

Simo TOŠOVIĆ, dipl.inž.geol.¹

Mr. Vladeta VUJANIĆ, dipl.inž.geol.¹

SAVREMENA KONTROLA ZBIJANJA MATERIJALA PRI IZGRADNJI PUTEVA

0352-2733, 39, (2006),,p.584-621

UDK: 624.13

625.7.084/085

STRUČNI ČLANAK

Rezime

U radu se daje prikaz i uporedna analiza klasičnih i savremenih metoda kontrole zbijanja fino-zrnih i krupno-zrnih materijala. Ukazuje se na važnost optimizacije i načina kontrole zbijanja, kao i na nedostatke „tradicionalnih“ načina ispitivanja. Takođe se daje poseban osvrt na savremene metode kontrole zbijanja: kontinualnu kontrolu gradnje (CCC- Continuous Compaction Control), ispitivanja uređajem sa padajućim tegom i „Geo Gauge“ - uređaj za merenje krutosti i Young-ovog modula.

¹ Institut za puteve, Zavod za geotehniku, Beograd, Kumodraška 257, tel. 2465-321, e-mail: geotech@ptt.yu

The Highway Institute, Department for geotechnics, 257 Kumodraška St., 11000 Belgrade, Serbia,

Phone No.: +381-11-2465-321, e-mail: geotech@ptt.yu

Rad primljen oktobra 2006.god.

Posebno se ističe značaj uvođenja u primenu ovih metoda kod nas, jer naša stručna javnost do sada, sa njima nije dovoljno upoznata. Institut za puteve, je zadnjih godina uložio velike napore u razradi i primeni nekih od ovih metoda, a neke su u fazi razrade. Razrađene metode se iznose u ovom radu.

Ključne reči: savremene metode zbijanja, materijali, kontinualna kontrola

Simo TOŠOVIĆ, B.Sc En.(Geology)

Mr. Vladeta VUJANIĆ, B.Sc En.(Geology)

MODERN COMPACTION IN ROAD COSTRUCTION

Abstract

An outline and contrastive analysis of classical and modern methods of coarse - grained and fine – grained materials compaction control are presented in this paper. The significance of optimization and compaction control models, as well as deficiencies of “traditional” modes of examination are pointed out. A special review on modern compaction control and continuous compaction control (CCC), the testing with device with falling weight and “Geo Gauge” - device for stiffnes and Young module measuring are also shown.

The importance of introduction in application of this methods with us is paricularly emphasized, since our professionals are not sufficiently familiar with them. In the recent years, The Highway Institute has put great efforts in elaboration and application of some of these methods, and some of them are still being elaborated. The elaborated methods are presented in this paper.

Key words: modern compaction control, materials, continuous control

1. UVOD

Opšte je poznato da zbijanje ugrađenog materijala ima vrlo veliki uticaj na trajnost izgrađenih objekata i na troškove njihovog održavanja ili velikih sanacija, ukoliko objekat nije izveden po propisanim uslovima. Od velikog je značaja što efikasnije kontrolisanje samog procesa i postizanje optimalne zbijenosti.

S obzirom na sve strožije zahteve koji se postavljaju pri izgradnji inženjerskih konstrukcija i nasipa, želja nam je bila da se ukaže na značaj i prednosti kontinualnog praćenja postupka zbijanja, čime bi se izbegla heterogenost pri zbijanju slojeva i nepouzdanost klasičnih metoda ispitivanja – mestimičnom proverom kvaliteta.

U radu je korišćena terminologija iz najnovijeg standarda «Geomehanička ispitivanja», TERMINI, DEFINICIJE, OZNAKE I JEDINICE, JUS.U.B0.100. iz 1998. god.

Ranije korišćeni termini: vezani, mešani i nevezani materijali zamenjeni su sa: sitnozrni, «mešani» - mešavina sitnozrnih i krupnozrnih i krupnozrni materijali.

2. OPTIMALNO ZBIJANJE SITNOZRNIH, KRUPNOZRNIH I «MEŠANIH» MATERIJALA

Tehnologija optimalnog zbijanja materijala prošla je dug razvoj u dvadestom veku, počev od definisanja Proktorovih parametara (**optimalne vlažnosti i maksimalne zapreminske mase**), do razvoja sredstava za zbijanje i metoda za kontrolu procesa postignute zbijenosti na terenu.

Sam proces postizanja maksimalne gustine na terenu, proces zbijanja, znatno se razlikuje kod sitnozrnih, krupnozrnih i «mešanih» materijala.

2.1. Sitnozrni materijali

Kontrola procesa **zbijanja sitnozrnih materijala** vrši se preko parametara dobijenih Proktorovim opitom – maksimalne zapreminske težine i optimalne vlažnosti. Rezultati Proktorovog opita interpretiraju se dijagramom

na čiju se apscisu nanosi vlažnost w , a na ordinatu zapreminska težina u suvom stanju γ_d . Međutim, fundamentalni parametar za proces zbijanja je procenat vazduha, tj. procenat šupljina a . Ovaj parametar direktno je povezan sa stepenom zasićenja i poroznošću.

Procenat šupljina je dat jednačinom:

$$a = 1 - (\gamma_d / \gamma_s) - w (\gamma_d / \gamma_w)$$

gde je:

γ_d – zapreminska težina u suvom stanju (kN/m^3),

γ_s – zapreminska težina čvrstih čestica (kN/m^3),

w – vlažnost materijala (%).

Ukoliko stavimo, da je $a = 0$, jednačina postaje:

$$\gamma_d = \gamma_s / (1 + w \gamma_s),$$

što predstavlja liniju zasićena pri stepenu zasićenja $S_r = 1$.

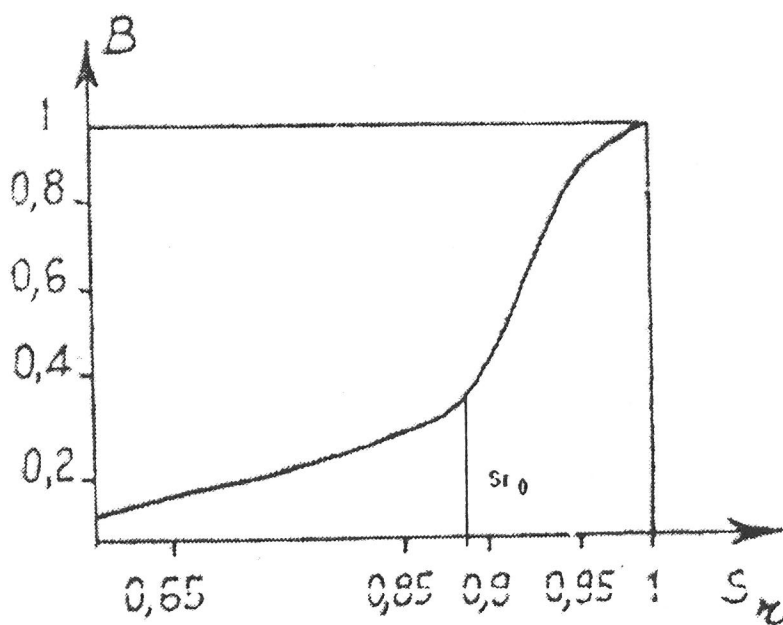
Kod zbijanja sitnozrnog materijala možemo razlikovati dva slučaja:

- I. kod materijala propustljivih za vazduh i vodu, naprezanja koja stvara uređaj za zbijanje pretvaraju se u intergranularne napone i materijal je pogodan za zbijanje.

II. kod materijala koji su nepropustljivi za vazduh i vodu (ova dva parametra uvek idu zajedno) važnu ulogu ima stepen zasićenja S_r . Ako je $S_r < S_{r0}$, dolazi do promene Skemptonovog parametra B , slika 1. Procenat šupljina ostaje veći od vrednosti a_o , koji obično iznosi 3 - 5 %. Naprezanja koja izaziva uređaj za zbijanje biće jedino intergranularna i **vezani materijal će se zbijati**.

Ukoliko se procenat šupljina približi vrednosti a_o , ukupna naprezanja koja stvara uređaj za zbijanje usled naglog rasta Skemptonovog parametra B , stvoriće u sitnozrnornom materijalu jak unutrašnji pritisak.

To u sitnozrnornom materijalu dovodi do **mehaničke nestabilnosti** i efekta «gumenog jastuka».



Slika 1. – Promena Skemptonovog parametra B u funkciji od zasićenja

2.2. Krupnozrni materijali

Kontrola procesa **zbijanja krupnozrnih materijala**, kao i kod sitnozrnih, vrši se preko parametara dobijenih Proktorovim opitom – max zapreminske težine u suvom stanju i optimalne vlažnosti. Za zbijanje krupnozrnih materijala je od velike važnosti koeficijent neravnomernosti C_u i koeficijent zakrivljenosti C_z . Koeficijent neravnomernosti za dobro granulisan materijal treba da bude $15 < C_u < 50$, a koeficijent zakrivljenosti $1 < C_z < 4$.

Koeficijent neravnomernosti i koeficijent zakrivljenosti su bitni parametri kod granulometrijskog sastava i treba da obezbede kontinualnost granulometrijskog sastava, odnosno zastupljenost svih frakcija. Visok koeficijent zakrivljenosti, ukazuje na nedostatak određene frakcije. Takav materijal i pored postignute zapreminske mase po Proktorovom opitu, **sklon je urušavaju strukture pod dinamičkim optrećenjem.**

Nažalost, kod nas se u tehničkim specifikacijama izvođenja radova, propisuju **granične krive** u okviru kojih treba da se nađe granulometrijski sastav materijala. Vrlo retko se propisuje **koeficijent zakrivljenosti**, tako da se u konstrukciju puta vrlo često ugrađuju materijali diskontinualnog granulometrijskog sastava.

