

# Ispitivanja polimerom modificiranog betona nerazornim metodama

---

**Banjad Pečur, Ivana; Štirmer, Nina; Galić, Jure**

*Source / Izvornik:* **Građevinar, 2009, 61, 655 - 662**

**Journal article, Published version**

**Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:016102>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-01**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)



# Ispitivanja polimerom modificiranog betona nerazornim metodama

Ivana Banjad Pečur, Nina Štirmer, Jure Galić

## Ključne riječi

polimerom modificirani beton, laboratorijsko ispitivanje, nerazorne metode ispitivanja, indeks sklerometar, ultrazvučni impuls

## Key words

polymer modified concrete, laboratory testing, non-destructive test methods, sclerometer index, ultrasound impulse

## Mots clés

béton modifié par polymères, essai de laboratoire, méthode d'essai non-destructive, indice de scléromètre, impulsion ultrasonique

## Ключевые слова

бетон модифицированный полимером, лабораторное испытание, методы неразрушающего контроля, индекс склерометра, ультразвуковой импульс

## Schlüsselworte

polymermodifizierter Beton, Laboruntersuchung, zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden. Sklerometerindex, Ultraschallimpuls

I. Banjad Pečur, N. Štirmer, J. Galić

Prethodno priopćenje

## Ispitivanja polimerom modificiranog betona nerazornim metodama

Polimerom modificirani betoni često se rabe za sanaciju postojećih ab konstrukcija. U radu su prikazani rezultati laboratorijskog ispitivanja provedenog na 20 različitih sastava betonskih mješavina. Varirani su vodocementni omjeri, veličina zrna agregata i udio polimera u betonu. Utvrđena je ovisnost između mehaničkih svojstava betona ispitanih razornim ispitivanjem i nerazornim metodama i to određivanjem indeksa sklerometra i mjerenjem brzine prolaska ultrazvučnog impulsa.

I. Banjad Pečur, N. Štirmer, J. Galić

Preliminary note

## Testing polymer modified concrete by non-destructive methods

The polymer modified concrete is often used for the remedy of existing reinforced-concrete structures. Results of laboratory testing conducted on 20 different concrete mix compositions are presented in the paper. The water-cement ratio, aggregate grain size, and polymer content in concrete, were all varied in the course of the testing. The dependence between mechanical properties of concrete tested by destructive testing and that tested by non-destructive methods was determined, and this by defining the sclerometer index and by measuring velocity of ultrasound impulse.

I. Banjad Pečur, N. Štirmer, J. Galić

Note préliminaire

## Essai de béton modifié par polymères à l'aide des méthodes non-destructives

Le béton modifié par polymères est souvent utilisé dans la réparation des structures en béton armé existantes. Les résultats des essais de laboratoire conduits sur 20 compositions de béton différentes sont présentés dans l'ouvrage. Le rapport eau/ciment, la grandeur d'agrégats, et le taux de polymères dans le béton, ont été variés au cours de l'essai. La dépendance entre les propriétés mécaniques du béton analysé par essai destructif et du béton analysé par méthodes non-destructives a été déterminée, et cela en définissant l'indice de scléromètre et en mesurant la vélocité des impulsions ultrasoniques.

И. Баньяд Печур, Н. Штирмер, Й. Галич

Предварительное сообщение

## Испытания бетона модифицированного полимером неразрушающими методами

Модифицированные полимером бетоны часто используются для санации существующих железобетонных конструкций. В работе приведены результаты лабораторных испытаний, проведенных на бетонных смесях 20 различных составов. Варьированы водоцементные пропорции, величина зерен агрегата и доля полимера в бетоне. Установлена зависимость между механическими свойствами бетонов, испытанными разрушающими и неразрушающими методами, включая, путем определения индекса склерометра и измерением скорости прохождения ультразвукового импульса.

I. Banjad Pečur, N. Štirmer, J. Galić

Vorherige Mitteilung

## Untersuchung des polymermodifizierten Betons mit zerstörungsfreien Methoden

Polymermodifizierte Betone werden oft für die Sanierung bestehender Konstruktionen angewendet. Im Artikel zeigt man die Ergebnisse der Laboruntersuchung die an 20 verschiedenen Zusammensetzungen von Betongemischen durchgeführt wurde. Variiert waren Wasser-Zement-Verhältnisse, Größe der Zuschlagkörner und der Anteil des Polymers im Beton. Festgestellt wurde die Abhängigkeit zwischen den mechanischen Eigenschaften des Betons untersucht durch zerstörende und zerstörungsfreie Verfahren, und zwar mit Bestimmung des Sklerometerindex und durch Messung der Durchlaufgeschwindigkeit des Ultraschallimpulses.

