



PD 6606



COBISS

DOKTORSKA DISERTACIJA

A. Cvetanović

1976

PH 6606
GRADJEVINSKI FAKULTET

Mr ALEKSANDAR CVETANOVIĆ
asistent Gradjevinskog fakulteta
Univerziteta u Beogradu

DINAMIČKI MODUL KRUTOSTI ASFALT BETONA
- DOKTORSKA DISERTACIJA -

BEOGRAD
APRIL 1976.

RUKOVODILAC TEZE
Prof. Živorad Djukić

S A D R Ź A J

| | Strana |
|---|--------|
| PREDGOVOR | 1 |
| I. ODNOS VOZILA I PUTA | 6 |
| I.1. Vibracije vozila | 6 |
| I.2. Stihijne vibracije | 8 |
| II. KARAKTERISTIKE MATERIJALA | 13 |
| II.1. Reološke osobine bitumena | 13 |
| II.1.1. Predstavljanje bitumena mehaničkim modelima | 16 |
| II.1.2. Uticaj temperature na modul krutosti bitumena | 19 |
| II.1.3. Grafičko odredjivanje modula krutosti bitumena | 20 |
| II.2. Reološke osobine asfaltnih mešavina | 23 |
| II.3. Modul krutosti asfaltnih mešavina | 28 |
| II.3.1. Definicija modula krutosti | 28 |
| II.3.2. Istorijat proučavanja modula krutosti | 29 |
| II.3.3. Zavisnost modula krutosti od temperature i trajanja opterećenja | 31 |
| III. EKSPERIMENTALNO ODREDJIVANJE DINAMIČKOG MODULA KRUTOSTI | 35 |
| III.1. Terensko ispitivanje modula krutosti | 35 |
| III.2. Laboratorijsko odredjivanje modula krutosti | 39 |
| III.2.1. Prikaz postupka ispitivanja modula krutosti | 41 |
| III.2.2. Postupak ispitivanja | 42 |
| III.2.3. Sračunavanje modula krutosti | 45 |
| IV. PRIKAZ DOBIJENIH REZULTATA I NJIHOVA OBRADA | 49 |
| V. RASPROSTIRANJE TEMPERATURE U ASFALTNIM KOLOVOZIMA | 101 |
| V.1. Toplotne osobine asfaltnih mešavina | 102 |
| V.2. Promene fizičkih osobina materijala | 104 |
| V.3. Uticaj temperature na promenu modula krutosti asfalt- nih slojeva u kolovoznoj konstrukciji | 105 |
| VI. PROJEKTOVANJE FLEKSIBILNIH KOLOVOZNIH KONSTRUKCIJA | 111 |
| VII. ZAKLJUČAK | 114 |
| VIII. LITERATURA | 117 |

P R E D G O V O R

Putevi spadaju u građevinske objekte najviše izložene uticajima sredine u kojoj se nalaze. Skoro da se svaki naredni kvadratni metar kolovoza razlikuje od prethodnog. Zbog toga je teško uspostaviti stroge kriterijume u pogledu kvaliteta kolovoza i njegove sposobnosti da u svim vremenskim situacijama odgovori svojoj nameni.

Medjutim, da nas velika odstupanja ne bi dovela u zabludu, potrebno je upoznati sve parametre koji utiču na ponašanje kolovoza i određuju veličinu odstupanja pojedinih karakteristika vezanih za kvalitet puta u određenim uslovima. Da bi smo u ocenu o valjanosti određene kolovozne konstrukcije imali poverenja, moramo biti sigurni da se ona zasniva na eksperimentalnim rezultatima velikog obima, koji uključuju veći broj uzajamno povezanih parametara. Posebno treba naglasiti da fleksibilni kolovozi ne spadaju u konstrukcije koje se mogu tačno proračunati, kao što računamo konstrukcije od armiranog ili prednapregnutog betona, čelika i dr. Razne vrste tla i materijala, koji se nalaze u okviru jedne kolovozne konstrukcije ne mogu se lako razvrstati u egzaktno kategorije, niti se može sa punom sigurnošću predvideti njihovo ponašanje.

Projektovanje kolovoznih konstrukcija za sada je još uvek empirijsko, zasnovano na stečenim iskustvima, jer kolovozne konstrukcije predstavljaju kompleksan fizički sistem koji je u matematičkom smislu za sada nemoguće tačno definisati. Zbog toga smo u našim proučavanjima prinudjeni da obavljamo određenu selekciju parametara, trudeći se da eksperimentalnim rezultatima proverimo mogućnosti i područja primene zakona mehanike. Najveći problem u ovim razmatranjima je svakako viskoelastično ponašanje materijala, koji ulaze u sastav slojeva fleksibilne kolovozne konstrukcije. Proračun napona i deformacija u vis-

koelastičnim sredinama kakav je asfalt sa praktične tačke gledišta, koliko je nama poznato, nije rešen. Ulagana su velika materijalna sredstva i na ovom problemu se u svetu intenzivno radi poslednjih 20 godina, ali zbog velikog broja parametara koji utiču na ponašanje fleksibilnih kolovoznih konstrukcija ovaj problem numerički nije rešen. Skoro svi dobijeni zaključci se zasnivaju na rezultatima eksperimentalnih istraživanja na terenu i laboratorijama.

U ovom radu je takodje pokušano da se na osnovu velikog broja dobijenih eksperimentalnih rezultata izvedu zaključci koji bi naša saznanja o stanju napona i deformacija u fleksibilnim kolovoznim konstrukcijama proširili.

Iako tema rada glasi: "Dinamički modul krutosti asfalt betona", problem je posmatran šire i u razmatranje su uključeni: odnos vozila i puta, karakteristike materijala, rasprostiranje temperature i osnovni principi projektovanja kolovoza.

U prvom delu rada je razmatran odnos vozila i puta, tj. oblik delovanja vozila na kolovoznu konstrukciju, a samim tim i na dinamički modul krutosti asfalt betona.

Kada se kaže, oblik delovanja vozila na kolovoznu konstrukciju, prvenstveno se misli na brzinu kretanja vozila, i u zavisnosti od brzine na vibracije kolovozne konstrukcije.

Veličina frekvencije vibracija kolovozne konstrukcije se kreće uglavnom od 1 do 40 HZ, a u radu je obradjeno područje od 5 do 100 HZ. U praksi su vibracije stihijne prirode, medjutim zbog praktične strane izvodjenja eksperimenata u radu su uzete harmonijske vibracije jednakog intenziteta. Ovako pojednostavljenje nema bitnog uticaja na dobijene rezultate i potpuno zadovoljava praktične potrebe.

Eksperimentalni rezultati su pokazali da promene u frekvenciji vibracija od 10 HZ izazivaju promenu "dinamičkog modula krutosti" za oko 2%, što znači da se dinamički uticaj konvencionalnih brzina vozila može zanemariti.

U drugom delu rada je dat istorijat proučavanja "modula krutosti", sa posebnim osvrtom na reološko tumačenje uticaja osobina bitumena, temperature i frekvencije na "modul krutosti" asfaltnih mešavina. Ovde odmah treba istaći da od bitumena koji ima ulogu veziva u asfalt betonu, zavis u najvećoj meri i ponašanje fleksibilne kolovozne konstrukcije. Nijedan drugi parametar nije toliko značajan, a ni kompleksan sam po sebi. Da bi se suzio problem, svi su uzorci napravljeni od istog tipa bitumena (najčešće upotrebljenih kod nas), i pod istim uslovima. Ovo poglavlje predstavlja osnovu za treće poglavlje, u kome je data suština rada, eksperimentalno određivanje "dinamičkog modula krutosti".

Koristeći originalnu aparaturu i postupak, izvršeno je ispitivanje "dinamičkog modula krutosti" asfalt betona, pri temperaturama od -20°C do $+50^{\circ}\text{C}$, frekvencijama od 5 do 100 Hz i šupljina od 3.73, 4.53 i 6.46%.

Izborom temperatura od -20°C do $+50^{\circ}\text{C}$ pri kojima su izvršena ispitivanja, obuhvaćeno je naše temperaturno područje i data osnova za korišćenje rezultata bez ekstrapolacije u svim delovima naše zemlje.

Široko frekventno područje od 5 do 100 Hz omogućava praćenje uticaja svih standardnih vozila na kolovoznu konstrukciju, pa i specijalnih sa složenim stajnim trapovima.

Iz praktičnih razloga pravljenja uzoraka bio je ograničen izbor šupljina u asfaltnim uzorcima. Medjutim, i ovako uzano područje omogućava sagledavanje uticaja šupljina na "dinamički modul krutosti" asfalt betona.

Poseban problem prilikom izvodjenja eksperimenata na višim temperaturama je bio brza pojava zamora uzoraka koji je otežavao očitavanje rezultata na mernim uredjajima.

U četvrtom poglavlju su svi dobijeni podaci statistički obradjeni i dobijene numeričke zakonitosti ponašanja "dinamičkog modula krutosti" u odnosu na temperaturu, frekvenciju i šupljine. Dobijeni rezultati statističke obrade pokazuju da linija regresije u odnosu na dobijene

eksperimentalne rezultate preko koeficijenta korelacije pokazuju da je stvarna disperzija podataka minimalna. Svi eksperimentalni rezultati i linija regresije su nacrtani "ploterom" računara.

Rezultati ispitivanja ukazuju na veliki značaj uticaja temperature na ponašanje "modula krutosti", čije se vrednosti u opsegu temperature od -20°C do $+50^{\circ}\text{C}$, menjaju od 2000 do 200 000 kp/cm^2 .

Analizirajući uticaje temperature i frekvencije vidi se da temperatura utiče na stanje napona i deformacija u kolovoznoj konstrukciji, a prolaz vozila (frekvencija) na zamor materijala.

U petom poglavlju je obradjeno rasprostiranje temperature u asfaltnim kolovozima i njen uticaj na rezultate "dinamičkog modula krutosti" dobijenih u prethodnom poglavlju.

Termička provodljivost i kapacitet zagrevanja asfaltnih materijala imaju posebnu ulogu pri analizi napona i deformacija. Unutrašnji termički naponi u najvećoj meri zavise od karakteristika materijala koji ulaze u sastav slojeva kolovozne konstrukcije. U trenutku prekoračenja napona na zatezanje koji dopušta dati materijal, dolazi do stvaranja pukotina u kolovozu bez učešća saobraćaja.

Temperatura na površini kolovoza se, grubo uzevši, u toku dana menja po sinusoidalnom zakonu, a odatle proizilazi i odgovarajuća varijacija temperature kolovoza na različitim dubinama.

Velike temperaturne oscilacije prilikom širenja temperature kroz kolovoznu konstrukciju koje se odigravaju prema Fourier-ovoj zakonitosti dovode do formiranja termičkih napona što je problem termoviskoelastičnosti i spregnute termoviskoelastičnosti. Preko preradjenih Duhamel-ovih jednačina koje su se prvobitno odnosile na elastičnu, a kasnije na viskoelastičnu sredinu moguće je dobiti termičke napone. Takodje koristeći fotoelastičnost moguće je za termoviskoelastičnu izotropnu sredinu rešiti problem termičkih napona. Medjutim, kada je u pitanju asfalt, koliko nam je poznato, još niko nije uspeo da numerički definiše tačno rasprostiranje temperature i termičke napone koji tom prilikom nastaju i računom obuhvataju sve parametre ko-

ji praktično utiču na ponašanje kolovoza. Zbog toga se skoro svi radovi (najviše ih je u SAD i Kanadi) zasnivaju na eksperimentalnim rezultatima.

U ovom radu su jasno prikazani svi uticaji godišnjih promena temperature na dinamički modul krutosti, što će bitno uticati na izmenu mnogih dosadašnjih shvatanja u ovoj oblasti.

U šestom poglavlju je data mogućnost primene dobijenih rezultata u već postojećim postupcima analize napona i deformacija u fleksibilnim kolovozima. Imajući u vidu da su ova istraživanja radjena sa našim materijalima i za naše uslove, dobijeni su podaci koji mogu služiti kao polazna osnova za uvođenje jednog tačnijeg postupka za dimenzionisanje fleksibilnih kolovoza.

U zaključcima je data analiza rezultata, njihovo tumačenje i predlozi za dalji rad u ovoj oblasti.

I. ODNOS VOZILA I PUTA

Između više važnih faktora koji utiču na projektovanje kolovoznih konstrukcija puteva i aerodroma, najbitniji su tip vozila, saobraćajno opterećenje i oblik delovanja vozila na konstrukciju. Prilikom razmatranja tipa vozila (uključujući i avion) najvažnije je razmotriti faktore kao što su konfiguracija stajnog trapa, veličina pneumatika, opterećenje po tačku i pritisak u pneumatiku.

Kada se kaže, oblik delovanja vozila na konstrukciju, prvenstveno se misli na brzinu kretanja vozila.

Vozilo u stanju mirovanja izaziva vertikalne pritiske u kolovozu, za razliku od vozila u pokretu gde postoje i znatna horizontalna naprezanja. Pored ovih statičkih naprezanja dolazi do pojave i dinamičkih sila, koje uglavnom zavise od karakteristika vozila, brzine vozila, spoljnih uticaja (krivina, vetar,...) i neravnina na zastoru.

I.1. Vibracije vozila

Najjednostavniji model vozila na kolovoznoj konstrukciji može se prikazati šematski kao na sl. 1. Gde m predstavlja masu vozila, K konstantu opruge (pneumatike) i C koeficijent prigušenja (pneumatici i amortizeri).

Diferencijalna jednačina kretanja ovakvog sistema sa jednim stepenom slobode glasi:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = P_0 \sin \omega t \quad (1)$$

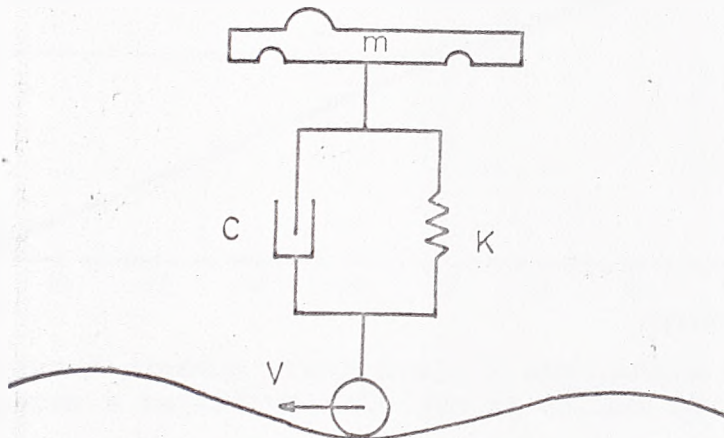
Amplituda oscilatornog kretanja vozila glasi:

$$x_0 = \frac{P_0}{\sqrt{(c\omega)^2 + (k - m\omega^2)^2}} \quad (2)$$

a faznog ugla

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{c\omega}{K - m\omega^2}$$

(3)



Sl. 1 - Šematski prikaz vozila

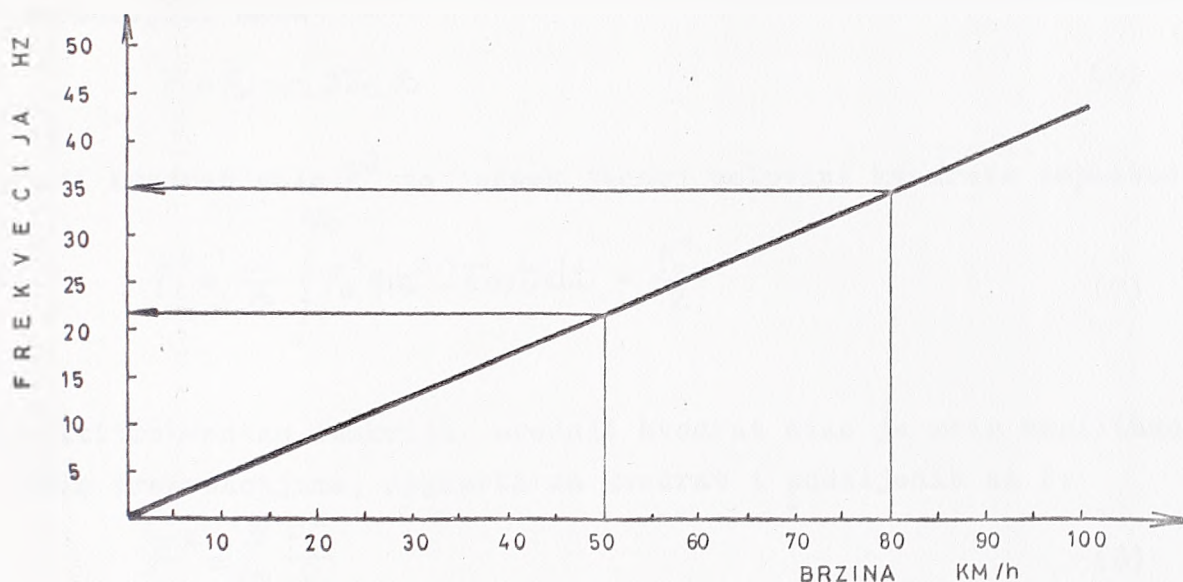
Medjutim, izvršena merenja pokazuju da se vozila u potpunosti ne pokoravaju ovoj diferencijalnoj jednačini. Tako npr. avion DC-7 stvara najveće amplitude vibracija, a avion DC-8 najmanje. Za DC-8, najveće amplitude se kreću u granicama ± 725 kp (± 0.024 g) pri frekvencijama ispod 2,5 c/s. Pri niskim frekvencijama dolazi do pojave rezonancije vibriranja vozila i kolovozne konstrukcije (čija sopstvena frekvencija se kreće od 6 do 15 c/s ili više) što može dovesti do razaranja kolovoza.

Kod automobila ovi odnosi su drugačiji. Na osnovu ugradjenih mernih traka u fleksibilnu kolovoznu konstrukciju i izvršenih merenja od strane "KONINKLIJKE/SHELL - LABORATORIUM, AMSTERDAM" nadjen je odnos između brzine vozila i frekvencije oscilovanja kolovozne konstrukcije (sl. 2).

$$f(c/s) = 0.45 V(km/h)$$

(4)





Sl. 2 - Dijagram promene frekvencije u zavisnosti od brzine vozila izmeren u asfaltnom kolovozu na dubini od 12 cm.

I.2. Stihijne vibracije

Kod jednostavnijih analiza vibracija vozila i kolovozne konstrukcije podrazumeva se da je kolovozna površina potpuno glatka i da nema vibracija prouzrokovanih neravninama zastora. Medjutim, ako se želi korektna analiza vibracija kolovoza i vozila, mora se početi od činjenice da je kolovozna površina neravna i kao takva glavni uzročnik vibracija vozila. Sa gledišta dinamičke analize, neravnine zastora su multifrekventne promenljive vibracije stihijnih talasnih dužina i amplituda.

U proučavanju problema stihijnih vibracija, faza funkcije sile kojom vozilo deluje na kolovoz ima mali uticaj na konačni rezultat. Zbog toga se rezultat stihijnog događaja predstavlja statistički. Na sl. 3-a apscisa predstavlja vreme putovanja; za odredjenu brzinu vreme može biti zavisno od predjenog rastojanja. Ordinata X predstavlja vertikalna odstupanja površine zastora od sredine.

Srednje kvadratno odstupanje je

$$\bar{X}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt \quad (5)$$

Za harmonijsku silu

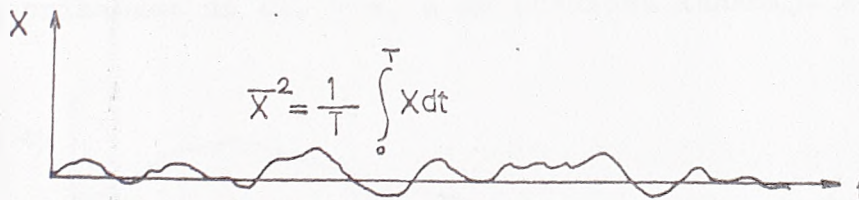
$$F = F_0 \sin 2\pi\omega t \quad (6)$$

srednji kvadrat sile \bar{F}^2 je jednak jednoj polovini kvadrata amplitude.

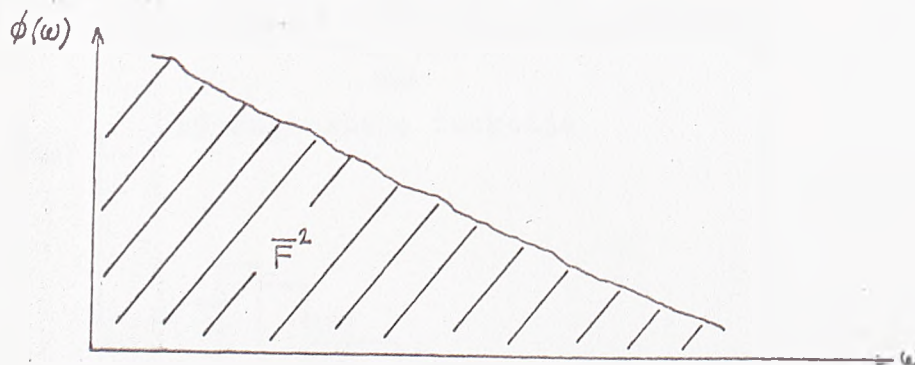
$$\bar{F}^2 = \frac{\omega}{n} \int_0^{n/\omega} F_0^2 \sin^2 2\pi\omega t dt = \frac{F_0^2}{2} \quad (7)$$

Za multifrekventnu funkciju, srednji kvadrat sile je zbir amplituda na svim frekvencijama, dignutih na kvadrat i podeljenih sa 2:

$$\bar{F}^2 = \sum^n \frac{F_n^2}{2} \quad (8)$$



a) Statički model



b) Model multifrekventne funkcije

Sl. 3 - Predstavljanje nepravilnog događaja

Ovo je značajan odnos koji služi za predstavljanje nepravilnih vibracija sastavljenih od multifrekventnih harmonijskih sila. Pomoću ukupne srednje kvadratne vrednosti, multifrekventna funkcija za svaki interval frekvencije može se izraziti kao

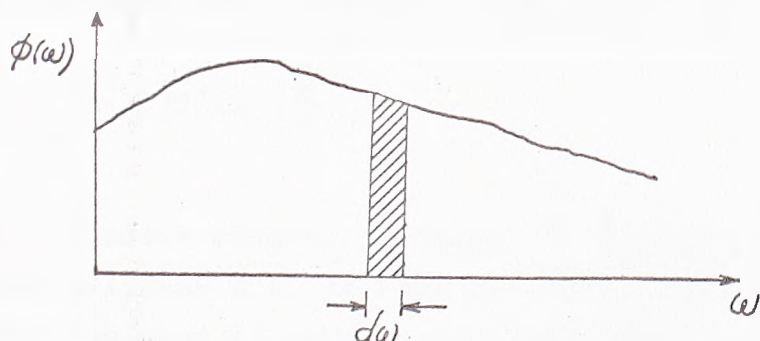
$$\phi(\omega) = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \frac{\Delta(\bar{F}^2)}{\Delta\omega} \quad (9)$$

U slučaju kada je interval frekvencije mali $\Delta \omega$ teži nuli, granična srednja kvadratna vrednost u frekventnom segmentu se definiše kao specifična spektralna snaga (PSD), multifrekventne funkcije $\phi(\omega)$. Za neprekidnu funkciju, srednja kvadratna vrednost nepravilne funkcije može se izraziti kao

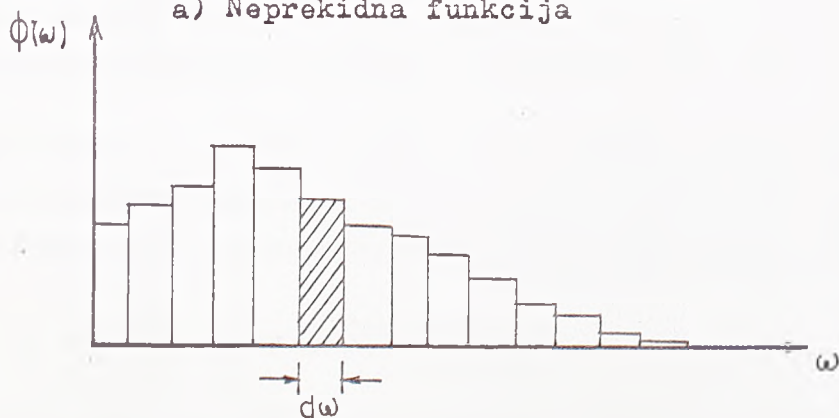
$$\bar{F}^2 = \int_0^{\omega} \phi(\omega) d\omega \quad (10)$$

Iz ove jednačine se može videti da je ukupna površina koju obuhvata ova kriva jednaka srednjoj kvadratnoj vrednosti \bar{F}^2 (sl. 3-b).

Grafički, definicija PSD neprekidne funkcije se može predstaviti kao što je prikazano na sl. 4-a, a za prekidnu funkciju kao na sl. 4-b.



a) Neprekidna funkcija



b) Diskretna funkcija

Sl. 4 - Ilustracija funkcije PSD

Koristeći ovaj postupak, neravnine na kolovoznom zastoru se mogu prikazati funkcijom PSD sastavljenoj od multifrekventnih harmonijskih funkcija.

Ponašanje vozila na neravnom zastoru je ustvari određeno zbirom vibracionih sila pri različitim opsezima frekvencija. Za diskretni sistem, ponašanje vozila bi se moglo izraziti pomoću

$$\bar{X}^2 = \sum^n \frac{F_n^2}{2} H_n^2 \quad (11)$$

gde je F_n amplituda jedne partikularne frekvencije, a H_n odgovarajući faktor povećanja vibracije pri ovoj frekvenciji. Za neprekidni sistem, prethodna jednačina bi dobila oblik

$$\bar{X}^2 = \int_0^\omega \phi(\omega) \frac{1}{[1 - (\omega/\xi)^2]^2 + (2\beta\omega/\xi)^2} d\omega \quad (12)$$

Ako se $\phi(\omega)$ veoma malo menja, tj. može smatrati konstantnom, integracijom prethodne jednačine dobija se

$$\bar{X}^2 = \phi(\omega) \frac{\pi f}{4\beta} \quad (13)$$

Ovo je kvadrat srednje vrednosti \bar{X}^2 ponašanja vozila, koji će u kasnijim analizama biti izražen preko \overline{DI}^2 , jednak PSD vrednosti funkcionalno zavisnoj od neravnina zastora $\phi(\omega)$ i pomnoženoj sa funkcijom prenosa $\pi f / 4\beta$. U ovom slučaju funkcija prenosa je zavisna od sopstvene frekvencije vozila i koeficijenta prigušenja amortizera.

Zbog dinamičkog delovanja neravnina zastora na vozilo izraženog preko dinamičkog uvećanja \overline{DI} , dolazi do reakcije i ponovnog delovanja funkcije sile na zastor. U ovom slučaju funkcija sile postaje

$$F(t) = (1 + \overline{DI}) F \sin 2\pi\omega t \quad (14)$$

Zamenjujući ovaj izraz u jednačinu za međusobni odnos vozila i zastora

$$-K_b z = \frac{F}{g} \ddot{z} \sin 2\pi\omega t$$

dobijamo: $-K_b z = \frac{(1 + \overline{DI}) F}{g} \ddot{z} \sin 2\pi\omega t$ (15)



Na ovaj način su uključene stihijne vibracije u izraz za međusobno dinamičko delovanje vozila i zastora.

Ovo poglavlje je ukazalo na oblik vibracija koje se javljaju prilikom kretanja vozila preko kolovozne konstrukcije. U zavisnosti od potreba našeg izučavanja mi se odlučujemo da posmatramo harmonijske prinudne vibracije sa otpornom silom ili stihijne vibracije.

Imajući u vidu praktičnu stranu izvodjenja eksperimenata, odlučili smo se na harmonijske vibracije, čija se frekvencija kretala od 5 do 100 HZ. Ovakvim izborom frekvencija uspeći smo da obuhvatimo u najvećoj meri sve slučajeve koji se javljaju u praksi. Izvodjenje eksperimenata na nižim frekvencijama od 5 HZ zahteva dodatnu opremu, a samim tim i veće troškove.

II. KARAKTERISTIKE MATERIJALA

U v o d

Dimenzionisanje kolovoznih konstrukcija predstavlja sintezu analize delovanja opterećenja i ponašanja materijala koji ulaze u sastav kolovozne konstrukcije. Problem dimenzionisanja fleksibilnih kolovoza postaje još složeniji kada se ima u vidu da je asfalt viskoelastičan materijal čije osobine prvenstveno zavise od temperature i viskozi-teta bitumena.

Posmatrati izolovano samo jedan parametar, s obzirom na kompleksnost problema, gotovo da je nemoguće.

U okviru proučavanja karakteristika sfaltnog kolovoza "Dinamički modul krutosti" nesumljivo predstavlja najvažniju osnovu za dalji proračun napona i deformacija u kolovozu.

Postoji veliki broj metoda ispitivanja karakteristika kolovoznih materijala. Do 1950. godine učinjeno je mnogo na standardizaciji osnovnih metoda ispitivanja (Marshall-ova, Hubbard-Field-ova, Hveem-ova i Duriez-ova metoda), a od 1950. na nalaženju korelacije između standardnih metoda ispitivanja i rezultata dobijenih eksperimentima na licu mesta (AASHO i WASHO opiti).

Razvojem teorijskih metoda projektovanja dolazi do potrebe uvođenja dinamičkih ispitivanja.

U ovom radu akcenat je i dat na dinamička ispitivanja asfalt-betona sa posebnim osvrtom na parametre koji definišu ponašanje modula krutosti pod ponovljenim opterećenjem.

II.1. Reološke osobine bitumena

Pod pojmom asfaltne mešavine podrazumeva se kompozicija bitumena i agregata. U zavisnosti od njihovih karakteristika i međusobnog odnosa, određuje se i ponašanje asfaltnih mešavina. Zbog toga, reolo-

gija asfaltnih mešavina se može podeliti na dva dela: jedan koji tretira čist bitumen i drugi mešavinu bitumena i agregata.

Predmet proučavanja reologije bitumena je da pronadje odnose između napona, deformacije, trajanja opterećenja i temperature.

Koristeći Hook-ov i Newton-ov zakon mogu se prikazati dve važne osobine bitumena:

a) modul elastičnosti E ;

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad i$$

b) viskozitet η

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{d\varepsilon}{dt}} \quad (16)$$

Modul elastičnosti E se određuje pri manjim deformacijama, a viskozitet η pri većim deformacijama.

Viskozitet izražen preko napona zatezanja i dilatacije glasi:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\varepsilon}} \cdot t = \frac{1}{2(1 + \frac{1}{m})} \cdot \frac{\sigma}{\varepsilon} \cdot t \quad (17)$$

gde je m - Poisson-ova konstanta.

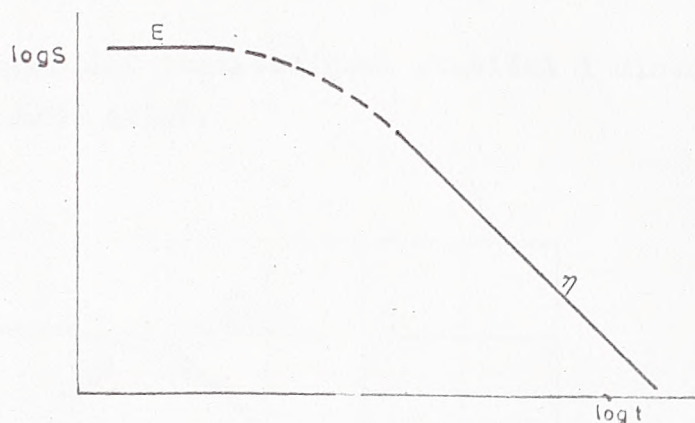
Za bitumen $m = 2$, odakle sledi da je:

$$3\eta = \frac{\sigma}{\varepsilon} \cdot t \quad (18)$$

Van der Poel pri opisivanju otpornosti na deformacije viskoelastičnih materijala u koje spada i bitumen, uzima odnos σ/ε kao funkciju vremena trajanja opterećenja t i temperature T . Ovaj odnos σ/ε je nazvao "STIFFNESS" (krutost) S . U principu veza između modula krutosti i vremena pri datoj temperaturi, za viskoelastičan materijal, predstavljena je krivom oblika - sl. 5.

Leva strana (horizontala) krive odgovara kratkotrajnom opterećenju, pri čemu su deformacije uglavnom elastične, a modul krutosti identi-

čan Young-ovom modulu.



Sl. 5 - Odnos modula krutosti i vremena kod viskoelastičnih materijala pri konstantnoj temperaturi

Desna strana krive, koja pada pod uglom od 45° , odgovara dugotrajnom opterećenju, pri čemu su deformacije uglavnom viskozne i proporcionalne sa vremenom.

Za određivanje modula krutosti kao funkcije vremena primenjuju se statička i dinamička ispitivanja.

Pri statičkoj metodi ispitivanja primenjuje se konstantno opterećenje, a deformacija se meri kao funkcija vremena (vreme deformisanja veće od 1 sec).

Kod dinamičkih metoda ispitivanja napon se menja sinusoidalno sa vremenom

$$\sigma = \sigma' \sin \omega t \quad (19)$$

Amplituda dilatacije se takodje menja sinusoidalno, sa istiom frekvencijom, ali sa razlikom u fazi u odnosu na napon

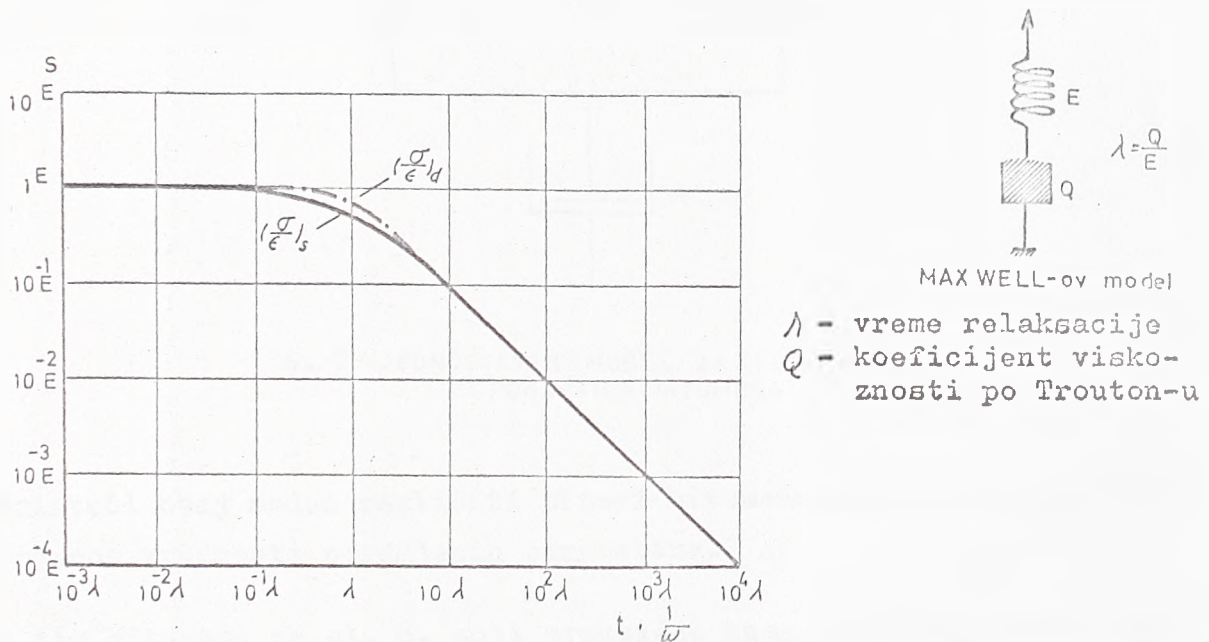
$$\varepsilon = \varepsilon' \sin(\omega t - \varphi) \quad (20)$$

gde je ω - kružna frekvencija

φ - razlika u fazi između napona i deformacije.