2.3. Mešavina sitnozrnih i krupnozrnih materijala

Ovi materijali obuhvataju materijale koji sadrže određeni procenat sitnozrne frakcije u krupnozrnom materijalu. Proktorova kriva ima veliku osetljivost na promenu vlažnosti pre svega sitnozrnog «matriksa». Ukoliko se ovi materijali sabijaju na suvoj grani Proktorove krive (vlažnost manja od optimalne), imaju veliki procenat šupljina iako se pri kompaktaciji ponašaju stabilno. Promenom vlažnosti u konstrukciji – «ulaskom» vode, dolazi do velikih sleganja. Neznatno povišena vlažnost iznad optimalne vlažnosti, dovodi materijal u zonu mehaničke nestabilnosti. Krupnozrni materijal gubi funkciju nosivosti i dominantnu nosivost preuzima sitnozrni materijal.

3. KONTROLA PRI ZBIJANJU MATERIJALA

Metode kontrole zbijenosti slojeva u konstrukciji puta mogu se podeliti na:

- **klasične metode**, koje se često nazivaju «tačkastim» metodama ispitivanja;
- **savremene metode**, kojima se teži dobijanje predstave o kvalitetu zbijenosti i nosivosti kontinualno u punoj površini puta.

3.1. Klasične metode kontrole

Klasična kontrola zbijanja materijala uslovljena je vrstom materijala, debljinom slojeva za zbijanje i može se u osnovi podeliti na dve vrste metoda, odnosno postupaka:

- **zapreminsko ispitivanje gustine zbijenog materijala** i određivanje stepena zbijenosti (R_D) u odnosu na maksimalnu zapreminsku masu, određenu Proktor-ovim opitom; i
- **ispitivanje deformabilno - nosivih karakteristika**, koja obuhvata određivanje modula deformabilnosti, opitom statički opterećenom pločom različitog prečnika.

3.1.1. Zapreminsko ispitivanje gustine zbijenog materijala

Metoda se primenjuje pri kontroli zbijanja sitnozrnih i krupnozrnih materijala, pri čemu su najzastupljeniji načini ispitivanja:

- **za sitnozrne materijale:** metoda cilindra poznate zapremine i kontrola nuklearnim aparatom;
- **za krupnozrni materijale:** metoda kalibrisanog peska, metoda balona i kontrola nuklearnim aparatom; i

- za mešavinu sitnozrnih i krupnozrnih materijala: ne preporučuje se kontrola zapreminskim ispitivanjem.

Ove metode su ograničene na debljinu ugrađenog sloja. Rezultati o postignutoj gustini se dobijaju u prvih 20 cm. Dubinsko ispitivanje ovim metodama je složeno i često neprecizno.

Kontrola nuklearnim aparatom je već duže u primeni, pri kontroli gustine i vlažnosti sitnozrnih i krupnozrnih materijala. Zbog brzine u pogledu dobijanja rezultata ova metoda je izuzetno pogodna i ekonomična, prilikom kontrole zbijanja.

Preciznost aparata je zadovoljavajuća. Rukovanje aparatom, zahteva obučeno osoblje i složenu proceduru zaštite od radioaktivnog zračenja.

Metoda se ne preporučuje, pri kontroli stabilizacije sa penastim bitumenom po dubokom hladnom postupku, jer daje jako neprecizne podatke.

3.1.2. Ispitivanje deformabilno nosivih karakteristika

Ispitivanje deformabilno – nosivih karakteristika materijala se najčešće u klasičnoj kontroli gradnje, vrši statički opterećenom pločom različitog prečnika. Moduli deformacije se sračunavaju po **Boussinesqu**-voj formuli za sve metode koje koriste opit pločom, a menjaju se samo

koeficijenti. U opštem slučaju modul deformabilnosti se sračunava **po formuli**:

$$E = 1,57 \cdot ((p \cdot a \cdot (1-v^2))/s)$$

gde je:

E – modul deformacije (MPa),

p – pritisak na ploči (MPa),

a – poluprečnik ploče (mm),

s – deformacija (mm), i

v – Poasonov koeficijent

Ukoliko se usvoji da je $(1-v^2)$ približno jednak 1, **Poasonov koeficijent** $v = 0,2 - 0,3$, dobija se formula:

$$E = 1,57 \cdot (p \cdot a) / s$$

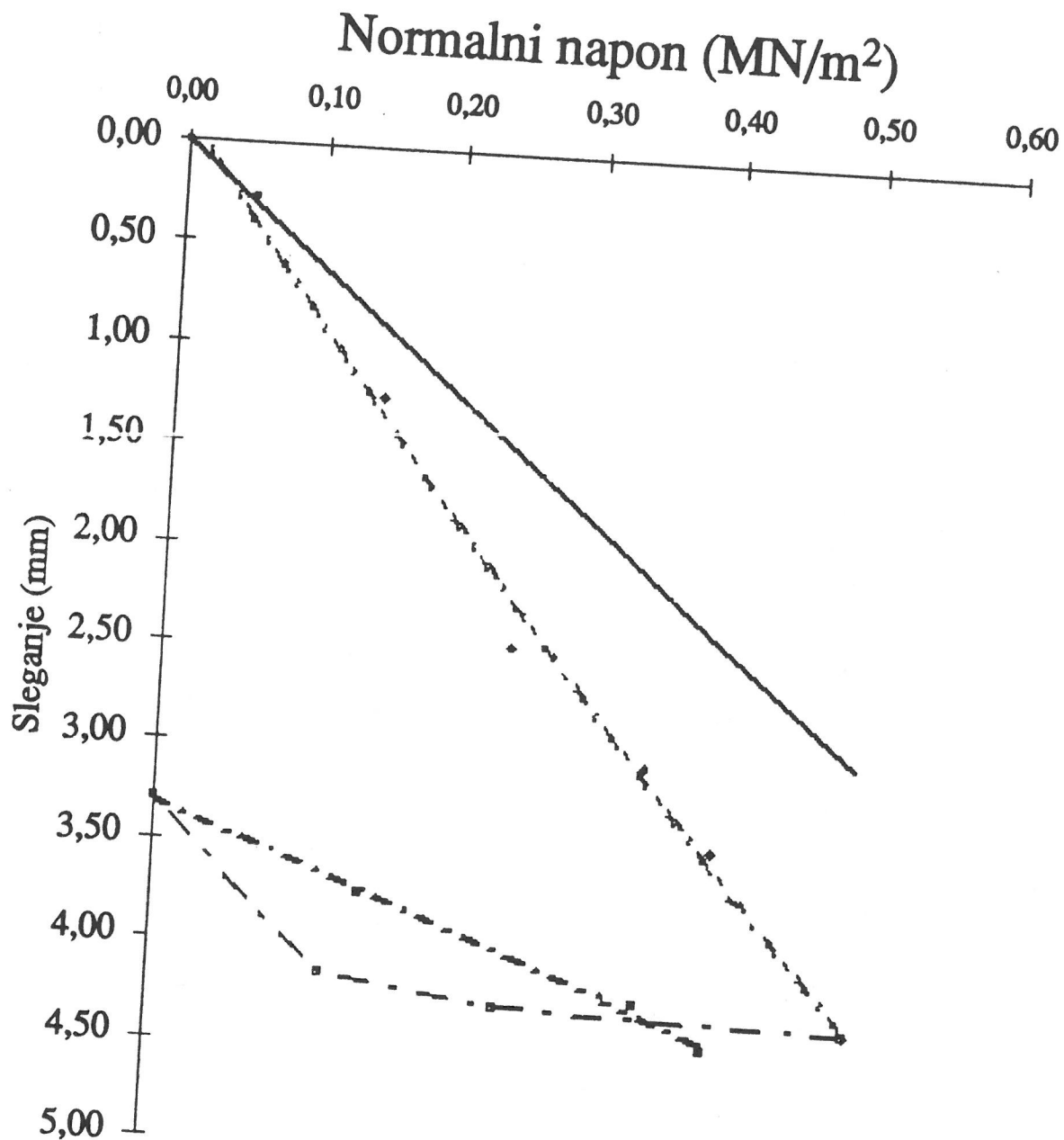
Najčešće korišćeni moduli deformacije su: **modul stišljivosti po švajcarskoj metodi** i **moduli deformacije E_{v_1} i E_{v_2} po nemačkoj metodi**.

Na slici 2, prikazana su ispitivanja na gornjem nosećem sloju drobljenog agregata ova dva modula deformacije, sa proračunom. Zahtevani modul stišljivosti $M_s = 50$ MPa za prečnik ploče $\varnothing 300$ mm, prikazan je pravom linijom na dijagramu **napon – deformacija**. Sa dijagrama se vidi, da se pri prvom ciklusu opterećenja deformacija nalazi ispod prave linije, za propisani modul od 50 MPa. Ovo bi nam, na prvi pogled ukazalo da modul stišljivosti

proračunat po švajcarskoj metodi ima na svim opterećenjima manju vrednost od propisanog modula.

Međutim, modul stišljivosti na opterećenju 0,25 – 0,35 MPa, daje nam vrednost od 52,63 MPa. Nagib linije na opterećenju 0,25 – 0,35 MPa i ostvarene deformacije je veći od nagiba linije za zahtevani modul od 50 MPa, ali je deformacija veća od dozvoljene. Iz ovoga proizilazi da je pri ispitivanju modula stišljivosti, neophodno i crtanje **dijagrama napon – deformacija ili registrovanje dozvoljenih deformacija.**

Moduli deformacije E_{v1} i E_{v2} ispitani po nemačkoj metodi su, dati po najnovijem izdanju DIN standarda 18134 iz 2002 godine. Modul deformacije E_{v1} u prvom ciklusu opterećenja pokazuje smanjenu vrednost što je posledica nedovoljne zbijenosti sloja ispod drobljenog agregata (peska). Stoga je i odnos deformacijskih modula $E_{v2} / E_{v1} = 4,76$. Ovaj odnos naknadnim zbijanjem se može smanjiti i samim tim povećati vrednost modula deformacije E_{v1} .