Autori: Prof. dr. sc. **Ivana Banjad Pečur**; doc. dr. sc.; **Nina Štirmer**, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za materijale, Kačićeva 26, Zagreb; mr. sc. **Jure Galić**, Vibrobeton d.d., Zagreb

## 1 Uvod

Posljednjih godina povećana je primjena nerazornih metoda za dijagnostiku i defektoskopiju stanja konstrukcija. Prednost je nerazornih metoda u njihovoj jednostavnosti i činjenici da ne oštećuju konstrukciju ili uzrokuju samo manja površinska oštećenja. Interpretacija rezultata, međutim, jest jedan od najzahtjevnijih zadataka u modernome graditeljstvu. Prednost primjene kombiniranih nerazornih metoda vidljiva je kada varijacija određenog svojstva betona izravno utječe na rezultate ispitivanja nerazornom metodom, ali ne u istoj mjeri. To je vidljivo na primjeru povećanja vlažnosti betona pri čemu se ispitivanjem dobiva manja vrijednost indeksa sklerometra (odskoka), ali koja isto tako povećava brzinu prolaska ultrazvučnih valova i na taj način smanjuje ili povećava preračunanu ili izvedenu čvrstoću betona ako se rabi samo jedna metoda [1,2].

Poznati su odnosi između veličina izmjerenih nerazornim metodama i, na primjer, čvrstoće za obične betone, ali uočeno je da ti odnosi ne vrijede za betone u koje se dodaje polimer. Kako polimerom izmijenjeni betoni imaju sve veću primjenu u praksi, potrebno je razviti pouzdane modele koji omogućuju efikasno određivanje traženih svojstava.

Dodavanjem polimera u svježi beton postiže se bolja obradljivost svježeg betona, a kod očvrstulog se betona poboljšava prionljivost (adhezija) na podlogu, povećana je nepropusnost za fluide, povećani su otpor ulasku agresivnih tvari i otpornost na cikluse zamrzavanja i odmrzavanja i soli za odleđivanje te istezljivost i otpornost na udar [3, 4]. Isto je tako smanjen modul elastičnosti i povećan koeficijent puzanja. Stoga bi se moglo zaključiti da dodavanje polimera mijenja izlazne vrijednosti rezultata ispitivanja betona modificiranog polimerom nerazornim metodama, jer postoji određen utjecaj na modul elastičnosti betona, a time i na same rezultate ispitivanja.

## 2 Polimerom modificirani betoni (PMB)

Obični beton omogućava prolaz vlage, kisika i klorida do armature zbog čega dolazi do korozije. Do propusnosti betona dolazi zbog mikropukotina i mikropora koje nastaju tijekom hidratacije cementa. Osnovni je razlog za primjenu polimerom modificiranih betona u građevinarstvu poboljšanje adhezije i vodonepropusnosti, a istodobno se poboljšava zaštita armature od korozije [3-5]. Ovi se betoni vrlo često primjenjuju i pri sanacijskim radovima za popravljivanje oštećenih dijelova betona, za izravnavanje podova i za poboljšanje veze između starog i novog betona. Dodavanjem polimerne disperzije svježem se betonu poboljšava obradljivost (kohezija, kut močenja na podlogu, zagladivost), a u očvrstulom stanju prionljivost (adhezija) na podlogu,

povećava se nepropusnost za fluide, istezljivost, smanjuje se modul elastičnosti, a povećava koeficijent puzanja, povećava se otpornost na udar, otpor prolasku agresivnih tvari i otpornost na djelovanje zamrzavanja i odmrzavanja i soli za odleđivanje [3-5].

Najčešće se za izradu takvih betona kao polimerna disperzija upotrebljava lateks. Lateksi se proizvode polimerizacijom monomera, pri čemu se izdvaja voda [3]. Na taj način nastaje disperzija polimernih čestica u vodi. Prosječna veličina čestica varira od 0,05 do 2  $\mu\text{m}$ . Dodatnom obradom mogu se proizvesti u praškastom obliku, ali to znatno poskupljuje proizvod. Kao modifikatori svojstava uporabljaju se:

- stiren-butadijenski kopolimeri
- akrilno-esterni homopolimeri i kopolimeri
- vinil-acetatni kopolimeri
- vinil-acetatni homopolimeri.

