih svojstava FBL sloja			
	h_{FBL}	k_f	$p_{0,063}$	r_2
SB	-0.486	-0.387	-0.123	0.323
LWD	0.041	-0.433	-0.189	0.285
ZORN	-0.283	-0.329	-0.041	0.366
FWD	0.073	-0.424	-0.262	0.498

Vrijednosti h_{FBL} i k_f (tablica 3.) pokazuju utjecaj debljine sloja i koeficijenta protoka na deformacijske module dobivene tijekom mjerenja statičkim uređajem (SB). Od razmatranih fizičkih svojstava jedino koeficijent protoka, k_f , je imao utjecaj na vrijednosti deformacijskog modula dobivene tijekom mjerenja uređajem Prima 100 LWD. Nije bilo nikakvog utjecaja fizičkih svojstava na vrijednosti deformacijskih modula dobivenih tijekom mjerenja uređajem ZORN. Na vrijednosti deformacijskog modula dobivenih tijekom mjerenja deflektometrom s padajućim teretom (FWD) utjecale su vrijednosti k_f i r_2 . Dobiveni podaci pokazuju da korelacija između deformacijskih modula mjenjenih različitim uređajima i fizičkih svojstava ispitne dionice nije snažna. Korelacija bi vjerojatno bila jača kada bi se fizička svojstva FBL sloja razmatrala u većim intervalima.

4.2. Komparativna analiza deformacijskih modula mjenjenih različitim uređajima

Međusobni utjecaj očitavanja statičkih i dinamičkih uređaja određen je primjenom regresijskog modela. Primijenjeni regresijski model se temelji na sljedećoj pretpostavci: ako su vrijednosti očitavanja statičkog uređaja jednake nuli, onda su i vrijednosti očitavanja dinamičkog uređaja jednake nuli. Linearna jednadžba dana je izrazom (7):

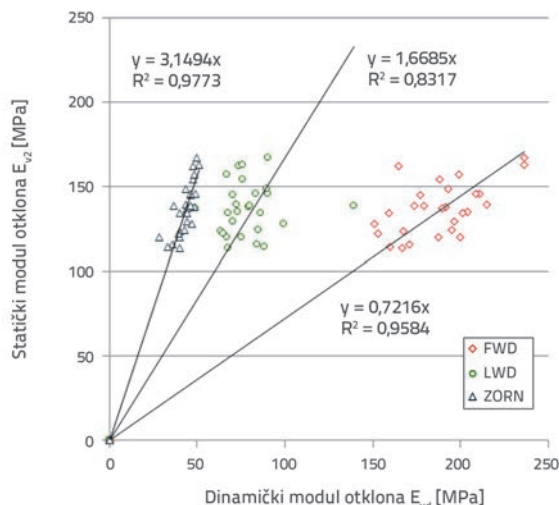
$$y = a_0 \cdot x \tag{7}$$

gdje je a_0 parametar regresijske jednadžbe, a x nezavisna varijabla, tj. očitavanje dinamičkog uređaja.

Nakon obrade eksperimentalnih podataka dobivene su regresijske jednadžbe i koeficijenti determinacije R^2 (slika 10.). Na osnovi dobivenih vrijednosti koeficijenta determinacije može se zaključiti da između očitavanja statičkog i dinamičkih uređaja postoji čvrsta veza. Dobivene vrijednosti koeficijenta korekcije za različite uređaje su konstantne. Kako bi se odredile vrijednosti statičkog deformacijskog modula, nužna je primjena koeficijenata korekcije (tablica 4.).