Slika 2. – Ispitivanje deformacijskih modula po nemačkoj metodi

Iz dijagrama toka opita Ev_1 i Ev_2 možemo proceniti stanje konstrukcije, pa ćemo dati tumačenje toka opita uz napomenu, da pri ispitivanju deformacijskih opita po Švajcarskoj i Nemačkoj metodi **treba uvek konstatovati:**

- dispoziciju ispitivanja (vrstu ugrađenih materijala, da li je ispitivani sistem dvoslojni ili troslojni),
- vlažnost pri ispitivanju, i
- debljinu slojeva u kolovoznoj konstrukciji gde se vrši ispitivanje.

Ove stavke su vrlo bitne, ukoliko se ispitivanje ne izvodi tokom građenja, već pri rehabilitaciji kolovoznih konstrukcija ili utvrđivanju stanja izvedenih radova.

3.1.3. Analiza modula deformacije E_{v1} i E_{v2}

3.1.3.1. Tumačenje toka opita

Kada se analiziraju prednosti i mane opita M_s i opita E_{v1} i E_{v2} , onda se mora istaći, da E_{v2} i E_{v1} daju objašnjenje o deformacijskim svojstvima tla, jer se uočavaju **trajne i elastične deformacije** pa odnos E_{v2} / E_{v1} ukazuje na dostignutu zbijenost. Iz toka linije pritisak – sleganje, **može se proceniti i zbijenost konstrukcije:**

- ako je linija pritisak - sleganje manjeg nagiba, a odnos E_{v2} / E_{v1} veliki, **radi se o nedovoljnoj zbijenosti**, koja se naknadnim zbijanjem može povećati.
- ako linija pritisak – sleganje, sa porastom opterećenja postaje strmija, **to dokazuje da je kod sitnozrnog tla viša vlažnost i približavanje lomu tla**, a kod krupnozrnog tla recimo tampona, da „leži“ na mekoj posteljici.

- ako je odnos E_{v2} / E_{v1} mali, **ne može se** naknadnim zbijanjem postići **veća zbijenost**, time i **nosivost**.

Ovo su samo osnovne postavke tumačenja toka opita. Napominjemo da se nekada u specifičnim uslovima ispitivanja mogu pojaviti i složeniji slučajevi, pa tumačenje toka opita treba da bude procenjeno ne držeći se strogo samo ovih preporuka.

3.1.3.2. Uslovi ispitivanja

Rezultati opita pločom kod sitnozrnih tla (prašinsto – glinovita tla), veoma zavise od vlažnosti, tako da se pri ispitivanju na vlažnosti ispod optimalne mogu dobiti veoma velike deformacije. Opit pločom treba vršiti za sitnozrna tla samo ako je indeks konzistencije $I_c > 0,75$ (krta - plastičnost).

Kod kamenitih tla i mešavina sa učešćem blokova, opit ne treba vršiti, jer ne daje pouzdane rezultate.

Za ispitivanje koriste se kružne čelične ploče debljine 12 mm, prečnika 30 i 60 cm.

Slojevi krupnozrnog materijala sa najvećim zrnom, prečnika do 75 mm, ispituju se pločom do 30 cm, a slojevi krupnozrnog materijala sa zrnima prečnika većeg od 75 mm, ispituju se pločom prečnika 60 cm.

Treba naglasiti da se pritisci ploče prenose na dubinu od $2 \times D$ (D - prečnik ploče), pa se zavisno od debljine sloja koji se ispituje, može osećati i uticaj nižeg sloja.

3.2. Osvrt na klasičnu metodu kontrole

Provera dostignute zbijenosti na terenu, tradicionalno se temelji na pojedinačnim ispitivanjima na određenom rastojanju ili je propisana tehničkim specifikacijama izvođenja radova, na količinu ugrađenog materijala.

Ukoliko se posmatra planum puta, odnos između ispitivanja izvedenih u kontroli gradnje i ukupne površine koja se zbija, iznosi 1:1.000.000,00. Ovakvom metodologijom ispitivanja, ne može se dobiti jasna slika o tome **kada je jedan materijal** ugrađen u donji ili gornji noseći sloj, **nedovoljno zbijen** ili **je došlo do prezbijanja materijala**. Efekat preterane zbijenosti u planumu puta, dovodi do «pucanja» ili drobljenja zrna agregata, što može imati negativne efekte na zonu dejstva mraza.

Očigledno je, da se ovakvim načinom kontrole ne može dobiti potpuna slika o postignutom kvalitetu, odnosno ujednačenosti zbijanja materijala.

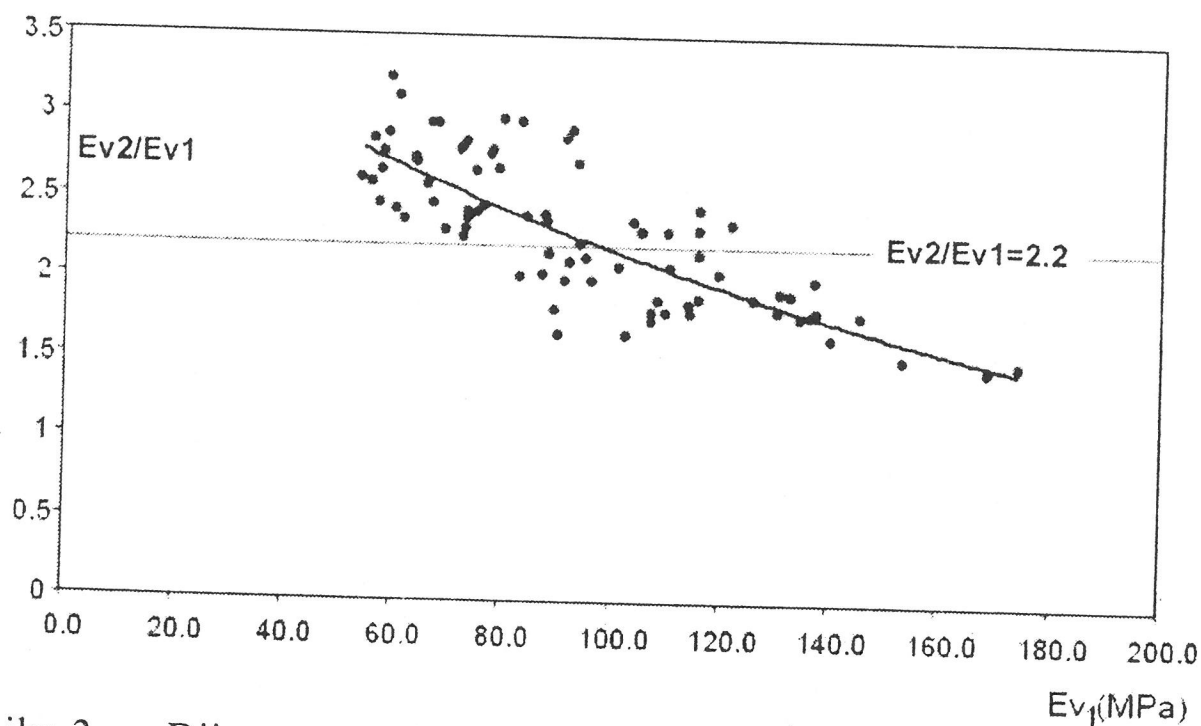
Deformabilno – nosive karakteristike zbijenog sloja na krupnozrnim materijalima vrlo često se kontrolišu ispitivanjem deformacijskih modula, bilo po švajcarskoj metodi - modula stišljivosti (M_s) ili po nemačkoj metodi Ev_1 i Ev_2 , kao i njihovog odnosa Ev_2/Ev_1 .

Odnos ova dva modula Ev_2/Ev_1 se literalno i po tehničkim specifikacijama propisuje do dopuštene gornje vrednosti od 2,2, što je veoma teško ostvariti na krupnozrnim materijalima.

Na slici 3, prikazana je funkcionalna zavisnost između odnosa ova dva deformacijska modula (E_{v2}/E_{v1}) i deformacijskog modula u prvom ciklusu opterećenja (E_{v1}), na posteljičnom sloju 0,63 mm položenom na nasip od lesa, deonica autoputa E - 75, Novi Sad – Beograd.

Modul deformacije E_{v1} je trebao biti veći od 60 MPa, što je uglavnom i ostvareno. Ali, odnos modula u ponovljenom i prvom ciklusu opterećenja (E_{v2}/E_{v1}) u velikom broju slučajeva bio je veći od propisanog, kao što se i može videti sa dijagrama.

Na osnovu ovog primera, ali i sličnih sa drugih gradilišta, može se zaključiti da odnos između deformacijskih modula ne može biti opšte prihvaćen kriterijum za ocenu kvalitetnog zbivanja materijala.