Modul krutosti se izračunava pri rezonantnoj frekvenciji u zavisnosti od dimenzija uzoraka. Dinamički metod ispitivanja se primenjuje pri niskim temperaturama i kratkotrajnim opterećenjima (< 1 sec).

Na sl. 6 su grafički predstavljeni statički i dinamički modul krutosti za Maxwell-ov model.



Sl. 6 - Uporedjenje statičkog i dinamičkog modula krutosti (Maxwell-ov model)

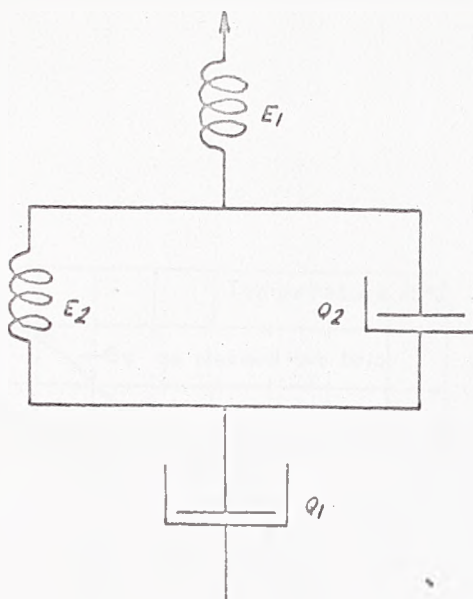
II.1.1. Predstavljanje različitih tipova bitumena mehaničkim modelom

Mehanički model, kojim se može predstaviti reološko ponašanje bitumena pri kratkotrajnom vremenu opterećenja, sastoji se od kombinacije linearnog, paralelno vezanog viskoznog i idealno elastičnog i čisto viskoznog.

Ovo je u stvari kombinacija Maxwell-ovog i Voigt elementa (sl. 7). Za ovaj model deformacija pri konstantnom naponu može se izraziti:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{Q_1} \cdot t + \frac{\sigma}{E_2} (1 - e^{-t/\lambda_r}) \quad (21)$$

gde je $\lambda_r = \frac{Q_2}{E_2}$ vreme retardacije.



SL. 7 JEDNOSTAVAN MODEL ZA ILUSTRACIJU
PONAŠANJA BITUMENA

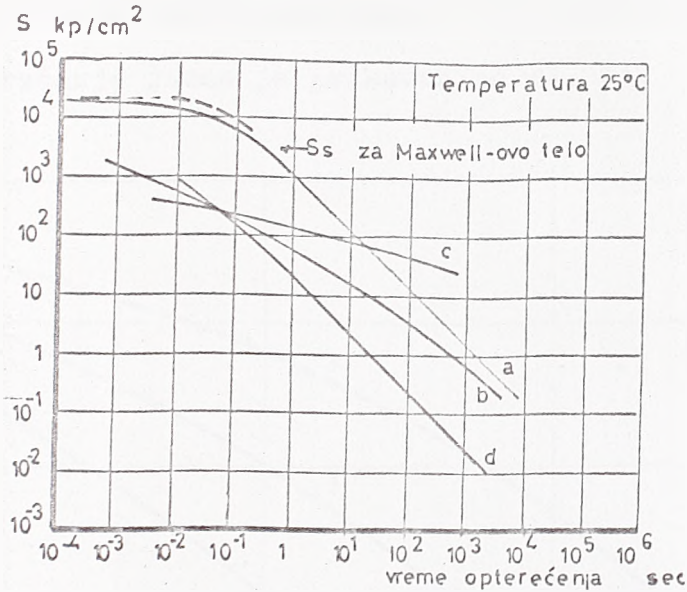
Koristeći ovaj model različiti tipovi bitumena mogu se predstaviti promenom vrednosti odredjenih parametara.

Za tip bitumena na sl. 8, koji praktično nema povratnu elastičnost, parametri E_2 i Q_2 su skoro neznatni. Na slici se vidi da se reološko ponašanje ovog tipa bitumena može skoro kompletno prikazati sa E_1 i Q_1 (Maxwell-ov model).

Bitumeni elastičnog sol tipa (b na sl. 8) koji pokazuju idealnu povratnu elastičnost kao i viskozno tečenje, mogu se predstaviti dobro modelom na sl. 7 .

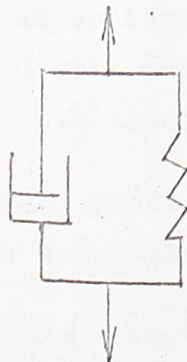
Reološko ponašanje bitumena gel-tipa (c na sl. 8), koji nisu podvrgnuti velikim naponima smicanja i deformacije, može se predstaviti modelom u kome je izostavljen viskozni element Q_1 .

| Bitumen | a | b | c |
|------------|------|------|------|
| pen/25°C | 3 | 15 | 13 |
| PK, °C | 66 | 67 | 120 |
| IP | -2.4 | -0.2 | +5.5 |
| asfalteni% | 3 | 20 | 34 |

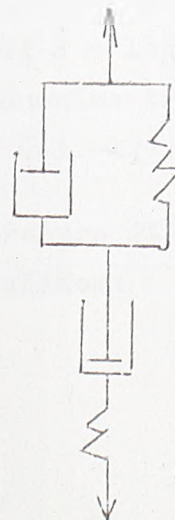


Sl. 8 - Modul krutosti u funkciji od vremena trajanja opterećenja za različite tipove bitumena

Imajući u vidu da se bitumen sastoji od velikog broja komponenata različitih hemijskih karakteristika, molekularne težine i veličine, reološko ponašanje se tačnije može predstaviti samo složenijim modelima.



Sl. 9
Kelvinov model

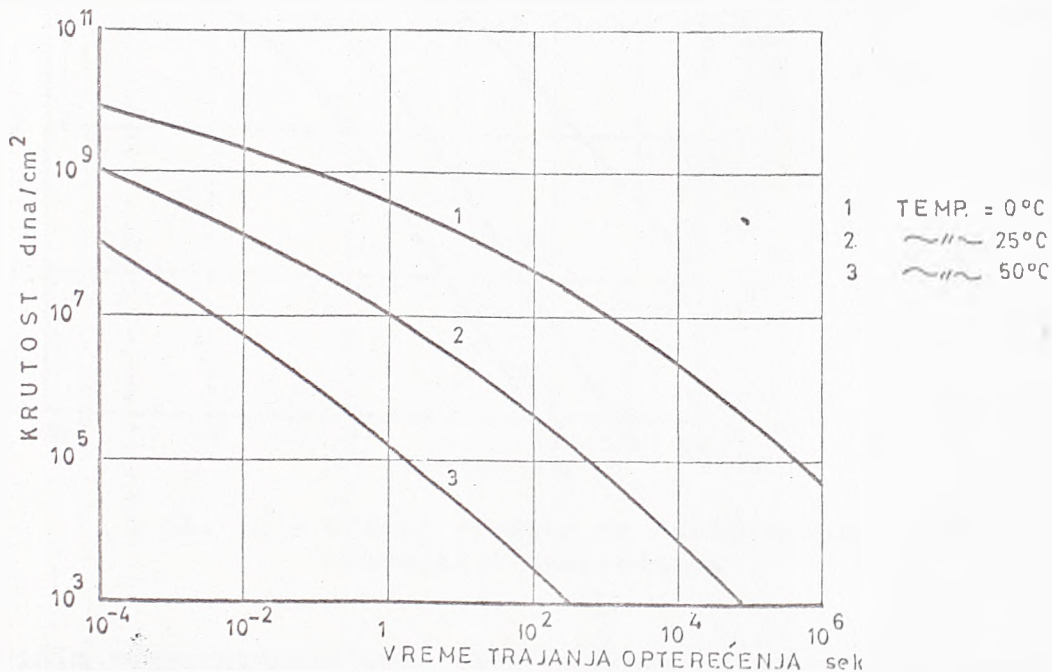


Sl. 10
Burgers-ov model

II.1.2. Uticaj temperature na "modul krutosti" bitumena

Pri niskim temperaturama deformacije su pretežno elastične, a na visokim elastoplastične do plastične.

Uticaj opterećenja jasno je prikazan na sl. 11.



Sl. 11 - Uticaj temperature na odnos modula krutosti i vreme tajanja opterećenja

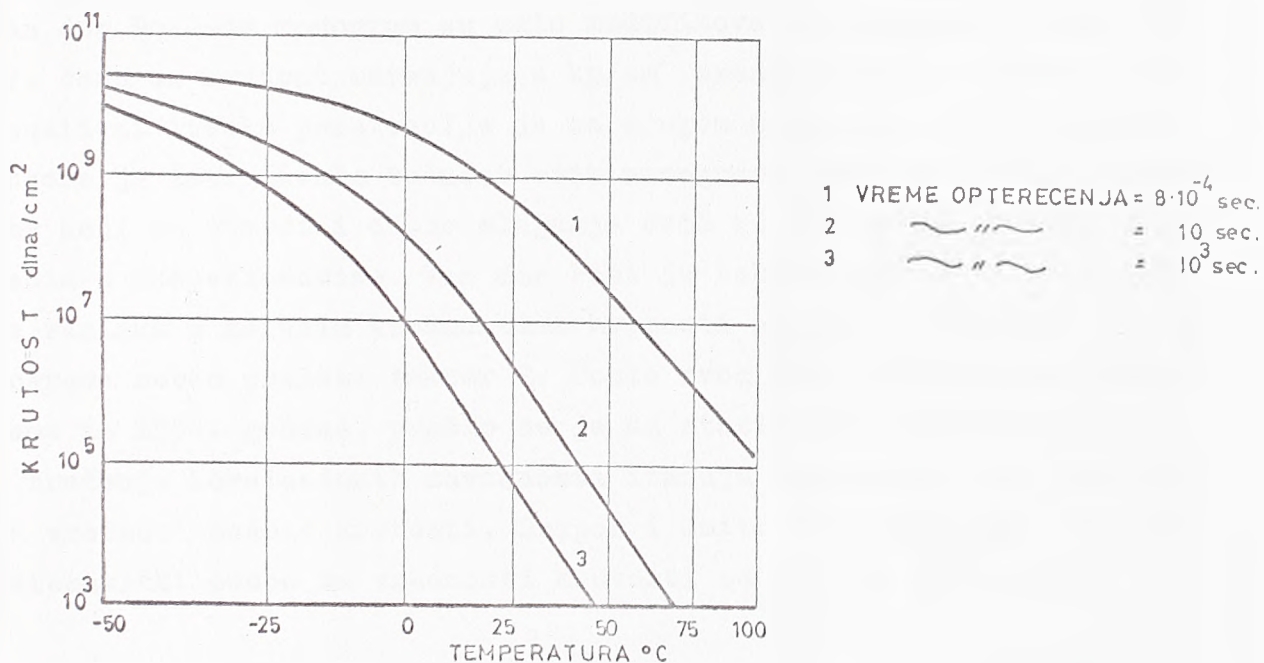
Promenom temperature utiče se na pomeranje log S - log t krivih. Krive koje su bile određene pri različitim vremenima trajanja mogu se dovesti do poklapanja pomeranjem duž ose (t) (sl. 12).

Za ograničeni pojas temperatura (ispod temperature PK) ovaj opšti princip se može aproksimativno izraziti jednačinom:

$$S = f \left(\ln \frac{t}{t_0} - \frac{F}{Rt} \right) \quad (22)$$

gde je R - gasna konstanta
F - aktivna energija i
t₀ - konstanta.

U principu, $\log S - \log t$ krive za bitumen određene za različite temperature (ispod temperature PK), imaju približno isti oblik.



Sl. 12 - Uticaj vremena na odnos modula krutosti i temperature

Pri višim temperaturama može biti odstupanja zbog promene reoloških osobina bitumena. Na primer, kod gel-tipa bitumena, gel struktura se menja pri visokim temperaturama u sol strukturu. Jasno je, da ovo utiče na odnos $\log S - \log t$, sprečavajući poklapanje krivih određenih za različite temperature.

Pri niskim temperaturama i kratkotrajnim opterećenjima svi bitumeni se ponašaju idealno elastično. Krutost je tada identična Young-ovom modulu E sa vrednošću od 2,5 do 3×10^{10} dina/cm², koji važi za sve bitumene ($1 \text{ N/m}^2 = 10 \text{ dina/cm}^2 = 1.02 \times 10^{-5} \text{ kg/cm}^2$).

II.1.3. Grafičko određivanje "modula krutosti" bitumena

Na osnovu eksperimentalnih podataka iz statičkih i dinamičkih ispitivanja Van der Poel (35) je projektovao nomogram (sl. 13) koji omogućuje određivanje "modula krutosti" bitumena na osnovu podataka:

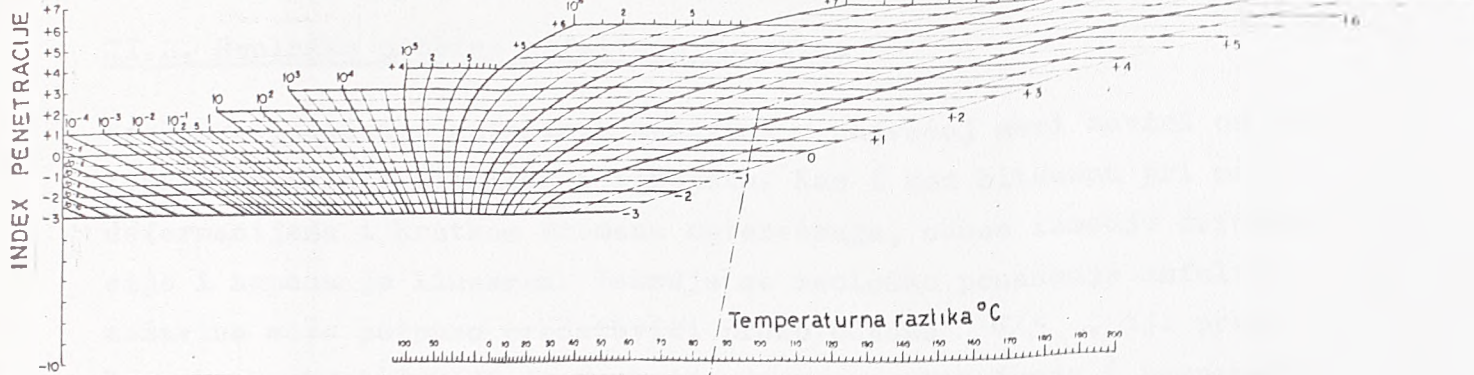
- a) tačke razmekšavanja po prstenu i kuglici (PK),
- b) indeksa penetracije, i
- c) vremena opterećivanja.

Van der Poel-ov nomogram su malo modifikovali Heukelom i Klomp (36), pri čemu se krutost određuje u kp/cm^2 umesto u N/m^2 , a linija za negativni indeks penetracije je na drugom mestu (sl. 14). Nekoliko autora je istraživalo tačnost ovih nomograma, kao npr. Pell i McCarthy koji su utvrdili dobro slaganje ovih rezultata sa stvarno dobijenim u eksperimentima. Van der Poel je takodje došao do zaključka da razlika u merenim vrednostima krutosti asfalta i dobijenih iz nomograma retko prelazi faktor 2. Posle ovog Van der Poel-ovog nomograma iz 1954. godine, prešlo se je na statističku obradu podataka i traženje korelacionih zavisnosti izmedju komponenti koje određuju vrednost modula krutosti. Draper i Smith (36) daju npr. sledeći matematički odnos za vrednosti krutosti od 10^{-7} do 10^1 kg/cm^2 :

$$\log_{10} S = -1.35927 - 0.06743(T) - 0.90251 \log(t) + 0.00038(T)^2 - 0.00138 (T \times \log t) + 0.00661 (PI \times T) \quad (23)$$

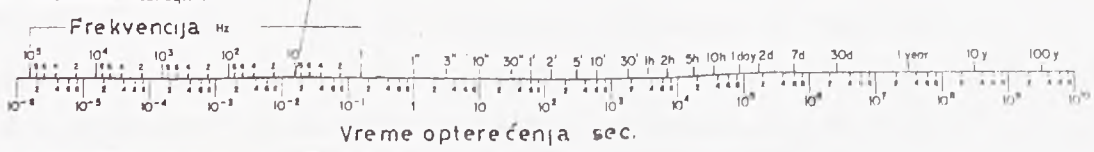
gde je: T - temperatura ispitivanja minus PK, °C
 t - vreme opterećenja, sec; i
 PI - indeks penetracije.

MODUL KRUTOSTI N/m²

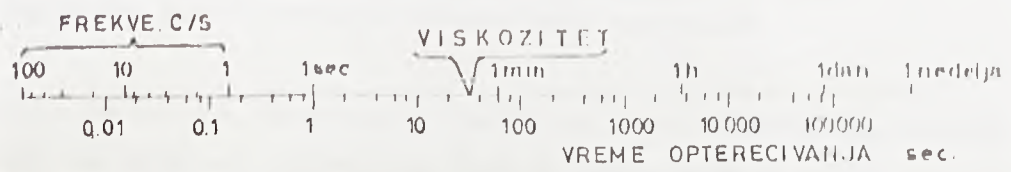
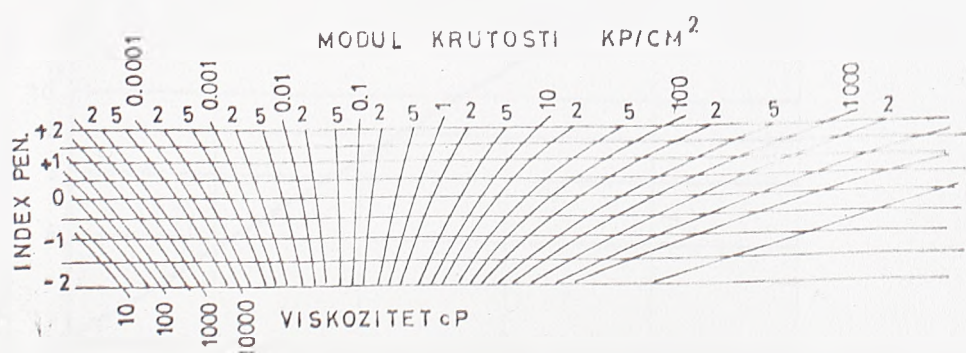


$$IP = \frac{20 - IP}{10 + IP} = 50 \frac{\log pen_{na T1} - \log pen_{na T2}}{T1 - T2}$$

1 N/m² = 10 dyn/cm² = 1.02 x 10⁻⁵ kgf/cm² = 1.45 x 10⁻⁴ lb/sq.in.
 1 N s/m² = 10 P



SL.23 Van der Poel-ov NOMOGRAM ZA ODREĐIVANJE MODULA KRUTOSTI BITUMENA



SL.24 HEUKELOM-ov i KLOMPOV-ov DIJAGRAM ZA ODREĐIVANJE MODULA KRUTOSTI BITUMENA

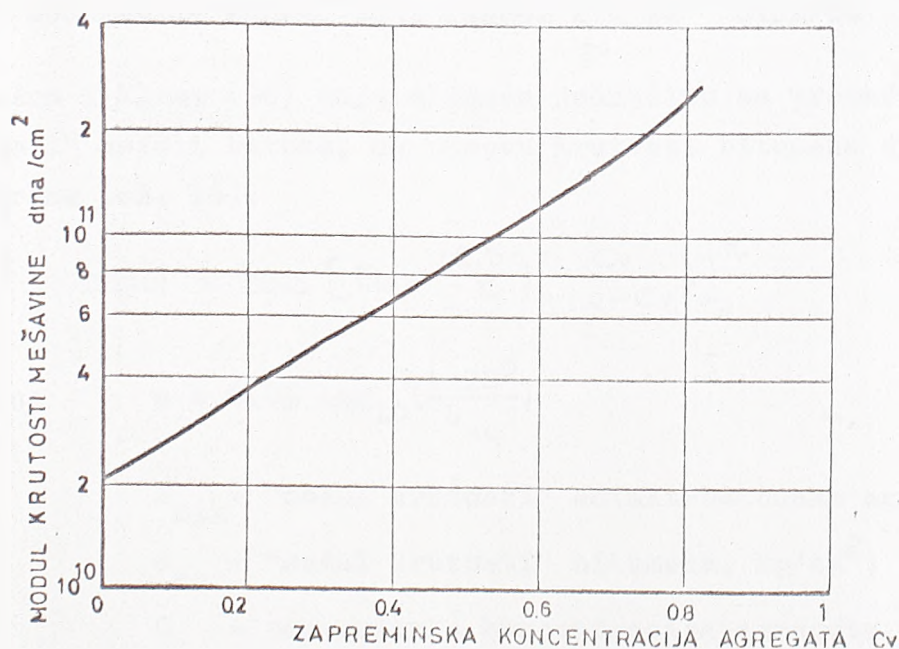
II.2. Reološke osobine asfaltnih mešavina

Reološko ponašanje asfaltnih mešavina u najvećoj mjeri zavisi od reološkog ponašanja bitumena i agregata. Kao i kod bitumena pri malim deformacijama i kratkom vremenu opterećenja, odnos između deformacije i napona je linearan. Takođe se reološko ponašanje asfaltnih mešavina može potpuno predstaviti preko odnosa σ/ϵ , tj. preko "modula krutosti" koji je funkcija vremena opterećenja i temperature.

A) UTICAJ KOLIČINSKOG UČEŠĆA MINERALNOG AGREGATA

(1) Dinamička istraživanja pri kratkotrajnom vremenu trajanja opterećenja

Krutost asfaltnih mešavina zavisi od krutosti bitumena i zapreminskog odnosa bitumena i agregata. Uticaj zapreminske koncentracije agregata na "modul krutosti" asfaltnih mešavina prikazan je na sl. 15.



Sl. 15 - Odnos između "modula krutosti" mešavine i zapreminske koncentracije mineralnog agregata

Kod asfaltnih mešavina, priroda i veličina zrna mineralnog agregata nema uticaja na krutost mešavine. Uprkos promenama u veličini zrna

(fil-er, pesak,...) sve tačke praktično leže na jednoj liniji. Samo pri visokoj koncentraciji agregata (oko 80% zapremine i više) ima uticaj veličina zrna. U ovom slučaju krutost se može razlikovati za faktor 2.

Za mešavine sa zapreminskom koncentracijom mineralnog agregata od oko $C_v = 25\%$, odnos krutosti i koncentracije može se izraziti Eilers-ovim i Van Dijck-ovim empiričkim obrascem:

$$\frac{S_m}{S_a} = \left(1 + \frac{1.25 C_v}{1 - 1.128 C_v} \right) \quad (24)$$

gde se "m" odnosi na mešavinu i "a" na bitumen.

Za vrlo niske koncentracije ova jednačina se menja u Einstein-ovu formulu:

$$\frac{\eta_m}{\eta_a} = 1 + 2.5 C_v \quad (25)$$

Pri visokim koncentracijama, krutost mešavine je ograničena Young-ovim modulom za kamen, koji iznosi 2×10^{12} dina/cm².

Heukelom i Klomp (36) daju sledeću jednačinu za proračun "modula krutosti" asfalt betona, na osnovu krutosti bitumena dobijene iz nomograma (sl. 14):

$$S_{mix} = S_{ac} \left[1.0 + \left(\frac{2.5}{n} \right) \left(\frac{C_v}{1.0 - C_v} \right) \right]^n \quad (26)$$

gde je: $n = 0.83 \log_{10} \left(\frac{4 \times 10^5}{S_{ac}} \right)$

S_{mix} - "modul krutosti" asfalt-betonske mešavine, kp/cm²

S_{ac} - "modul krutosti" bitumena, kp/cm²; i

C_v - zapreminska koncentracija agregata.

Zapreminska koncentracija agregata u mešavini definiše se kao:

$$C_v = \frac{\text{zapremina sabijenog agregata}}{\text{zapremina (bitumena+agregata)}}$$

Ovaj izraz bi se mogao zameniti ekvivalentnom vrednošću, dobijenom na uzorcima iz kolovoza ili napravljenim u laboratoriji.

$$C_v = \frac{1}{1+C} \quad (27)$$

gde je $C = \left(\frac{W_B}{W_A}\right) \times \left(\frac{G_A}{G_B}\right) = (\text{procenat bitumena po težini}/100) \times \left(\frac{G_A}{G_B}\right)$

gde je:

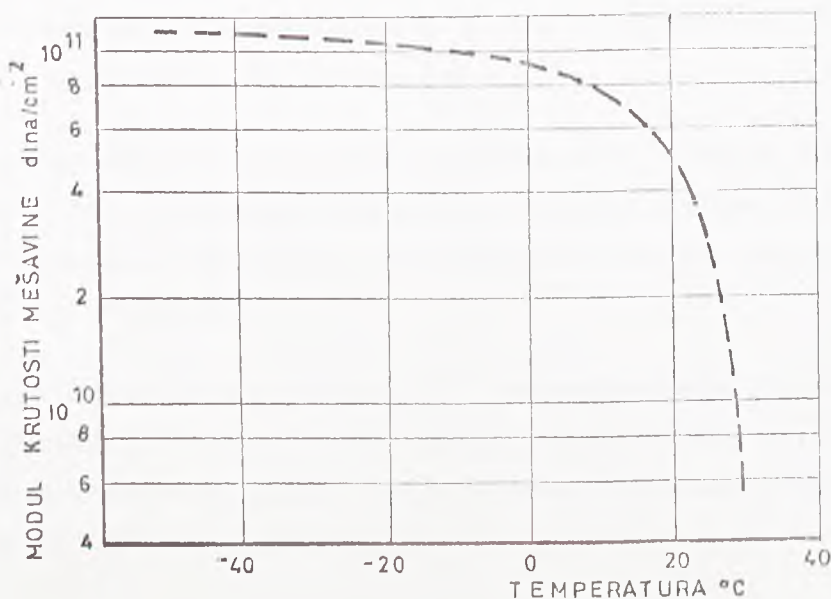
- W_B - težina bitumena
- W_A - težina agregata
- G_B - specifična težina bitumena i
- G_A - specifična težina agregata.

Odnos S_{mix} (26) važi za dobro sabijene mešavine sa oko 3% šupljina ispunjenih vazduhom. Za mešavine sa šupljinama većim od 3%, Draat i Sommer (38) su utvrdili korekciju za C_v :

$$C'_v = \left(\frac{C}{1+H}\right) \quad (28)$$

gde je: H = stvarne šupljine ispunjene vazduhom - 0.03.

Uticaoaj temperature na krutost asfaltne mešavine (u ovom slučaju pešćane asfaltne mešavine) prikazan je na sl. 16.



Sl. 16 - Uticaj temperature na krutost pri 60 C/S

(2) Statička istraživanja pri dugotrajnom vremenu trajanja opterećenja

Koristeći rezultate triaksijalnih ispitivanja utvrđeno je da koncentracija agregata isto kao i priroda agregata utiče na osobine asfaltnih mešavina. Postoji optimalna granica učešća količine bitumena i šupljina u asfaltnim mešavinama.

Početna otpornost τ_e puno zavisi od kompozicije mineralnog agregata, posebno od filera (zrna $< 74 \mu$) i zrna agregata ($> 2\text{mm}$).

Prema Nijboer-u τ_e kod peščanih asfalta opada sa faktorom 1.7, sa podizanjem temperature od 10°C .

B) VEZA IZMEDJU REOLOŠKIH OSOBINA ASFALTNIH MEŠAVINA I KOMPONENATA ASFALTNIH MEŠAVINA

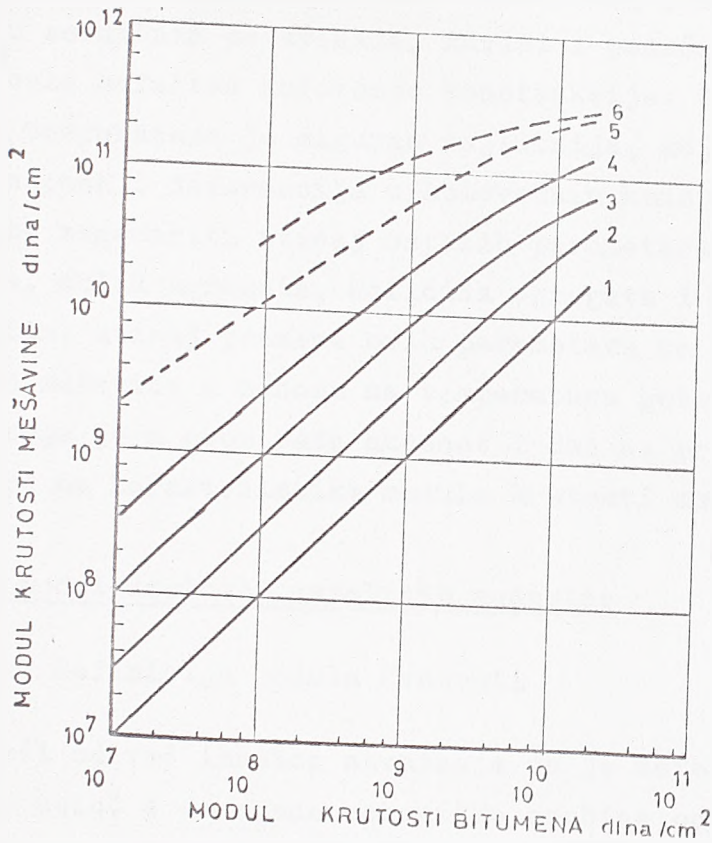
Reološke osobine asfaltnih mešavina neposredno zavise od tipa upotrebljenog bitumena.

Zavisnost modula krutosti asfaltnih mešavina od modula krutosti bitumena pri istom vremenu trajanja opterećenja za različitu koncentraciju mineralnog agregata data je na sl. 17.

Za svaku koncentraciju mineralnog agregata krutost bitumena određuje krutost mešavine, što je takodje slučaj kada se ista zavisnost postavi i u odnosu na temperaturu (sl. 18).

Statička ispitivanja su pokazala da vrednosti početne otpornosti τ_e i viskoziteta η_m asfaltnih mešavina takodje zavise od "modula krutosti" (viskoziteta) bitumena. Obe vrednosti se povećavaju sa povećanjem krutosti bitumena.

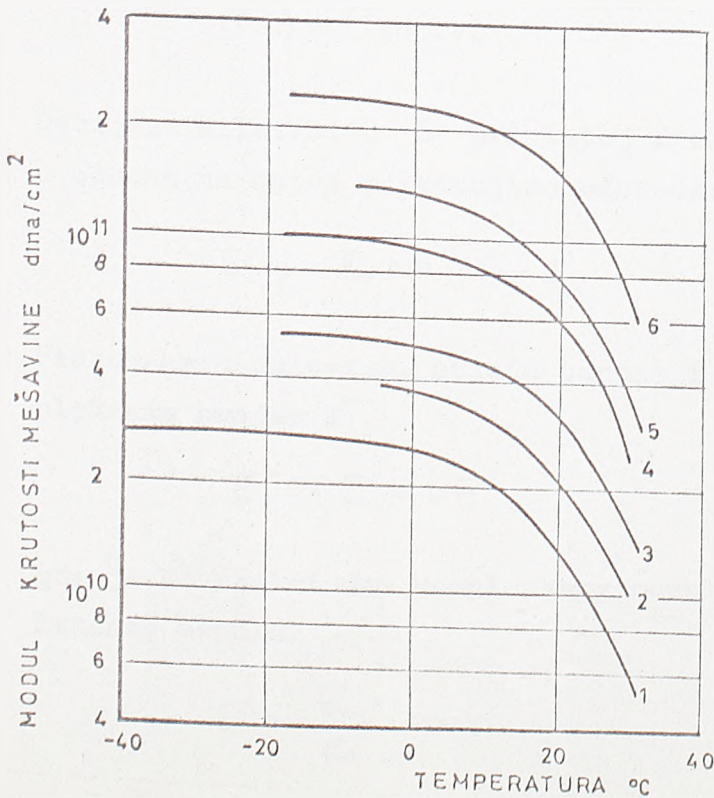
Vrednost ugla unutrašnjeg trenja φ mešavine malo je zavisna od krutosti bitumena. Posebno treba istaći da čvrstoća na lom asfaltnih uzoraka prvenstveno zavisi od bitumena, a da mineralni agregat ima mali uticaj.



No KONCEN. MIN. AGREGATA

- 1 0 ČIST BITUMEN
- 2 30 MASTIKS
- 3 50 ~~~
- 4 70 ~~~
- 5 81 PEŠČANI ASF.
- 6 86 ASF. BETON

Sl. 17 - Odnos "modula krutosti" bitumena i mešavine za različite koncentracije agregata



No KONCENTRACIJA AGREGATA % zap.

- 1 0 ČIST BITUMEN
- 2 14 MASTIKS
- 3 24 ~~~
- 4 47 ~~~
- 5 60 ~~~
- 6 75 ~~~

Sl. 18 - "Modul krutosti" mešavine u funkciji od temperature pri istoj frekvenciji

Na osnovu izloženih stavova iz reologije asfaltnih mešavina i bitumena, može se zaključiti da od reološkog ponašanja bitumena kao veziva u asfaltnim mešavinama, zavisi i ponašanje asfaltnih mešavina pa i cele asfaltne kolovozne konstrukcije. Od svih spoljašnjih faktora, temperatura je sigurno najbitnija, koja utiče direktno na stanje napona i deformacija u kolovoznim konstrukcijama. Pri tome se ne može zanemariti uticaj ostalih parametara (količina veziva, tip veziva, oblik agregata, količina agregata i njegov medjusobni odnos). Medjutim, uticaj promene ovih parametara na reološko ponašanje asfaltnih mešavina u odnosu na temperaturu gotovo da je zanemarljiv. Zbog toga je u ovom radu akcenat i dat na proučavanje uticaja temperature na karakteristike modula krutosti asfalt betona.

II.3. Modul krutosti asfaltnih mešavina

II.3.1. Definicija modula krutosti

Polazeći od već iznetog shvatanja da je asfaltna mešavina viskoelastično telo, i da njene mehaničke osobine pored veličine opterećenja zavise od perioda trajanja i temperature, primenjujemo radi lakšeg proučavanja sinusoidalni napon:

$$\tilde{\sigma}(t) = \tilde{\sigma} \sin \omega t \quad (29)$$

Dobijenu dilataciju \mathcal{E} pri istoj frekvenciji, ali različitoj fazi u odnosu na napon prikazujemo odnosom:

$$\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_0 \sin(\omega t - \varrho) \quad (30)$$

Pod ovakvim uslovima, stanje napona i deformacija se prikazuju kompleksnim brojem E^* .

$$E^* = E' + i E'' \quad (31)$$

gde je E' realni deo kompleksnog modula, a E'' imaginarni deo kompleksnog modula.

$$E' = \frac{\tilde{\sigma}_0}{\mathcal{E}_0} \cdot \cos \varrho \quad (32)$$

$$E'' = \frac{\tilde{\sigma}_0}{\varepsilon_0} \sin \varphi \quad (33)$$

E' je komponenta modula koja predstavlja sačuvanu povratnu energiju, a E'' izgublenu energiju na unutrašnjem trenju u materijalu.

Apsolutna vrednost kompleksnog modula je:

$$|E^*| = \frac{\tilde{\sigma}_0}{\varepsilon_0} \quad (34)$$

Odnos amplituda napona i dilatacije naziva se "modulom krutosti" i kao termin je veoma rasprostranjen u stručnoj literaturi.

II.3.2. Istorijat proučavanja "modula krutosti"

Iako su istraživanja uticaja osobina asfaltnih mešavina na napone i deformacije preduzeta još pre 35 godina, nije dovoljno proučen uticaj veličine, dužine trajanja opterećenja i temperature.

Mali broj ispitivanja je urađen na utvrđivanju uticaja količine bitumena, šupljina ispunjenih vazduhom i ostalih karakteristika asfaltnih mešavina.