Tablica 4. Vrijednosti koeficijenata korekcije

Statički deformacijski modul	Koeficijent korekcije		
	FWD	LWD	ZORN
E_{SB}	$0,72 \cdot E_{FWD}$	$1,67 \cdot E_{LWD}$	$3,15 \cdot E_{ZORN}$

Slika 10. Regresijski modeli za izračun statičkog deformacijskog modula E_{vz} na osnovi vrijednosti deformacijskog modula E_{vd} dobivenog mjerenjem uređajima FWD, LWD i ZORN

Vrijednosti očitavanja statičkog uređaja se određuju množenjem vrijednosti dobivenih dinamičkim uređajima i koeficijenata korekcije. Vrijednosti koeficijenata korekcije dobivene su na temelju regresijskog modela za pojedini dinamički uređaj. Da bi se dobila vrijednost deformacijskog modula statičkog uređaja, potrebno je pomnožiti vrijednost E_{FWD} s 0,72, vrijednost E_{LWD} s 1,67, a vrijednost E_{ZORN} s 3,15 (tablica 4.). Dobivene vrijednosti koeficijenta korekcije su različite od onih prikazanih na slici 3.a.

Kako bi se deformacijski modul mjereno bilo kojim dinamičkim uređajem (LWD, ZORN, FWD) mogao usporediti s vrijednostima koje su propisane normom, potrebno je dinamička očitavanja preračunati u statička očitavanja. Primjenom, u ovom radu predloženih koeficijenata korekcije, moguće je dobiti očitavanja

statičkog uređaja na temelju očitavanja dinamičkih uređaja i odrediti nosivost FBL sloja.

5. Zaključak

Prosječne vrijednosti deformacijskog modula FBL sloja, mjerene različitim vrstama uređaja na ispitnoj dionici ceste s ukupno 27 poddionica, međusobno se bitno razlikuju.

Prosječne vrijednosti deformacijskog modula mjenog uređajem Prima 100 LWD i ZORN niže su za 42,3 % odnosno 68,4 % od vrijednosti izmjerenih statičkim uređajem (SB). Vrijednosti dobivene deflektometrom s padajućim teretom (FWD) bile su 37,6 % veće od prosječnih vrijednosti dobivenih mjerenjem statičkim uređajem (SB). Vrijednosti standardne devijacije su pokazale da su najstabilnija očitavanja (najmanja disperzija) postignuta uređajem ZORN: standardna devijacija iznosila je 5,3 MPa. Očitavanja dobivena uređajima SB i LWD bila su manje stabilna, a vrijednosti standardne devijacije iznosile su: SD = 15,4 MPa, SD = 16,2 MPa. Vrijednost standardne devijacije mjerene uređajem FWD iznosila je 22,8 MPa uz najveću varijaciju. Koeficijent varijacije (CoV) se povećavao sljedećim redoslijedom: statički uređaj (CoV = 11,3 %), FWD (CoV = 12,1 %), ZORN (CoV = 12,3 %), LWD (CoV = 20,5 %).

Utjecaj fizičkih svojstava FBL sloja na deformacijski modul određen je korelacijsko - regresijskom analizom. Debljina sloja utječe samo na deformacijski modul mjereno statičkim uređajem. Deformacijski modul mjereno pomoću uređaja SB, LWD i FWD izložen je utjecaju koeficijenta filtracije. Postotak prolaska kroz sito otvora 0,063 mm nije imao utjecaj na vrijednosti deformacijskog modula, dok je postotak prolaska kroz sito otvora 2 mm imao utjecaj na vrijednosti deformacijskog modula mjereno deflektometrom s padajućim teretom (FWD-om). Korekcijski koeficijenti za izračun statičkog deformacijskog modula na temelju vrijednosti dobivenih mjerenjem pomoću različitih dinamičkih uređaja dobiveni su regresijskim modelom. Da bi se dobila vrijednost statičkog deformacijskog modula određenog uređajem SB, potrebno je vrijednosti deformacijskog modula E_{FWD} pomnožiti s 0,72, E_{LWD} s 1,67 i E_{ZORN} s 3,15. U slučaju da FBL sloj ima drugačija fizička svojstva, potrebno je, na odgovarajući način, korigirati navedene vrijednosti koeficijenata korekcije.