Izmjenom svojstava betona lateksom poboljšavaju se njegova svojstva na dva načina. Matrica lateksa smanjuje stupanj kretanja vlage blokiranjem "putova", a nakon formiranja mikropukotina u cementnom kamenu, polimerni film premošćuje te pukotine i sprečava njihovo širenje. Time se povećavaju vlačna čvrstoća i žilavost betona. Radi sprečavanja kretanja vlage, ograničeno je prodiranje fluida iz okoline u očvrstuli beton, pa se povećava kemijska otpornost i otpornost na djelovanje ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja [3-11].

Uporaba stiren-butadijenskog lateksa (SB lateks) u polimerom modificiranom betonu rezultira smanjenjem potrebe za vodom u betonu za postizanje potrebne konzistencije. Povećava se tečenje betona i obradljivost mješavine bez dodatne vode. Prema tome, odabir količine lateksa utjecat će na svojstva očvrstulog betona na dva načina:

1. količinom upotrijebljenog lateksa
2. smanjenjem količine vode za istu konzistenciju.

Struktura je PMB-a takva da su mikropore i šupljine koje se javljaju u portlandsko-cementnom sustavu djelomično ispunjene polimernim filmom koji se formira tijekom njege. Zbog toga je smanjena propusnost betona i apsorcija vode (slika 1.).

Zbog mogućnosti smanjenja prodora vode koja sadrži kloridne ione, stiren-butadijenski lateks ima najveću primjenu kod mostova, parkirališta i garaža kod kojih može doći do korozije armature i oštećenja betona. Ova se vrsta lateksa uglavnom rabi kada se zahtijeva dobra adhezija te vodonepropusnost. Osim poboljšavanja kemijske otpornosti i adhezije, stiren-butadijenski lateks služi kao sredstvo za smanjenje količine vode u sastavu



indeksom modificirani beton



obični beton

Slika 1. Mikroskopska slika lateksom modificiranog i običnog betona [6]

betonske mješavine, a ta karakteristika pridonosi poboljšanim svojstvima betona, uz potrebnu obradljivost radi mogućnosti ugrađivanja.

### 3 Teorijski modeli za procjenu svojstava očvrsnulog betona

Beton kao kompozitni materijal ima izrazito heterogena svojstva. Varijacije u čvrstoći, modulu elastičnosti i u svim ostalim svojstvima potrebno je promatrati preko udjela pojedinih komponenata betona u ukupnom volumenu. Procjena modula elastičnosti betona moguća je pomoću dvofaznih modela koji se sastoje od cementnog kamena i agregata odnosno mortne matrice i zrna krupnog agregata. Pri tome je potrebno poznavati njihove module elastičnosti te udio agregata u volumenu betona. Razlikujemo nekoliko osnovnih modela koji beton prikazuju kao dvofazni kompozit sastavljen od agregata i cementne paste ili krupnog agregata i morta [12]. Primjerice, to su Voigtov i Reussov model koji pretpostavlja-

ju jednoliku deformaciju odnosno jednoliku naprezanje dviju faza u betonu, te ih promatraju u paralelnoj odnosno serijskoj konfiguraciji [12]. Hirschov model elastičnog ponašanja kompozitnih materijala uvodi empirijsku konstantu  $x$  koja označava relativni udio paralelnog odnosno serijskog modela, a upotrebljava se za istraživanje veze između cementne paste i agregata [12]. Hanse- nov se model sastoji od sferičnog agregata smještenog u centar sferične matrice, a sličan je i Countov model kod kojega je prizma agregata smještena u centar prizme matrice [12]. Niti jedan od navedenih modela ne uzima u obzir utjecaj šupljina i pukotina u betonu, promjenu stanja faza (npr. zbog zamrzavanja vode u betonu), specifične geometrijske značajke faza, međusobno djelovanje pora i agregata pod različitim uvjetima opterećenja i utjecaj oblika zrna agregata koji je jako važan u slučaju različitih modula elastičnosti. Iz tog su razloga pojedini autori (Nielsen, Monteiro) predložili model s tri faze, odnosno uveli su u model i prijelaznu zonu u betonu - zonu sučeljka [12]. Hashin i Monteiro razvili su matematički model koji se temelji na pretpostavci da je beton kompozit koji se sastoji od matrice u koju su ugrađeni sferični dijelovi, svaki okružen s koncentričnom sferičnom ljuskom – tzv. interfazom [12]. Pojedini sofisticirani modeli (npr. Mori – Tanaka) uzimaju u obzir i utjecaj pora i pukotina u betonu [12]. Prema tome, svojstva betona u očvrnulom stanju ovise o više različitih parametara, ne samo o udjelu komponenata u sastavu betona, već i o uvjetima ugradnje, njege te izloženosti betonskog elementa utjecajima iz okoline. Procjena svojstava očvrnulog betona te njihovo ispitivanje nerazornim metodama u konstrukciji osobito je otežano ako se radi o posebnim vrstama betona, kao što su, primjerice, polimerom modificirani betoni.