Van der Poel (21) i (22) je definisao ponašanje viskoelastičnog materijala u funkciji od vremena i temperature kao - STIFFNESS MODULUS - "modul krutosti" dat izrazom:

$$(S)_{t,T} = \left(\frac{\tilde{\sigma}}{\varepsilon} \right)_{t,T} \quad (35)$$

koji važi za bilo koju odredjenu kombinaciju vremena trajanja opterećenja i temperature T.

Monismith i Seed (23) su 1962. godine saopštili rezultate opsežnih istraživanja "modula krutosti" u pojasu od 100 kp/cm^2 do $20\,000 \text{ kp/cm}^2$ za različite asfalt-betonske mešavine, opsege temperatura i dužine trajanja opterećenja.

Finn (24) je pored pomenutih faktora, utvrdio niz novih koji utiču

na "modul krutosti" asfaltnih kolovoznih mešavina. Po njemu granulometrijski sastav ima mnogo veći uticaj od tipa bitumena (pri konstantnoj količini bitumena) pri dužem vremenu trajanja opterećenja.

Pagen i Ku (25) upotrebljavaju opit tečenja, da bi ispitali uticaj tipa bitumena, granulometrijskog sastava i vrste agregata na "modul krutosti".

Heukelom i Klomp (26) su ispitivali vezi između "modula krutosti" i modula krutosti bitumena. Oni smatraju da zbog komplikovane geometrije asfaltnih mešavina, odnos "modula krutosti" mešavine i bitumena S_{mix}/S_{bit} ne može biti tačno sračunat. Zbog toga su dali poluempirički obrazac koji izražava odnos S_{mix}/S_{bit} u zavisnosti od koncentracije agregata C_v .

$$S_{mix}/S_{bit} = \left(1 + \left(\frac{2.5 C_v}{n(1-C_v)} \right) \right)^n \quad (36)$$

gde je

$$n = 0.83 \log_{10} \left(\frac{4 \times 10^5}{S_{bit}} \right) \quad (37)$$

Iz ovih jednačina i dijagrama datih od Van der Poel-a (26) moguće je za različite temperature koje se upotrebljavaju u projektovanju, dobiti "modul krutosti" mešavine. U slučaju viših temperatura preporučuju Nijboer-ovu formulu, koja daje preko rezultata opita po Marshall-u vrednost krutosti mešavine:

$$S_{60} C^{\circ}, 4 \text{ sec (kp/cm}^2) = 1.6 \frac{\text{stabilnost (kp)}}{\text{tečenje (mm)}} \quad (38)$$

Nešto izmenjenim putem su krenuli Finn, Hicks, Kavi i Cayne (27) kada su došli do zaključka da gustina mase, količina pešćanih frakcija agregata i penetracija bitumena utiču na dinamički modul krutosti. Njihovi rezultati se baziraju na podacima dobijenim prilikom ispitivanja uzoraka kolovoza, a označavaju sledeće odnose:

$$\log_e M_r(\text{modul krutosti} \times 10^{-3}) = -1.86 - 0.016 (\text{penetracija}) + 0.047 (\text{gustina}) + 2.58 (\% \text{peska}) \quad (39)$$

Goetz (28) je proučavao promenu dinamičkog modula krutosti u zavisnosti od temperature asfalt betona, koji sadrži različitu količinu i vrstu bitumena.

Utvrдио je vezu između dinamičkog modula krutosti i količine bitumena. Pored toga, pronašao je da penetracija bitumena malo utiče na modul krutosti.

Jimenez i Gallaway (29) su utvrdili da se dinamički modul krutosti odredjen deflektometrijskim opitom, povećava linearno sa većom gustinom uzoraka.

Bazin i Saunier (30) su utvrdili da šupljine ispunjene vazduhom znatno utiču na vrednost "modula krutosti", tj. da sa povećanjem šupljina dolazi do opadanja modula. Ovaj odnos može biti linearan ako se posmatraju logaritamske vrednosti. Oni su takodje utvrdili zavisnost modula krutosti od tvrdoće i temperaturne osetljivosti bitumena u mešavini.

I na kraju treba istaći rad McLeod-a (31) koji predlaže sledeći izraz za sračunavanje modula krutosti:

$$\text{Modul} = 40 \frac{\text{stabilnost}}{\text{tećenje}} \quad (40)$$

Treba odmah istaći da je ovaj obrazac sličan Nijboer-ovom i da nije prihvaćen od mnogih autora.

II.3.3. Zavisnost modula krutosti od temperature i trajanja opterećenja

Modul krutosti elastičnih materijala jednak je modulu elastičnosti E , koji je u ovom slučaju, nazavisan od vremena opterećenja i temperature. Viskozni materijali se karakterišu preko njihovog viskoziteta η , vrednosti koja uglavnom zavisi od temperature. Prema defi-

niciji viskoziteta, napon σ koji izaziva deformaciju dat je izrazom:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma}{3\eta} \quad (41)$$

Za konstantni napon u vremenu t , počevši od $\varepsilon = 0$ pri $t = 0$, deformacija je jednaka:

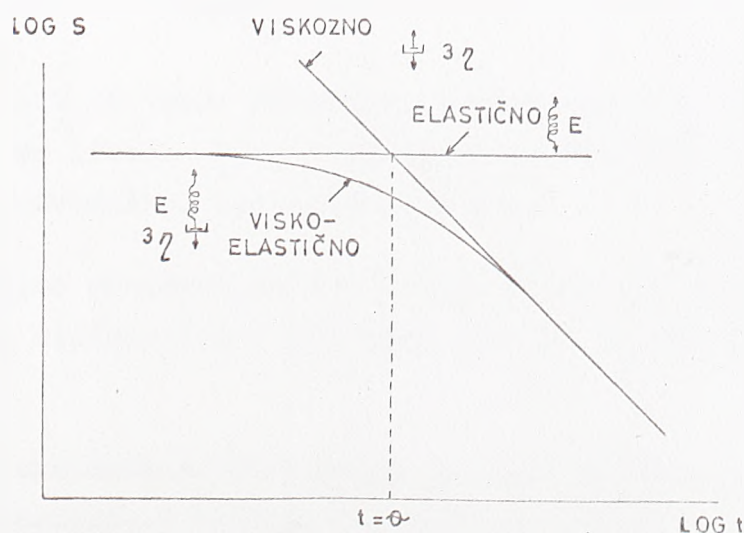
$$\varepsilon = \frac{\sigma t}{3\eta} \quad (42)$$

Stoga se modul krutosti može izračunati u zavisnosti od vremena i temperature u ovom slučaju kao:

$$(S)_{t,T} = \frac{3\eta(T)}{t} \quad (43)$$

što znači da je modul krutosti viskoznog materijala u osnovi inverzno proporcionalan trajanju opterećenja.

Viskoelastični materijali se ponašaju složeno, kao što je prikazano na sl. 19.



Sl. 19 - Modul krutosti različitih materijala u zavisnosti od vremena opterećivanja

Pri kratkom vremenu trajanja opterećenja (dinamičkom opterećenju)

oni se ponašaju elastično, a pri dugačkom skoro viskozno. Ovo se može predstaviti i modelom sastavljenim od opruge (E) i prigušenja (3η). Ponašanje ovog modela u odnosu na opterećenje može se prikazati preko diferencijalne jednačine:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} - \frac{\sigma}{\lambda} = 0 \quad (44)$$

odakle se dobijaju sledeći izrazi za modul krutosti:

a) statičko opterećenje; $\sigma = \text{const}$; $\varepsilon = 0$ pri $t = 0$;

$$S = \frac{E}{1 + t/Q} \quad (45)$$

b) konstantan iznos deformacije; $d\varepsilon/dt = \text{const}$; $\sigma = 0$ pri $t = 0$

$$S = \frac{3\eta}{t} (1 - e^{-\frac{t}{\theta}}) = \frac{E}{t/\theta} (1 - e^{-\frac{t}{\theta}}) \quad (46)$$

c) dinamičko opterećenje; $\sigma = \sigma \sin \omega t$; $\varepsilon = \varepsilon \sin (\omega t - \varphi)$;

$$S = \frac{E}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega\theta}\right)^2}} \quad (47)$$

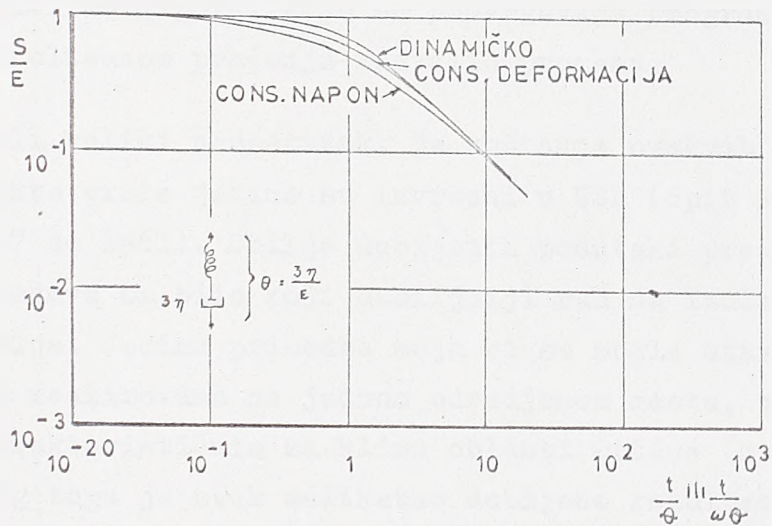
gde je: $\theta = 3\eta/E$ vreme relaksacije sistema, koje odgovara vremenu pri kome se linije η i E seku na sl. 19; $\omega = 2\pi f$, gde je f frekvencija dinamičkog opterećenja u c/s.

Sve tri jednačine pokazuju da $S \rightarrow E$ kada $t \rightarrow 0$ ili $\omega \rightarrow \infty$. U drugom ekstremnom slučaju $S \rightarrow 3\eta/t$ kada je $t \gg 0$, dok $S \rightarrow 3\eta/\omega$ kada $\omega\theta \ll 1$.

Prema tome, u ekstremnim slučajevima postoji odlična korelacija između dinamičkih i statičkih vrednosti modula krutosti dobijenih stavljajući da je:

$$t = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{2\pi f} \quad (48)$$

Razlike izmedju tri jednačine (a, b i c) vide se na sl. 20 na mestu gde je $t = \theta$ i $\omega\theta = 1$. Za jednostavan model, gde je $t = \theta$ i $\omega\theta = 1$, modul krutosti pri konstantom opterećenju je 70% od dinamičkog modula, a 90% od modula pri konstantnom iznosu deformacije.



Sl. 20 - Modul krutosti u zavisnosti od vremena i frekvencije

III. EKSPERIMENTALNO ODREĐJIVANJE DINAMIČKOG MODULA KRUTOSTI

U v o d

Najpravilniji način ispitivanja fleksibilnih kolovoznih konstrukcija sastoji se u izgradnji opitnih deonica sa kolovoznim konstrukcijama različitih tipova, koje se podvrgavaju programiranom saobraćaju i kontrolisanom praćenju nastalih promena.

Jedini, ali veliki nedostatak, je koštanje ovakvih eksperimenata. Opiti ovakve vrste jedino su izvršeni u USA (opit WASHO-1959 i AASHO-1957 do 1961). Obilje dobijenih podataka predstavlja i danas polaznu osnovu za bilo koji ozbiljniji rad na izučavanju kolovoznih konstrukcija. Jedina primedba koja bi se mogla staviti je, da su ispitivanja realizovana na jednom odredjenom mestu, pri vremenskim uslovima karakterističnim za klimu oblasti Ottawe (država Illinois u USA). Zbog toga je uvek delikatno dobijene rezultate ekstrapolirati bez prethodnih ispitivanja koja se odnose na lokalne uslove.

Ukoliko se unapred dozvoli izvesno odstupanje od stvarnosti tj. da se vrši oponašanje stvarnog saobraćaja i kolovozne konstrukcije, moguće je izvršiti terenska i laboratorijska ispitivanja koja imaju niz povoljnosti (mali troškovi, kratko vreme izvodjenja eksperimenata, promena velikog broja parametara uz minimum ulaganja, odlična korelacija sa stvarno izmerenim podacima na terenu, itd.).

Ovde će biti izložen jedan terenski i laboratorijski aparat za dinamičko ispitivanje modula krutosti fleksibilnih kolovoznih konstrukcija.

III.1. Terensko ispitivanje modula krutosti

Primena terenskih metoda ispitivanja modula krutosti datira od 1950. godine, kada su "Corps of Engineers at the Waterways Experiment Station" i "Shell Research Laboratory" u Amsterdamu konstruisali aparaturu sa teškim mehaničkim vibratorom za merenje vibracija u kolovoznoj konstrukciji. Preko par ekscentričnih doboša, ekscentri-

teta r koji rotiraju kružnom brzinom ω stvara se funkcija sile koja deluje na površinu zastora. Horizontalne ekscentrične sile su međusobno poništene, tako da deluje samo vertikalna sila vibracije Pd . Pod dejstvom ove sile na površinu idealno elastičnog materijala, dolazi do pojave tri tipa talasa. To su a) P - primarni talas, b) S - sekundarni talas i c) R - Rayleigh-ov talas. U zavisnosti od osobina materijala formiraju se brzine rasprostiranja talasa (V_p , V_s i V_r).

Na sl. 21 je prikazan odnos izmedju brzine talasa P i R prema S u funkciji od Poisson-ovom odnosa. Na osnovu ove slike moglo bi se zaključiti: da je V_s nezavisna od Poisson-ovog odnosa sredine, dok je V_p nasuprot mnogo zavisnija. Brzina V_r je neznatno zavisna od μ . Zbog toga prilikom rešavanja praktičnih problema može se uzeti da je

$$V_s \approx V_r$$

Teorijski važi odnos

$$\alpha = \frac{V_r}{V_s} \quad (49)$$

gde je α konstanta proporcionalnosti.

Na osnovu iznetih teorijskih razmatranja, modul krutosti materijala, određuje se iz sledećih jednačina:

Za S talase:

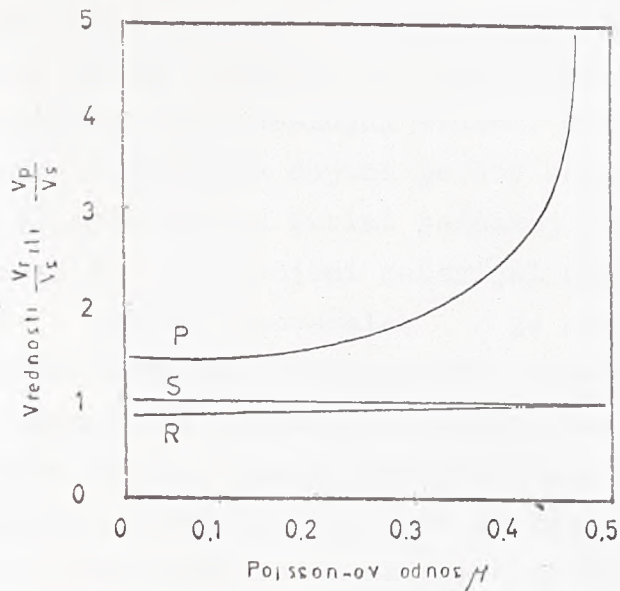
$$E = 2(1+\mu)G = 2(1+\mu)V_s^2 \left(\frac{\gamma_m}{g} \right) \quad (50)$$

Za P talase:

$$E = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)V_p^2 \left(\frac{\gamma_m}{g} \right)}{(1-\mu)} \quad (51)$$

Za R talase:

$$E = \frac{2(1+\mu)V_r^2 \left(\frac{\gamma_m}{g} \right)}{\alpha^2} \quad (52)$$



Sl. 21 - Uticaj Poisson-ovog odnosa na brzinu talasa

U ovim jednačinama, kao što se vidi, na osnovu izmerene vrednosti brzine talasa "V" odredjuje se modul krutosti. Brzina rasprostiranja talasa data je izrazom:

$$V = L \cdot f \quad (53)$$

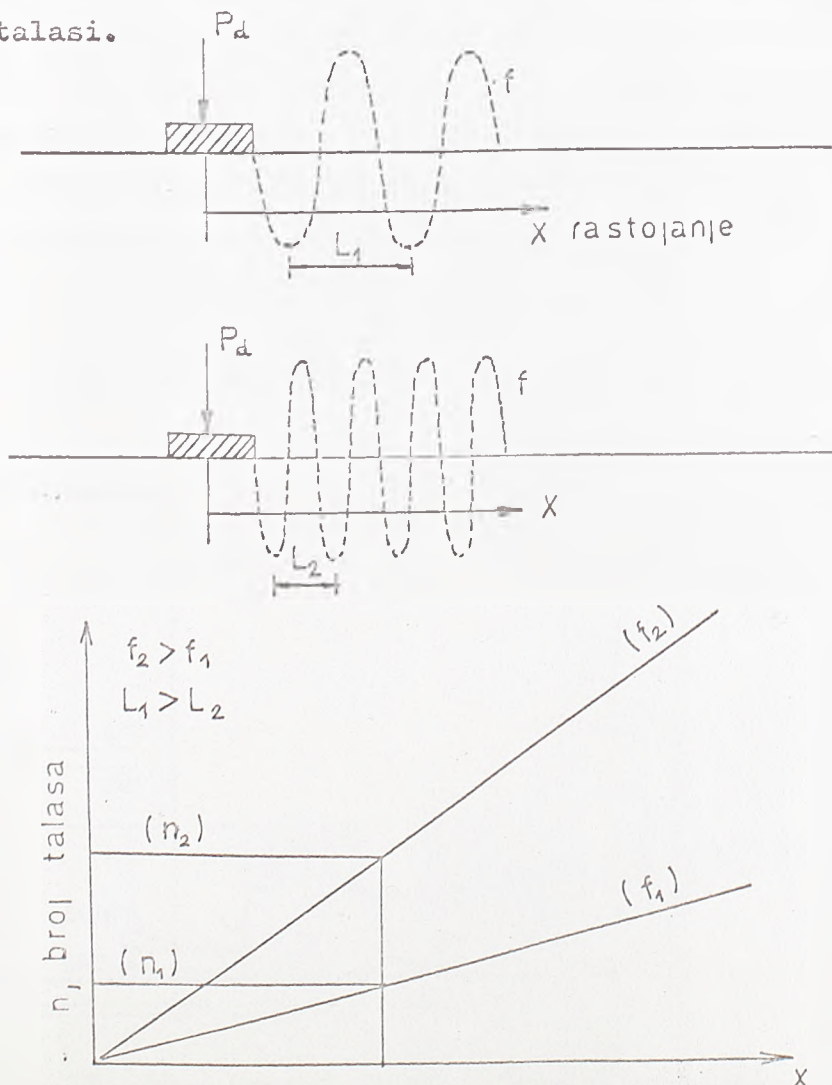
gde je: L - dužina talasa, i f - frekvencija.

Na sl. 22 je ilustrovana jednačina 53. Brzina rasprostiranja talasa, nastalih od vibrirajućeg opterećenja Pd, frekvencije f, meri se preko električnog detektora, osciloskopa i fazometra. Talasna dužina se normalno odredjuje iz izmerenog broja talasa n na odredjenom rastojanju X. Na osnovu dijagrama sa osama n i x, a za različite frekvencije odredjuje se talasna dužina i odgovarajuća brzina rasprostiranja talasa. Sa povećanjem frekvencije dolazi do opadanja talasne dužine. Znači za datu frekvenciju, odredjuje se talasna dužina, a na osnovu jednačine 53 se sračunava brzina talasa.

Za idealno uniformnu elastičnu sredinu,

$$V = f_1 L_1 = f_2 L_2 = \dots = f_n L_n \quad (54)$$

Za ovakav materijal brzina talasa je nezavisna od frekvencije, a modul se može sračunati preko jednačina 50 i 51 na osnovu rezultata jedne frekvencije. Međutim, za višeslojni sistem, ovaj idealni slučaj se mora modifikovati. Najvažnija dopuna je što se uvode u razmatranje R talasi koji se rasprostiru na dubini jednakoj L_T . Prosečna vrednost modula krutosti E za određeni materijal dobija se na jednoj polovini dubine L_r . Ako se f povećala, L_r je opala i izmerene osobine odgovaraju bliže površini. Takodje, ako f opada, L_r se povećava i daje osobine materijala tipične za dublje slojeve. Prema tome, kod višeslojnih konstrukcija visoke frekvencije se upotrebljavaju za određivanje osobina na površini dok niske frekvencije vibratora za osobine posteljice. Tačku osmatranja najpre dostižu primarni (longitudinalni talasi), zatim sekundarni (transverzalni) i na kraju Rayleigh-ovi talasi.



Sl. 22 - Prikaz rasprostiranja talasa kroz idealnu elastičnu sredinu

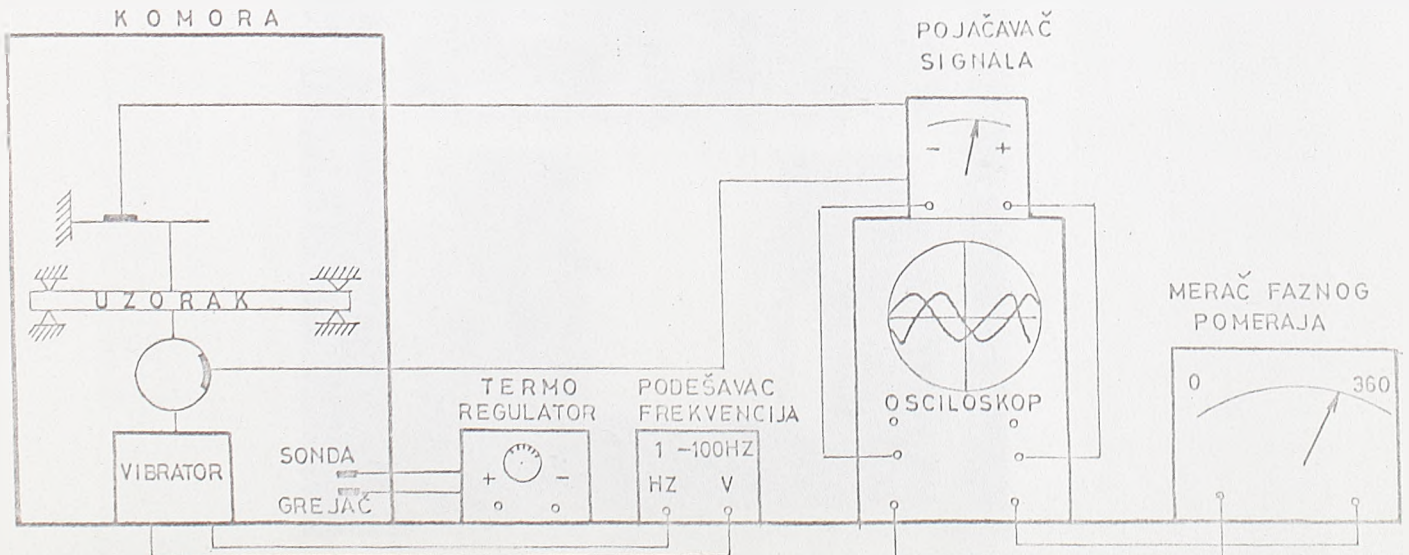
II.2. Laboratorijsko određivanje modula krutosti

Rezultati dobijeni laboratorijskim ispitivanjima u svakom slučaju imaju manju vrednost, nego oni dobijeni na licu mesta. U stvari, najveći problem prilikom laboratorijskih ispitivanja je da se nađe odgovarajući model koji će dovoljno tačno reprezentovati događaje u stvarnosti.

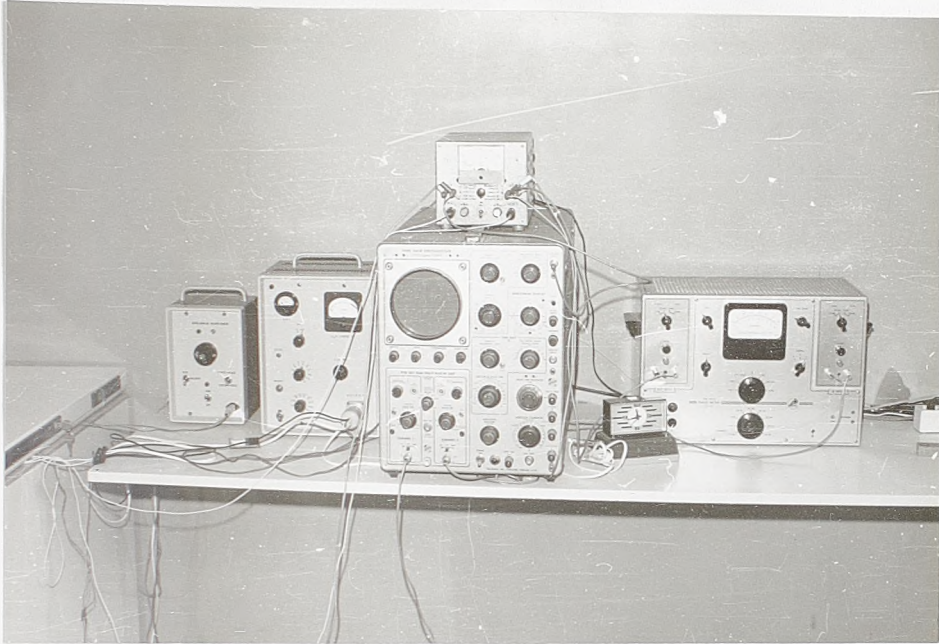
Postoje modeli koji u razmeri 1:n potpuno verno predstavljaju stvarne uslove i oni čija oprema zaprema 2 m^2 .

S obzirom na naše materijalne mogućnosti mi smo u Laboratoriji za puteve - Građevinskog fakulteta u Beogradu, konstruisali aparat za dinamička ispitivanja asfalta. Po konstrukciji aparat je originalan (svi delovi aparata, osim osciloskopa, vibratora i fazometra, su ručne izrade), a po idejnom rešenju ima par uzora u najpoznatijim svetskim istraživačkim centrima. Ovako konstruisan aparat omogućava ispitivanje pojedinih reoloških karakteristika asfalta, kao što su: modul krutosti, kompleksni modul elastičnosti, zamor ... i to u funkciji od opterećenja, frekvencije i temperature.

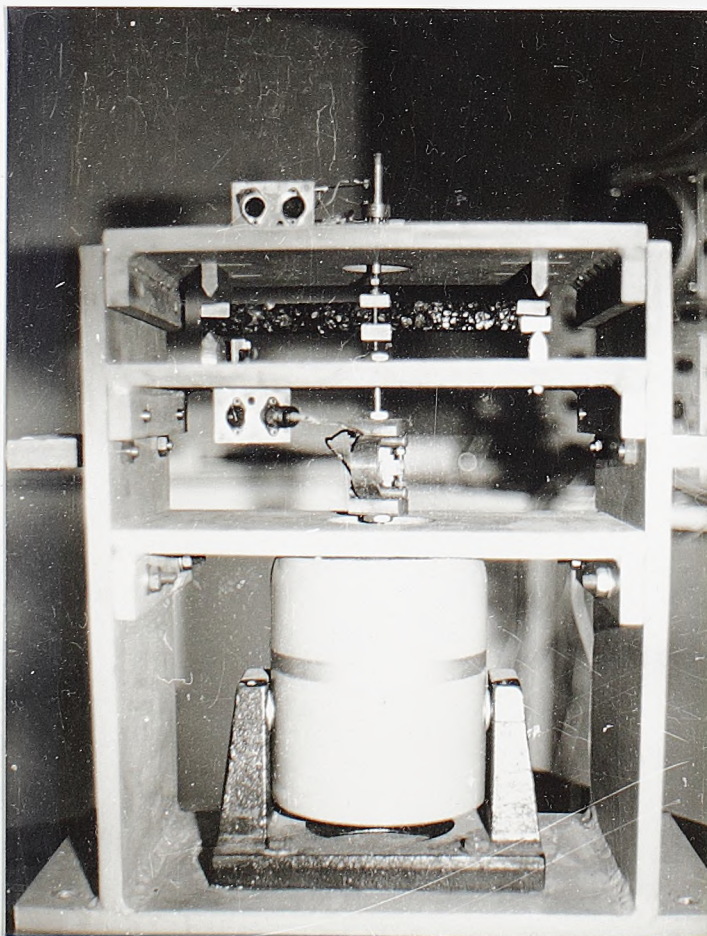
Konstruktivni detalji aparata prikazani su na sl. 23, 24 i 25.



Sl. 23 - Aparat za dinamičko ispitivanje asfaltnih gredica



S1. 24



S1. 25

Osnovni delovi aparata su:

- osciloskop (za registrovanje amplituda sile i ugiba)
- merač faznog pomeranja (za merenje fazne razlike između trenutka dejstva sile i nastalog pomeranja)
- birač frekvencija sile (od 1 do 100 HZ sa intervalom od 1/2 HZ)
- pojačivač signala (pojačava signale sa mernih traka)
- termoregulator (omogućava izbor temperature na kojoj će se obavljati ispitivanje; od -36°C do $+100^{\circ}\text{C}$, sa intervalom od $1/10^{\circ}\text{C}$)
- vibrator (proizvodi sinusoidalno opterećenje max jačine 25 kp)
- merač sile (kombinacija više čeličnih prstena sa ugradjenim mernim trakama za merenje jačine sile kojom vibrator deluje na uzorak)
- merač ugiba (konzola sa mernom trakom koja registruje ugib i reguliše najveći dozvoljeni ugib prilikom rezonancije da ne bi došlo do oštećenja aparature)
- držač uzoraka i prateće opreme (metalna konstrukcija postolja za jedan deo aparature)
- termoregulaciona komora (prepravljen frižider za duboko zamrzavanje sa ugradjenim grejačem i regulacionom sondom)
- merač vremena ispitivanja uzoraka (električni časovnik koji se automatski uključuje prilikom ispitivanja i isključuje u trenutku razaranja uzorka).

III.2.1. Prikaz postupka ispitivanja modula krutosti

Uvod

Pre početka ispitivanja trebalo je razrešiti niz na oko lakih problema. Najznačajniji su svakako način spravljanja uzoraka i izbor reprezentativnog uzorka. Postoje dva načina da se dodje do uzoraka - asfaltnih gredica dimenzija 25 x 3 x 2 cm. Jedan je da se one seku iz kolovoza ili laboratorijski napravljenih ploča, a drugi da se prave u kalupima. Ovaj principijelno lak problem rešen je dosta naporno pravljenjem uzoraka u kalupima. Tom prilikom smo došli do zaključka da se jedino dinamičkim sabijanjem može postići 100% zbijenost po "Marshall"-u (u odnosu na zbijenost standardnih Marshall-ovih cilindara).

Asfaltna mešavina se sastojala od:

| | |
|---------------------------|-------|
| - kamenog braška | 10% |
| - peska | 5% |
| - kamene sitneži 0 - 2 mm | 30% |
| - kamene sitneži 2 - 5 mm | 25% |
| - kamene sitneži 5 - 8 mm | 15% |
| - kamene sitneži 8 -12 mm | 15% |
| | <hr/> |
| | 100% |

- bitumen 50/55 6,75%

sa fizičko-mehaničkim osobinama:

| | |
|---|-----------------------|
| - stabilnost po "Marshall"-u na 60°C | 1000 kp |
| - tečenje po "Marshall"-u na 60°C | 3,75 mm |
| - zapreminska težina po "Marshall"- -ovim uzorcima | 2,33 t/m ³ |
| - šupljine u asfaltnoj masi | 4,11% |
| - šupljine u asfaltnim gredicama | 4,53% |

od koje je napravljeno i ispitano 250 gredica (sl. 26). Nakon više-nedeljnih proba izbor je pao na mineralnu mešavinu sastavljenu po Fulerovom principu za asfalt betone (sl. 27).

Iako je sa peščanim asfaltnim mešavinama mnogo lakše raditi, odlučio sam se za asfalt-betonsku mešavinu zbog njene rasprostranjenosti u našim uslovima, a i zbog povezivanja sa rezultatima ispitivanja modula krutosti bituminiziranog šljunka koji sam radio u magistarskom radu. Da bi se smanjila rasipanja rezultata u toku merenja modula krutosti, svi uzorci su bili identičnog sastava, dimenzija i zapreminske težine.

III.2.2. Postupak ispitivanja

Pre početka ispitivanja bilo je neophodno izbaždariti sve merne uređaje. U suštini bilo je moguće meriti samo električne veličine, tj. napon struje na mernim trakama koji je pojačavan i registrovan na

osciloskopu. Na osnovu ovih vrednosti preko dijagrama (dobijenih u fazi baždarenja) očitovane su vrednosti sile i ugiba.



Sl. 26

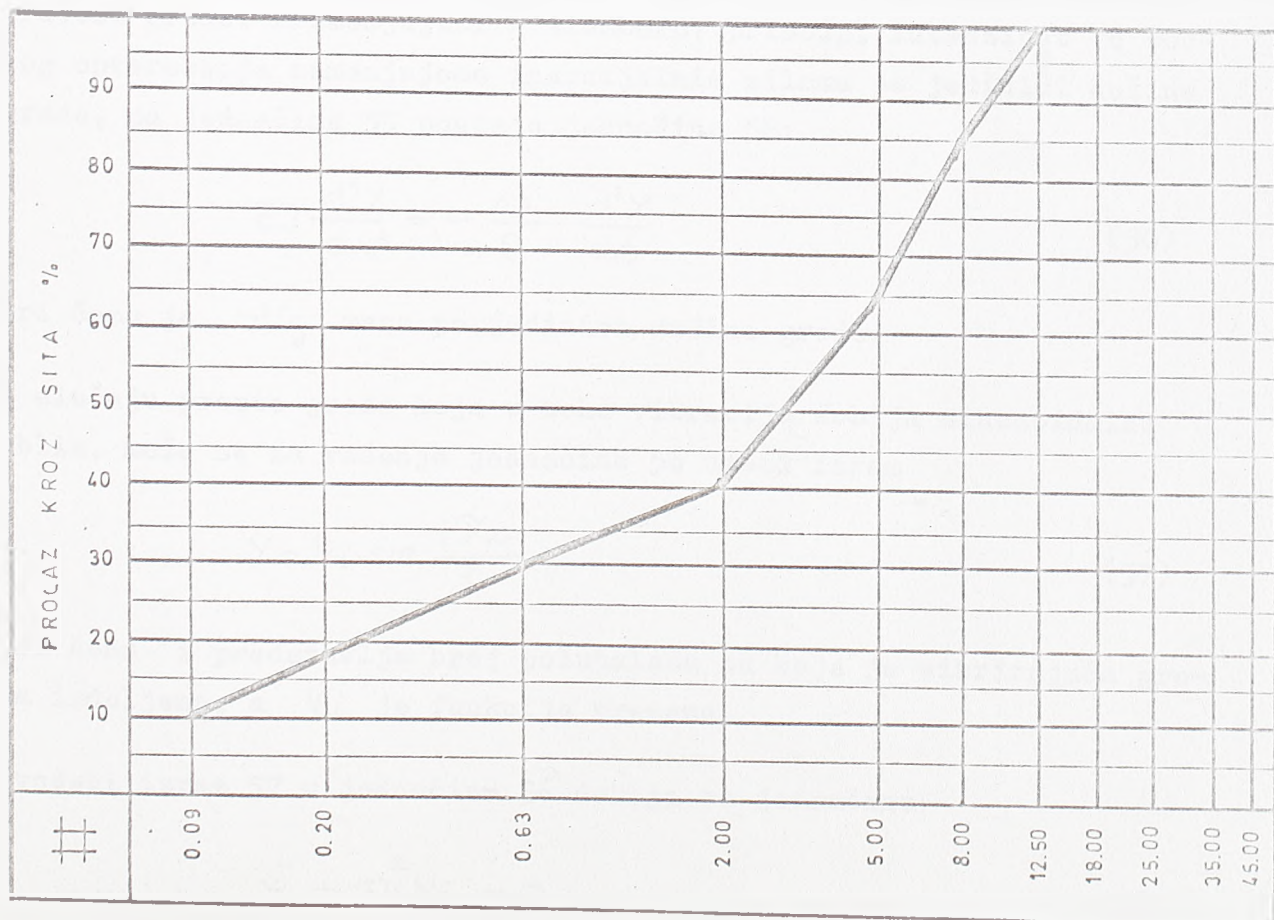
Pre početka ispitivanja uzorci su temperirani u komori do postizanja konstantne temperature. Ovo vreme se kretalo od 30' do 60'. Zatim su uzorci stavljeni na merno postolje i uključivan vibrator koji je preko mernog prstena delovao predvidjenom silom i njenom frekvencijom na uzorak.