LITERATURA

- [1] Zhang, X., Presler, W., Li, L., Jones, D., Odgers, B.: Use of wicking fabric to help prevent Frost boils in Alaskan pavements, Journal of Materials in Civil Engineering, 26 (2014) 4, pp. 728-740, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000828](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000828)
- [2] Juknevičiūtė-Žilinskienė, L., Laurinavičius, A.: Evaluation of possibilities for the climatic distribution of regions from the point of view of road construction, The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 10 (2015) 3, pp. 262-268, <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2015.33>
- [3] Remišova, E., Decky, M., Podolka, L., Kovač, M., Vondračková, T., Bartuška, L.: Frost Index from Aspect of Design of Pavement Construction in Slovakia, Procedia Earth and Planetary Science, 15 (2015), pp. 3-10, <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.08.002>
- [4] Riehma, M., Gustavsson, T., Bogrenb, J., Janssona, P.: Ice Formation Detection on Road Surfaces Using Infrared Thermometry, Cold Regions Science and Technology, 83 (2012) 34, pp. 71-76, <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.06.004>

- [5] Monnet, J., Boutonnier, L.: Calibration of an unsaturated air-water-soil model, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 12 (2012), pp. 493-499, <https://doi.org/10.1016/j.acme.2012.07.001>
- [6] Vaičiukynas, V., Vaikasas, S., Sivilevičius, H., Grinys, A.: The impact of agriculture drainage reconstruction on ground water recession close to the subgrade, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 10 (2015) 3, pp. 230-238, <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2015.29>
- [7] Pospisil, K., Zednik, P., Stryk, J.: Relationship between deformation moduli obtained using light falling weight deflectometer and static plate test on various types of soil, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 9 (2014) 4, pp. 251-259, <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2014.31>
- [8] Mateos, A., Soares, J.B.: Characterization of stiffness of unbound materials for pavement design: do we follow the right approach?, *Journal of Transportation Engineering*, 140 (2014) 4, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000645](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000645)
- [9] Zhou, C., Huang, B., Drumm, E., Shu, X., Dong, Q., Udeh, S.: Soil resilient modulus regressed from physical properties and influence of seasonal variation on asphalt pavement performance, *Journal of Transportation Engineering*, 141 (2015) 1, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000727](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000727)
- [10] Abu-Farsakh, M.Y., Mehrotra, A., Mohammad, L., Gaspard, K.: Incorporating the effect of moisture variation on resilient modulus for unaturated fine-grained subgrade soils, *Transport Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2510 (2015), pp. 44-55, <https://doi.org/10.3141/2510-06>
- [11] Bazi, G., Briggs, R., Saboundjian, S., Ullidtz, P.: Seasonal effects on a low-volume road flexible pavement, *Transport Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, 2510 (2015), pp. 81-89, <https://doi.org/10.3141/2510-010>
- [12] Rajaei, P., Baladi, G.Y.: Frost depth general prediction model, *Transport Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2510 (2015), pp. 74-80, <https://doi.org/10.3141/2510-09>
- [13] Salour, F., Erlingsson, S., Zapata, C.E.: Model for seasonal variation of resilient modulus in silty sand subgrade soil, *Transport Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2510 (2015), pp. 65-73, <https://doi.org/10.3141/2510-08>
- [14] Titi, H.H., English, R., Faheem, A.: Resilient modulus of fine - grained soils for mechanistic - empirical pavement design, *Transport Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2510 (2015), pp. 24-35, <https://doi.org/10.3141/2510-04>
- [15] Vennapusa, P.K.R., White, D.J., Siekmeier, J., Embacher, R.A.: In situ mechanistic characterisations of granular pavement foundation layers, *International Journal of Pavement Engineering*, 13(1), pp. 52-67, 2012. <https://doi.org/10.1080/10298436.2011.564281>