Slika 3. – Dijagram zavisnosti E_{v2}/E_{v1} u funkciji od modula deformacije E_{v1}

Sa druge strane, postavlja se pitanje homogenosti i ravnomernog zbijanja materijala na putevima. Ukoliko na ovom primeru izračunamo koeficijent varijacije za deformacijske module dobijene na ovoj deonici autoputa, po preporuci Austijskih propisa za puteve i autoputeve, dobićemo vrednosti prikazane u tabeli 1.

| DEFORMACIJSKI MODULI | KOEFICIJENT VARIJACIJE | PRORAČUN KOEFICIJENTA VARIJACIJE NA DEONICI NOVI SAD - BEOGRAD | | |
|----------------------|----------------------------------|--|----------------------|--------------------------------|
| | Kriterijum za gornji noseći sloj | Standardna devijacija S_x | Srednja vrednost x | Koeficijent varijacije v (%) |
| E_{v_1} | 15 | 28.4 | 93.7 | 30.3 |
| E_{v_2} | 15 | 37.6 | 205.6 | 18.3 |

Tabela 1. – Proračun koeficijenta varijacije

Na osnovu proračunatih koeficijenata varijacije može se konstatovati, da su dobijene vrednosti znatno iznad prihvatljivih. Stoga, za gornji noseći sloj možemo konstatovati da je nehomogen.

Iskustvo je pokazalo da homogenost izvedenog sloja znatno utiče na vek trajanja konstrukcije.

Takođe, pri kontroli gradnje većina klasičnih metoda ispitivanja su vremenski zahtevne, **te je izvođač prinuđen da na rezultate ispitivanja čeka satima.** Ispitivanje deformacijskih modula E_{v_1} i E_{v_2} , po jednom opitu može da traje i do 45 min. Ovo, **neminovno ima za posledicu prekidanje ili usporavanje izvođenja radova.**

4. KONTINUALNA KONTROLA GRADNJE

4.1. Opšte

Zbog sve strožijih zahteva koji se postavljaju u kontroli gradnje, kao i potrebi da se dobije informacija o kvalitetu izvedenog procesa zbijanja na svakom mernom mestu, **razvijene su metode kontinualne kontrole gradnje.**

Metode su nedestruktivne i **mogu se svrstati u dva tipa:**

- kontinualna kontrola zbijanja (CCC), merni uređaj se nalazi na sredstvu za zbijanje; i
- spektralna analiza površinskih talasa (SASW) ili kontinualna analiza površinskih talasa (CSW).

Kontrola zbijanja preko CCC – sistema je pogodnija za upotrebu. Uređaj je montiran na valjku i dobija se neposredna informacija o zbijanju materijala. Sistemom SASW i CSW potrebna je posebna oprema, gde se preko sistema geofona i rasprostiranja talasa vrši ispitivanje.

Princip kontinualne kontrole gradnje CCC, sastoji se u tome da se oscilacija bubnja za valjanje menja u funkciji krutosti podloge.

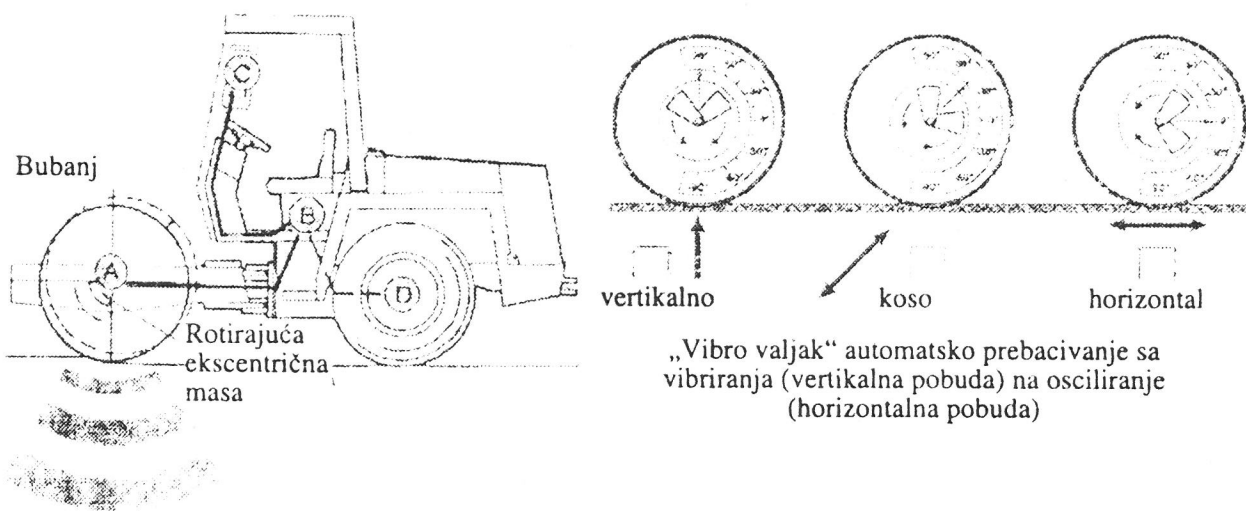
Interakcija između doboša valjka i tla se registruje preko akceleratora, na samom dobošu valjka i preko procesorske jedinice izračunava se **vrednost dinamičkog**

zbijanja. Rezultati se prikazuju na ekranu, uz mogućnost štampanja.

Na osnovu globalnog pozicionog sistema (GPS), moguće je odrediti poziciju valjka, uz odstupanje od 5 cm.

Na slici 4. prikazan je način rada vibracijskog ili oscilacijskog valjka. Kretanje valjka se registruje u uređaju A, analiza se obavlja u procesoru B, gde se proračunava vrednost dinamičkog zbijanja, a rezultati se prikazuju na uređaju sa ekranom C, gde se mogu i sačuvati.

Prednost novih valjaka sastoji se u tome, što je omogućena promena nanošenja sile od vertikalne, preko kose, do horizontalne.



Slika 4. – Princip rada valjka za kontinualnu kontrolu promena pravca sile

Uključivajem valjka na automatsku kontrolu tokom zbijanja materijala, vrši se promena sile na osnovu vibriranja tla i promene krutosti tokom zbijanja. Zbijanje se,

zavisno od promene krutosti, **prebacuje sa oscilacija na vibraciju.**

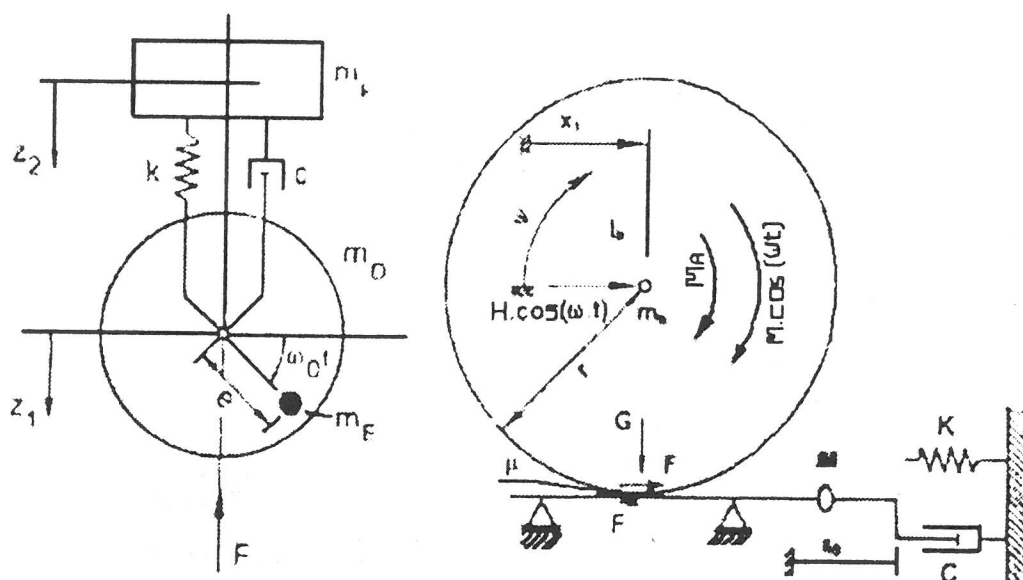
Ovim sistemom moguće je vršiti uspešno zbijanje svih vrsta materijala uz opitmatizaciju broja prelaza.

4.2. Princip rada kontinualne kontrole

Vibro valjak se teoretski može modelirati sa dva stepena slobode, slika 5. Polazi se od pretpostavke da se intenzitet oscilacija valjka menja prema povećanja krutosti podloge, i na osnovu odziva senzor vrši registrovanje akceleracije bubnja.

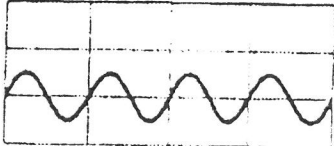
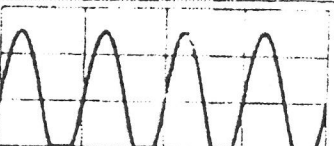
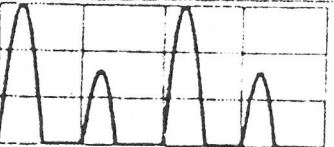
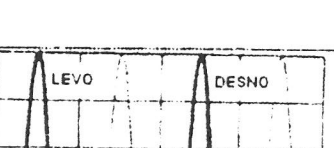
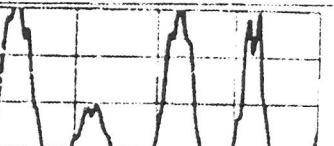
Do sada su razvijena dva sistema za praćenje kontinualne kontrole:

- merenjem signala preko komaktometera; i
- merenjem signala preko terametra.