Različite temperature ispitivanja zahtevale su i različite debljine čeličnih prstenova (zbog velikih razlika u veličini modula krutosti na različitim temperaturama). Preko konzole sa ugradjenim mernim trakama registrovan je ugib i zaustavljen aparat u trenutku rezonancije, kada je dolazilo do naglog skoka amplituda ugiba.

| FRAKCIJA | PROLAZ OSNOVNIH FRAKCIJA | | | | | | |
|---------------|--------------------------|------|-------|------|-------|-------|-------|
| | 0.09 | 0.20 | 0.63 | 2.00 | 5.00 | 8.00 | 12.50 |
| OTVORI SITA | 0.09 | 0.20 | 0.63 | 2.00 | 5.00 | 8.00 | 12.50 |
| KAMENO BRAŠNO | 79.8 | 98.8 | 100.0 | | | | |
| PESAK | 87.5 | 91.0 | 100.0 | | | | |
| 0 - 2 | 8.5 | 19.7 | 47.3 | 81.3 | 100.0 | | |
| 2 - 5 | 0.8 | 1.3 | 2.8 | 6.4 | 71.9 | 100.0 | |
| 5 - 8 | 0.2 | 0.3 | 0.5 | 0.9 | 5.4 | 83.4 | 100.0 |
| 8 - 12.5 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.6 | 18.0 | 95.0 |

| FRAKCIJA | UCE- ŠĆE | PROLAZ SASTAVLJENE MEŠAVINE | | | | | | |
|-------------|-------------|-----------------------------|------|------|------|------|------|-------|
| | | 0.09 | 0.20 | 0.63 | 2.00 | 5.00 | 8.00 | 12.50 |
| OTVORI SITA | | 0.09 | 0.20 | 0.63 | 2.00 | 5.00 | 8.00 | 12.50 |
| KAMENO B. | 10 | 8.0 | 9.9 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 |
| PESAK | 5 | | 1.3 | 4.8 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 |
| 0 - 2 | 30 | 2.5 | 5.9 | 14.2 | 24.4 | 30.0 | 30.0 | 30.0 |
| 2 - 5 | 25 | 0.2 | 0.3 | 0.6 | 1.6 | 18.0 | 25.0 | 25.0 |
| 5 - 8 | 15 | | | | 0.1 | 0.8 | 12.5 | 15.0 |
| 8 - 12.5 | 15 | | | | | 0.1 | 2.7 | 15.0 |
| UKUPNO | 100 | 10.7 | 17.4 | 29.6 | 41.1 | 63.9 | 85.2 | 100.0 |

LINIJA PROSEJAVANJA



Sl. 27 - Granulometrijski sastav mineralne mešavine

U trenutku rezonancije dolazilo je uvek do loma uzorka. Na visokim temperaturama je zbog brze pojave rezonancije bio veliki problem registrovanja svih mernih veličina. Pojačivač signala sa mernih traka zbog svoje znatne osetljivosti, tražio je uvek intervencije u toku ispitivanja. Na ekranu osciloskopa registrovane su veličine amplituda sile i ugiba u Volta/cm, a kasnije pretvarane u kp i mm. Pored ovih vrednosti registrovao sam i fazni pomeraj, ali ga nisam koristio u daljem toku rada.

III.2.3. Sračunavanje modula krutosti

Diferencijalna jednačina statičke krive ugiba elastične prizmatične grede je

$$EJ \frac{d^4 y}{dx^4} = q \quad (55)$$

pri čemu q predstavlja intenzitet raspodeljenog opterećenja, a EJ krutost grede. Primenjujući D'Alembertov princip, intenzitet q bočnog opterećenja zamenjujemo inercijalnim silama po jedinici dužine grede, pa jednačina 55 postaje jednačina 56:

$$EJ \frac{d^4 y}{dx^4} = - \frac{\omega}{g} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (56)$$

pri čemu je ω/g masa po jedinici dužine grede.

U slučaju proste grede koja u toku vibracija dobija sinusoidalni oblik, može se za rešenje jednačine 56 uzeti izraz

$$y = \varrho_i \cdot \sin \frac{i\pi x}{\ell} \quad (57)$$

pri čemu i predstavlja broj polutalasa na koje je vibrirajuća greda izdeljena, a ϱ_i je funkcija vremena.

Uvodeći izraz 57 u jednačinu 56 dobija se jednačina

$$\ddot{\varrho}_i + p_i^2 \varrho_i = 0 \quad (58)$$

u kojoj je primenjena oznaka

$$p_i^2 = \frac{i^4 \pi^4}{l^4} \cdot \frac{EJg}{\omega} \quad (59)$$

Diferencijalna jednačina 58 predstavlja prosto harmonijsko kretanje, čija je frekvencija

$$\lambda_i = \frac{p_i}{2\pi} = \frac{\pi \cdot i^2}{2l^2} \sqrt{\frac{EJg}{\omega}} \quad (60)$$

Kod prinudnih vibracija grede pod $q(x,t)$ raspodeljenom pobudjujućom silom, koristeći prethodni princip, koji dodajemo inercijalnim silama na desnoj strani jednačine 56 dobijamo

$$EJ \frac{d^4 y}{dx^4} = -\frac{\omega}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + q(x,t) \quad (61)$$

Nalazeći rešenje ove jednačine u obliku (57) i uvodeći ga natrag, dobijamo

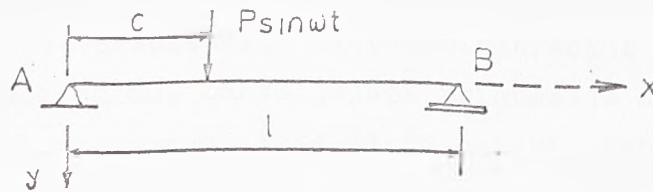
$$\ddot{e}_i \sin \frac{i\pi x}{l} + p_i^2 e_i \sin \frac{i\pi x}{l} = \frac{g}{\omega} q(x,t) \quad (62)$$

Sada se pomnože obe strane jednačine sa $\sin(i\pi x/l)dx$, pa izvrši integrisanje po dužini l grede.

$$\ddot{e}_i + p_i^2 e_i = \frac{2g}{\omega l} \int_0^l q(x,t) \sin \frac{i\pi x}{l} dx \quad (63)$$

Za slučaj kada umesto raspodeljene pobudjujuće sile $q(x,t)$ na gredu deluje stalno pulzirajuća sila $P \sin \omega t$, funkcija $q(x,t)$ iščezava za sve vrednosti od x , izuzev za $x = c$ (sl. 28), pa tako dobijamo

$$\int_0^l q(x,t) \sin \frac{i\pi x}{l} dx = P \cdot \sin \omega t \sin \frac{i\pi c}{l} \quad (64)$$



sl. 28

Ako ovo unesemo u desnu stranu jednačine (63) ona postaje

$$\ddot{e}_i + p_i^2 e_i = \frac{2gP}{\omega l} \sin \omega t \cdot \sin \frac{i\pi c}{l} \quad (65)$$

a zatim koristeći se jednačinom za numeričko integrisanje

$$x_1 = x_0 + \frac{1}{2} \left(\frac{x_0}{p_0} + \frac{x_1}{p_0} \right) \Delta(p_0 \cdot t) \quad (66)$$

dobijamo opšte rešenje

$$e_i = \frac{2gP}{p_i \omega l} \cdot \sin \frac{i\pi c}{l} \int_0^{t_1} \sin \omega t \cdot \sin(p_i t - p_i t) dt \quad (67)$$

koje posle integracije postaje

$$e_i = \frac{2gP}{\omega l} \sin \frac{i\pi c}{l} \left(\frac{\sin \omega t}{p_i^2 - \omega^2} - \frac{\omega}{p_i} \frac{\sin p_i t}{p_i^2 - \omega^2} \right) \quad (68)$$

Uvodeći ovaj izraz za \$e_i\$ u jednačinu 57 dobija se \$i\$-ti način vibriranja grede. Uzimajući \$i = 1, 2, 3, \dots\$ te sumirajući odgovarajuće načine vibriranja, dobija se potpuno rešenje za reagovanje grede na pobudjujuću silu \$P \sin \omega t\$, koje glasi

$$y = \frac{2gP}{\omega l} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\sin(i\pi c/l) \sin(i\pi x/l)}{p_i^2 - \omega^2} \sin \omega t - \frac{2gP}{\omega l} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\omega}{p_i} \frac{\sin(i\pi c/l) \sin(i\pi x/l)}{p_i^2 - \omega^2} \sin p_i t \quad (69)$$

Prvi red, srazmeran sa $\sin \omega t$, predstavlja prinudne vibracije koje imaju istu frekvenciju $\omega/2\pi$ kao i pobudjujuća sila. Drugi red, srazmeran sa $\sin p_1 t$, predstavlja slobodne vibracije čije su frekvencije date jednačinom 60. Zahvaljujući prigušenju doći će do postupnog gušenja ovih vibracija, tako da će ostati samo prinudne vibracije.

Za slučaj kada pobudjujuća sila deluje na sredini grede ($c=l/2$), uz uvođenje oznake $\omega^2/p_1^2 = a^2$, iz prvog reda jednačine 69, dobija se

$$y = \frac{2Pl^3}{\pi^4 EJ} \left[\frac{\sin(\pi x/l)}{1-a^2} - \frac{\sin(3\pi x/l)}{3^2-a^2} + \frac{\sin(5\pi x/l)}{5^2-a^2} \dots \right] \sin \omega t \quad (70)$$

Red brzo konvergira i zadovoljavajuću aproksimaciju za ugib, možemo da dobijemo uzimajući samo prvi član. Na ovaj način za ugib u sredini nalazimo:

$$(y)_{x=l/2} = \frac{2Pl^3}{EJ\pi^4} = \frac{Pl^3}{48,7EJ} \quad (71)$$

Greška ove aproksimacije je oko 1,5%.

Stavljajući da je modul elastičnosti E jednak modulu krutosti S_m , dobijamo izraz za sračunavanje modula krutosti asfaltnih gradica

$$S_m = \frac{P \cdot l^3}{48,7J} = \frac{P \cdot l^3}{48,7b^3j} \quad (72)$$

- gde je:
- P - amplituda sile (kp)
 - f - amplituda ugiba (cm)
 - l - razmak oslonaca (23 cm)
 - h - visina gredice (2 cm)
 - b - širina gredice (3 cm)

IV. PRIKAZ DOBIJENIH REZULTATA I NJIHOVA OBRADA

U okviru proučavanja ponašanja modula krutosti asfalt-betona u zavisnosti od temperature i frekvencije obavljena su ispitivanja na temperaturama -20°C , -10°C , 0°C , 10°C , 20°C , 30°C , 40°C , 50°C i frekvencijama 5 HZ, 10 HZ, 20 HZ, 30 HZ, 40 HZ, 50 HZ, 60 HZ, 70 HZ, 80 HZ, 90 HZ i 100 HZ.

Uticao je šupljina na modul krutosti asfalt betona pri različitim temperaturama ispitivanja je za šupljine u asfaltnim gredicama od 3,73% 4,53%, 6,46% i temperaturama -10°C , 0°C , 10°C , 20°C i 30°C .

Tabelarno sredjene vrednosti izvršenih ispitivanja date su na sl. 29 i 30. U ovim tabelama su dati samo ispravni rezultati merenja.

S obzirom da merenja nisu iste tačnosti ali daju približnu vrednost za parametar koji ima najmanju srednju kvadratnu grešku, sračunate su aritmetičke sredine, srednje kvadratno odstupanje, težina i srednja greška aritmetičke sredine za svaku grupu podataka - sl. 31.

Da bi se dobio jednačine modula krutosti u zavisnosti od temperature, frekvencije i procenta šupljina, izvršena je statistička obrada podataka.

Prikaz postupka za obradu podataka

Eksperimentalno dobijeni podaci za modul krutosti u funkciji od temperature i frekvencije i temperature i procenta šupljina u asfaltnim gredicama, sredjeni su korišćenjem usluga Računskih centara na Građevinskom i Elektrotehničkom fakultetu.

Za određivanje aproksimativnih krivih korišćen je princip da zbir kvadrata odstupanja između eksperimentalnih vrednosti Y_i i odgovarajućih vrednosti izabrane funkcionalne veze Y_i^a bude najmanji,

$$Y^a = a + b x$$

(73)

što znači da se koeficijenti "a" i "b" određuju iz uslova da izraz:

$$\sum_{i=1}^n (Y_i^a - Y_i)^2 \quad (74)$$

bude minimalan, pri čemu su " Y_i " i " X_i " rezultati od "N" merenja. Ovaj postupak određivanja željene funkcije poznat je pod nazivom "regresiona analiza" i metod "najmanjih kvadrata". Kao ocena dobrote "fitovanja" uvedeni su pojmovi rezidijumska varijansa G, rezidijumska devijacija GG i rezidijumski varijacioni koeficijent GP.

$$G = \frac{1}{N} \sum [f(x_i) - Y_i]^2 \quad (75)$$

$$GG = \sqrt{G}$$

$$GP = \frac{\sqrt{G}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n Y_i} \cdot 100\% \quad (76)$$

Veličine " Y_i " predstavljaju vrednosti modula krutosti na temperaturama X_i .

Od niza isprobanih funkcija, kao najpogodnija za fitovanje u ovom slučaju pokazala se:

$$f(x) = Ax^B + C \quad (77)$$

Polazeći od izraza za rezidijumsku varijansu G diferenciranjem po parametrima, A, B i C, dobijeni su izrazi:

$$G = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Ax_i^B + C - Y_i)^2 \quad (78)$$

$$\frac{\partial G}{\partial A} = \frac{2}{N} \sum (Ax_i^B + C - Y_i) x_i \cdot B \quad (79)$$

$$\frac{\partial G}{\partial A} = \frac{2}{N} \sum (Ax_i^B + C - Y_i) A x_i^B \cdot \ln x_i \quad (80)$$

$$\frac{\partial G}{\partial C} = \frac{2}{N} \sum (A x_i^B + C - Y_i) \quad (81)$$

Izjednačivanjem parcijalnih izvoda sa nulom, dobijaju se parametri A, B i C za koje rezidijumska varijansa ima minimalnu vrednost.

$$A \sum x_i^{2B} + C \sum x_i^B = \sum Y_i x_i^B$$

$$A \sum x_i^{2B} \ln x_i + C \sum x_i^B \ln x_i = \sum Y_i x_i^B \ln x_i \quad (82)$$

$$A \sum x_i^B + CN = \sum Y_i$$

Oдавде sledi da je:

$$A(B) = \frac{\sum Y_i (x_i - \frac{1}{N} \sum x_i^B)}{\sum x_i^B (x_i - \frac{1}{N} \sum x_i^B)} \quad (83)$$

$$C(B) = \frac{1}{N} \left[\sum Y_i - \frac{\sum Y_i (x_i - \frac{1}{N} \sum x_i^B)}{\sum x_i^B (x_i - \frac{1}{N} \sum x_i^B)} \cdot \sum x_i^B \right] \quad (84)$$

S obzirom da je treća jednačina od prethodne tri transcendentna, potrebno je oformiti novu funkciju $\mathcal{E}(B)$:

$$\mathcal{E}(B) = A(B) \sum x_i^{2B} \ln x_i + C(B) \sum x_i^B \ln x_i - \sum Y_i x_i^B \ln x_i \quad (85)$$

Iterativnim postupkom nadjena je nula funkcije $\mathcal{E}(B) = 0$ i za dobijenu vrednost B izračunate su vrednosti za A i C iz izraza A(B) i C(B).

Na osnovu izloženog algoritma korišćenjem gotovog programa sredjeni su podaci i dobijeni dijagrami koji predstavljaju promenu modula krutosti asfalt-betona u zavisnosti od frekvencije i temperature i promenu modula krutosti asfalt-betona u zavisnosti od temperature i procenta šupljina u asfaltnim gredicama.

Na kraju ovog poglavlja dat je i dijagram promene modula krutosti bituminiziranog šljunka u zavisnosti od temperature (iz magistarskog rada autora). Ovim dijagramom je postignuta celina izučavanja modula krutosti fleksibilnih kolovoznih konstrukcija i pružena mogućnost za interpolaciju i ekstrapolaciju rezultata.

| | 50 HZ | 60 HZ | 70 HZ | 80 HZ |
|-----|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 13004 | 13004 | 13004 | 13004 |
| 2 | 14559 | 14559 | 14559 | 14559 |
| 3 | 16054 | 16054 | 16054 | 16054 |
| 4 | 17484 | 17484 | 17484 | 17484 |
| 5 | 18944 | 18944 | 18944 | 18944 |
| 6 | 21031 | 21031 | 21031 | 21031 |
| 7 | 22111 | 22111 | 22111 | 22111 |
| 8 | 23200 | 23200 | 23200 | 23200 |
| 9 | 24350 | 24350 | 24350 | 24350 |
| 10 | 25500 | 25500 | 25500 | 25500 |
| 11 | 26650 | 26650 | 26650 | 26650 |
| 12 | 27800 | 27800 | 27800 | 27800 |
| 13 | 28950 | 28950 | 28950 | 28950 |
| 14 | 30100 | 30100 | 30100 | 30100 |
| 15 | 31250 | 31250 | 31250 | 31250 |
| 16 | 32400 | 32400 | 32400 | 32400 |
| 17 | 33550 | 33550 | 33550 | 33550 |
| 18 | 34700 | 34700 | 34700 | 34700 |
| 19 | 35850 | 35850 | 35850 | 35850 |
| 20 | 37000 | 37000 | 37000 | 37000 |
| 21 | 38150 | 38150 | 38150 | 38150 |
| 22 | 39300 | 39300 | 39300 | 39300 |
| 23 | 40450 | 40450 | 40450 | 40450 |
| 24 | 41600 | 41600 | 41600 | 41600 |
| 25 | 42750 | 42750 | 42750 | 42750 |
| 26 | 43900 | 43900 | 43900 | 43900 |
| 27 | 45050 | 45050 | 45050 | 45050 |
| 28 | 46200 | 46200 | 46200 | 46200 |
| 29 | 47350 | 47350 | 47350 | 47350 |
| 30 | 48500 | 48500 | 48500 | 48500 |
| 31 | 49650 | 49650 | 49650 | 49650 |
| 32 | 50800 | 50800 | 50800 | 50800 |
| 33 | 51950 | 51950 | 51950 | 51950 |
| 34 | 53100 | 53100 | 53100 | 53100 |
| 35 | 54250 | 54250 | 54250 | 54250 |
| 36 | 55400 | 55400 | 55400 | 55400 |
| 37 | 56550 | 56550 | 56550 | 56550 |
| 38 | 57700 | 57700 | 57700 | 57700 |
| 39 | 58850 | 58850 | 58850 | 58850 |
| 40 | 60000 | 60000 | 60000 | 60000 |
| 41 | 61150 | 61150 | 61150 | 61150 |
| 42 | 62300 | 62300 | 62300 | 62300 |
| 43 | 63450 | 63450 | 63450 | 63450 |
| 44 | 64600 | 64600 | 64600 | 64600 |
| 45 | 65750 | 65750 | 65750 | 65750 |
| 46 | 66900 | 66900 | 66900 | 66900 |
| 47 | 68050 | 68050 | 68050 | 68050 |
| 48 | 69200 | 69200 | 69200 | 69200 |
| 49 | 70350 | 70350 | 70350 | 70350 |
| 50 | 71500 | 71500 | 71500 | 71500 |
| 51 | 72650 | 72650 | 72650 | 72650 |
| 52 | 73800 | 73800 | 73800 | 73800 |
| 53 | 74950 | 74950 | 74950 | 74950 |
| 54 | 76100 | 76100 | 76100 | 76100 |
| 55 | 77250 | 77250 | 77250 | 77250 |
| 56 | 78400 | 78400 | 78400 | 78400 |
| 57 | 79550 | 79550 | 79550 | 79550 |
| 58 | 80700 | 80700 | 80700 | 80700 |
| 59 | 81850 | 81850 | 81850 | 81850 |
| 60 | 83000 | 83000 | 83000 | 83000 |
| 61 | 84150 | 84150 | 84150 | 84150 |
| 62 | 85300 | 85300 | 85300 | 85300 |
| 63 | 86450 | 86450 | 86450 | 86450 |
| 64 | 87600 | 87600 | 87600 | 87600 |
| 65 | 88750 | 88750 | 88750 | 88750 |
| 66 | 89900 | 89900 | 89900 | 89900 |
| 67 | 91050 | 91050 | 91050 | 91050 |
| 68 | 92200 | 92200 | 92200 | 92200 |
| 69 | 93350 | 93350 | 93350 | 93350 |
| 70 | 94500 | 94500 | 94500 | 94500 |
| 71 | 95650 | 95650 | 95650 | 95650 |
| 72 | 96800 | 96800 | 96800 | 96800 |
| 73 | 97950 | 97950 | 97950 | 97950 |
| 74 | 99100 | 99100 | 99100 | 99100 |
| 75 | 100250 | 100250 | 100250 | 100250 |
| 76 | 101400 | 101400 | 101400 | 101400 |
| 77 | 102550 | 102550 | 102550 | 102550 |
| 78 | 103700 | 103700 | 103700 | 103700 |
| 79 | 104850 | 104850 | 104850 | 104850 |
| 80 | 106000 | 106000 | 106000 | 106000 |
| 81 | 107150 | 107150 | 107150 | 107150 |
| 82 | 108300 | 108300 | 108300 | 108300 |
| 83 | 109450 | 109450 | 109450 | 109450 |
| 84 | 110600 | 110600 | 110600 | 110600 |
| 85 | 111750 | 111750 | 111750 | 111750 |
| 86 | 112900 | 112900 | 112900 | 112900 |
| 87 | 114050 | 114050 | 114050 | 114050 |
| 88 | 115200 | 115200 | 115200 | 115200 |
| 89 | 116350 | 116350 | 116350 | 116350 |
| 90 | 117500 | 117500 | 117500 | 117500 |
| 91 | 118650 | 118650 | 118650 | 118650 |
| 92 | 119800 | 119800 | 119800 | 119800 |
| 93 | 120950 | 120950 | 120950 | 120950 |
| 94 | 122100 | 122100 | 122100 | 122100 |
| 95 | 123250 | 123250 | 123250 | 123250 |
| 96 | 124400 | 124400 | 124400 | 124400 |
| 97 | 125550 | 125550 | 125550 | 125550 |
| 98 | 126700 | 126700 | 126700 | 126700 |
| 99 | 127850 | 127850 | 127850 | 127850 |
| 100 | 129000 | 129000 | 129000 | 129000 |

SL.31 Aritmetička sredina, težina, srednje kvadratno odstupanje i srednja greška aritmetičke sredine za svaku grupu podataka

5 HZ

TEMPERATURA= -20 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1711711E-04
TEŽINA= 0.6125000E-06
DSC= 0.1000400E-04
DSV= 0.4002001E-04

TEMPERATURA= -15 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1524411E-04
TEŽINA= 0.2940000E-04
DSC= 0.4000000E-04
DSV= 0.1000000E-04

TEMPERATURA= 0 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1301411E-04
TEŽINA= 0.1100000E-04
DSC= 0.2700000E-04
DSV= 0.3000000E-04

TEMPERATURA= 10 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1400000E-04
TEŽINA= 0.2000000E-04
DSC= 0.5000000E-04
DSV= 0.2000000E-04

TEMPERATURA= 20 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.2000000E-04
TEŽINA= 0.4000000E-04
DSC= 0.4000000E-04
DSV= 0.1000000E-04

TEMPERATURA= 25 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.5225000E-05
TEŽINA= 0.4412000E-04
DSC= 0.3000000E-04
DSV= 0.1000000E-04

TEMPERATURA= 40 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.2614400E-05
TEŽINA= 0.4000000E-04
DSC= 0.3000000E-04
DSV= 0.1000000E-04

TEMPERATURA= 50 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1000000E-04
TEŽINA= 0.2000000E-04
DSC= 0.1000000E-04
DSV= 0.5000000E-04

TEMPERATURA=-20 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1734855E-06 10 HZ
TETIJA= 0.1757155E-04
DSC= 0.6324270E-04
DSV= 0.2291251E-04

TEMPERATURA=-10 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1521215E-06
TETIJA= 0.1130911E-04
DSC= 0.2687911E-04
DSV= 0.9402419E-04

TEMPERATURA= 0 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1251674E-06
TETIJA= 0.6386055E-04
DSC= 0.3210554E-04
DSV= 0.1251271E-04

TEMPERATURA= 10 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1148532E-06
TETIJA= 0.1436230E-04
DSC= 0.5843537E-04
DSV= 0.2472100E-04

TEMPERATURA= 20 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.5828671E-06
TETIJA= 0.2792234E-04
DSC= 0.5006433E-04
DSV= 0.1802418E-04

TEMPERATURA= 30 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.5225942E-06
TETIJA= 0.5054277E-04
DSC= 0.3723714E-04
DSV= 0.1411212E-04

TEMPERATURA= 40 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.3917011E-06
TETIJA= 0.1277145E-04
DSC= 0.2084037E-04
DSV= 0.1102235E-04

TEMPERATURA= 50 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.3141103E-06
TETIJA= 0.1457926E-04
DSC= 0.2151137E-04
DSV= 0.9281667E-04

20HZ

TEMPERATURA=-20 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1751365E-04
TEZIJA= 0.2315364E-04
DSC= 0.2301415E-04
DSV= 0.1056625E-04

TEMPERATURA=-10 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1651475E-04
TEZIJA= 0.1449515E-04
DSC= 0.6243220E-04
DSV= 0.2626524E-04

TEMPERATURA= 0 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1457305E-04
TEZIJA= 0.3534105E-04
DSC= 0.3916735E-04
DSV= 0.3371975E-04

TEMPERATURA= 10 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1190705E-04
TEZIJA= 0.1301235E-04
DSC= 0.2313315E-04
DSV= 1.8766235E-04

TEMPERATURA= 20 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.802510E-04
TEZIJA= 0.715310E-04
DSC= 0.310070E-04
DSV= 0.1132961E-04

TEMPERATURA= 30 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.6163057E-04
TEZIJA= 0.4192005E-04
DSC= 0.4030215E-04
DSV= 0.1544050E-04

TEMPERATURA= 40 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.2223657E-04
TEZIJA= 0.364900E-04
DSC= 0.2633201E-04
DSV= 0.1317015E-04

TEMPERATURA= 50 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.5571403E-04
TEZIJA= 0.3221573E-04
DSC= 0.1474055E-04
DSV= 0.5571401E-04

30 HZ

TEMPERATURE = -20 I = 7
 SPEED (JA) VFD (OST) = 0.1512164E-06
 T71 (A) = 0.1093532E-01
 OSC = 0.122236E-04
 OSV = 0.3515014E-04

TEMPERATURE = -17 I = 7
 SPEED (JA) VFD (OST) = 0.1451301E-06
 T71 (A) = 0.1126021E-04
 OSC = 0.799146E-04
 OSV = 0.752757E-04

TEMPERATURE = 0 I = 7
 SPEED (JA) VFD (OST) = 0.1547401E-06
 T71 (A) = 0.2323862E-04
 OSC = 0.444423E-04
 OSV = 0.1413575E-04

TEMPERATURE = 10 I = 7
 SPEED (JA) VFD (OST) = 0.1211325E-06
 T71 (A) = 0.4916395E-04
 OSC = 0.2334931E-04
 OSV = 0.1455919E-04

TEMPERATURE = 20 I = 7
 SPEED (JA) VFD (OST) = 0.3826115E-06
 T71 (A) = 0.2357074E-04
 OSC = 0.490517E-04
 OSV = 0.120204E-04

TEMPERATURE = 30 I = 7
 SPEED (JA) VFD (OST) = 0.6096605E-06
 T71 (A) = 0.4204605E-04
 OSC = 0.3510405E-04
 OSV = 0.134205E-04

TEMPERATURE = 40 I = 7
 SPEED (JA) VFD (OST) = 0.383507E-06
 T71 (A) = 0.606985E-04
 OSC = 0.235000E-04
 OSV = 0.120204E-04

TEMPERATURE = 50 I = 7
 SPEED (JA) VFD (OST) = 0.463372E-06
 T71 (A) = 0.101460E-01
 OSC = 0.247002E-04
 OSV = 0.972196E-02

40HZ

TEMPERATURA=-20 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1933279E-04
TEZIJA= 0.4127438E-05
DSC= 0.1569432E-05
DSV= 0.4127438E-04

TEMPERATURA=-10 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1733977E-04
TEZIJA= 0.2146163E-04
DSC= 0.5445811E-04
DSV= 0.2133917E-04

TEMPERATURA= 0 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1591484E-04
TEZIJA= 0.2520051E-04
DSC= 0.5273410E-04
DSV= 0.1952027E-04

TEMPERATURA= 10 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1292318E-04
TEZIJA= 0.4201911E-04
DSC= 0.4031673E-04
DSV= 0.1542711E-04

TEMPERATURA= 20 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1095944E-04
TEZIJA= 0.5815629E-04
DSC= 0.2204784E-04
DSV= 0.1711987E-04

TEMPERATURA= 30 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.7825203E-05
TEZIJA= 2.4162370E-04
DSC= 0.4100411E-04
DSV= 0.1544905E-04

TEMPERATURA= 40 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.4521057E-05
TEZIJA= 0.7101040E-04
DSC= 0.5139503E-04
DSV= 0.1180063E-04

TEMPERATURA= 50 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.5112216E-05
TEZIJA= 0.3023177E-04
DSC= 0.4803460E-04
DSV= 0.1215783E-04

50 HZ

TEMPERATURA=-20 I= 7
SPEED/JA VREFDOST= 0.105440E-06
TEZILJA= 0.2015100E-09
DSC= 0.1054113E-05
DSV= 0.3802751E-04

TEMPERATURA=-10 I= 7
SPEED/JA VREFDOST= 0.1791404E-06
TEZILJA= 0.2076767E-06
DSC= 0.5111621E-06
DSV= 0.1035031E-04

TEMPERATURA= 0 I= 7
SPEED/JA VREFDOST= 0.1668629E-06
TEZILJA= 0.4761031E-06
DSC= 0.3234411E-04
DSV= 0.1448271E-04

TEMPERATURA= 10 I= 7
SPEED/JA VREFDOST= 0.1484457E-06
TEZILJA= 0.4641177E-06
DSC= 0.3470009E-04
DSV= 0.1503512E-04

TEMPERATURA= 20 I= 7
SPEED/JA VREFDOST= 0.1221060E-06
TEZILJA= 0.3476311E-06
DSC= 0.4487016E-06
DSV= 0.1635902E-04

TEMPERATURA= 30 I= 7
SPEED/JA VREFDOST= 0.3301120E-05
TEZILJA= 0.4093031E-06
DSC= 0.3748002E-06
DSV= 0.1416613E-04

TEMPERATURA= 40 I= 7
SPEED/JA VREFDOST= 0.4217742E-05
TEZILJA= 0.1035031E-06
DSC= 0.2693000E-06
DSV= 0.1052160E-04

TEMPERATURA= 50 I= 7
SPEED/JA VREFDOST= 0.5017000E-06
TEZILJA= 0.7014150E-06
DSC= 0.5197847E-06
DSV= 0.1135560E-04

60HZ

TEMPERATURA=-20 t= 7
 SREDNJA VREDNOST= 0.1941495E-04
 TIZIJA= 0.1047759E-04
 DSC= 0.1173574E-04
 DSM= 0.318127E-04

TEMPERATURA=-10 t= 7
 SREDNJA VREDNOST= 0.1931495E-04
 TIZIJA= 0.1521124E-04
 DSC= 0.6653743E-04
 DSM= 0.2514078E-04

TEMPERATURA= 0 t= 7
 SREDNJA VREDNOST= 0.1712777E-04
 TIZIJA= 0.1917708E-04
 DSC= 0.604682E-04
 DSM= 0.226175E-04

TEMPERATURA= 10 t= 7
 SREDNJA VREDNOST= 0.1944750E-04
 TIZIJA= 0.2866742E-04
 DSC= 0.4041412E-04
 DSM= 0.1047152E-04

TEMPERATURA= 20 t= 7
 SREDNJA VREDNOST= 0.1314117E-04
 TIZIJA= 0.3374821E-04
 DSC= 0.4058816E-04
 DSM= 0.1511571E-04

TEMPERATURA= 30 t= 7
 SREDNJA VREDNOST= 0.3052897E-04
 TIZIJA= 0.4934711E-04
 DSC= 0.4272877E-04
 DSM= 0.1014658E-04

TEMPERATURA= 40 t= 7
 SREDNJA VREDNOST= 0.4718242E-04
 TIZIJA= 0.6564258E-04
 DSC= 0.3265849E-04
 DSM= 0.1224201E-04

TEMPERATURA= 50 t= 7
 SREDNJA VREDNOST= 0.5428417E-04
 TIZIJA= 0.7526124E-04
 DSC= 0.2971712E-04
 DSM= 0.1123231E-04

70 HZ

TEMPERATURA=-20 N=7
SREDNJA VREDNOST= 0.1221455E-06
TEZIJA= 0.9153416E-06
DSC= 0.8744953E-04
DSV= 0.3205251E-04

TEMPERATURA=-10 N=7
SREDNJA VREDNOST= 0.1568448E-06
TEZIJA= 0.1452455E-04
DSC= 0.5941267E-04
DSV= 0.2623592E-04

TEMPERATURA= 0 N=7
SREDNJA VREDNOST= 0.1772308E-06
TEZIJA= 0.2217212E-04
DSC= 0.5617424E-04
DSV= 0.2122719E-04

TEMPERATURA= 10 N=7
SREDNJA VREDNOST= 0.1621727E-06
TEZIJA= 0.2213012E-04
DSC= 0.4501624E-04
DSV= 0.1721563E-04

TEMPERATURA= 20 N=7
SREDNJA VREDNOST= 0.1243075E-06
TEZIJA= 0.4321763E-04
DSC= 0.391195E-04
DSV= 0.144116E-04

TEMPERATURA= 30 N=7
SREDNJA VREDNOST= 0.962158E-06
TEZIJA= 0.7226322E-04
DSC= 0.3620924E-04
DSV= 0.1161255E-04

TEMPERATURA= 40 N=7
SREDNJA VREDNOST= 0.5125907E-06
TEZIJA= 0.7114421E-04
DSC= 0.3136765E-04
DSV= 0.1185575E-04

TEMPERATURA= 50 N=7
SREDNJA VREDNOST= 0.5126423E-06
TEZIJA= 0.2668524E-02
DSC= 0.5121688E-03
DSV= 0.1925816E-03

80 HZ

TEMPERATURA=-20 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1950910E 06
TEZINA= 0.1552002E-04
DSC= 0.6715975E 04
DSV= 0.2538303E 04

TEMPERATURA=-10 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.100055E 06
TEZINA= 0.1424249E-04
DSC= 0.7010615E 04
DSV= 0.2449703E 04

TEMPERATURA= 0 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1912629E 06
TEZINA= 0.1058446E-04
DSC= 0.4948584E 04
DSV= 0.1970389E 04

TEMPERATURA= 10 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1660253E 06
TEZINA= 0.5402804E-04
DSC= 0.2206438E 04
DSV= 0.1249716E 04

TEMPERATURA= 20 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1441093E 06
TEZINA= 0.2958654E-04
DSC= 0.4864034E 04
DSV= 0.1098454E 04

TEMPERATURA= 30 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.9920915E 05
TEZINA= 0.2290778E-04
DSC= 0.5527906E 04
DSV= 0.2089337E 04