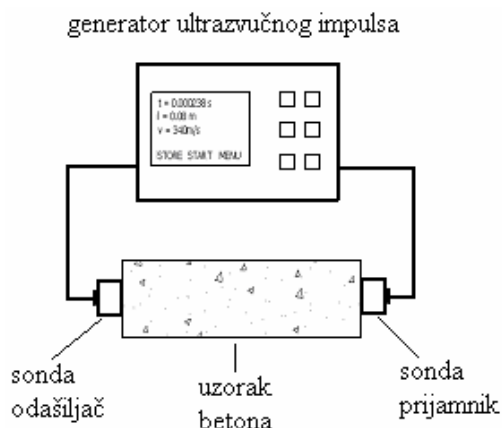
### 4 Nerazorne metode ispitivanja

Nerazorne se metode ispitivanja uglavnom rabe za kontrolu kvalitete proizvodnje betona ili kontrolu kvalitete betona na građevini, a vrlo često i za ocjenu stanja postojećih konstrukcija te ocjenu uspješnosti izvedenih sanacijskih radova. Općenito, primjenom nerazornih metoda nije moguće izravno dobiti podatke o čvrstoći materijala, već je za pravilnu procjenu čvrstoće potrebno poznavati vezu između rezultata ispitivanja nerazornim metodama i tlačne čvrstoće određene razornim ispitivanjem (baždarenje). Iako su razvijene mnogobrojne nerazorne metode za ispitivanje betona, najčešće se rabe ispitivanja sklerometrom i ultrazvukom, osobito ako je potrebno optimizirati sredstva i raspoloživu tehnologiju ispitivanja. Kombiniranjem spomenutih metoda smanjuje se pogreška koja se pojavljuje pri procjeni čvrstoće betona samo jednom metodom koja nikako nije dovoljna za određivanje traženog parametra. S obzirom da se u

današnje vrijeme za popravak armiranobetonskih konstrukcija često primjenjuju polimerom modificirani betoni, pojavila se potreba za izradom baždarnih krivulja pri ispitivanju sklerometrom ili ultrazvukom kod takvih posebnih vrsta betona. Tlačna čvrstoća betona izračunata prema regresijskim modelima raznih autora za izmjereni indeks sklerometra i brzinu prolaska ultrazvučnog impulsa najbolje pokazuje koliki je utjecaj dodavanja polimera na izlazne rezultate [1,2].

#### 4.1 Određivanje dinamičkog modula elastičnosti ultrazvučnom metodom

Dinamički modul elastičnosti može se izmjeriti ultrazvučnom metodom prema HRN EN 12504-2. Metoda se temelji na mjerenju vremena prolaska longitudinalnih ultrazvučnih valova kroz uzorak betona (izravnim postupkom) od sonde odašiljača do sonde prijavnika (slika 2.). Vremenski interval od trenutka kada impuls napušta prvu sondu pa do trenutka prijama impulsa u drugu sondu jest vrijeme prolaska impulsa ( $t$ ) kroz uzorak betona duljine ( $l$ ).



Slika 2. Princip mjerenja ultrazvukom

Brzina ultrazvuka dana je izrazom:

$$v = \frac{l}{t} \text{ (m/s)}$$

Poznavajući brzinu ultrazvuka  $v$  (m/s) izmjerenu izravnim prolazom kroz beton, gustoću betona  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) i Poissonov omjer  $\nu$  za beton, dinamički modul elastičnosti može se proračunati iz izraza:

$$E_{bd} = \frac{v^2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \text{ (Pa)}$$

#### 4.2 Ispitivanje tlačne čvrstoće betona sklerometrom

Nerazorna metoda ispitivanja sklerometrom (slika 3.) vrlo se često primjenjuje za određivanje tlačne čvrstoće betona u konstrukcijama. Princip mjerenja sklerometrom

sastoji se u tome da uteg sklerometra mase  $m$  određenom brzinom  $v$  udara površinu betona s kinetičkom energijom  $E_{kin} = mv^2/2$ . Pri udaru u materijal nastaje plastična deformacija te pri tome uteg sklerometra predaje dio energije. Što je plastična deformacija veća, gubitak energije je veći. Taj se gubitak očituje kao pretvorba kinetičke energije u toplinsku. S pomoću vrijednosti odskoka mase, moguće je odrediti brzinu nakon sudara. Udaljenost koju prevali masa izražena kao postotak početnog produljenja opruge u sklerometru naziva se indeksom sklerometra.