Slika 5. – Šema rada valjka sa dva stepena slobode

Način rada vibracijskog valjka na osnovu interakcije između bubnja i tla prikazan je na slici 6.

| NAČIN KRETANJA | INTERAKCIJA BUBNJA I TLA | NAČIN RADA | VREMENSKI ZAVISNA KONTAKTNA SILA | CCC UPOTREBLJIV | BRZINA TLA | BRZINA VALJKA |
|--------------------------------|-----------------------------|--|---|-----------------|------------|---------------|
| PERIODIČAN | NEPREKIDNI KONTAKT | KONTAKT |  | DA | MALA | VELIKA |
| | PERIODIČAN GUBITAK KONTAKTA | DELIMIČNO UZDIZANJE |  | DA | ↓ ↑ | |
| | | PRESKAKANJE |  | DA | | |
| | | NJIHANJE |  | NE | | |
| NEKONTROLISAN GUBITAK KONTAKTA | NEKONTROLISANO KRETANJE |  | NE | VELIKA | | |

Slika 6. – Način rada vibracijskog valjka

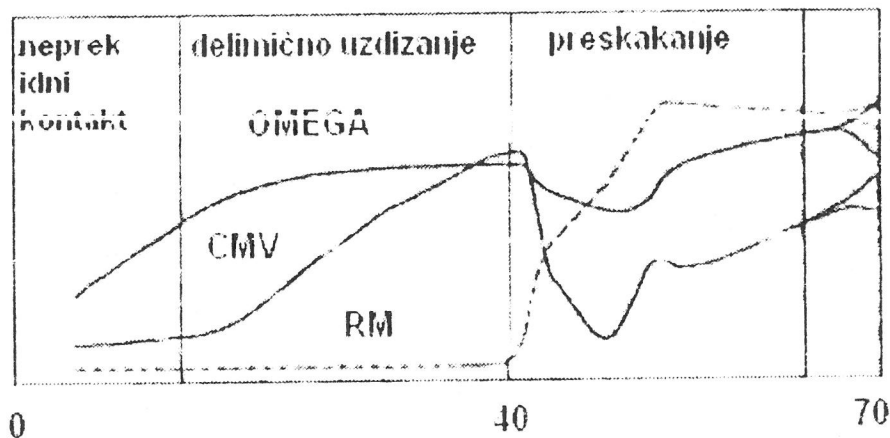
Akcelaratorski sistem koji se analizira i obrađuje u procesnoj jedinici, prikazuje dva parametra CMV i OMEGA.

Kompaktorska vrednost (CMV), određuje se tako, što se amplituda prve harmonijske oscilacije podeli sa amplitudom frekvencije pobude.

Pored ovoga, dobija se podatak o načinu rada bubnja kod valjka, preko rezonantne vrednosti (RM). Ova vrednost se izračunava tako, sto se amplituda polufrekvencije

ncije akcelatorskog signala podeli sa amplitudom frekvencije pobude.

Na slici 7. se vidi da vrednost (CMV) raste u početku zbijanja, sa povećanjem krutosti tla.



Slika 7. – OMEGA, CMV i RMV u funkciji dinmičkog modula

Vrednost RM je u procesu zbijanja jednaka nuli. Ukoliko počinje da raste, dolazi do preskakanja kontakta između valjka i tla, to jest do nekontrolisanog zbijanja.

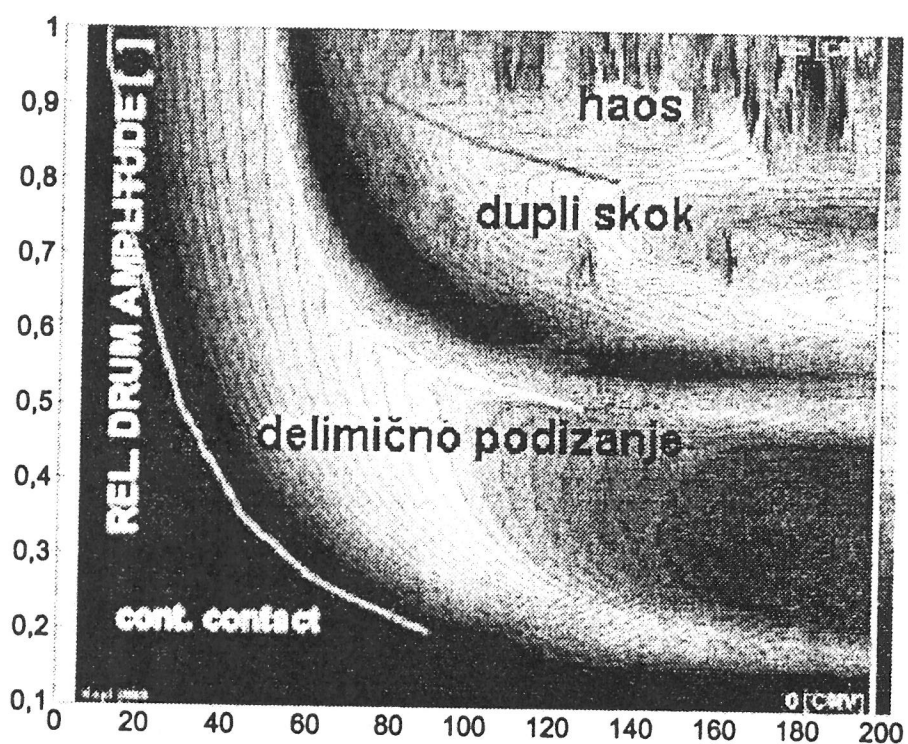
Vrednost OMEGA se proračunava na osnovu energije koju apsorbuje tlo.

Pored ove dve vrednosti u poslednje vreme razvijen je sistem koji daje dinamički elastični vibracioni modul E_{vib} (MN/m^2). Modul se meri preko terametra i izveden je iz odnosa pravca kontaktne sile i pomeranja tokom opterećenja.

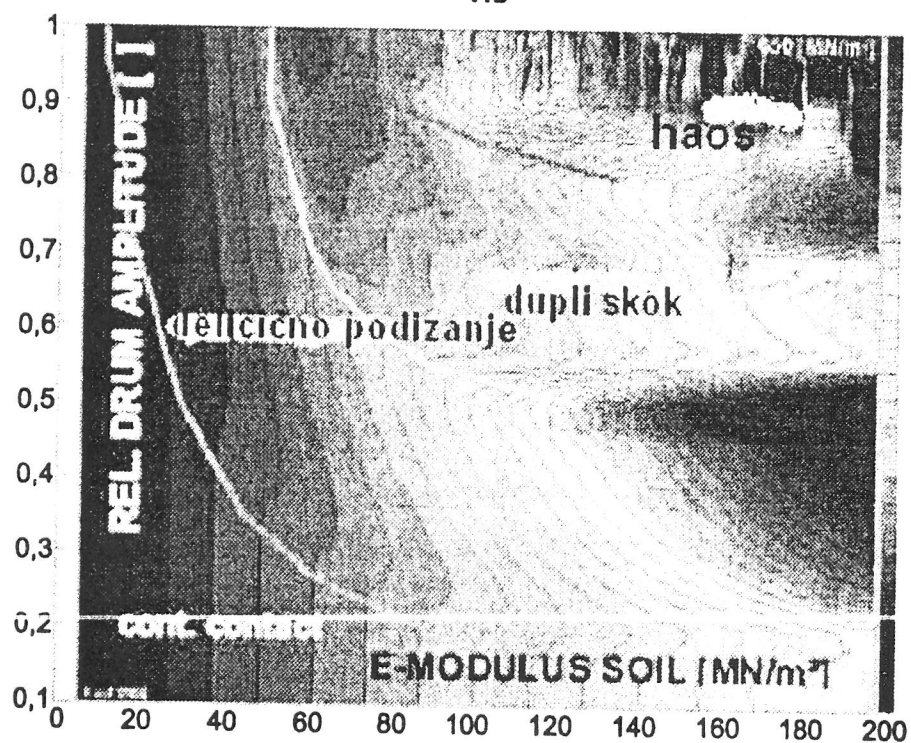
Švajcarska je razvila ACE sistem kontinualne kontrole na osnovu krutosti tla K_b (N/m), izveden na osnovu odnosa između sile i maksimalne defleksije doboša.

Urađene su i kompjuterske simulacije ovih vrednosti prikazane na slici 8, što nam ukazuje na velike mogućnosti primene kontinualne kontrole.