TEMPERATURA= 40 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.122242E 05
TEZINA= 0.2090004E-04
DSC= 0.4192021E 04
DSV= 0.1584438E 04

TEMPERATURA= 50 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.776000E 04
TEZINA= 0.8010100E-03
DSC= 0.9344420E 03
DSV= 0.3531902E 03

90HZ

TEMPERATURA=-20 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.199101E-06
TEZIJA= 0.5060592E-04
DSC= 0.1176111E-04
DSV= 0.4645293E-04

TEMPERATURA=-10 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1928044E-06
TEZIJA= 0.1725327E-04
DSC= 0.7136711E-04
DSV= 0.2696478E-04

TEMPERATURA= 0 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1841020E-06
TEZIJA= 0.2020152E-04
DSC= 0.4814219E-04
DSV= 0.1919660E-04

TEMPERATURA= 10 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1702525E-06
TEZIJA= 0.2612812E-04
DSC= 0.5176077E-04
DSV= 0.1956347E-04

TEMPERATURA= 20 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1471975E-06
TEZIJA= 0.3441674E-04
DSC= 0.6019872E-04
DSV= 0.1706011E-04

TEMPERATURA= 30 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.1022824E-06
TEZIJA= 0.2271741E-04
DSC= 0.4378212E-04
DSV= 0.1028594E-04

TEMPERATURA= 40 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.5812005E-06
TEZIJA= 0.5171347E-04
DSC= 0.3776012E-04
DSV= 0.1284606E-04

TEMPERATURA= 50 N= 7
SREDNJA VREDNOST= 0.5518421E-06
TEZIJA= 0.2481007E-04
DSC= 0.1418177E-04
DSV= 0.5254901E-04

100 HZ

TEMPERATURA = -20 n = 7

SRPNA VREDNOST = 0.2001231E-04
TEZINA = 0.7471494E-05
OSC = 0.9882232E-04
OSV = 0.3610441E-04

TEMPERATURA = -10 n = 7

SRPNA VREDNOST = 0.1961213E-04
TEZINA = 0.1562084E-04
OSC = 0.6691213E-04
OSV = 0.2881174E-04

TEMPERATURA = 0 n = 7

SRPNA VREDNOST = 0.1871945E-04
TEZINA = 0.3370675E-04
OSC = 0.4558746E-04
OSV = 0.1721184E-04

TEMPERATURA = 10 n = 7

SRPNA VREDNOST = 0.1740737E-04
TEZINA = 0.3409793E-04
OSC = 0.4413527E-04
OSV = 0.1664403E-04

TEMPERATURA = 20 n = 7

SRPNA VREDNOST = 0.1541105E-04
TEZINA = 0.3024908E-04
OSC = 0.4304252E-04
OSV = 0.1651441E-04

TEMPERATURA = 20 n = 7

SRPNA VREDNOST = 0.1722045E-04
TEZINA = 0.1902710E-04
OSC = 0.2050000E-04
OSV = 0.3151100E-04

TEMPERATURA = 40 n = 7

SRPNA VREDNOST = 0.5812771E-05
TEZINA = 0.4406001E-05
OSC = 0.3049200E-04
OSV = 0.1401211E-04

TEMPERATURA = 50 n = 7

SRPNA VREDNOST = 0.7802870E-04
TEZINA = 0.3761570E-04
OSC = 0.1517670E-03
OSV = 0.3848700E-02

SL. 32 ARITMETIČKA SREDINA, TEŽINA, SREDNJE KVADRATNO
ODSTUPANJE I SREDNJA GREŠKA ARITMETIČKE SREDINE
GRUPE UZORAKA ISPITIVANIH PRI ISTOJ FREKVENCIJI
50HZ I RAZLIČITIM % ŠUPLJINA U ASFALTNIM GREDICAMA

TEMPERATURA= -10 n= 5 3.73 % ŠUPLJINA
SREDNJA VREDNOST= 0.2002026E 06
TEŽINA= 0.4108037E 05
DSC= 0.1103238E 05
DSV= 0.1022403E 04

TEMPERATURA= 0 n= 5
SREDNJA VREDNOST= 0.1972036E 06
TEŽINA= 0.7101957E 04
DSC= 0.2452378E 04
DSV= 0.1186626E 04

TEMPERATURA= 10 n= 5
SREDNJA VREDNOST= 0.1700022E 06
TEŽINA= 0.3020109E 04
DSC= 0.4190522E 04
DSV= 0.1976742E 04

TEMPERATURA= 20 n= 5
SREDNJA VREDNOST= 0.1441400E 06
TEŽINA= 0.3022019E 04
DSC= 0.2243708E 04
DSV= 0.1002410E 04

TEMPERATURA= 30 n= 5
SREDNJA VREDNOST= 0.1420000E 06
TEŽINA= 0.7084500E 04
DSC= 0.2000000E 04
DSV= 0.1180000E 04

TEMPERATURA= -10 t₁ = 10
 SREDNJA VREDNOST= 0.1721852E 04
 TEZINA= 0.1223831E 04
 DSC= 0.9102857E 04
 OSV= 0.2731964E 04

4.53% ŠUPLJINA

TEMPERATURA= 0 t₁ = 5
 SREDNJA VREDNOST= 0.1667142E 04
 TEZINA= 0.1503905E 04
 DSC= 0.6456413E 04
 OSV= 0.1997622E 04

TEMPERATURA= 10 t₁ = 5
 SREDNJA VREDNOST= 0.1482604E 04
 TEZINA= 0.2192421E 04
 DSC= 0.4779099E 04
 OSV= 0.2125409E 04

TEMPERATURA= 20 t₁ = 5
 SREDNJA VREDNOST= 0.1220080E 04
 TEZINA= 0.2841612E 04
 DSC= 0.4111111E 04
 OSV= 0.1111111E 04

TEMPERATURA= 30 t₁ = 5
 SREDNJA VREDNOST= 0.1211141E 04
 TEZINA= 0.1597762E 04
 DSC= 0.4311111E 04
 OSV= 0.1724411E 04

TEMPERATURA= -10 n= 5
SREDNJA VREDNOST= 0.1471224E 07
TEZINA= 0.9274112E-05
DSC= 0.7242503E 04
DSV= 0.1283703E 04

6.46 % ŠUPLJINA

TEMPERATURA= 0 n= 5
SREDNJA VREDNOST= 0.1243274E 06
TEZINA= 0.2026183E-04
DSC= 0.4967509E 04
DSV= 0.2221573E 04

TEMPERATURA= 10 n= 5
SREDNJA VREDNOST= 0.1174114E 06
TEZINA= 0.6957703E-04
DSC= 0.2701131E 04
DSV= 0.1207657E 04

TEMPERATURA= 20 n= 5
SREDNJA VREDNOST= 0.1123941E 05
TEZINA= 0.4536232E-04
DSC= 0.3233073E 04
DSV= 0.1125656E 04

TEMPERATURA= 30 n= 5
SREDNJA VREDNOST= 0.1223001E 06
TEZINA= 0.1111111E-04
DSC= 0.2247773E 04
DSV= 0.1005212E 04

| TEMPERATURA °C | REZULTATI MERENJA MODULA KRUTOSTI | KP/CM ** 2 | NA 5 HZ | | | | |
|----------------|-----------------------------------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| -20. | 171030. | 180243. | 185216. | 179216. | 162156. | 157216. | 163056. |
| -10. | 153214. | 155846. | 158216. | 160280. | 151214. | 148105. | 147213. |
| 0. | 130116. | 140213. | 141286. | 132218. | 120056. | 119056. | 128056. |
| 10. | 104101. | 110281. | 106281. | 110213. | 97053. | 102053. | 97058. |
| 20. | 78261. | 82516. | 83216. | 81216. | 74813. | 73056. | 75056. |
| 30. | 52516. | 56814. | 55143. | 56821. | 48031. | 49118. | 48067. |
| 40. | 26340. | 30145. | 31096. | 27255. | 22056. | 21056. | 25035. |
| 50. | 1580. | 1628. | 1728. | 1585. | 1418. | 1321. | 1565. |

JEDNACINA KRIVE MODULA KRUTOSTI $Y = (250 - (A(X+20)**B+C)) * 1000$

KOEFICIJENTI JEDNACINE

A = 0.1620663187E 01
 B = 0.1098265298E 01
 C = 0.7768688678E 02

REZIDIJUMSKA VARIJANSA = 0.3261691643E 02

REZIDIJUMSKA DEVIJACIJA = 0.5711122171E 01

REZIDIJUMSKI VAR. KOEF. = 0.3561003541E 01 PROCENATA

TEMPERATURA MODUL KRUTOSTI

| | |
|------|---------|
| -20. | 172213. |
| -10. | 151991. |
| 0. | 128805. |
| 10. | 104298. |
| 20. | 79163. |
| 30. | 53295. |
| 40. | 26909. |
| 50. | 86. |

| TEMPERATURA °C | REZULTATI MERENJA MODULA KRUTOSTI | KP/CM ** 2 | NA 10HZ |
|----------------|-----------------------------------|------------|---------|
| -20. | 173840. | 180214. | 161216. |
| -10. | 158340. | 162054. | 159243. |
| 0. | 139101. | 142050. | 143057. |
| 10. | 113481. | 120080. | 121056. |
| 20. | 85564. | 90216. | 91284. |
| 30. | 57860. | 61024. | 62056. |
| 40. | 30165. | 33165. | 34285. |
| 50. | 3005. | 3156. | 3230. |
| | | | 177314. |
| | | 167054. | 165813. |
| | | 154011. | 157046. |
| | | 136216. | 135216. |
| | | 106216. | 105283. |
| | | 60046. | 79048. |
| | | 53123. | 52146. |
| | | 27286. | 26281. |
| | | 2987. | 2870. |

JEDNACINA KRIVE MODULA KRUTOSTI Y = (250 - (A(X+20)**B+C)) * 1000

KOEFICIJENTI JEDNACINE

- A = 0.9625367817E 00
- B = 0.1222327439E 01
- C = 0.7558594256E 02

REZIDIJUMSKA VARIJANSA = 0.1845579224E 02
 REZIDIJUMSKA DEVIJACIJA = 0.4296020511E 01
 REZIDIJUMSKI VAR. KOEF. = 0.2774325688E 01 PROCENATA

TEMPERATURA MODUL KRUTOSTI

| | |
|------|---------|
| -20. | 174414. |
| -10. | 158354. |
| 0. | 136942. |
| 10. | 112904. |
| 20. | 86984. |
| 30. | 59568. |
| 40. | 30898. |
| 50. | 1140. |

| TEMPERATURA C | REZULTATI MERENJA MODULA KRUTOSTI | KP/CM ** 2 | NA | 20 HZ | | | |
|---------------|-----------------------------------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| -20. | 178214. | 180264. | 182345. | 180213. | 176064. | 174218. | 176056. |
| -10. | 165263. | 170056. | 175216. | 170000. | 160021. | 156213. | 159264. |
| 0. | 164214. | 150214. | 155214. | 147213. | 142046. | 137216. | 145056. |
| 10. | 119514. | 122134. | 121213. | 119900. | 116213. | 116083. | 118500. |
| 20. | 89564. | 92153. | 91065. | 93241. | 86285. | 87063. | 85078. |
| 30. | 60581. | 62156. | 63156. | 65178. | 58387. | 67000. | 54956. |
| 40. | 32161. | 32181. | 34286. | 36532. | 32140. | 30186. | 28156. |
| 50. | 4156. | 4456. | 4321. | 4375. | 3800. | 3900. | 3750. |

JEDNACINA KRIVE MODULA KRUTOSTI $Y = (250 - (A(X+20)**B+C)) * 1000$

KOEFICIJENTI JEDNACINE

A= 0.8272480221E 00
 B= 0.1265012739E 01
 C= 0.6983521267E 02

REZIDIJUMSKA VARIJANSA = 0.2510018128E 02

REZIDIJUMSKA DEVIJACIJA= 0.5010008113E 01

REZIDIJUMSKI VAR. KOEF.= 0.3335399402E 01 PROCENATA

| TEMPERATURA | MODUL KRUTOSTI |
|-------------|----------------|
| -20. | 180164. |
| -10. | 164936. |
| 0. | 143566. |
| 10. | 119040. |
| 20. | 92209. |
| 30. | 63522. |
| 40. | 33265. |
| 50. | 1635. |

TEMPERATURA °C REZULTATI MERENJA MODULA KRUTOSTI KP/CM ** 2 NA 30 HZ

| | | | | | | | |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| -20. | 181214. | 193216. | 189216. | 188345. | 169056. | 173214. | 174254. |
| -10. | 168041. | 175238. | 176284. | 176385. | 161036. | 159685. | 159953. |
| 0. | 153283. | 159481. | 157264. | 157314. | 147216. | 149813. | 159215. |
| 10. | 131214. | 125286. | 126281. | 132345. | 127318. | 125481. | 130005. |
| 20. | 98148. | 102560. | 105341. | 100056. | 94037. | 91316. | 96235. |
| 30. | 66543. | 70235. | 71056. | 67836. | 62056. | 61000. | 65349. |
| 40. | 25814. | 40253. | 37281. | 36345. | 30006. | 33284. | 33981. |
| 50. | 4678. | 4875. | 4993. | 4690. | 4423. | 4336. | 4650. |

JEDNACINA KRIVE MODULA KRUTOSTI Y = (250 - (A(X+20)**B+C)) * 1000

KOEFICIJENTI JEDNACINE

A= 0.4500107228E 00
 B= 0.1410457065E 01
 C= 0.6804685184E 02

REZIDIJUMSKA VARIJANSA = 0.3284217283E 02

REZIDIJUMSKA DEVIJACIJA= 0.5730809094E 01

REZIDIJUMSKI VAR. KOEF.= 0.3951323518E 01 PROCENATA

TEMPERATURA MODUL KRUTOSTI

| | |
|------|---------|
| -20. | 181953. |
| -10. | 170373. |
| 0. | 151173. |
| 10. | 127422. |
| 20. | 100133. |
| 30. | 69868. |
| 40. | 36999. |
| 50. | 1794. |

| TEMPERATURA °C | REZULTATI MERENJA MODULA KRUTOSTI | KP/CM ** 2 | NA 40 HZ |
|----------------|-----------------------------------|------------|----------|
| -20. | 183560. | 200050. | 185653. |
| -10. | 173890. | 177284. | 178256. |
| 0. | 159141. | 165345. | 165056. |
| 10. | 139215. | 142186. | 144286. |
| 20. | 109586. | 112834. | 113286. |
| 30. | 74560. | 80281. | 77231. |
| 40. | 39481. | 41286. | 43283. |
| 50. | 5176. | 5543. | 5678. |
| | | | 190450. |
| | | | 166216. |
| | | | 168314. |
| | | | 152981. |
| | | | 134216. |
| | | | 105381. |
| | | | 71216. |
| | | | 72057. |
| | | | 36121. |
| | | | 4605. |

JEDNACINA KRIVE MODULA KRUTOSTI $Y = (250 - (A(X+20)**B+C)) * 1000$

KOEFICIJENTI JEDNACINE

A= 0.222059634E 00
 B= 0.1577570820E 01
 C= 0.6622688357E 02

REZIDIJUMSKA VARIJANSA = 0.2877306407E 02

REZIDIJUMSKA DEVIJACIJA= 0.5364052951E 01

REZIDIJUMSKI VAR. KOEF.= 0.3842107189E 01 PROCENATA

| TEMPERATURA | MODUL KRUTOSTI |
|-------------|----------------|
| -20. | 183473. |
| -10. | 175077. |
| 0. | 158416. |
| 10. | 135969. |
| 20. | 108686. |
| 30. | 77130. |
| 40. | 41690. |
| 50. | 2657. |

| TEMPERATURA °C | REZULTATI MERENJA MODULA KRUTOSTI | KP/CM ** 2 | NA 70 HZ | | | | |
|----------------|-----------------------------------|------------|----------|---------|---------|---------|---------|
| -20. | 186897. | 200186. | 175143. | 188186. | 172086. | 175064. | 184060. |
| -10. | 178484. | 185216. | 183060. | 180023. | 171213. | 172953. | 176034. |
| 0. | 166215. | 169218. | 172050. | 165184. | 166034. | 160054. | 164183. |
| 10. | 148104. | 153186. | 152936. | 149831. | 143060. | 144016. | 147287. |
| 20. | 122156. | 127184. | 125016. | 127216. | 117064. | 119064. | 117031. |
| 30. | 83214. | 88134. | 85164. | 86216. | 78034. | 81031. | 79216. |
| 40. | 43264. | 47214. | 45060. | 44218. | 39284. | 41111. | 42063. |
| 50. | 5678. | 5780. | 6003. | 5940. | 5421. | 5200. | 5297. |

JEDNACINA KRIVE MODULA KRUTOSTI $Y = (250 - (A(X+20)**B+C)) * 1000$

KOEFICIJENTI JEDNACINE

A = 0.8678968183E-01
 B = 0.1801462696E 01
 C = 0.6432514959E 02

REZIDIJUMSKA VARIJANSA = 0.2786979366E 02

REZIDIJUMSKA DEVIJACIJA = 0.5279184944E 01

REZIDIJUMSKI VAR. KOEF. = 0.3957746970E 01 PROCENATA

TEMPERATURA MODUL KRUTOSTI

| | |
|------|---------|
| -20. | 185674. |
| -10. | 180180. |
| 0. | 166522. |
| 10. | 145914. |
| 20. | 118914. |
| 30. | 85882. |
| 40. | 47081. |
| 50. | 2720. |

| TEMPERATURA °C | REZULTATI | MERENJA | MODULA | KRUTOSTI | KP/CM ** 2 | NA | 60HZ |
|----------------|-----------|---------|---------|----------|------------|---------|---------|
| -20. | 190056. | 200184. | 198751. | 195347. | 180064. | 181953. | 184650. |
| -10. | 183218. | 190216. | 187285. | 191214. | 176058. | 179003. | 175021. |
| 0. | 171864. | 178034. | 177256. | 176208. | 164213. | 165185. | 166135. |
| 10. | 155514. | 160215. | 158214. | 156235. | 145030. | 152014. | 154103. |
| 20. | 131040. | 136218. | 133984. | 135783. | 126318. | 129203. | 127385. |
| 30. | 90005. | 95214. | 93216. | 94218. | 84900. | 86980. | 85632. |
| 40. | 47216. | 50124. | 51216. | 49583. | 43218. | 43286. | 45634. |
| 50. | 5670. | 6007. | 5943. | 5675. | 5205. | 5307. | 5595. |

JEDNACINA KRIVE MODULA KRUTOSTI $Y = (250 - (A(X+20)**B+C)) * 1000$

KOEFICIJENTI JEDNACINE

A = 0.4802137683E-01
 B = 0.1944661974E 01
 C = 0.6090507571E 02

REZIDIJUMSKA VARIJANSA = 0.3093588157E 02

REZIDIJUMSKA DEVIJACIJA = 0.5562003379E 01

REZIDIJUMSKI VAR. KOEF. = 0.4333836669E 01 PROCENATA

| TEMPERATURA | MODUL | KRUTOSTI |
|-------------|---------|----------|
| -20. | 189094. | |
| -10. | 184867. | |
| 0. | 172820. | |
| 10. | 153290. | |
| 20. | 126448. | |
| 30. | 92410. | |
| 40. | 51266. | |
| 50. | 3089. | |

| TEMPERATURA °C | REZULTATI | MERENJA | MODULA | KRUTOSTI | KP/CM ** 2 | NA | 70 HZ |
|----------------|-----------|---------|---------|----------|------------|---------|---------|
| -20. | 192568. | 199204. | 205078. | 195146. | 185035. | 179035. | 188960. |
| -10. | 187060. | 195216. | 190056. | 195146. | 179001. | 182870. | 178943. |
| 0. | 177164. | 183216. | 179215. | 184860. | 171035. | 175039. | 170283. |
| 10. | 162165. | 165218. | 166385. | 168218. | 159040. | 157980. | 156210. |
| 20. | 139569. | 143286. | 142814. | 143056. | 135031. | 136218. | 135181. |
| 30. | 96567. | 98156. | 99184. | 100051. | 94216. | 93281. | 92056. |
| 40. | 51314. | 55143. | 53286. | 54286. | 47218. | 49000. | 48216. |
| 50. | 6178. | 6514. | 6438. | 6875. | 5705. | 5821. | 5424. |

JEDNACINA KRIVE MODULA KRUTOSTI $Y = (250 - (A(X+20)**B+C)) * 1000$

KOEFICIJENTI JEDNACINE

A = 0.2344646814E-01
 B = 0.2116548107E 01
 C = 0.5828161796E 02

REZIDIJUMSKA VARIJANSA = 0.3182579751E 02

REZIDIJUMSKA DEVIJACIJA = 0.5641435770E 01

REZIDIJUMSKI VAR. KOEF. = 0.4564947757E 01 PROCENATA

| TEMPERATURA | MODUL | KRUTOSTI |
|-------------|---------|----------|
| -20. | 191718. | |
| -10. | 188652. | |
| 0. | 178420. | |
| 10. | 160351. | |
| 20. | 134053. | |
| 30. | 99242. | |
| 40. | 55692. | |
| 50. | 3216. | |

| TEMPERATURA °C | REZULTATI MERENJA MODULA KRUTOSTI | κP/CM ** 2 | NA 80HZ | | | | |
|----------------|-----------------------------------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| -20. | 195214. | 205060. | 200148. | 198165. | 185040. | 190060. | 191950. |
| -10. | 190056. | 200143. | 195167. | 194286. | 179953. | 184867. | 185567. |
| 0. | 181145. | 185967. | 187214. | 185343. | 177216. | 175060. | 177035. |
| 10. | 166218. | 170218. | 169108. | 168214. | 162167. | 162164. | 164053. |
| 20. | 144060. | 150030. | 149216. | 147218. | 138216. | 138817. | 141208. |
| 30. | 98587. | 105050. | 102345. | 103207. | 91031. | 94218. | 93026. |
| 40. | 51164. | 57214. | 55060. | 53216. | 45916. | 47030. | 48964. |
| 50. | 7080. | 8040. | 7090. | 8340. | 6100. | 7020. | 5750. |

JEDNACINA KRIVE MODULA KRUTOSTI $Y = (250 - (A(X+20)**B+C)) * 1000$

KOEFICIJENTI JEDNACINE

A = 0.2081349029E-01
 B = 0.2148777377E 01
 C = 0.5494362559E 02

REZIDIJUMSKA VARIJANSA = 0.3665547546E 02

REZIDIJUMSKA DEVIJACIJA = 0.6054376557E 01

REZIDIJUMSKI VAR. KOEF. = 0.5008799526E 01 PROCENATA

| TEMPERATURA | MODUL KRUTOSTI |
|-------------|----------------|
| -20. | 195056. |
| -10. | 192124. |
| 0. | 182055. |
| 10. | 163985. |
| 20. | 137404. |
| 30. | 101934. |
| 40. | 57273. |
| 50. | 3167. |

| TEMPERATURA °C | REZULTATI MĚRENJA MODULA KRUTOSTI | KP/CM ** 2 | NA 90HZ |
|----------------|-----------------------------------|------------|---------|
| -20. | 198107. | 209214. | 215162. |
| -10. | 193218. | 199214. | 202564. |
| 0. | 184216. | 189216. | 188206. |
| 10. | 170000. | 177060. | 175060. |
| 20. | 148586. | 155213. | 151214. |
| 30. | 102314. | 105364. | 107860. |
| 40. | 55108. | 60214. | 57217. |
| 50. | 6567. | 6614. | 6704. |
| | | | 199147. |
| | | | 196218. |
| | | | 189204. |
| | | | 173216. |
| | | | 149286. |
| | | | 106216. |
| | | | 58314. |
| | | | 6600. |
| | | | 187014. |
| | | | 187040. |
| | | | 179060. |
| | | | 163030. |
| | | | 141060. |
| | | | 99060. |
| | | | 50003. |
| | | | 6405. |
| | | | 181064. |
| | | | 182316. |
| | | | 179906. |
| | | | 164968. |
| | | | 145040. |
| | | | 97103. |
| | | | 53040. |
| | | | 6420. |

JEDNACINA KRIVE MODULA KRUTOSTI $Y = (250 - (A(X+20)**B+C)) * 1000$

KOEFICIJENTI JEDNACINE

- A = 0.1466227768E-01
- B = 0.2233909944E 01
- C = 0.5223208385E 02

REZIDIJUMSKA VARIJANSA = 0.4349319431E 02

REZIDIJUMSKA DEVIJACIJA = 0.6594937024E 01

REZIDIJUMSKI VAR. KOEF. = 0.5597385933E 01 PROCENATA

TEMPERATURA MODUL KRUTOSTI

| | |
|------|---------|
| -20. | 197467. |
| -10. | 194955. |
| 0. | 185648. |
| 10. | 168229. |
| 20. | 141869. |
| 30. | 105941. |
| 40. | 59927. |
| 50. | 3386. |

| TEMPERATURA °C | REZULTATI | MERENJA | MODULA | KRUTOSTI | KP/CM ** 2 | NA 100 HZ |
|----------------|-----------|---------|---------|----------|------------|-----------|
| -20. | 200050. | 210218. | 212164. | 205195. | 190080. | 187984. |
| -10. | 196105. | 200186. | 205164. | 202186. | 191986. | 187216. |
| 0. | 187514. | 193216. | 190080. | 191216. | 181064. | 184214. |
| 10. | 174186. | 180050. | 178218. | 176214. | 168000. | 169850. |
| 20. | 154216. | 150216. | 158101. | 156214. | 148040. | 150043. |
| 30. | 110218. | 115214. | 112860. | 115214. | 104958. | 98000. |
| 40. | 59060. | 63216. | 64218. | 61243. | 55060. | 54063. |
| 50. | 7513. | 7583. | 7563. | 7466. | 7685. | 7415. |

JEDNACINA KRIVE MODULA KRUTOSTI $Y = (250 - (A(X+20)**B+C)) * 1000$

KOEFICIJENTI JEDNACINE

A = 0.9326356641E-02
 B = 0.2341461899E 01
 C = 0.5038364236E 02

REZIDIJUMSKA VARIJANSA = 0.4273578920E 02

REZIDIJUMSKA DEVIJACIJA = 0.6537261597E 01

REZIDIJUMSKI VAR. KOEF. = 0.5719330919E 01 PROCENATA

TEMPERATURA MODUL KRUTOSTI

| | |
|------|---------|
| -20. | 199616. |
| -10. | 197569. |
| 0. | 189240. |
| 10. | 172303. |
| 20. | 147029. |
| 30. | 110044. |
| 40. | 63727. |
| 50. | 4659. |

| TEMPERATURA °C | REZULTATI MERENJA MODULA KRUTOSTI | KP/CM ** 2 | NA 50HZ (šupljine 3.73%) |
|----------------|-----------------------------------|------------|--------------------------|
| -10. | 200241. | 210214. | 212286. |
| 0. | 187205. | 189567. | 190245. |
| 10. | 170204. | 175143. | 173156. |
| 20. | 144056. | 147256. | 145134. |
| 30. | 104215. | 106287. | 107314. |
| | | | 190356. |
| | | | 188216. |
| | | | 185346. |
| | | | 184056. |
| | | | 166900. |
| | | | 141281. |
| | | | 143018. |
| | | | 101001. |

JEDNACINA KRIVE MODULA KRUTOSTI $Y = (250 - (A(X+20)**B+C)) * 1000$

KOEFICIJENTI JEDNACINE

- A= 0.1735999606E-01
- B= 0.2205647641E 01
- C= 0.4811629471E 02

REZIDIJUMSKA VARIJANSA = 0.2683797813E 02

REZIDIJUMSKA DEVIJACIJA= 0.5180538402E 01

REZIDIJUMSKI VAR. KOEF.= 0.5833858182E 01 PROCENATA

| TEMPERATURA | MODUL KRUTOSTI |
|-------------|----------------|
| -10. | 199096. |
| 0. | 189026. |
| 10. | 170438. |
| 20. | 142573. |
| 30. | 104859. |

TEMPERATURA °C REZULTATI MERENJA MODULA KRUTOSTI KP/CM ** 2 NA 50 HZ (Šupljine 4.53%)

| | | | | | |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|
| -10. | 178484. | 185216. | 183060. | 171213. | 172953. |
| 0. | 166215. | 169218. | 172050. | 166034. | 160054. |
| 10. | 148104. | 153186. | 152936. | 143060. | 144016. |
| 20. | 122156. | 127184. | 125016. | 117064. | 119064. |
| 30. | 83214. | 88134. | 85164. | 78034. | 81031. |

JEDNACINA KRIVE MODULA KRUTOSTI $Y = (250 - (A(X+20)**B+C)) * 1000$

KOEFICIJENTI JEDNACINE

A = 0.1847905361E-01
 B = 0.2189447051E 01
 C = 0.6922929630E 02

REZIDIJUMSKA VARIJANSA = 0.1845256984E 02

REZIDIJUMSKA DEVIJACIJA = 0.4295645451E 01

REZIDIJUMSKI VAR. KOEF. = 0.3893607157E 01 PROCENATA

TEMPERATURA MODUL KRUTOSTI

| | |
|------|---------|
| -10. | 177612. |
| 0. | 167432. |
| 10. | 148792. |
| 20. | 120999. |
| 30. | 83534. |

| TEMPERATURA °C | REZULTATI MERENJA MODULA KRUTOSTI | KP/CM ** 2 | NA 50HZ (šupljine 6.46 %) |
|----------------|-----------------------------------|------------|---------------------------|
| -10. | 147216. | 152148. | 138103. |
| 0. | 134285. | 137961. | 128054. |
| 10. | 117813. | 119914. | 114218. |
| 20. | 91105. | 93842. | 87046. |
| 30. | 52843. | 53181. | 49214. |

JEDNACINA KRIVE MODULA KRUTOSTI $Y = (250 - (A(X+20)**B+C)) * 1000$

KOEFICIJENTI JEDNACINE

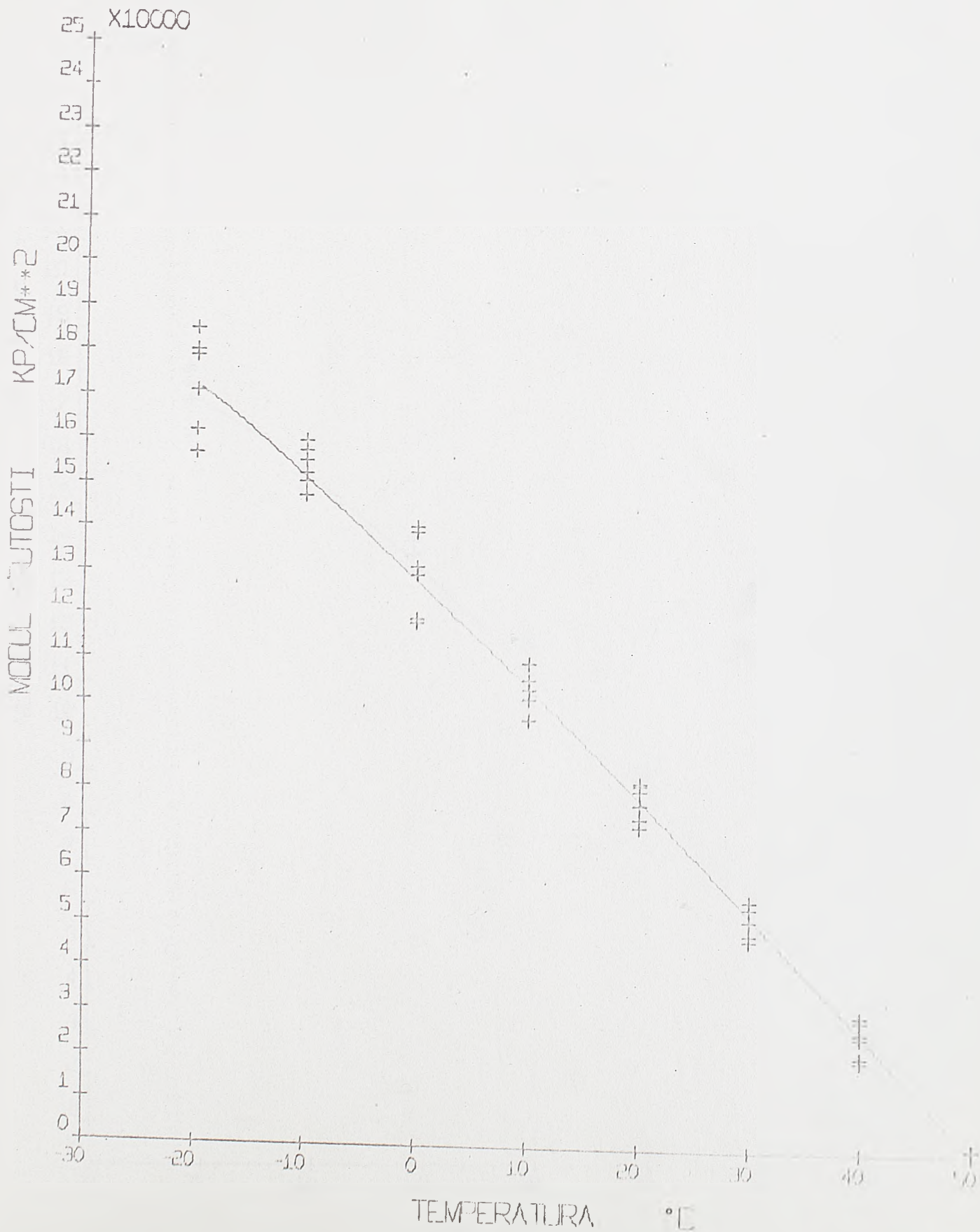
- A = 0.1828344915E-01
- B = 0.2189874301E 01
- C = 0.1010916658E 03

REZIDIJUMSKA VARIJANSA = 0.1748368711E 02

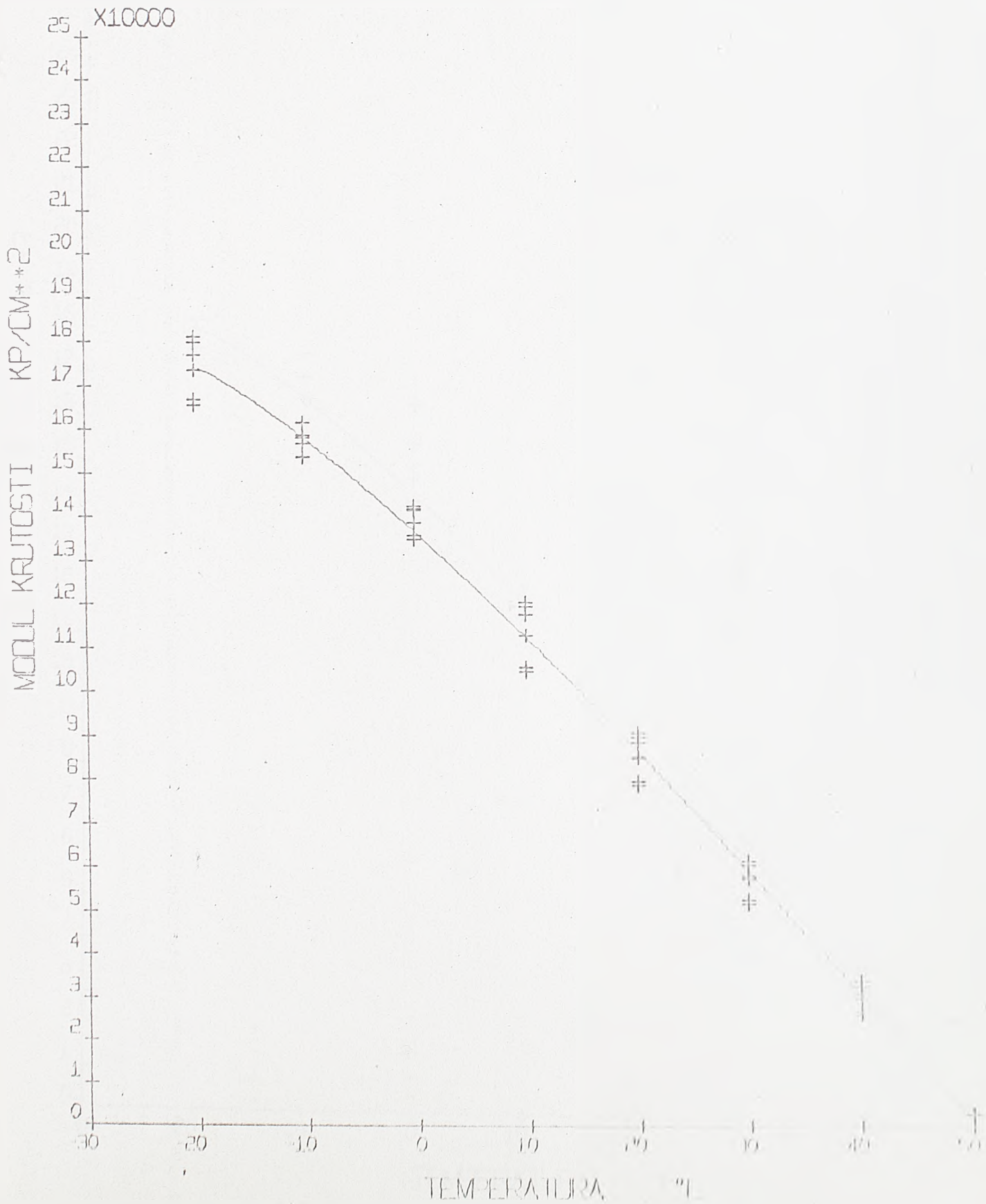
REZIDIJUMSKA DEVIJACIJA = 0.4181349916E 01