- [16] Nam, B.H., Stokoe, K.H.: Improved Rolling Dynamic Deflectometer for continuous pavement deflection measurements, *Journal of Testing and Evaluation*, 42 (2014) 2, pp. 312-327, <https://doi.org/10.1520/JTE20120262>
- [17] Elhakim, A.F., Elbaz, K., Amer, M.I.: The use of light weight deflectometer for in situ evaluation of sand degree of compaction, *HBRC Journal*, 10 (2014), pp. 298-307, <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2013.12.003>
- [18] Chai, G.W., van Staden, R., Loo, Y.C.: In situ assessment of pavement subgrade using Falling Weight Deflectometer, *Journal of Testing and Evaluation*, 43 (2015) 1, pp. 140-148, <https://doi.org/10.1520/JTE20130149>. ISSN 0090-3973
- [19] Subgrade installation ST 188710638.06: 2004, The rules for construction, the Lithuanian Road Administration, Vilnius, 2004.
- [20] Bilodeau, J.P., Doré, G.: Direct estimation of vertical strain at the top of the subgrade soil from interpretation of falling weight deflectometer deflection basins, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41 (2014) 5, pp. 403-408, <https://doi.org/10.1139/cjce-2013-0128>
- [21] Bilodeau, J.P., Doré, G.: Stress distribution experienced under a portable light-weight deflectometer loading plate, *International Journal of Pavement Engineering*, 15 (2014) 6, pp. 564-575, <https://doi.org/10.1080/10298436.2013.772612>
- [22] Kim, J.R., Kang, H.B., Kim, D., Park, D.S., Kim, W. J.: Evaluation of in situ modulus of compacted subgrades using portable falling weight deflectometer and plate-bearing load test, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19 (2007) 6, pp. 492-499, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:6\(492\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:6(492))
- [23] Ullidtz, P.: *Modeling Flexible Pavement Response and Performance*, Denmark, 1998, 205 p.
- [24] Kavussi, A., Rafiei, K., Yasrobi, S.: Evaluation of PFWD as potential quality control tool of pavement layers, *Journal of Civil Engineering and Management*, 16 (2010) 1, pp. 123-129, <https://doi.org/10.3846/jcem.2010.11>
- [25] Tompai, Z.: Conversion between static and dynamic load bearing capacity moduli and introduction of dynamic Target Values, *Civil Engineering*, 52 (2008) 2, pp. 97-102, <https://doi.org/10.3311/pp.ci.2008-2.06>
- [26] Sulewska, M.J.: The application of the modern method of embankment compaction control, *Journal of Civil Engineering and Management*, X, pp. 45-50, 2004. ISSN 1392-3730
- [27] Sulewska, M.J.: The control of soil compaction degree by means of LFWD, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 7 (2012) 1, pp. 36-41, <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2012.05>
- [28] Bertulienė, L.: Assessment, research and use of methods for determining the strength of base courses of road pavement structure, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 7 (2012) 3, pp. 228-236, <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2012.30>
- [29] Janulevičius, J., Čygas, D., Giniotis, V., Aavik, A.: Assumptions to road pavement testing by non-destructive means, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 8 (2013) 4, pp. 227-231, <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2013.29>
- [30] Soils for road construction. Testing methods. Plate load test, LST 1360.5:1995, Lithuanian Standardization Department, Vilnius, 1995.
- [31] Čygas, D., Laurinavičius, A., Paliukaitė, M., Motiejūnas, A., Žiliūtė, L., Vaitkus, A.: Monitoring the mechanical and structural behavior of the pavement structure using electronic sensors, *Computer - Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 30 (2015) 4, pp. 317-328, <https://doi.org/10.1111/mice.12104>
- [32] Standardized design rules for the road pavement structures KPT SDK 07, The Lithuanian Road Administration, Vilnius, 2007.
- [33] Road pavement layers without binders installation rules JT SBR 07, The Lithuanian Road Administration, Vilnius, 2007.
- [34] Podvezko, V., Sivilevičius, H.: The use of AHP and rank correlation methods for determining the significance of the interaction between the elements of a transport system having a strong influence on traffic safety, *Transport*, 28 (2013) 4, pp. 389-403, <https://doi.org/10.3846/16484142.2013.86>