CMV

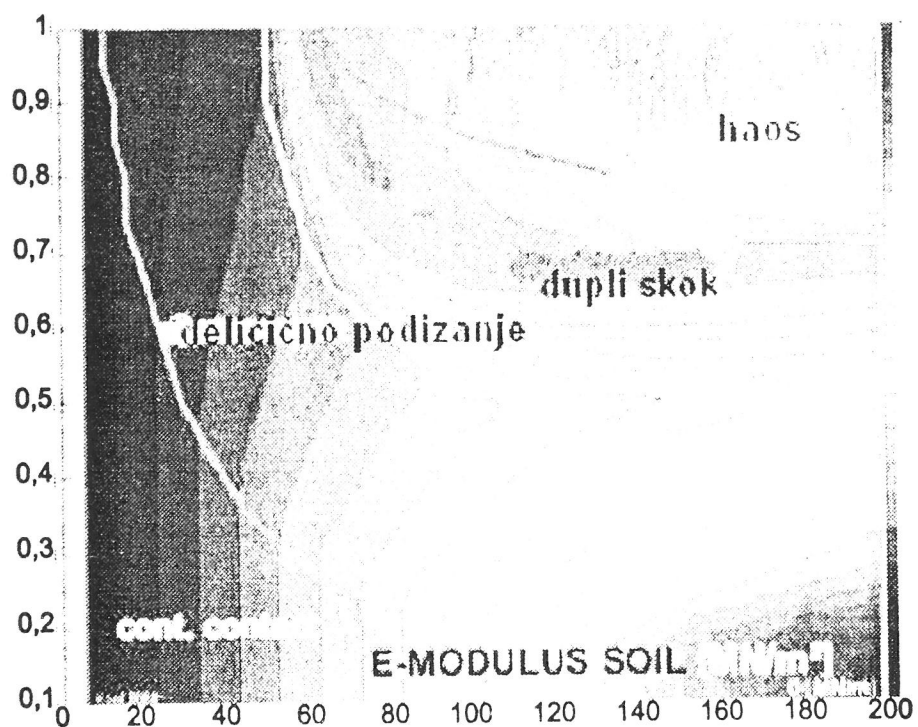
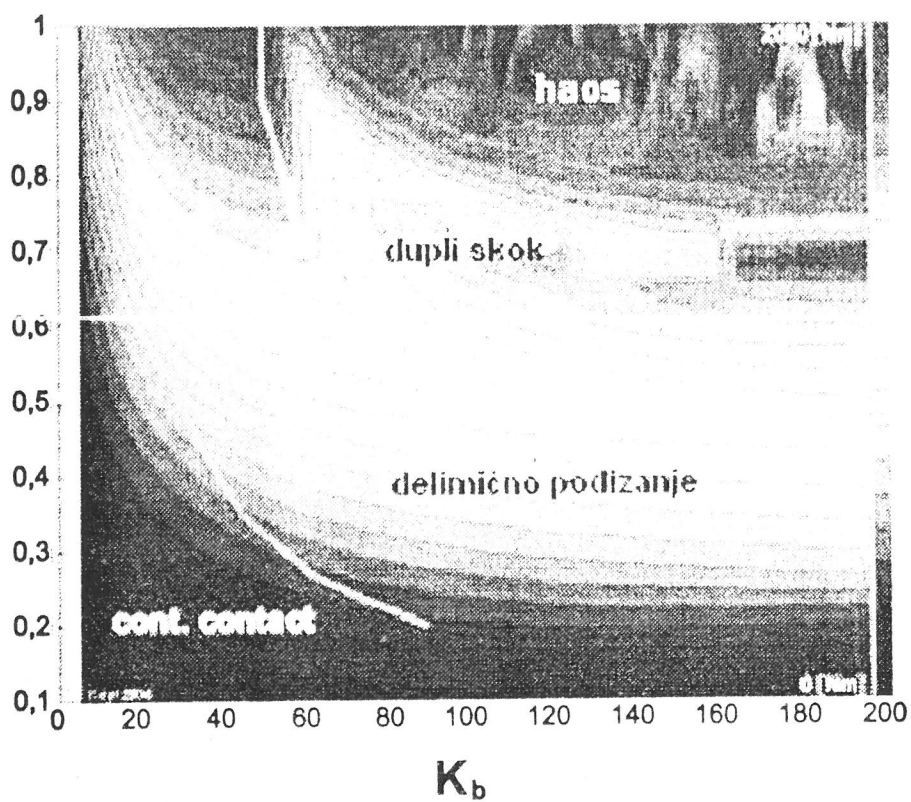


E_{vib}



Slika 8. – Kompjuterska simulacija CMV, OMEGA, Evib, kb u funkciji od E – modula

OMEGA



Slika 8. – Kompjuterska simulacija CMV, OMEGA, Evib, k_b u funkciji od E – modula

4.3. Prednost kontinualne kontrole gradnje

U poslednje vreme nakon razvoja vibracijskih dinamičkih modula, može se očekivati njihova direktna upotreba za određivanje kvalitetnog zbijanja materijala.

Prednosti kontinualne kontrole u odnosu na klasične metode su:

- kontinualnom kontrolom, **dobijaju se informacije o zbijanju na celoj površini,**
- rezultati ispitivanja su dostupni trenutno, uz mogućnosti izmene parametara, **te nema kašnjenja i usporavanja procesa rada,**
- zbijanje materijala je optimalno, **izbegavaju se efekti nedovoljne zbijenosti ili preteranog zbijanja,**
- cene pri kontinualnoj kontroli su znatno manje od cena klasičnih ispitivanja,
- dokumentacija o kontroli ispitivanja je dostupna u celosti, **primopredajni postupak jako je uprošćen i dokaz kvaliteta za celu površinu je jasno vidljiv.**

5. POREĐENJE KLASIČNE I KONTINUALNE KONTROLE GRADNJE

Kontinualna kontrola gradnje do sada je bila poređena sa klasičnom kontrolom gradnje, pre svega preko stepena zbijenosti (R_D), kao i preko statičkih modula deformacije.

Pri uspostavljanu ovih korelacionih ispitivanja mora se voditi računa da je dubina dejstva koja se registruje CCC kontrolom, znatno veća od dubine dejstva pri ispitivanju klasičnim metodama, preko statički opterećene ploče. Ova dubina je funkcija težine valjka kao i oscilacija, i često može da detektuje niže slojeve koje ne možemo detektovati klasičnom metodom kontrole.

Najbolji način korelacije se dobija kada se izvede kontinualna kontrola i onda na osnovu raspona vrednosti od maksimalne, preko srednje do minimalne, odaberu mesta za ispitivanje statičkih deformacijskih modula.

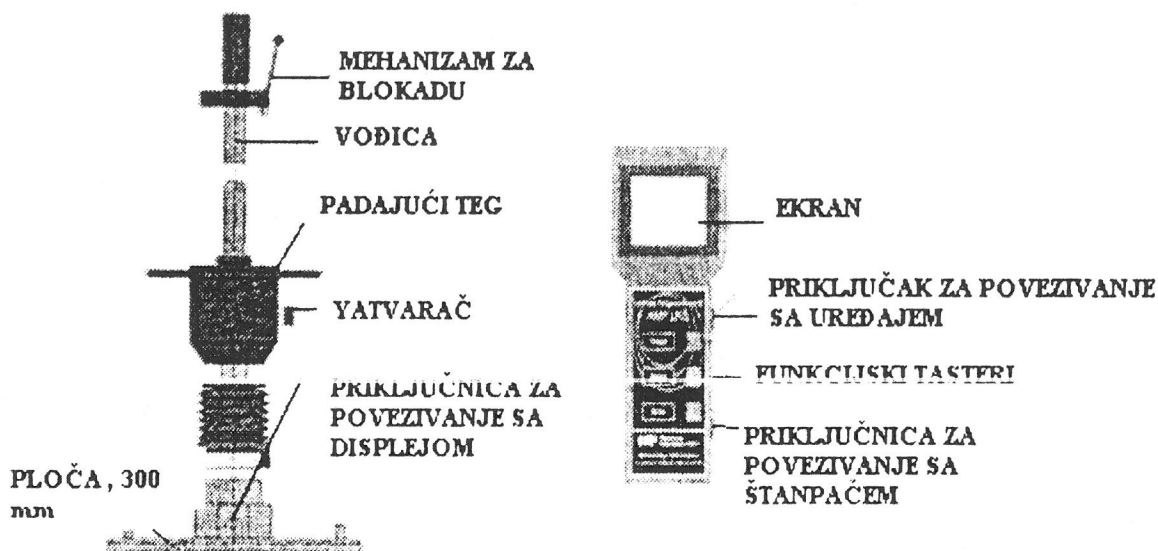
Preporučuje se da se za korelaciju koristi dinamički uređaj sa padajućim tegom, kojim se dobija $E_{v_{din}}$ modul deformacije. Ovaj modul se pokazao klerativnim sa vrednostima dobijenim kontinualnom kontrolom i modulima deformacije statički opterećenom pločom.

6. DINAMIČKI UREĐAJ SA PADAJUĆIM TEGOM

Princip ispitivanja dinamičkog modula $E_{v_{din}}$ se sastoji od pada tega sa određene visine i merenja deformacije, koja se dobija sleganjem ploče od 30 cm, na kojoj se na kontaktu sa tlom proizvodi pritisak od 0,1 MPa, slika 9. Pre merenja dinamičkog modula deformacije $E_{v_{din}}$, potrebno je izvršiti tri konsolidacijska udarca, a zatim se sa tri nova udarca meri sleganje. Na osnovu srednje vrednosti iz tri merenja izračunava se dinamički modul $E_{v_{din}}$.

S'obzirim da se oba modula deformacije nalaze u elastičnoj zoni deformacije, kao i na veliki raspon koeficijenta međusobne korelacije, preporučljivo je tokom kontrole gradnje na određenom materijalu u konstrukciji puta **izvršiti međusobnu korelaciju modula.**

Razlog ovakvog pristupa je u tome što se lakim uređajem sa padajućim tegom **dobijaju u kratkom vremenskom roku** informacije o deformabilno - nosivim karakteristikama određenog sloja u konstrukciji puta, dok je ispitivanje statičkih modula deformacije E_{v_1} i E_{v_2} po nemačkoj metodi **dugotrajno.**



Slika 9.– Šema lakog dinamičkog uređaja sa padajućim tegom

Međusobnom kombinacijom ispitivanja dinamičkom i statičkom metodom, moguće je **povećati gustinu ispitivanja**, kojom se može adekvatno proceniti homogenost sloja u odnosu na deformabilno – nosive karakteristike.