REZIDIJUMSKI VAR. KOEF. = 0.2954605016E 01 PROCENATA ✓

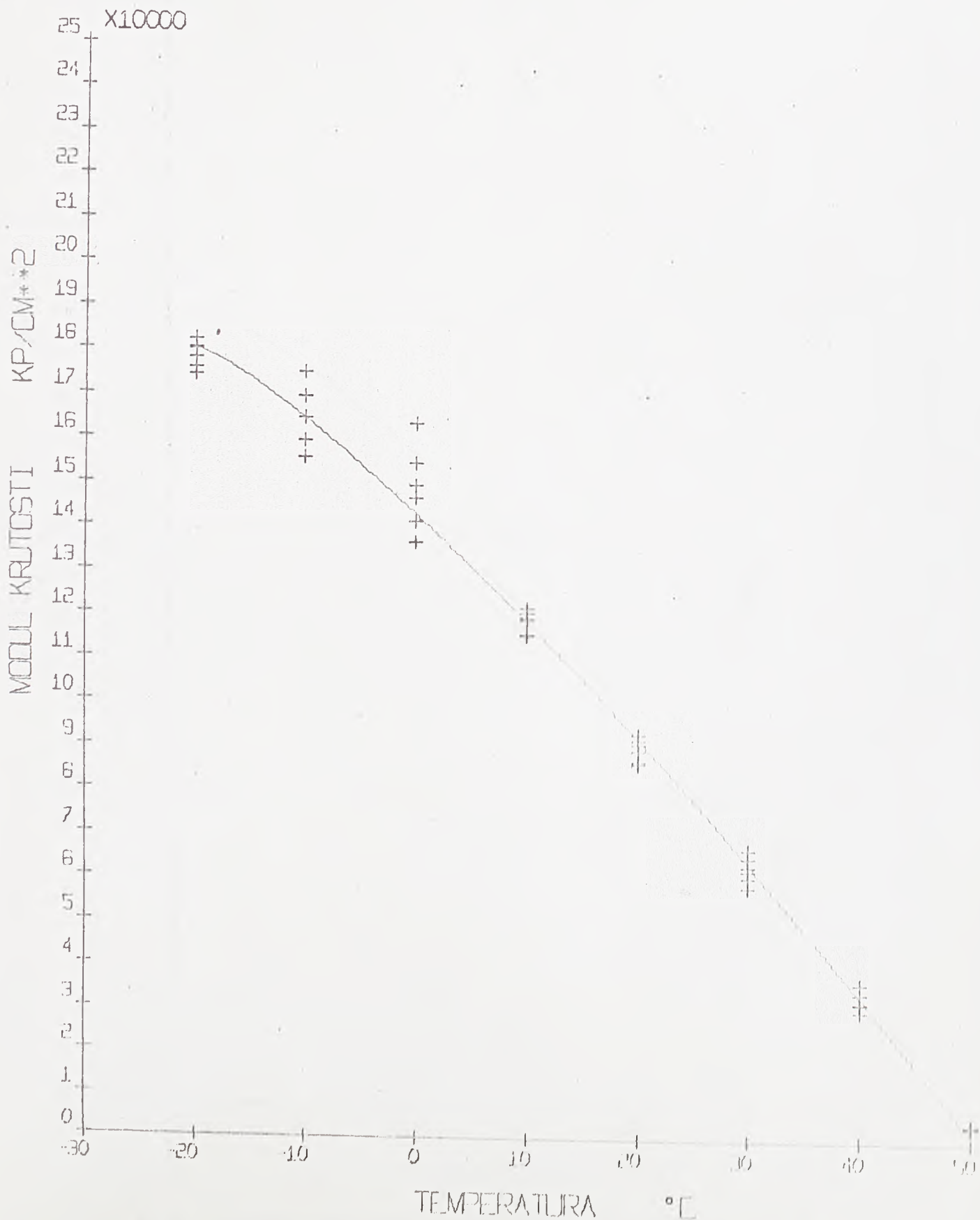
| TEMPERATURA | MODUL KRUTOSTI |
|-------------|----------------|
| -10. | 146077. |
| 0. | 135991. |
| 10. | 117520. |
| 20. | 89974. |
| 30. | 52838. |