6.1. Primer korelacije između statičke i dinamičke ploče

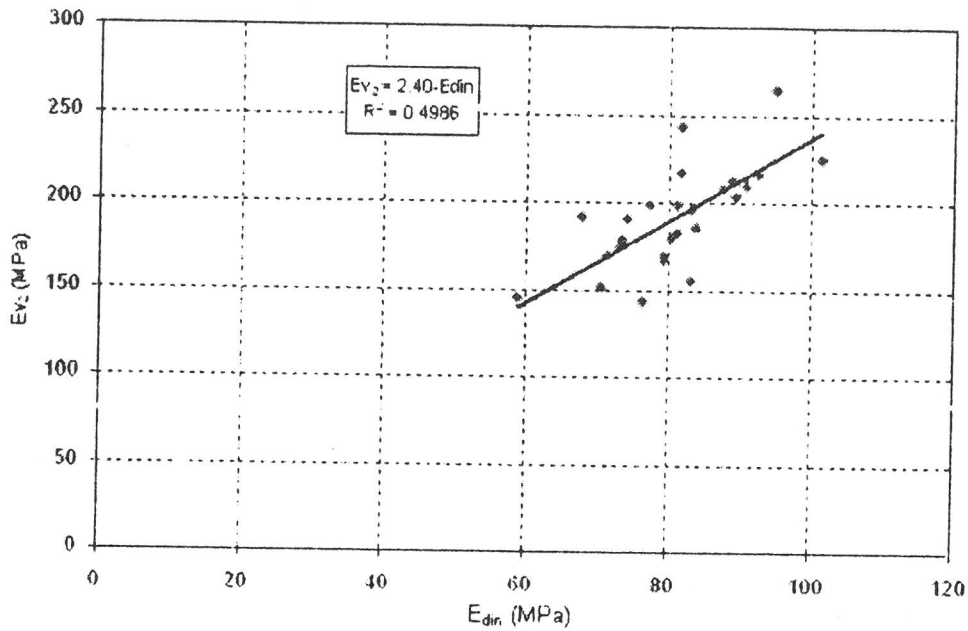
Konstrukcija autoputa E-75, Novi Sad – Beograd pri izgradnji leve trake sastojala se od posteljičnog sloja od drobljenog kamenog agregata 0/63 mm, položenog na završni sloj nasipa od lesa ili podtla i gornjeg nosećeg sloja od drobljenog kamenog agregata 0/31,5 mm. Gornji noseći sloj je razastiran finišerom na optimalnijoj vlažnosti, kao «hidraulički sloj»

Na slikama 10. i 11, prikazana je zavisnost Ev_2 i Ev_1 u funkciji od dinamičkog modula Ev_{din} , dobijena na gradilištu kontrolnim ispitivanjima. Vrednost dinamičkog modula deformacije određena je kao srednja vrednost tri modula, dobijena ispitivanjem neposredno oko ploče.

Koeficijent korelacije između statičkog modula deformacije Ev_2 i dinamičkog modula Ev_{din} je 2,57. Koeficijent determinacije R^2 , pokazuje da su ove dve veličine u direktnoj korelativnoj zavisnosti 44,89 %.

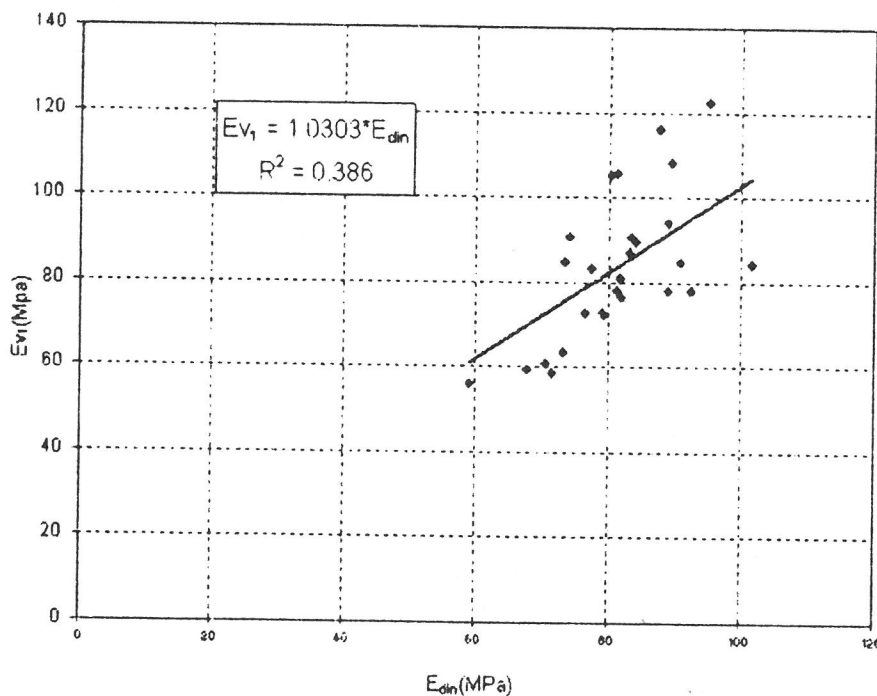
Treba napomenuti da su se, tokom gradnje menjale karakteristike 0/31,5 mm drobljenog agregata. Materijal je nabavljan iz različitih kamenoloma, i znatno se razlikovao po koeficijentu neravnosti i koeficijentu zakrivljenosti.

Na početku gradilišta na probnoj deonici određena je zavisnost Ev_2 i Ev_{din} . Dobijena je korelaciona zavisnost $Ev_2 = 2,40 Ev_{din}$ sa koeficijentom determinacije, koji iznosi 45%.

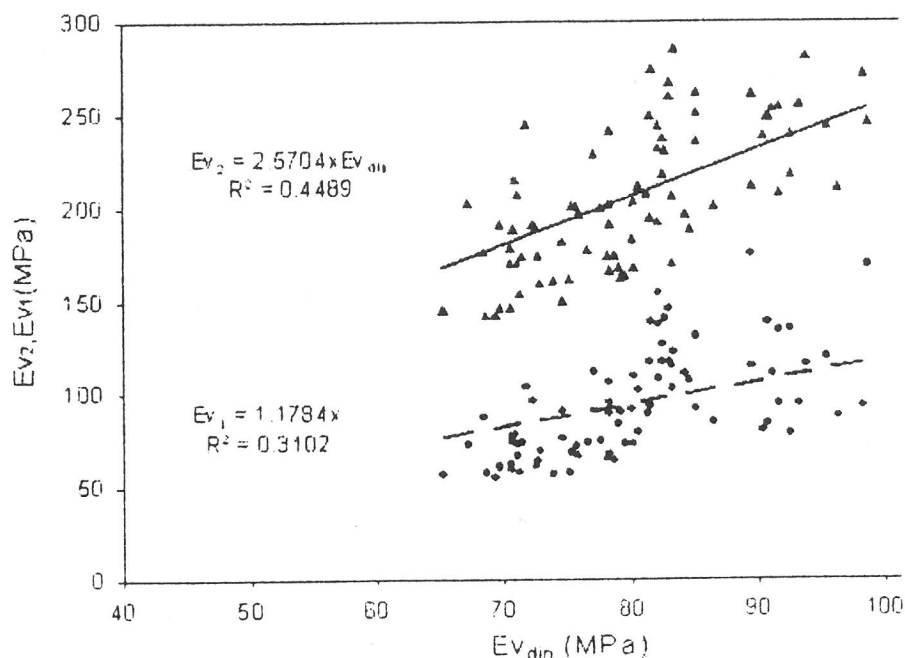


Slika 10. – Korelacija $E_{v2} = f(E_{din})$, na probnoj deonici

Dobijeni modul deformacije E_{v2} , se kretao od 150 – 260 MPa, taj raspon vrednosti se zadržao i tokom gradnje što se vidi sa slike.



Slika 11. – Korelacija $E_{v1} = f(E_{din})$, na probnoj deonici



Slika 12. – Korelacija E_{v2} , $E_{v1} = f(E_{v_{din}})$, tokom gradnje

Možemo konstatovati, da je na probnoj deonici dobro prognozirana korelaciona zavisnost između statičkih i dinamičkog modula deformacije, slika 12.

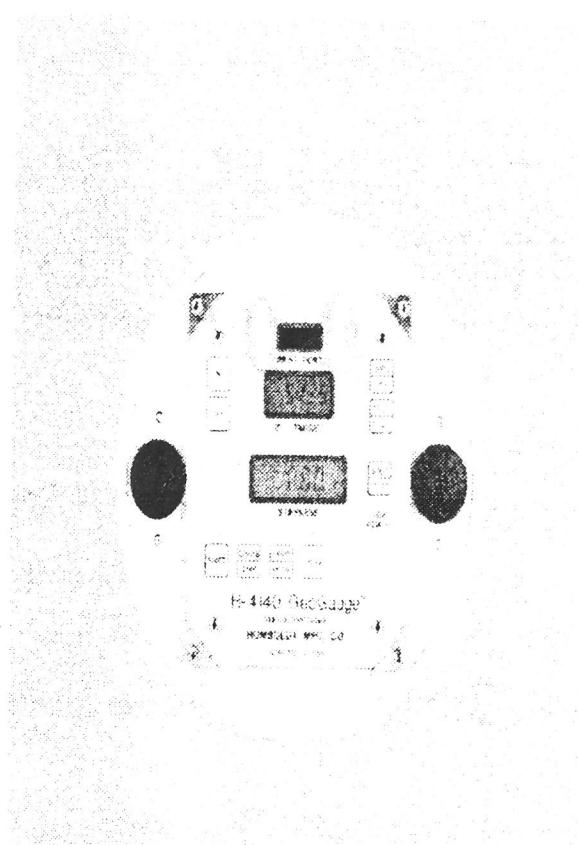
7. „GEO GAUGE“ INSTRUMENT ZA MERENJE KRUTOSTI I YOUNG-OVOG MODULA TLA

7.1. Osnovni podaci o uređaju i načinu rada

Instrument je razvijen u Sjedinjenim Američkim Državama, u okviru dveju kompanija «BBn Systems & Technologies», Kembridž, Masačustes i «CNA Consulting Engineers», Mineapolis, Minesota. Uređaj je prikazan na slici 13.

Instrument radi na principu vibracija pri 25 stacionarnih frekvencija, između 100 i 96 Hz, koje proizvode male defleksije. «Geo Gauge» meri impedancu pri površini tla, koja daje krutost i ona je proporcionalna u odnosu na modul smicanja tla. Ukoliko se prepostavi Poasonov koeficijent, i iz poznatih fizičkih dimenzija uređaja, može se izvesti modul smicanja tla i Jungov modul.

Uređaj je težak oko 10 kg, sa prečnikom 28 cm i visinom 25,4 cm i na tlo se oslanja na prstenastu nožicu.



Slika 13. – «Geo Gauge» uređaj za merenje krutosti tla i Jungov-og modula

Osnovni podaci o uređaju:

- opseg krutosti (3 - 70 MN/m),
- Young - ov modul (26 - 610 MPa),
- dubina merenja (230 - 310 mm),
- prečnik mernog instrumenta (280 mm),
- visina mernog instrumenta (210 mm),
- težina mernog instrumenta (210 mm), i
- broj opita na sat (20).

7.2. Merenje zapremenske gustine

Zapreminska gustina na terenu povezana je sa krutošću, objavljeno je u radovima Roman D.Hryciw & Thomas G.Thoman, «Model za tla od nevezanog materijala zasnovanim na istorijskim podacima o naponu» Journal of Geotechnical Engineering, Tom 119, br.7, juli 1993.

Na osnovu ovih podataka razvijena je formula:

$$\rho_d = (\rho_0 / (1 + 1,2 * (C / K - 0,3)^{0,5}), \quad \text{gde je:}$$

$$C = (C_1 \sigma_1^P)^{4a} / (1 - v)$$

gde je:

C_1 – funkcija vlage i vrste tla,

σ_1 – napon humusnog sloja,

P – konstanta koja se kreće između 1/2 i 1/4,

a – prečnik ploče,

v – Poasonov koeficijent,

ρ_d – suva zapreminska gustina,

ρ_s – zapreminska masa čvrstih čestica,

m – vlažnost %,

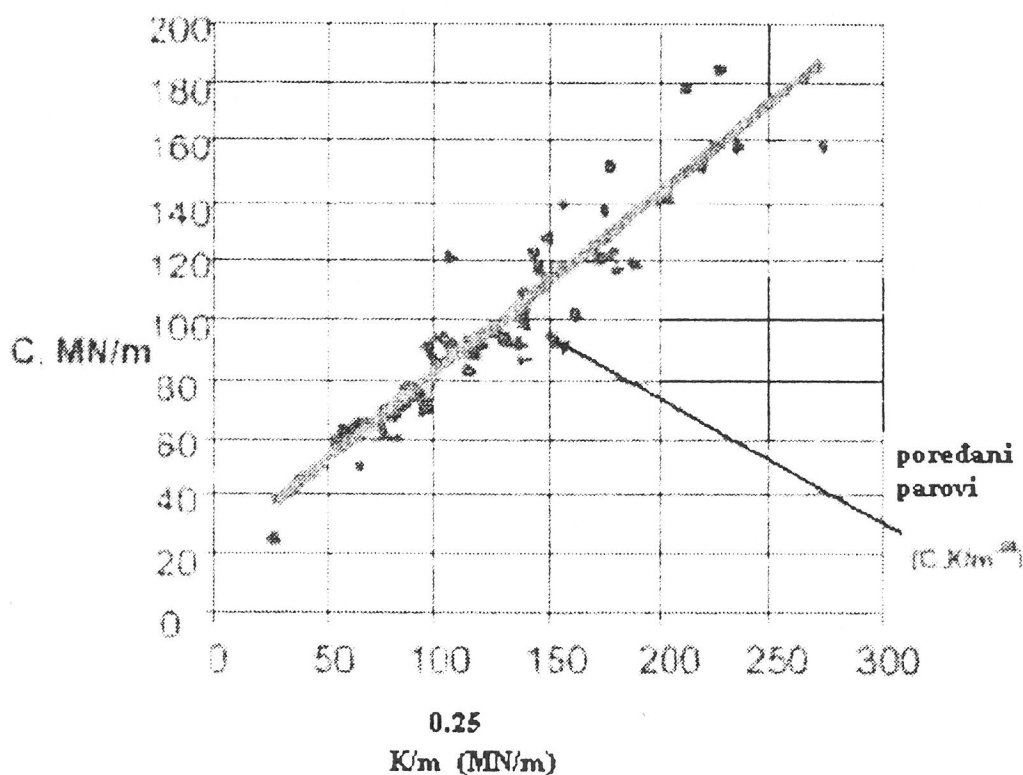
K – krutost, i

C – konstanta u funkciji od krutosti i vlažnosti.

Osnovni princip je, da se odredi vlažnost za određenu vrstu materijala na osnovu merenja krutosti i zapreminske težine. Zatim se koristi C , izmerena krutost i sadržaj vlažnosti da bi se predvidela suva zapreminska masa. Ovaj pristup omogućava, da se odredi sadržaj vlage u svakom pojedinačnom predviđanju suve zapreminske mase. Time se omogućuje dobijanje konstante C iz jednačine:

$$C = n (K/m) + b,$$

ovaj odnos između C , K i m obezbeđuje primenljivu konstantu C koja se koristi za proračunavanje pojedinačne zapreminske težine. Na slici br. 14. pokazan je linearan trend sa odsečkom dobijen na osnovu podataka sa terena.



Slika 14. – Linearni odns C prema K/m

7.3. Young – ov modul

Merenje modula zasniva se na tehnologiji pozajmljenoj iz vojnog arsenala, da se mere male defleksije koje potiču iz težine uređaja i njegove vibracije. Tlo reaguje proizvodeći male deformacije δ , koje su proporcionalne u odnosu na spoljni prečnik prstenaste nožice (R), **Young** – vom modulu (E), modulu smicanja (G), i Poasonovom koeficijentu (ν) tla (Poulos, H.G. i Davis, E.H. «Elastična rešenja za mehaniku tla i stena», 1974. str. 167-168). Krutost se definiše kao količnik sile u odnosu **na pomeranje**:

$$K = P / \delta \text{ (kN/m)}$$

Young – ov modul i modul smicanja mogu se odrediti na osnovu merenja uz pomoć «Geo Gauge», ukoliko se pretpostavi Poasonov koeficijent, iz relacije:

$$P \sim 1,77RE \delta / (1-\nu), \quad \text{odnosno}$$

$$K = P / \delta \sim 1,77RE / (1-\nu)$$

Uređaj je kalibrisan preko odnosa sile – pomeranja dobijenog na osnovu pokretanja poznate mase:

$$F / \delta = M(j\omega)^2$$

Masa koja se koristi od težine uređaja, dovoljna je za tačnost krutosti, i **Young** – ov modul (na primer 10 kg predstavlja približno 4 MN/m pri 100 Hz i 6 MN/m pri 200 Hz).

Kod sitnozrnih materijala koeficijent varijacije je manji od 2% , a kod krupnozrnih materijala on iznosi i do 10 %.

Young – ov modul, se koristi za uspostavljanje korelativnih ispitivanja sa statičkim i dinamičkim modulima deformacije.

Institut za puteve a.d. nabavio je 2006. god. ovaj uređaj i sada je u fazi eksperimentalnog ispitivanja sa uporednim metodama.

8. ZAKLJUČAK

Zbijanje materijala, kao složen proces sa jedne strane, i kontrola kvaliteta sa druge strane doveli su do razvoja nedestruktivnih metoda kojima se teži dobijanje informacija o postignutoj zbijenosti – nosivosti na celoj površini puta. Kontinualna kontrola gradnje (CCC), razvijena na uređajima za zbijanje, kao i metode ispitivanja $E_{v_{din}}$ (laki uređaj sa padajućim tegom), krutost i **Young** – ov modul («Geo Gauge») u mnogim zemljama prolaze još uvek fazu poređenja sa klasičnim metodama ispitivanja.

Nesumnjivo da će ove metode, posebno kontinualna kontrola gradnje CCC, vremenom postati dominantne u kontroli kvaliteta pri izgradnji puteva. Stoga smatramo da izloženi (ovaj) rad, za našu stručnu javnost ima, pored informativnog karaktera i značajan stručni doprinos.

LITERATURA

- [1] ŽORŽ ARKIE: *Zbijanje, putevi i aerodromske piste sredstva i metode*, Izdavačko preduzće Građevinska knjiga, Beograd 1978.
- [2] HEINZ BRANDL, *Zbijanje tla i drugih zrnastih materijala za građevine*, UDK 624.131.52.0013, Građevinar 54V(2002) 9, strana 513 – 527
- [3] D. & F. KOPF: Operational devices for Compaction optimization and qualita control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device), *Proceedings of the International Seminar on Geotechnics in Pavements and Railway Desing and Construction*, 2004 Millpress, Rotterdam, ISBN 90 5966 038 2
- [4] SIMO TOŠOVIĆ, LASLO ČAKI, VLADETA VUJANIĆ, ŽIVKO JOVIĆ: *Studija korelacione zavisnosti na drobljenom agregatu 0/31,5 mm između statičkih i dinamičkih modula deformacije autout E-75 Novi Sad - Beograd*, Institut za puteve a.d., 2003. god.
- [5] ROMAN D.HRYCIW & THOMAS G.THOMAN: Model za tla od nevezanog materijala zasnovanim na istorijskim podacima o naponu, *Journal of Geotechnical Engineering*, Tom 119, br.7, juli 1993.
- [6] POULOS, H.G. & DAVIS E.H.: *Elastična rešenja za mehaniku tla i stena*, 1974., str.167-168. Stručna i naučna dokumentacija Instituta za puteve a.d. iz Beograda