SL. 33 MODUL KRUTOSTI U ZAVISNOSTI OD TEMPERATURE NA 5HZ

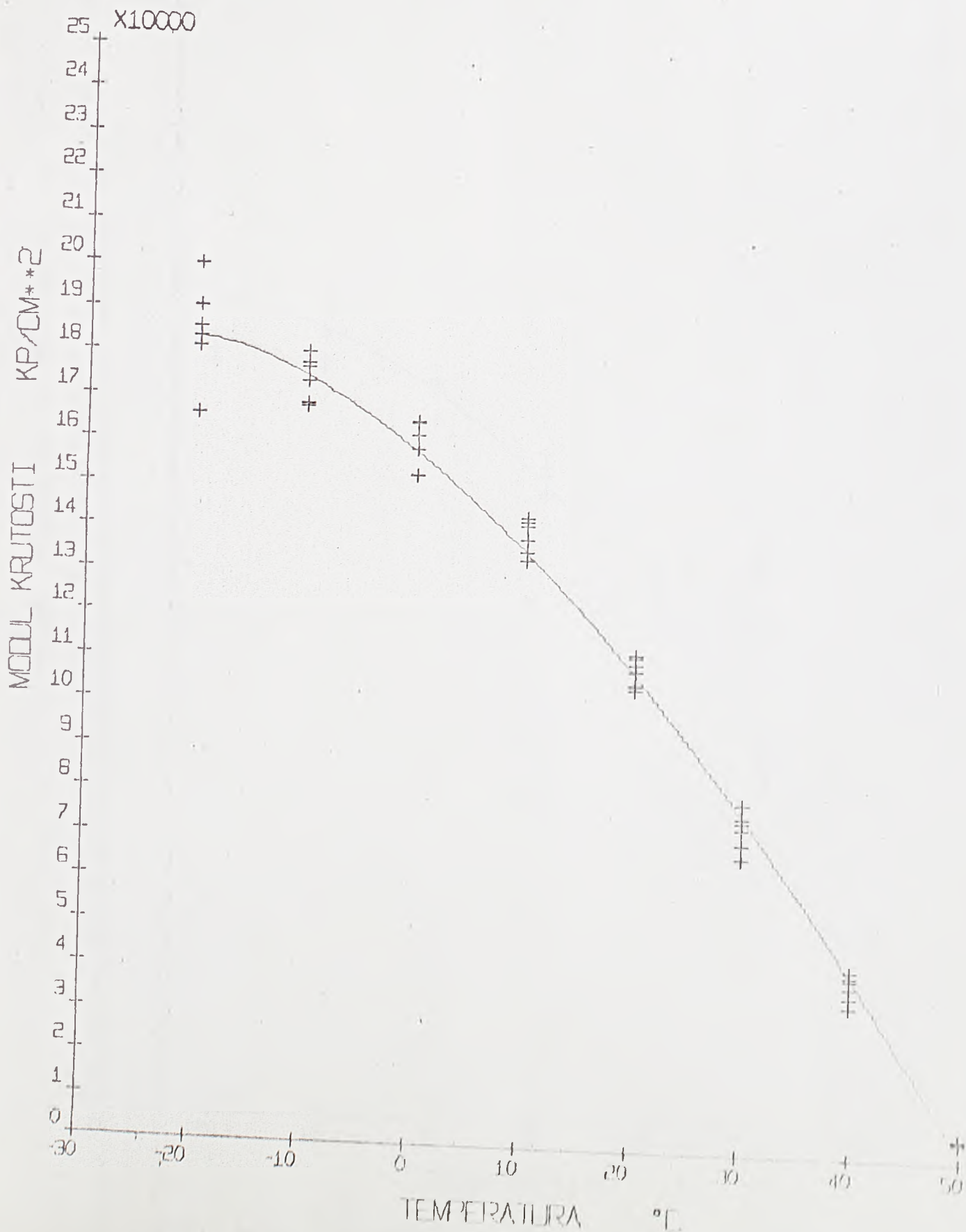


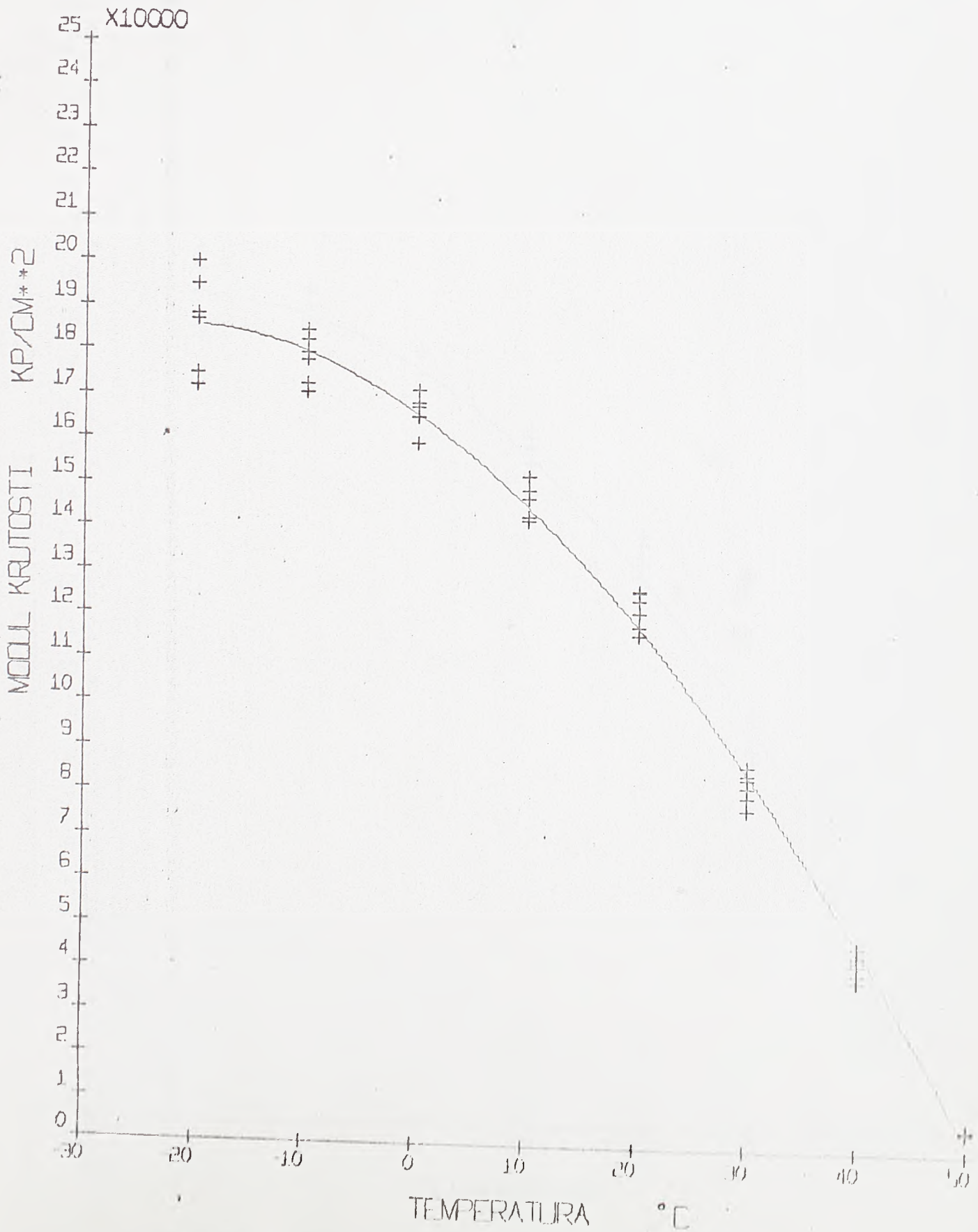
SL. 34 MODUL KRUTOSTI U ZAVISNOSTI OD TEMPERATURE NA 10 HZ



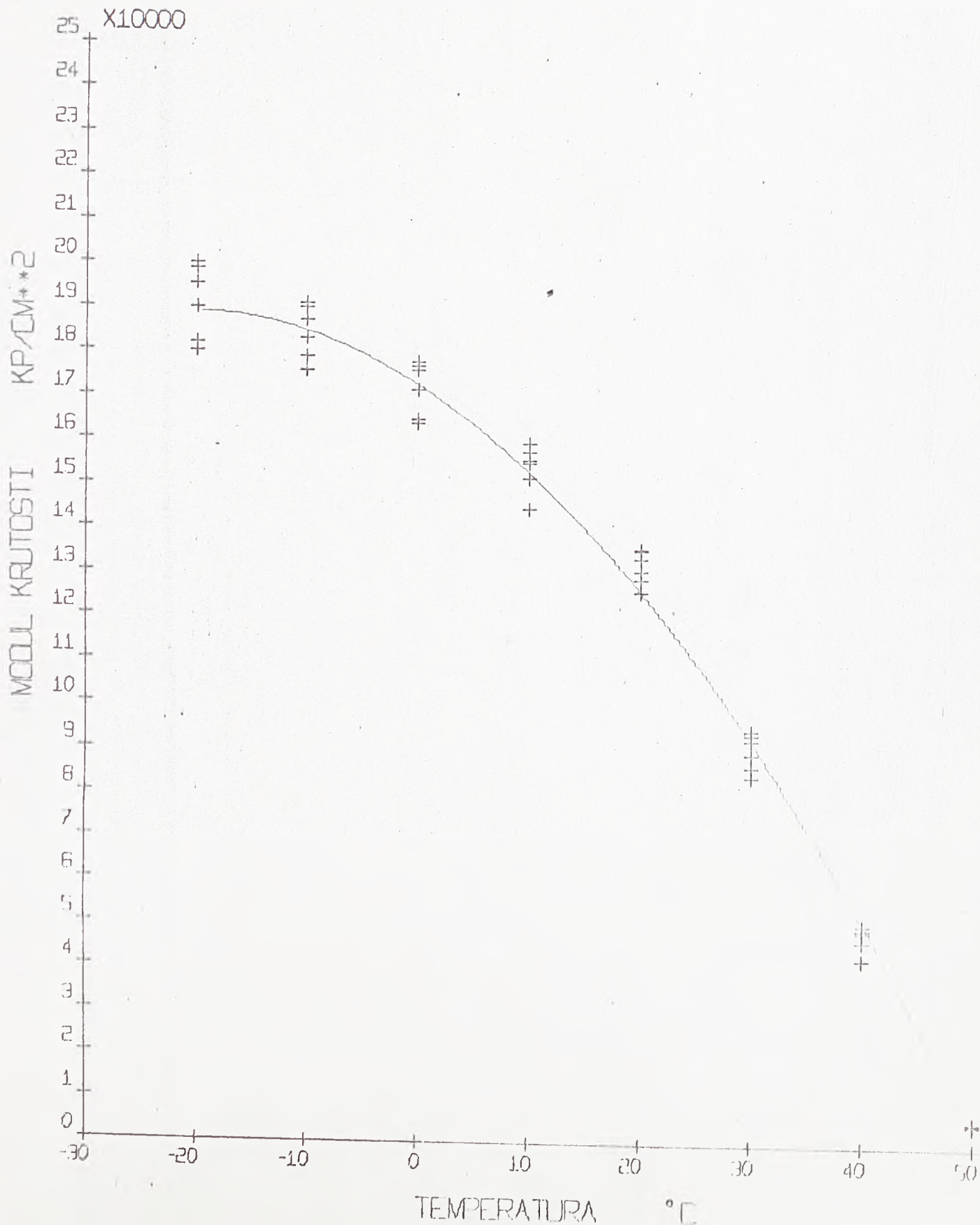
SL. 35 MODUL KRUTOSTI U ZAVISNOSTI OD TEMPERATURE NA 20HZ



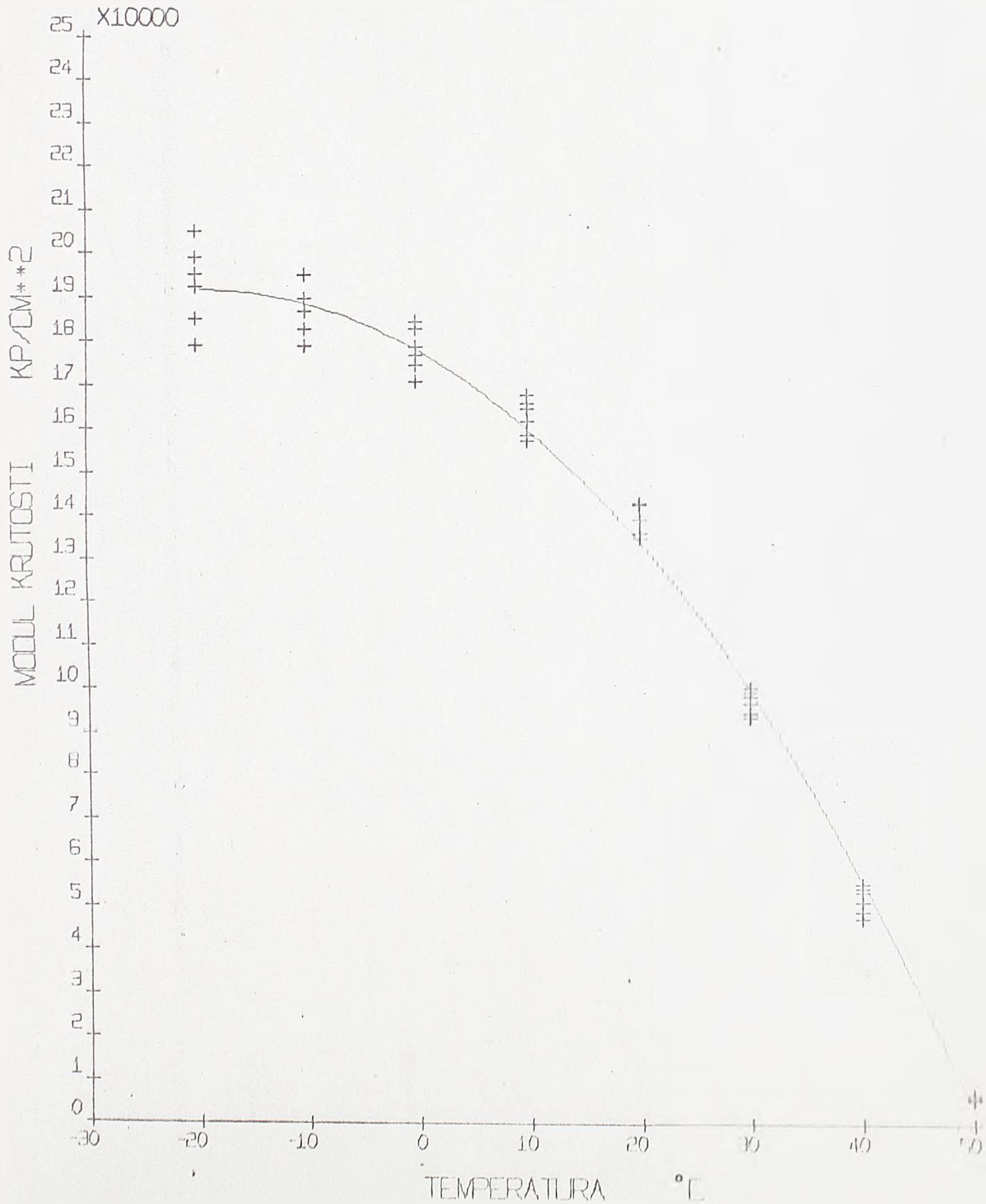




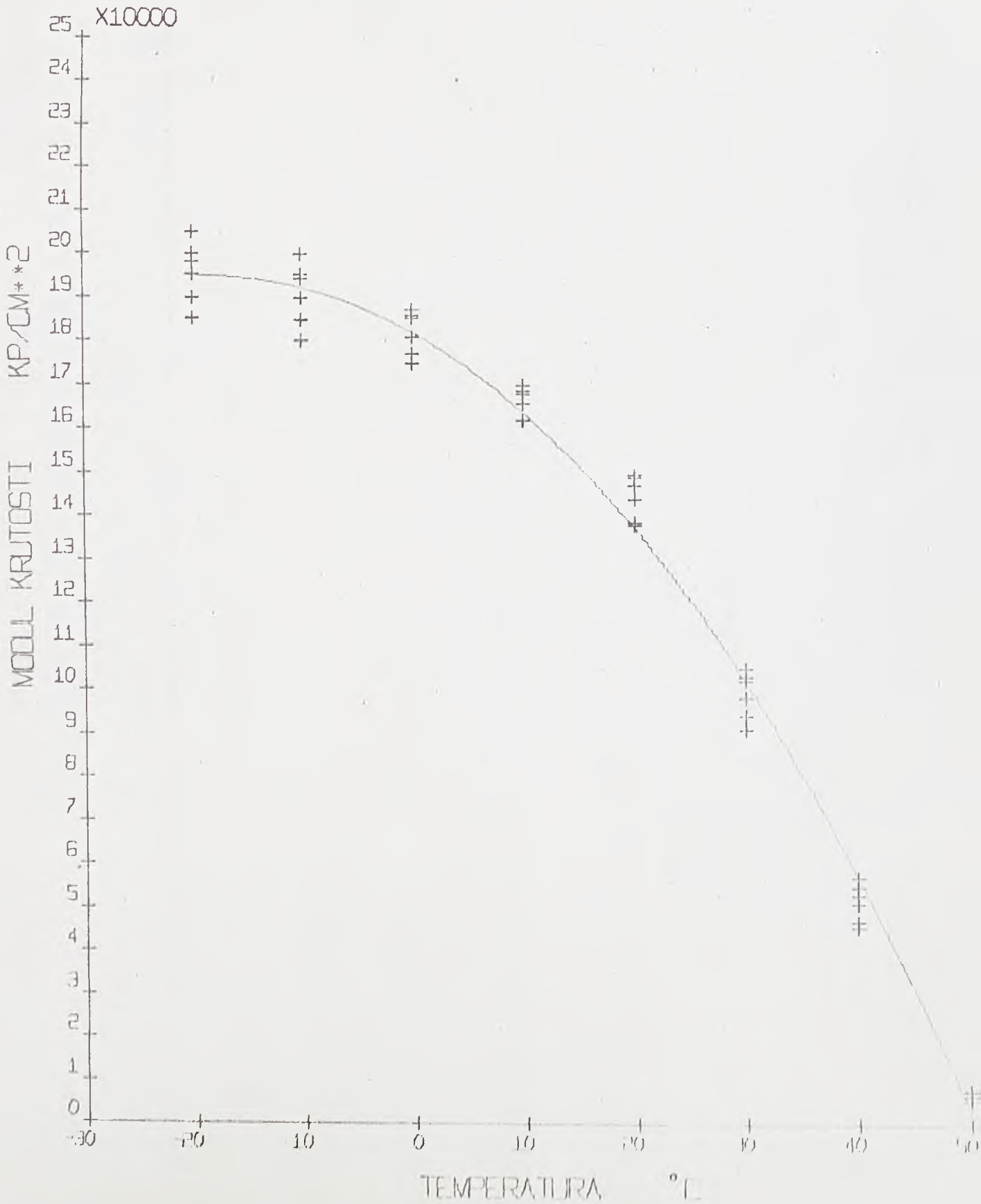
SL. 38 MODUL KRUTOSTI U ZAVISNOSTI OD TEMPERATURE NA 60 112



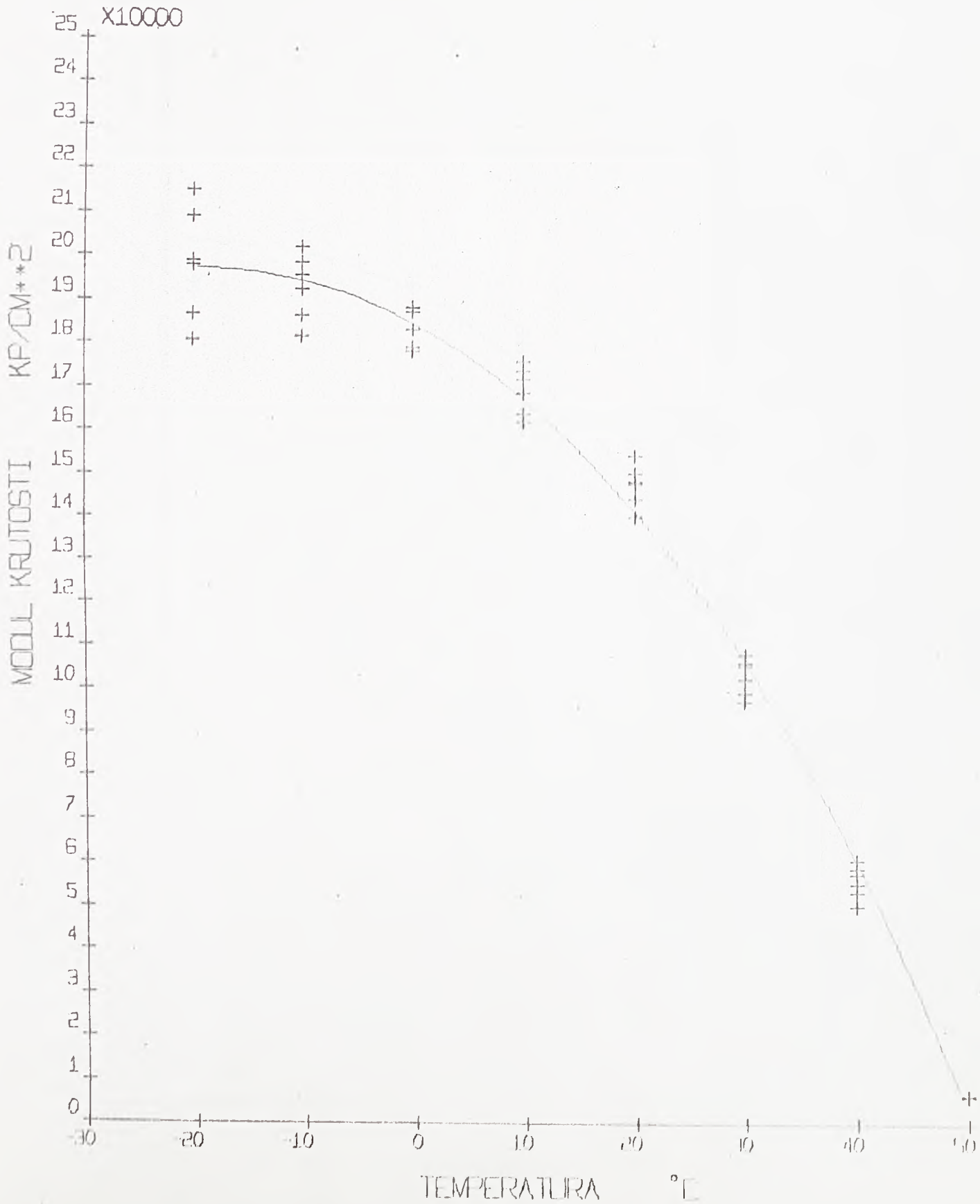
SL. 39 MODUL KRUTOSTI U ZAVISNOSTI OD TEMPERATURE NA 00 117



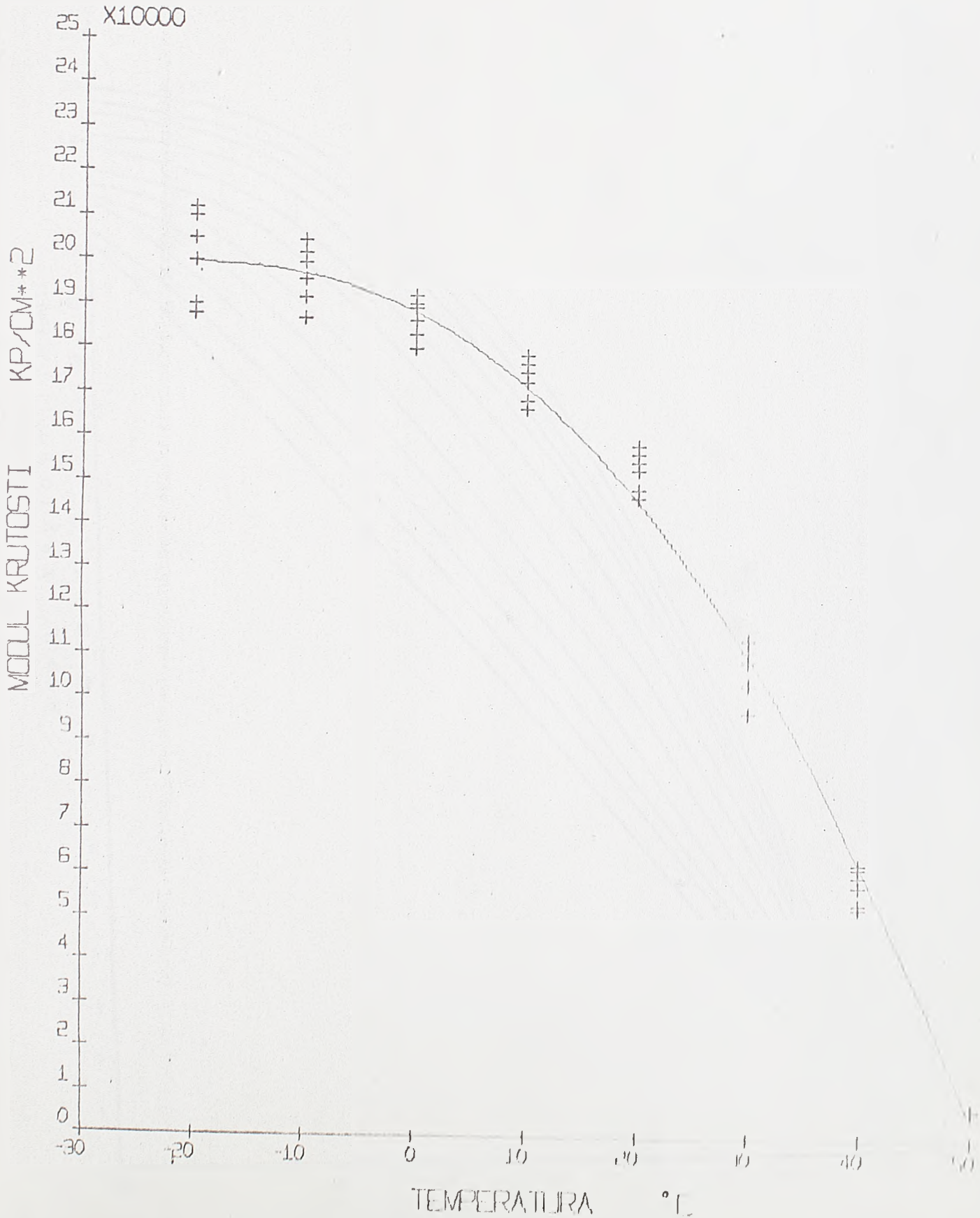
SL.40 MODUL KRUTOSTI U ZAVISNOSTI OD TEMPERATURE NA 30117



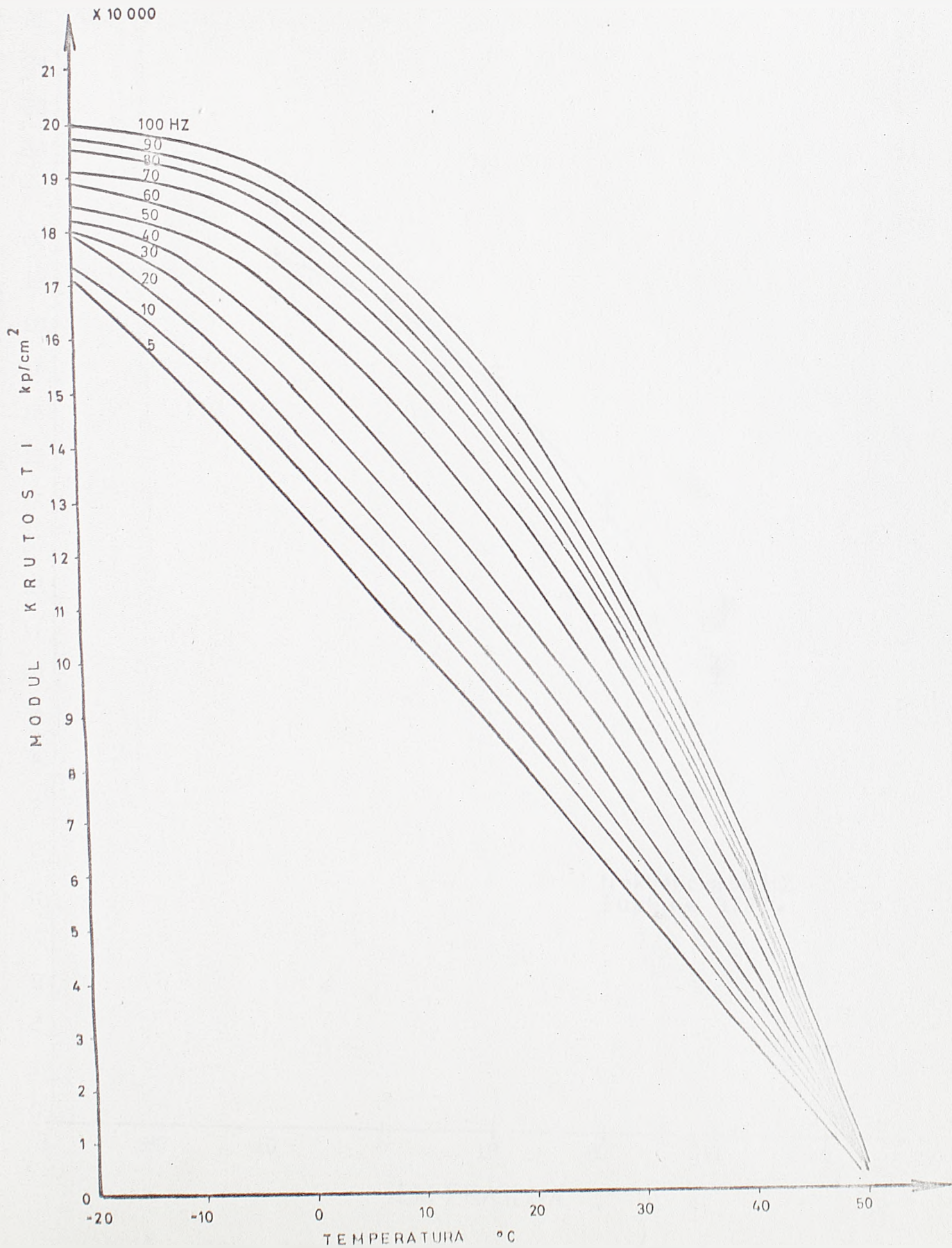
SL. 41 MODUL KRUTOSTI U ZAVISNOSTI OD TEMPERATURE NA 80117



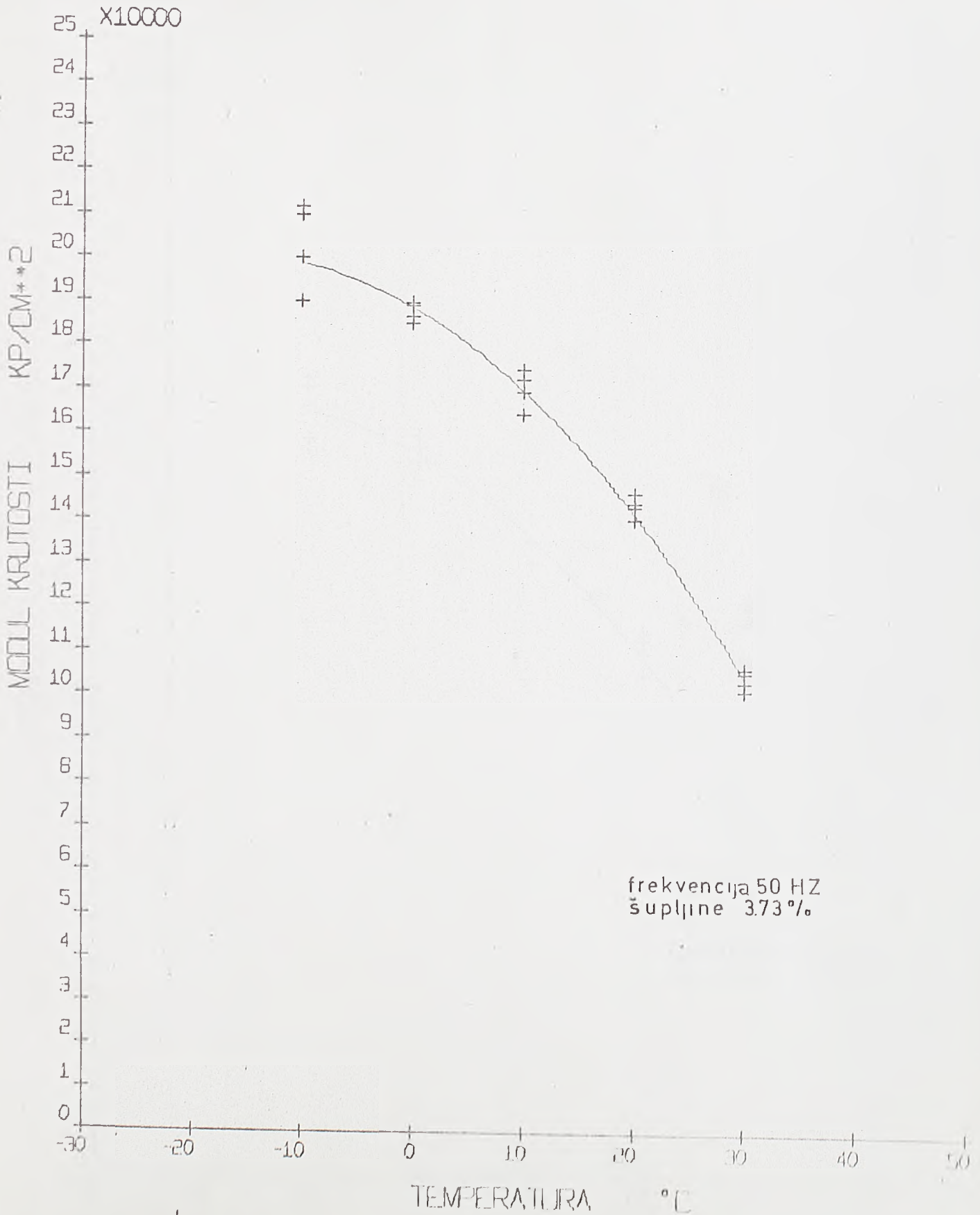
SL. 42 MODUL KRUTOSTI U ZAVISNOSTI OD TEMPERATURE NA 90 HZ



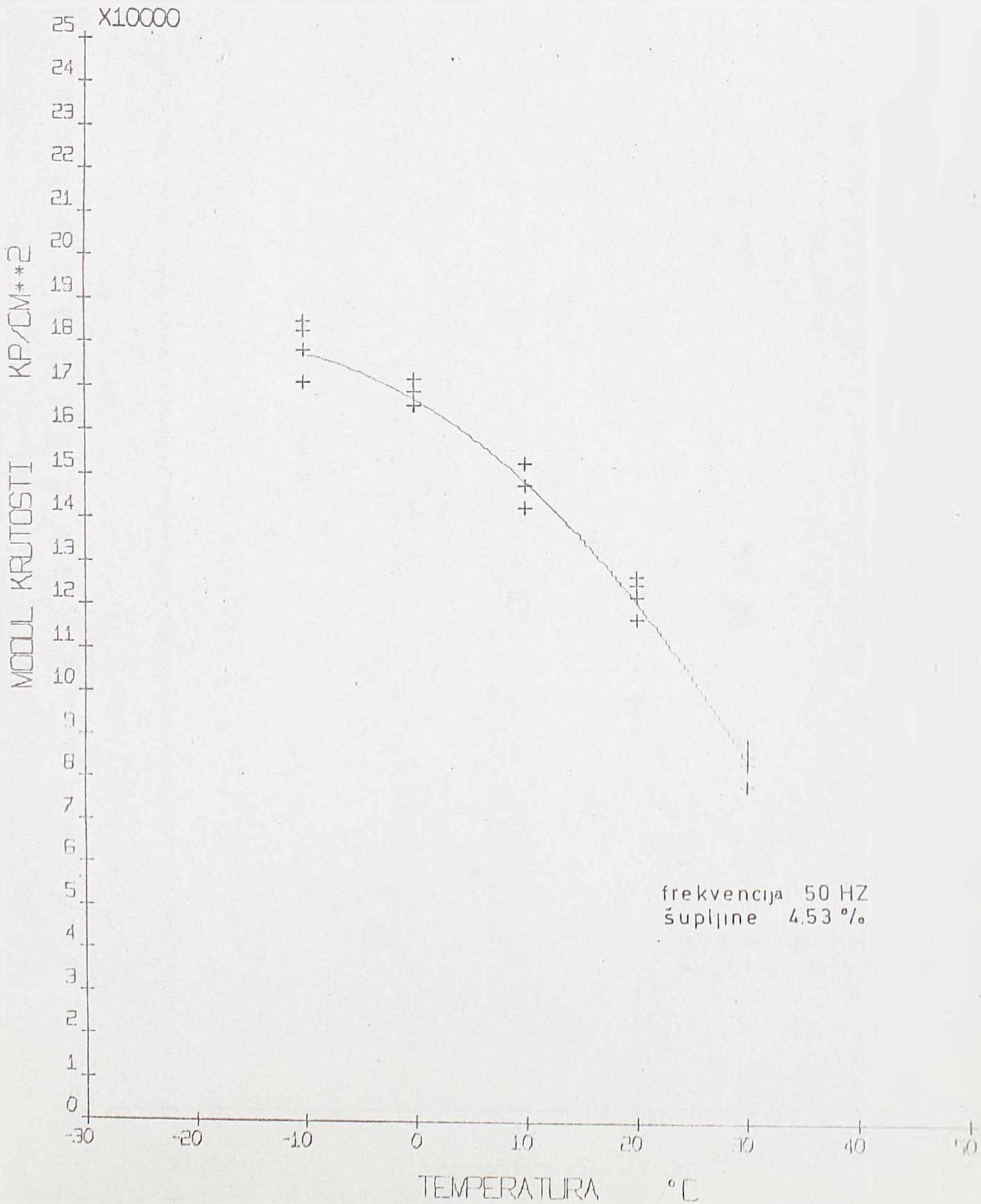
SL. 63 MODUL KRUTOSTI U ZAVISNOSTI OD TEMPERATURE NA 100HZ



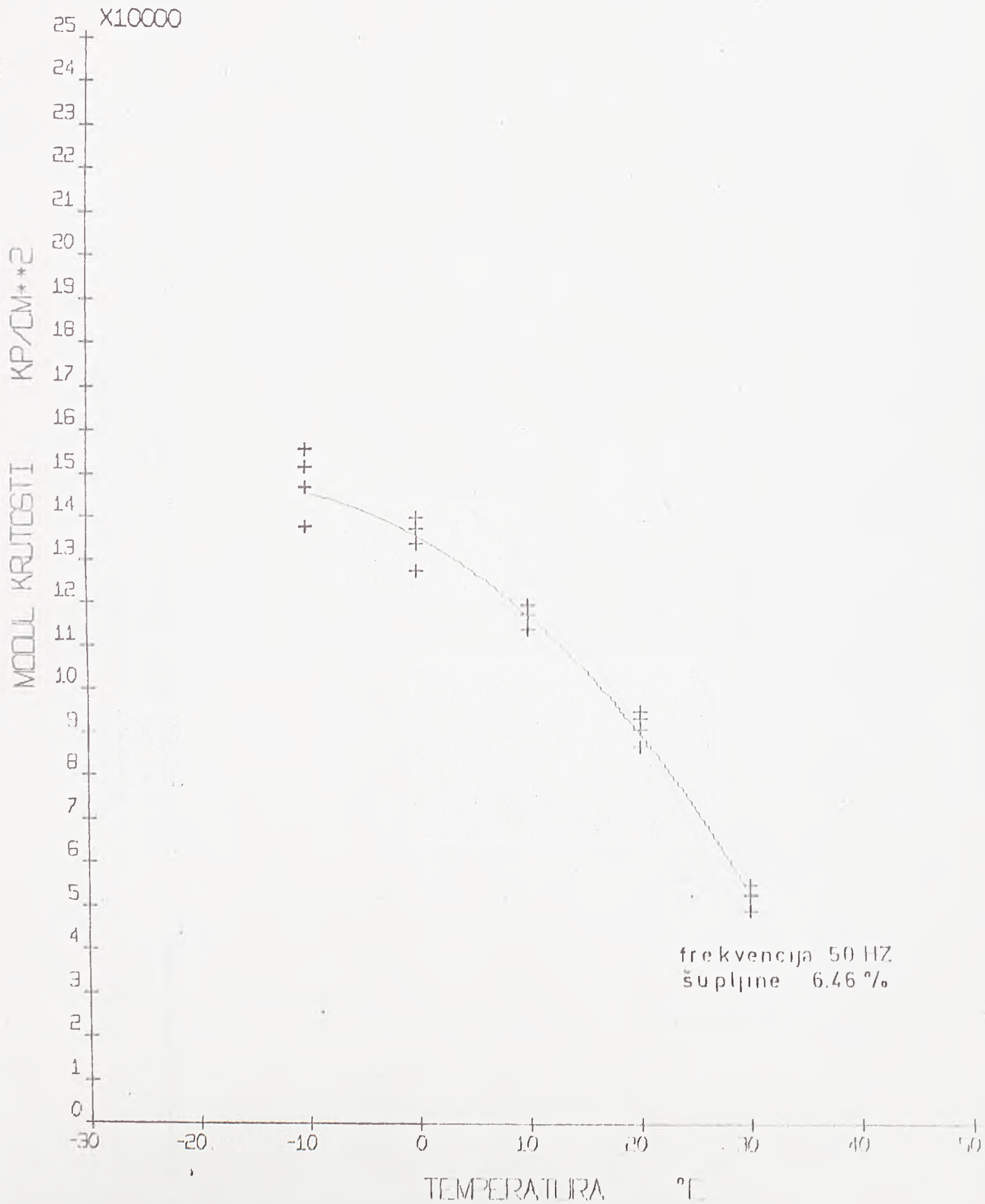
SL. 44 MODUL KRUTOSTI U ZAVISNOSTI OD TEMPERATURE PRI RAZLIČITIM FREKVENCIJAMA



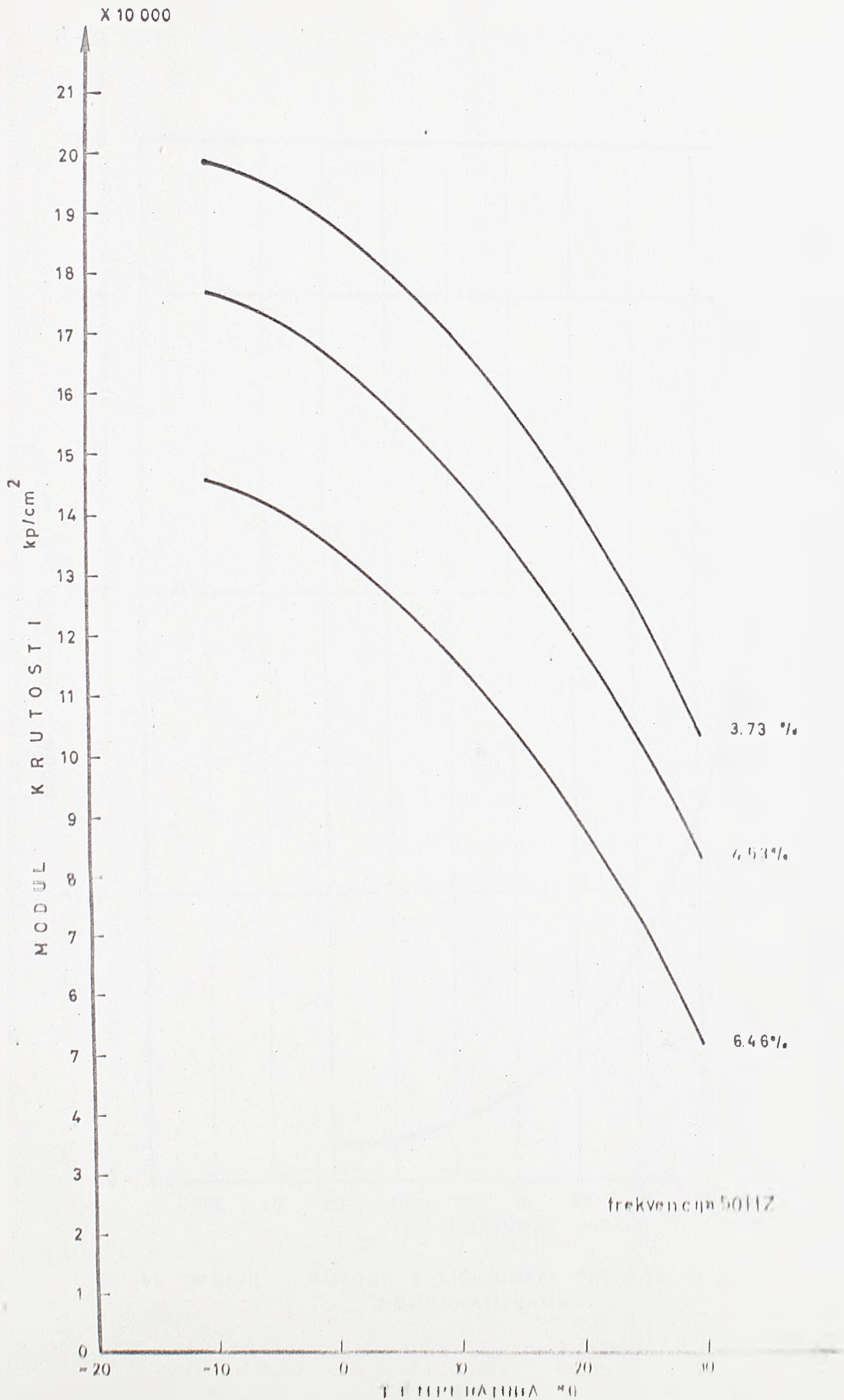
SL. 45 MODUL KRUTOSTI U ZAVISNOSTI OD TEMPERATURE



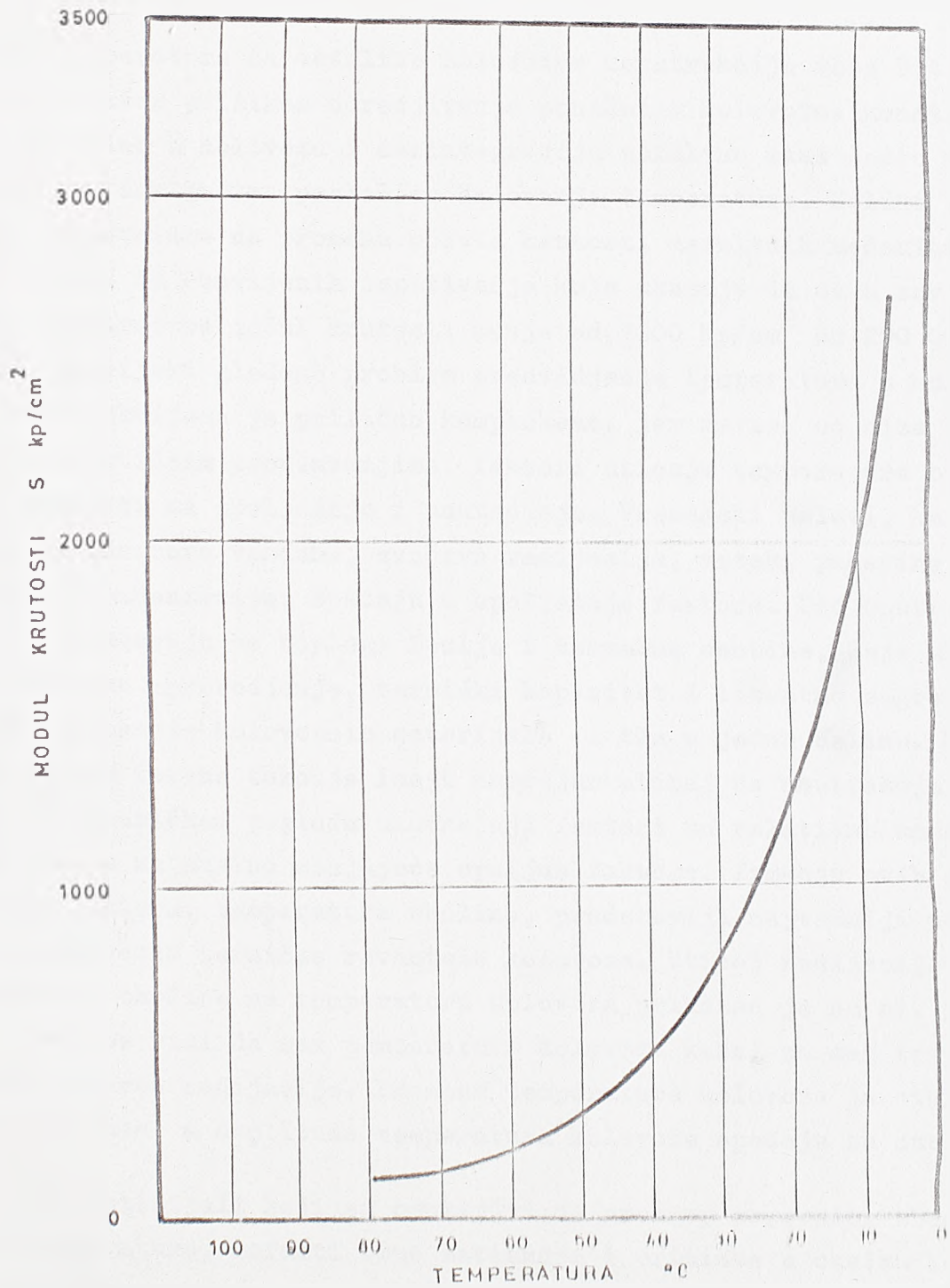
Sl. 46 MODUL KRUTOSTI U ZAVISNOSTI OD TEMPERATURE



SL. 47 MODUL KRUTOSTI U ZAVISNOSTI OD TEMPERATURE



GL. 48 MODUL KRUTOSTI U ZAVISNOSTI OD TEMPERATURE I PROCENTA ŠUPLJINA U KOJ. ZASTORU



SL. 49 MODUL KRUTOSTI BIT. ŠLJUNKA PRI RAZLIČNIM TEMPERATURAMA

V. RASPROSTIRANJE TEMPERATURE U ASFALTNIM KOLOVOZIMA

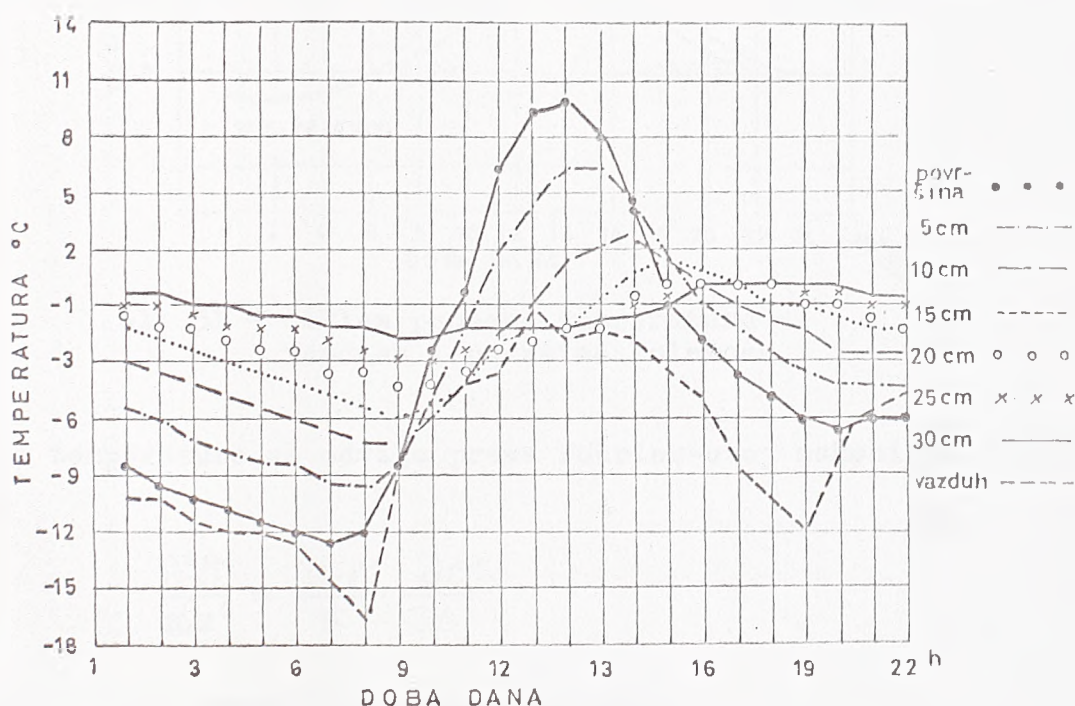
U v o d

Dejstvo temperature na asfaltne kolovozne konstrukcije može biti odlučujući faktor prilikom određivanja ponašanja kolovozne konstrukcije. Pukotine u kolovozu i dezintegracija asfaltne mase često mogu nastati kao isključiva posledica delovanja temperature. Koliki je značaj temperature na promenu modula krutosti asfaltnih mešavina može se videti iz obavljenih ispitivanja koja ukazuju da se u zavisnosti od temperature modul krutosti menja od 2000 kp/cm^2 do $200\ 000 \text{ kp/cm}^2$. Teorijski gledano problem predviđanja temperatura u kolovoznim konstrukcijama je prilično kompleksan, jer zavisi od niza faktora. U praktičnim proučavanjima, faktori uticaja temperature bi se mogli podeliti na spoljašnje i unutrašnje. Vremenski uslovi, kao što su temperatura vazduha, sunčeva radijacija, vetak, padavine, isparenja i kondenzacija, spadaju u spoljašnje faktore. Pod unutrašnje faktore svrstavaju se toploga Zemlje i termalne osobine, koje uključuju termičko sprovodjenje, termički kapacitet i latentno zagrevanje nastalo stapanjem kolovoznih materijala i tla u jednu celinu. Geološke odlike terena takodje imaju značajan uticaj na unutrašnje faktore. U dinamičkom pogledu unutrašnji faktori su relativno konstantni u odnosu na stalno menjajuće spoljne faktore. Izmedju ovih spoljašnjih faktora, temperatura okoline, predstavlja najvažniji u okviru proučavanja termičke ravnoteže kolovoza. Uticaj redijacije i temperature okoline na temperaturu kolovoza prikazan je na sl. 50 i 51. Ovde se vidi da max temperatura kolovoza kasni za max temperaturom solarne radijacije. Promena temperature kolovoza je ciklična u toku dana, a amplitude temperatura kolovoza opadaju sa dubinom.

Kao i svi materijali koji su osećljivi na promenu zapremine zbog dejstva temperature, asfalti trpe zatezanja i pritiske u okviru kolovozne konstrukcije.

Termička sprovodljivost i kapacitet zagrevanja kolovoznih materijala ima posebnu ulogu u ovom slučaju. Ovo znači da su unutrašnji na-

termički naponi rezultat karakteristika materijala koji ulaze u sastav slojeva konstrukcije. U trenutku prekoračenja napona na zatezanje koji dopušta dati materijal, dolazi do stvaranja pukotina u kolovozu iako nema opterećenja od vozila. Ovakvi lomovi se javljaju češće kod betonskih nego kod asfaltnih kolovoza.

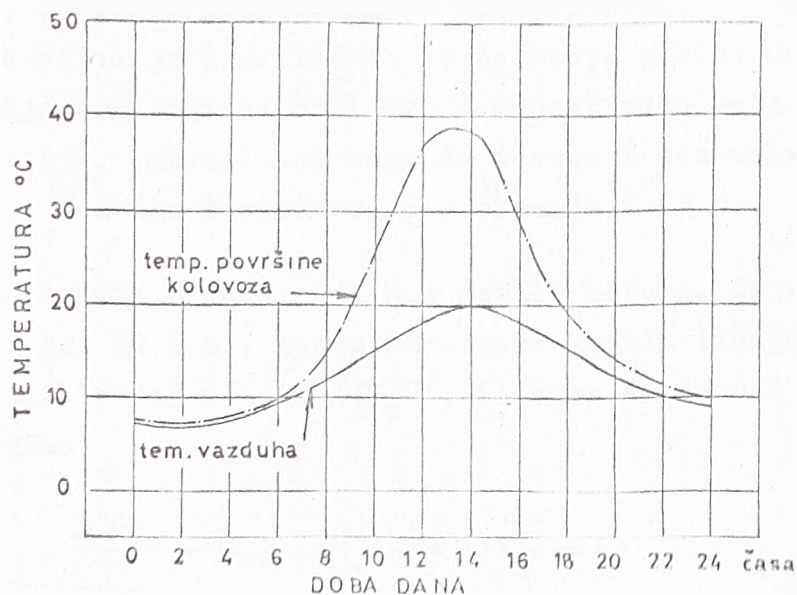


Sl. 50 - Temperatura asfalt-betona u januaru

Postoji veliki broj istraživačkih radova koji su se bavili proučavanjem uticaja promene temperature vazduha na temperaturu kolovoza. Mora se odmah napomenuti da osim empirijskih odnosa ne postoje za sada korektni analitički odnosi.

V.1. Toplotne osobine asfaltnih mešavina

Temperatura na površini kolovoza se, grubo uzevši, menja po sinusoidalnom zakonu, a odatle proizilazi i odgovarajuća varijacija temperature kolovoza na različitim dubinama (sl. 50 i sl. 51).



Sl. 51 - Ciklus promene temperature vazduha i površine kolovoza

Promena temperature se odvija prema Fourier-ovoj zakonitosti koja glasi:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \frac{c \cdot \gamma}{K} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (86)$$

gde je: C - specifična toplota betona,
 γ - specifična težina betona,
 K - termička provodljivost kolovoza,
 θ - temperatura na dubini Z , i
 t - vreme.

Ako je temperatura na površini ploče data izrazom

$$\theta = \theta_0 \sin 2\pi \frac{t}{T} \quad (87)$$

rešenje Fourier-ove jednačine ima oblik:

$$\theta = \theta_0 e^{-\lambda z} \sin \left(2\pi \frac{t}{T} - \lambda z \right) \quad (88)$$

pri čemu je
$$\lambda^2 = \frac{\rho c \gamma}{TK} \quad (89)$$

Izraz za λ upravlja prigušivanjem temperaturnih promena i zavisi od perioda varijacija površinskih temperatura ploča. Ono će za dnevne varijacije temperature biti oko dvadeset puta veće nego za godišnje varijacije, polazeći od toga da dnevne i sezonske varijacije predstavljaju fenomen dvostrukog ponavljanja.

Na osnovu analognih proučavanja kod asfalt betona, čija su merenja prikazana na sl. 50 i 51, mesto maksimuma krivih linija $Q = f(t, z)$ dobija se poništavanjem σ_e / σ_t , i to za vrednosti koje dobijamo iz jednačine:

$$\frac{2\pi t}{T} - \lambda z + (2k + 1) \frac{\pi}{2} = 0 \quad (90)$$

Odakle se dobija vrednost koeficijenta λ pomoću:

$$\lambda = \frac{2\pi \Delta t}{T \Delta z} \quad (91)$$

gde Δt predstavlja pomeranje srednjeg vremena maksimuma dveju temperatura krivih linija na dve udaljene dubine za Δz .

Isto tako se mogu uporediti i amplitude promene temperature na različitim dubinama, jer ako ova amplituda vredi 2% na površini, ona neće vredeti više od $2 \cdot \sigma_0 \cdot e^{-\lambda z}$ na dubini z . Polazeći od sl. 50, i pored toga što promena površinske temperature nije sasvim sinusoidalna, nalazi se da je koeficijent λ oko 6 rad/m. Ova vrednost je bliska vrednosti za cement betone što pruža mogućnost da u prvoj aproksimaciji uobičajeni materijali za puteve imaju veoma srodne termičke osobine.

V.2. Promene fizičkih osobina materijala

Obavljena merenja uticaja temperature na promenu čvrstoće betonskog kolovoza, pokazuju da u temperaturnom pojasu od 5°C do 40°C, dolazi do opadanja relativne čvrstoće na pritisak i savijanja za 1.25 do

0.80. Što znači da čvrstoća betona opada sa povišenjem temperature. Slično, ali i mnogo kompleksnije, dolazi do promena i kod asfaltnih kolovoza. U istom temperaturnom području stabilnost asfalt betona može opasti od 7000 kp pri 5°C na 1300 kp pri 40°C. Ovako velike promene su posledica promene elastičnih osobina bitumena. U istom temperaturnom području modul krutosti bi se promenio od 180 000 kp/cm² pri 5°C na 6000 kp/cm² pri 40°C.

Uticaj temperature na fizičke osobine posteljice se znatno komplikuje zbog dejstva vlage; pri istoj vlažnosti dolazi do opadanja čvrstoće u posteljici pri podizanju temperature.

Sledeća važna fizička osobina prouzrokovana promenom temperature je promena zapremine materijala. Za kolovozne materijale kao što su beton, stabilizovani materijali i sabijena posteljica, koeficijent širenja se normalno kreće od 2 do 8 x 10⁻⁶ cm/(cm)(°C). U temperaturnom području od -20°C do 70°C, termičko širenje ovih materijala je linearna funkcija promene temperature.

Termičko širenje asfalt betona je prvenstveno zavisno od viskoznih osobina bitumena i fizičkih osobina agregata. Zbog složenih međusobnih odnosa bitumena i agregata, ne postoji koeficijent širenja za asfalt betone, kao za čelik i beton. U svetu je puno radjeno i radi se na definisanju termičkog ponašanja asfaltnih konstrukcija, ali neka veća teorijska osnova, zbog nemogućnosti obuhvatanja svih parametara u proračun, nije nadjena.

V.3. Uticaj temperature na promenu modula krutosti asfaltnih slojeva u kolovoznoj konstrukciji

Da bi smo istakli uticaj temperature na modul krutosti asfaltnih slojeva, napravili smo model kolovozne konstrukcije u okviru kojeg smo na osnovu obavljenih merenja u inostranstvu očitali temperature za određena godišnja doba i dubine slojeva (sl. 53). Za ovako određene temperature u pojedinim slojevima na osnovu rezultata iz doktorata i magistarskog rada, nacrtani su dijagrami promene modula krutosti u zavisnosti od temperature (godišnjih doba) i frekvencije

sl. 53, 54, 55, 56 i 57.

Analiza prikazanih rezultata pokazuje da u toku različitih godišnjih doba dolazi do znatnih razlika u pogledu vrednosti modula krutosti habajućeg i veznog sloja (asfalt betona) i nosećeg sloja (bituminizirani šljunak).

Pored niz zaključaka koji se odavde mogu izvući, svakako je najinteresantniji ovaj da se pri današnjim važećim propisima za kvalitet pojedinih asfaltnih mešavina, postižu bez obzira na godišnja doba, odnosno temperaturu u kolovozu, najmanje vrednosti za modul krutosti u nosećem sloju. Kada bi ova razlika bila mala i kontinualna to bi bilo normalno i poželjno, međutim ta je razlika velika ($S = 12\ 000$ do $90\ 000$ kp/cm^2). Na ovaj način dolazi do velikog diskontinuiteta u nosivosti pojedinih slojeva i mogućnosti oštećenja kolovozne konstrukcije pod opterećenjem. Novi domaći propisi, uzimaju donekle ovo u obzir zahtevajući bolji kvalitet nosećih slojeva.

Na osnovu dijagrama datih u ovom radu u mogućnosti smo da prilikom određivanja dimenzija pojedinih slojeva asfaltne konstrukcije, odredimo ponašanje ove konstrukcije u najkritičnijim vremenskim periodima.

Pored iznetog zaključka o nesrazmernoj raspodeli modula krutosti u toku svih godišnjih doba, poseban problem stvaraju ekstremne temperature.

Leti dolazi do zagrevanja kolovozne površine (zbog njene crne boje) i do $70 - 80^{\circ}\text{C}$ (30°C više od max temperature vazduha), što dovodi do niskih vrednosti modula krutosti, a samim tim i male otpornosti kolovoza na deformacije. Posledica ovakvog stanja su na pravcima uzdužni kolotrazi, a na mestima naglih promena brzina (raskrsnice i usponi) poprečni talasí.

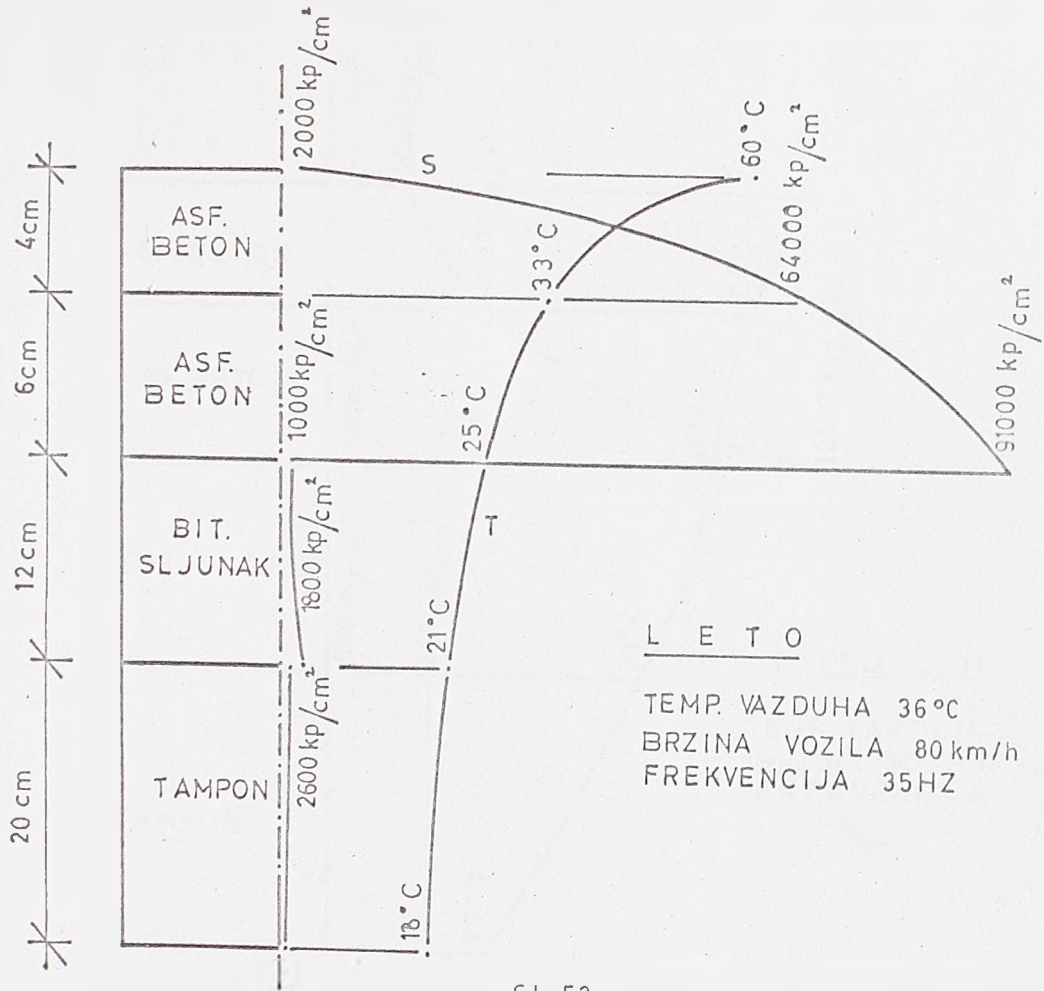
Zimi, pri niskim temperaturama zbog termičkih napona zatezanja koji prekoračuju čvrstoću na zatezanje asfalt betona, dolazi do stvaranja prskotina na površini kolovoza. Poznavajući termičko ponašanje asfalt betona tj. promenu modula krutosti, frekvenciju opterećenja, intenzitet opterećenja i temperaturu okoline, u stanju smo da predvidimo mogućnost pojave pukotina.

LETO $T_0 = 36^\circ\text{C}$ LETO $T_0 = 35^\circ\text{C}$ LETO $T_0 = 37^\circ\text{C}$ ZIMA $T_0 = -17^\circ\text{C}$ PROLEĆE $T_0 = -1^\circ\text{C}$
 35-Hz 5 Hz 35 Hz 35 Hz 35 Hz
 80 km/h 10 km/h 80 km/h 80 km/h 80 km/h

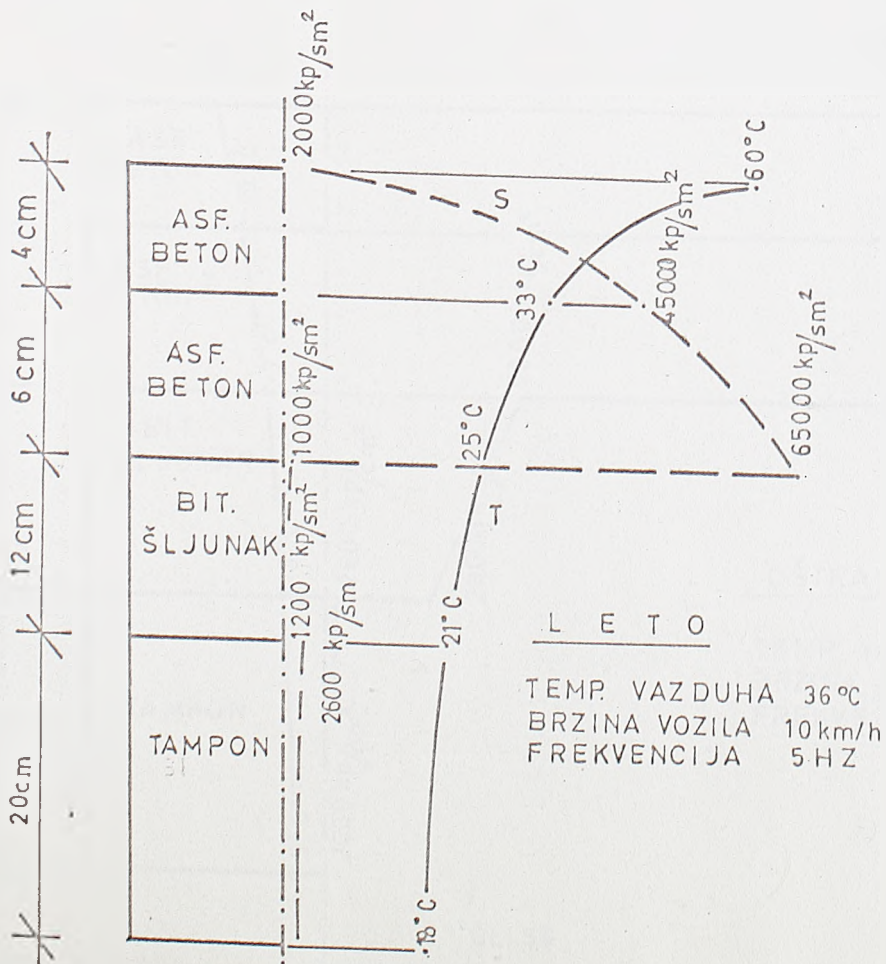
| | $T = 60^\circ\text{C}$ | $T = 60^\circ\text{C}$ | $T = 61^\circ\text{C}$ | $T = -13^\circ\text{C}$ | $T = 8^\circ\text{C}$ |
|--------------------|---|--|--|---|---|
| ASFALT BETON | $E = 84.000 \text{ kp/cm}^2$ $f = 2,33 \text{ t/m}^3$ $T = 33^\circ\text{C}$ $\gamma = 0,434$ | $E = 45.000 \text{ kp/cm}^2$ $\gamma = 2,33$ $T = 33^\circ\text{C}$ $\gamma = 0,434$ | $E = 4.000 \text{ kp/cm}^2$ $\gamma = 2,33$ $T = 53^\circ\text{C}$ $\gamma = 0,45$ | $E = 172.000 \text{ kp/cm}^2$ $\gamma = 2,33$ $T = -10^\circ\text{C}$ $\gamma = 0,35$ | $E = 142.000 \text{ kp/cm}^2$ $\gamma = 2,33$ $T = 6^\circ\text{C}$ $\gamma = 0,35$ |
| ASFALT BETON | $E = 91.000 \text{ kp/cm}^2$ $f = 2,33 \text{ t/m}^3$ $T = 25^\circ\text{C}$ $\gamma = 0,434$ | $E = 65.000 \text{ kp/cm}^2$ $\gamma = 2,33$ $T = 25^\circ\text{C}$ $\gamma = 0,434$ | $E = 12500 \text{ kp/cm}^2$ $\gamma = 2,33$ $T = 48^\circ\text{C}$ $\gamma = 0,45$ | $E = 167.000 \text{ kp/cm}^2$ $\gamma = 2,33$ $T = -7^\circ\text{C}$ $\gamma = 0,35$ | $E = 148.000 \text{ kp/cm}^2$ $\gamma = 2,33$ $T = 2^\circ\text{C}$ $\gamma = 0,35$ |
| BITUMEN SLJUNAK | $E = 1100 \text{ kp/cm}^2$ $f = 2,33 \text{ t/m}^3$ $T = 21^\circ\text{C}$ $\gamma = 0,35$ | $E = 1200 \text{ kp/cm}^2$ $f = 2,36$ $T = 21^\circ\text{C}$ $\gamma = 0,35$ | $E = 500 \text{ kp/cm}^2$ $\gamma = 2,36$ $T = 39^\circ\text{C}$ $\gamma = 0,35$ | $E = 40.000 \text{ kp/cm}^2$ $\gamma = 2,36$ $T = -5^\circ\text{C}$ $\gamma = 0,35$ | $E = 35000 \text{ kp/cm}^2$ $\gamma = 2,36$ $T = -1^\circ\text{C}$ $\gamma = 0,35$ |
| TAMPON | $E = 2600 \text{ kp/cm}^2$ $f = 1,9 \text{ t/m}^3$ $T = 18^\circ\text{C}$ $\gamma = 0,45$ | $E = 2600 \text{ kp/cm}^2$ $f = 1,9$ $T = 18^\circ\text{C}$ $\gamma = 0,45$ | $E = 2600 \text{ kp/cm}^2$ $f = 1,9$ $T = 20^\circ\text{C}$ $\gamma = 0,45$ | $E = 2600 \text{ kp/cm}^2$ $f = 1,9$ $T = -3^\circ\text{C}$ $\gamma = 0,45$ | $E = 2600 \text{ kp/cm}^2$ $f = 1,9$ $T = -1^\circ\text{C}$ $\gamma = 0,45$ |

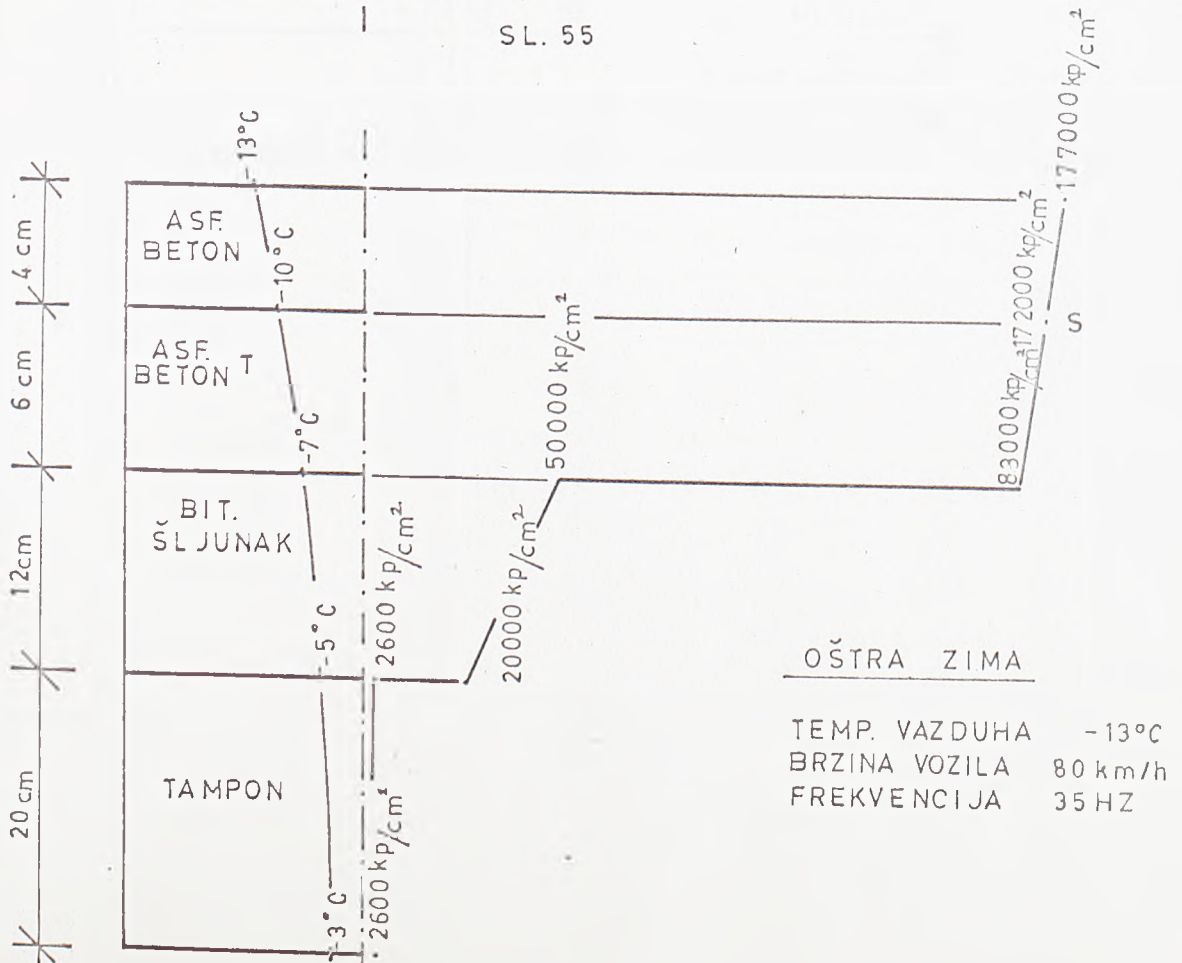
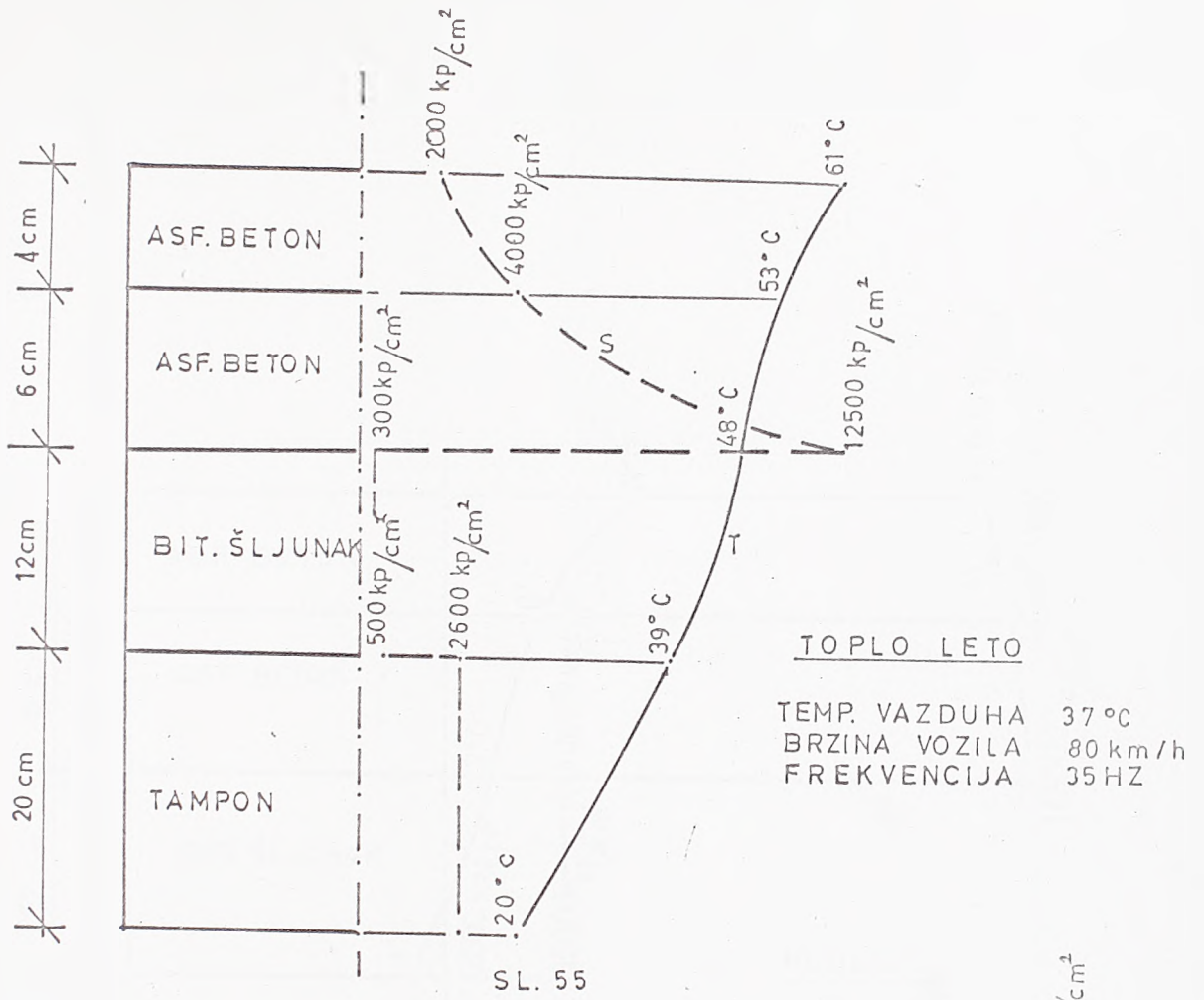
1 SLUČAJ 2 SLUČAJ 3 SLUČAJ 4 SLUČAJ 5 SLUČAJ

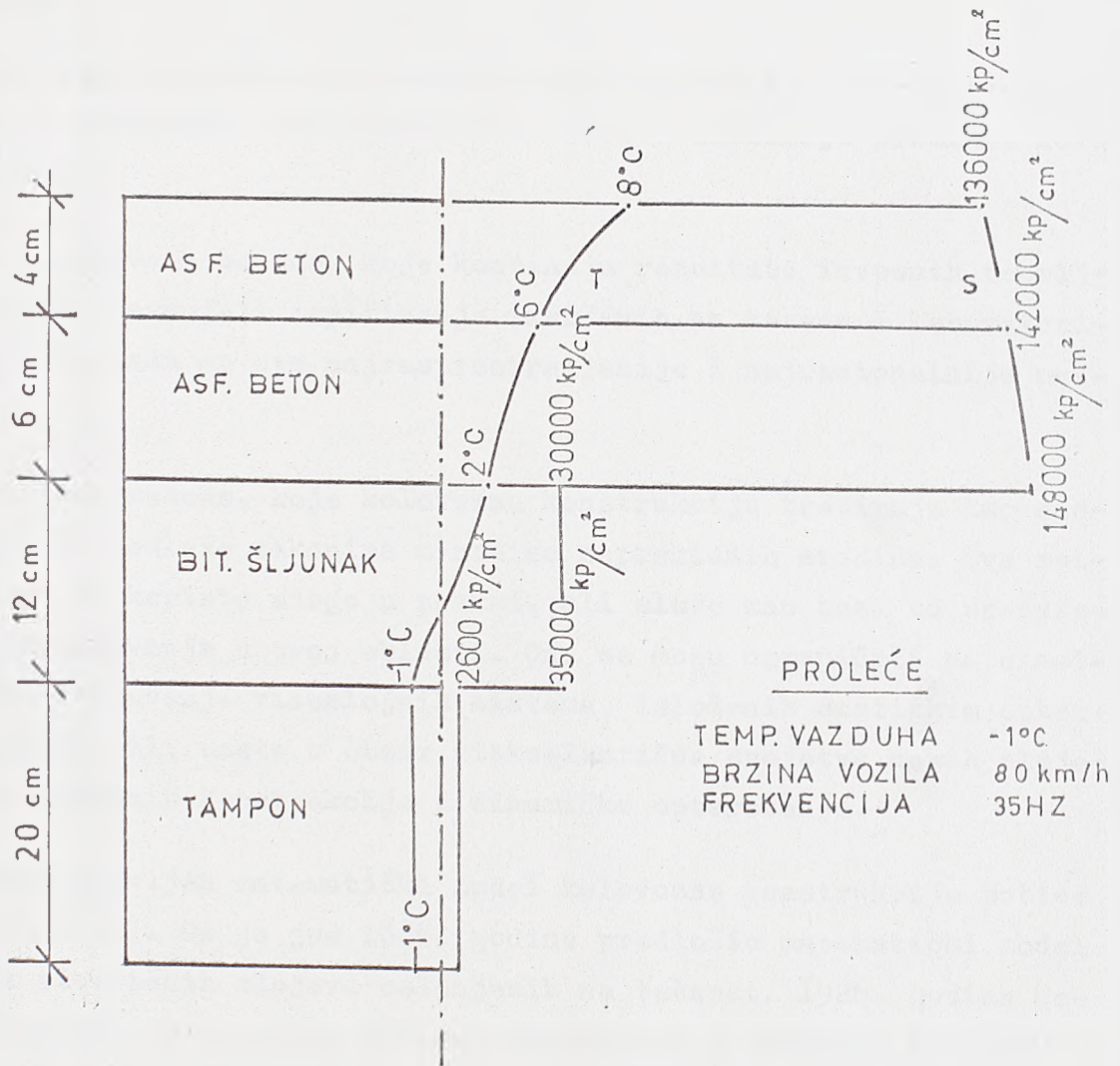
SL. 52 SERTIFIKAT POKAZA PROJEKTOVANE KONSTRUKCIJE



SL. 53







SL. 57

VI. PROJEKTOVANJE FLEKSIBILNIH KOLOVOZNIH KONSTRUKCIJA

Projektovanje fleksibilnih kolovoznih konstrukcija razvija se veoma dinamično i kontinualno. Metode za proračun mogle bi se podeliti u tri grupe:

- a) Iskustvene (empirijske) metode, koje se baziraju isključivo na ranije dobijenim rezultatima i na osnovu analogije predlažu nova rešenja.
- b) Poluiskustvene metode, koje kombinuju rezultate izvesnih teorijskih proučavanja i ispitivanja izvršenih na terenu i laboratorijama. Za sada su ovo najrasprostranjenije i najracionalnije metode.
- c) Teorijske metode, koje kolovoznu konstrukciju tretiraju kao sistem koji podleže zakonima mehanike neprekidnih sredina. Ove metode se ne koriste mnogo u praksi, ali služe kao baza za preduzeća istraživanja u ovoj oblasti. Ona se mogu ograničiti na elastično proučavanje višeslojnih sistema, izloženih statičkim opterećenjima, ili uzete u obzir viskoelastična svojstva nekih slojeva kolovoznih konstrukcija i dinamičko opterećenje.

Najranije razvijen matematički model kolovozne konstrukcije potiče od Hertz-a (1). On je još 1884. godine predložio matematički model analize elastičnih slojeva oslonjenih na tečnost. 1926. godine Westergaard (2) je uprostio matematički aparat i omogućio njegovu primenu u praktičnom projektovanju. Pickett-Ray (3) su 1951. uveli u upotrebu uticajne dijagrame i na taj način još više olakšali primenu Westergaard-ove metode. U međjuvremenu učinjen je veliki napredak u istraživačkom radu od strane Portland Cement Association - USA (PCA) na odredjivanju fundamentalnih osobina portlandcementnih betona. Mnogo dobrih betonskih kolovoza je sagrađeno i projektovano, a Westergaard-ova teorija i uticajni dijagrami postali sinonim za matematički model kolovoza za više decenija.

Prvo rešenje za opšti višeslojeni sistem je dao Burmister (4). U

svojim radovima on je formulisao problem za sistem od n elastičnih slojeva i razvio rešenje za dvoslojni i troslojni sistem. Pri tom je pretpostavio, da normalno opterećenje deluje preko kružne površine. Schiffman (7) je kasnije proširio, Burmister-ov rad za uslove asimetričnog opterećenja, uključujući napon smicanja na površini.

Kompleksan matematički aparat nije dopuštao širu primenu ove dobre teorije. Tek sa pojavom tablica Jones-a (6) i grafički predstavljene vrednosti u trodimenzionalnim dijagramima Peattie (8) dolazi do šire primene u praksi Burmister-ove teorije.

Huang (9), Moavenzadeh (10) i Ashton (10) su uveli visko-elastičan materijal u teorijsku analizu višeslojnog sistema. Moavenzadeh i Elliott (11) su proširili rešenje sa viskoelastičnim materijalom za slučaj pokretnog opterećenja.

Huang (12) je u svojim analizama krenuo od osnovnih jednačina razvijenih za sistem elastičnih slojeva, s tim što je elastične konstante E i ν izrazio preko modula klizanja G i modula stišljivosti (bulk moduls) K .

Na kraju treba naglasiti da su 1971. godine napravljena dva glavna kompjuterska programa od strane California Research Corporation i Shell-ove laboratorije u Amsterdamu za sračunavanje napona i deformacija u višeslojnim sistemima za probleme dimenzionisanja kolovoznih konstrukcija. Zadnju verziju Shell-ovog programa pod nazivom "BISAR" poseduje i Laboratorija za puteve Gradjevinskog fakulteta u Beogradu.

Dimenzionisanje fleksibilnih kolovoznih konstrukcija predstavlja sigurno najsloženiji problem u oblasti proračuna gradjevinskih konstrukcija, jer predstavlja sintezu više fundamentalnih naučnih disciplina.

Definisanje karakteristika materijala tj. osvetljavanje ponašanja modula krutosti asfalt betona u funkciji od vremena i temperature predstavlja samo jednu kariku u lancu problema koji sačinjavaju ob-

last dimenzionisanja fleksibilnih kolovoznih konstrukcija.

Dimenzionisanje fleksibilnih kolovoznih konstrukcija sadrži: 1) međusobni uticaj vozila i puta, 2) integraciju teorija i metoda koje se odnose na projektovanje krutih i fleksibilnih kolovoza i 3) uvođenje u razmatranje karakteristika materijala, ekonomičnosti i kvaliteta konstrukcija u eksploataciji.

Na kraju treba naglasiti da se podaci dobijeni u ovom radu, koji se odnose na modul krutosti asfalt betona, prilikom inženjerskog pristupa rešavanju problema, mogu uvrstiti u sve spomenute proračune umesto modula elastičnosti.

Jedna od najsavremenijih metoda za dimenzionisanje asfaltnih kolovoznih konstrukcija, koju je dao "Asphalt Instituts - USA", uzima u obzir modul krutosti asfalt betona u zavisnosti od temperature. Koristeći pomenutu metodu i podatke za modul krutosti iz ovog rada, već smo iskoristili za dimenzionisanje PSS, rulnih staza i stajalki na jednom vojnom aerodromu.

VII. Z A K L J U Č C I

Svakodneвно povećanje saobraćaja stvara potrebu za konstantnim poboljšanjem kvaliteta puteva. Asfaltni slojevi, čija je glavna osobina nepropustljivost i dobar kvalitet površine, dobijaju mnogo veći značaj kao nosilac opterećenja u kolovoznij konstrukciji.

Imajući u vidu ove činjenice pojavljuje se potreba za iznalaženjem korektnog postupka za dimenzioniranje fleksibilnih kolovoza. U cilju ostvarenja ove namere preduzimaju se u svetu opsežna dinamička ispitivanja asfaltnih kolovoza.

Donedavno, projektovanje kolovoza se zasnivalo samo na iskustvima, uglavnom sistematski sakupljenim u USA i drugim zemljama. Prvi rezultati dali su osnovu za CBR metodu, a kasnije zahvaljujući opitima WASHO i AASHO, dobijeno je niz metoda koje su prirodno bile ograničene za određene klimatske uslove, specifične podloge i lokalni saobraćaj.

Ekstrapolacija rezultata opita na druge tipove konstrukcija, različite klimatske uslove i drugi saobraćaj u principu je nemoguća. Zbog toga se moraju prikupiti podaci koji će važiti za lokalne uslove.

Skupa praktična ispitivanja su postala neophodna ako se želi odgovarajuća teorijska osnova i racionalna metoda projektovanja, koja će u krajnjem slučaju dati najekonomičnije rešenje dimenzija kolovoznih konstrukcija.

Činjenica je da asfalt beton nije ni elastičan ni viskozan već viskoelastičan, tj. njegova krutost je funkcija temperature i vremena trajanja opterećenja. Postoje tri prilaza proučavanju viskoelastičnih materijala: modeli, indirektna merenja i direktna merenja. Zadnji prilaz je primenjen u ovom radu i većina zaključaka proizilazi iz eksperimentalnog rada.

Na osnovu objavljenih dinamičkih ispitivanja gredica od asfalt betona mogu se izvesti sledeći zaključci:

1. Da temperatura, frekvencija i šupljine igraju značajnu ulogu prilikom određivanja vrednosti modula krutosti asfalt betona.
2. Da je temperatura jedan od najvažnijih činilaca koji određuje vrednost modula krutosti (u temperaturnom području od -20°C do 50°C modul krutosti se kreće od $200\ 000\ \text{kp/cm}^2$ do $1\ 500\ \text{kp/cm}^2$).
3. Da je zahvaljujući numeričkom definisanju ponašanja modula krutosti u zavisnosti od temperature moguće izvršiti, za konkretne slučajeve interpolaciju i ekstrapolaciju rezultata.

Konkretna primena dobijenih rezultata u ovom radu mogla bi se ostvariti na više načina:

- a) Prilikom dimenzioniranja asfaltnih kolovoza uzeti u obzir dinamički modul krutosti umesto modula elastičnosti. Kod savremenih metoda je moguće direktno korišćenje rezultata.
- b) Lomovi pri niskim temperaturama i otpornost na zamor asfaltnih kolovoznih konstrukcija u numeričkim postupcima direktno zavise od modula krutosti.
- c) Dinamički uticaj vozila odnosno vibracije kolovoza zahvaljujući rezultatima u ovom radu mogu se direktno posmatrati (ovo se naročito odnosi na opterećene saobraćajnice).
- d) Posledice loše zbijenosti asfaltnih slojeva mogu se analizirati iz dobijenih dijagrama, a samim tim preduzeti i odgovarajuće mere sanacije.

Podaci dobijeni ovim radom predstavljaju samo jednu kariku u lancu definisanja ponašanja kolovoznih konstrukcija. Ovo nije ni početak ni kraj u izučavanju ove oblasti. Najveći problem je u tome što je to kompleksna oblast koja zahteva saradnju kadrova raznorodnih oblasti. Drugi, ne mali, problem je složena elektronska oprema i velika materijalna sredstava koja traže velike serije ispitivanja.

Dalji put na ovom radu bi bio upoređivanje laboratorijskih i terenskih rezultata. Utvrđivanje pouzdanosti eksperimentalnih rezulta-

ta. Definisiranje pored modula krutosti i drugih reoloških parametara. I na kraju, traženje numeričkog postupka za rešavanje problema vezanih za dimenzioniranje fleksibilnih kolovoza.

VIII. L I T E R A T U R A

1. H.Hertz, Uber das Gleichgewicht Schwimmender Elastischer Platten, Ann. Physik Shem., vol. 22, 1884
2. H.M.S. Westergaard, Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis, Proc. HRB, part 1, 1925; takodje Štampano u Public Roads, vol. 7, No. 2, April 1926.
3. G.Pickett and G.K. Ray, Influence Charts for Concrete Pavements, Trans. ASCE, vol 116, 1951.
4. D.M.Burmister, The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil System, I, II, III, J.Appl. Phys., vol. 16, No. 2, No. 3, No. 5, 1945.
5. J.Boussinesq, "Application des Potentials", Paris, 1885.
6. A.Jones, Tables of Stresses in Three-layer Elastic Systems, HRB Bull., 342, 1962.
7. R.L.Schiffman, General Analysis of Stresses and Displacements in Layered Elastic Systems, Proc.Int.Conf.Struct.Design Asphalt Pavements, Ann Arbor, Mich., 1962.
8. K.R.Peattie, Stresses and Strain Factors for Three-layer Elastic Systems, HRB Bull. 342, 1962.
9. Y.H.Huang, Stresses and Displacements in Viscoelastic Layered System under, Circular Loaded Areas, Proc.Int.Conf. Struct. Design Asphalt Pavements, 2nd, Ann Arbor, Mich., 1967.
10. F.Moavenzadeh and J.E.Ashton, "Analysis of Stresses and Displacements in a Three-layer Viscoelastic System", Massachusetts Institute of Technology School of Engineering Research Report R67-31.
11. F.Moavenzadeh and J.F.Elliott, "Moving Load on a Viscoelastic Layered System", U.S.A D.T.F.H.A, Bureau of Public Roads (Contract FH-11-6619).
12. V.H.Huang, Stresses and Displacements in Viscoelastic Layered Systems under Circular Loaded Areas, Proc.Int.Conf. Struct. Design Asphalt Pavements, 2nd, Ann Arbor, Mich., 1967.

13. V.T.Thomson, Vibration Theory and Applications, Prentice-Hall, Inc, 1965.
14. V.Brčić, Dinamika konstrukcija, Beograd, 1964.
15. V.Harti, Dinamika konstrukcija, Beograd, 1973.
16. D.Hartog, Vibracije u mašinstvu, Beograd, 1972.
17. Timošenko Jang, Teorija konstrukcija, Beograd, 1968.
18. Timošenko Jang, Teorija oscilacija, Beograd, 1966.
19. A.R.Ržanicin, Teorija puženja materijala, Beograd, 1974.
20. Ž.Žefroa, Projektovanje i gradjenje kolovoznih konstrukcija
21. T.R.B.Pavement Temperatures-An Annotated Bibliography, T.R.B., 55/1974.
22. G.Van der Poel, "Time and Temperature Effects on the Deformation of Asphaltic Bitumens and Bitumen-Mineral Mixtures", S.P.E. Journal 11-1955.
23. G.Van der Poel, "A General System Describing the Visco-Elastic Properties of Bitumens and Its Relation to Routine Test Data", J.Appl.Chem. 4-1954.
24. Monismith i Seed, "Moderator's-Summary Report of Papers Presented for Discussion at Session V", Conference, Ann Arbor, Michigan, 1962.
25. Fred Finn, "Factors Involved in the Design of Asphaltic Pavement Surfaces", HRB 39/1967.
26. C.A.Pagen i B.Ki, "Effect of Asphalt Viscosity on Rheological Properties of Bituminous Concrete", HRR 104/1965.
27. Heukelom i Klomp, "Road Design and Dynamic Loading", Proceedings of the AAPT, 33/1964.
28. Fin, Hicks, Kari i Coyne, "Design of Emulsified Asphalt Treated Bases", HRR 239/1968.
29. Goetz, "Sonic Testing of Bituminous Mixes", Proceedings AAPT, 24/1955.
30. Jimenez i Gallaway, "Behavior of Asphaltic Concrete Diaphragms to Repetitive Loadings", Conference, Ann Arbor, Michigan, 1962.
31. Bazin i Saunier, "Deformability, Fatigue and Healing Properties of Asphalt Mixes", Conference, Ann Arbor, Michigan, 1967.

32. McLeod, "The Asphalt Institute's Layer Equivalency Program", The Asphalt Institute, Maryland, 15/1967.
33. Acum i Fox, "Computation of L Stresses in a Three-Layer Systems", Geotechnique 293/51.
34. Jones, "Tables of Stresses in Thre-Layer Elastic Systems", HRB, Washington, 342/62.
35. Peattie, "Stress and Strain Factors for Three-Layer Systems", HRB, Washington, 342/62.
36. Chell Bitumen Review 43/73.
37. Chahin and McCullough, "Stiffness History of Asphalt Concrete Surfaces in Roads", HRR, Washington 466/73.
38. Pell and McCarthy, "Amplitude Effect of Stiffnesa of Bituminous Mixes Under Dynamic Conditions", Rheologia Acta, Vol. 2, No. 2, 1962.
39. Dratt and Sommer, "Ein Gerat zur Bestimmung der Dynamischen Elastizitattsmoduln von Asphalt. Strasse und Autobahn, 35/1966.
40. Danilo Mirkov, "Diplomski rad - Programski sistem za fitovanje eksperimentalnih podataka"
41. B.F.Kallas, "Asphalt Pavement Temperatures".
42. H.F.Southgate, "Temperature Distributions in Asphalt Concrete Pavements, TRB 549/1975.
43. The Structural Design of Flexible Pavements No 298F/68, CHELL Company.
44. Heukelom i Foster, "Dynamic Testing of Pavements" Journal ASCE 2/1960.
45. Yang, "Design of Functional Pavements".
46. Structural Design of Asphalt Concrete to Prevent Fatigue Craking. HRB 140/73.
47. Flexible Pavement Design and Management. HRB 139/73.
48. Deacon, "Materials Characterization-Experimental Behavior", HRB 126/71.
49. Shook i Kallos, "Factor Influencing Dynamic Modulus of Asphalt Concrete", Proc. ASCE.
50. Sall and Labout, "Rheological Properties of Asphalts".

51. Quinn i Wyk, "A Method for Instructing Dynamic Vehicle Loads into Design of Highways", HRB 40/1961.
52. Whittemore, "Measurement and Prediction of Dynamic Pavement Loading by Heavy Highway Vehicles.
53. Bissada, "Asphalt Pavement Temperatures Related to Kuwait Climate", HRR 404/72.