Ovisnost čvrstoće betona i indeksa sklerometra nije linearna, ali je empirijski moguće odrediti korelaciju tih parametara. Za obične betone poznata je korelacija indeksa sklerometra i tlačne čvrstoće betona koja je prikazana baždarnim krivuljama za svaki tip sklerometra.



Slika 3. Sklerometar

## 5 Eksperimentalni dio

U svrhu utvrđivanja utjecaja svojstava polimerom modificiranih betona na rezultate ispitivanja čvrstoće nerazornim metodama, izrađene su betonske mješavine koje obuhvaćaju široki raspon čvrstoća i time omogućavaju kalibriranje rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće dobivenih sklerometrom i ultrazvukom. Varirana je i količina polimera, te su osigurane pretpostavke za razvoj modela na čitavom nizu podataka o betonskim mješavinama. Osim na svojstva očvrstnulo, stiren-butadijenski lateks djeluje i na svojstva svježeg betona (poboljšana ugradljivost), čime su stvorene pretpostavke za razumijevanje mogućih varijacija u čvrstoći [13].

### 5.1 Sastavi betonskih mješavina

Varirani su sljedeći parametri sastava betona (tablica 1.):

- cement: 320 kg/m<sup>3</sup> i 400 kg/m<sup>3</sup>
- udio polimera (lateks SB-50 sa 50 % suhe tvari): 0, 5 i 10 % na masu cementa
- $v/c$  omjer: 0,35; 0,45; 0,55; 0,65
- maksimalno zrno agregata: 8 mm i 16 mm.

Tablica 1. Pregled odabranih sastava betonskih mješavina

v/c	c = 320 kg/m <sup>3</sup> bet.			c = 400 kg/m <sup>3</sup> bet.		
	udio polimera (%)			udio polimera (%)		
0,35	-	5	10	0	5	10
0,45	0	5	10	-	5	10
0,55	-	5*	10	0*	5*	10
0,65	0*	5*	10	-	5*	10

\*mješavine su prosijane na situ 8 mm i od njih su izrađeni uzorci oblika kocke brida 15 cm (zbog vremena potrebnog za prosijavanje, u mješavine se dodaje usporivač vezivanja 0,25 % m.)

U tablici 2. prikazani su fizikalni parametri i udjeli pojedinih frakcija agregata u betonskim mješavinama.

Tablica 2. Volumenska gustoća, apsorpcija i udio pojedine frakcije agregata

	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	A (%m)	udio (%)
0-4 mm	2,69	1,30	48
4-8 mm	2,68	1,80	17
8-16 mm	2,69	1,40	

Za izradu betona upotrijebljen je cement CEM II/B-M(S-V) 42,5 N iz tvornice Holcim Koromačno.

- o gustoća cementa 3,06 g/cm<sup>3</sup>
- o normirana konzistencija 26,8 % (HRN EN 196-3)
- o vrijeme vezivanja: početak 173 minute (HRN EN 196-3) kraj 235 minuta
- o tlačna čvrstoća: 3 dana – 27,5 N/mm<sup>2</sup> (HRN EN 196-1) 28 dana – 51,3 N/mm<sup>2</sup>
- o čvrstoća na savijanje: 3 dana – 5,3 N/mm<sup>2</sup> (HRN EN 196-1) 28 dana – 8,2 N/mm<sup>2</sup>

### 5.2 Analiza rezultata ispitivanja

Rezultati ispitanih svojstava očvrstnalog betona prikazani su na slici 6. i u tablicama 3. i 4. Ispitivana su slje-

Tablica 3. Rezultati ispitivanja statičkog i dinamičkog modula elastičnosti betona ( $D_{max}=16$  mm)

v/c	Udio polimera (%)	$m_{cem}=320$ kg/m <sup>3</sup>	$E_{st}$ (GPa)	$E_{din}$ (GPa)	$m_{cem}=400$ kg/m <sup>3</sup>	$E_{st}$ (GPa)	$E_{din}$ (GPa)
0,35	0		-	-		28,1	49,3
0,45	0	27,5	43,5	-	-		
0,55	0	-	-	28,4	45,3		
0,65	0	27,6	45,1	-	-		
0,35	5	30,4	44,5	28,2	46		
0,45	5	31,0	39,5	25,8	39,8		
0,55	5	29,5	36,9	26,4	39,1		
0,65	5	28,5	35,6	25,6	37,2		
0,35	10	28,9	39,6	27,2	40,3		
0,45	10	28,1	35,45	25,2	37,5		
0,55	10	26,8	33,8	24,1	34,4		
0,65	10	25,9	31,0	23,9	34,0		



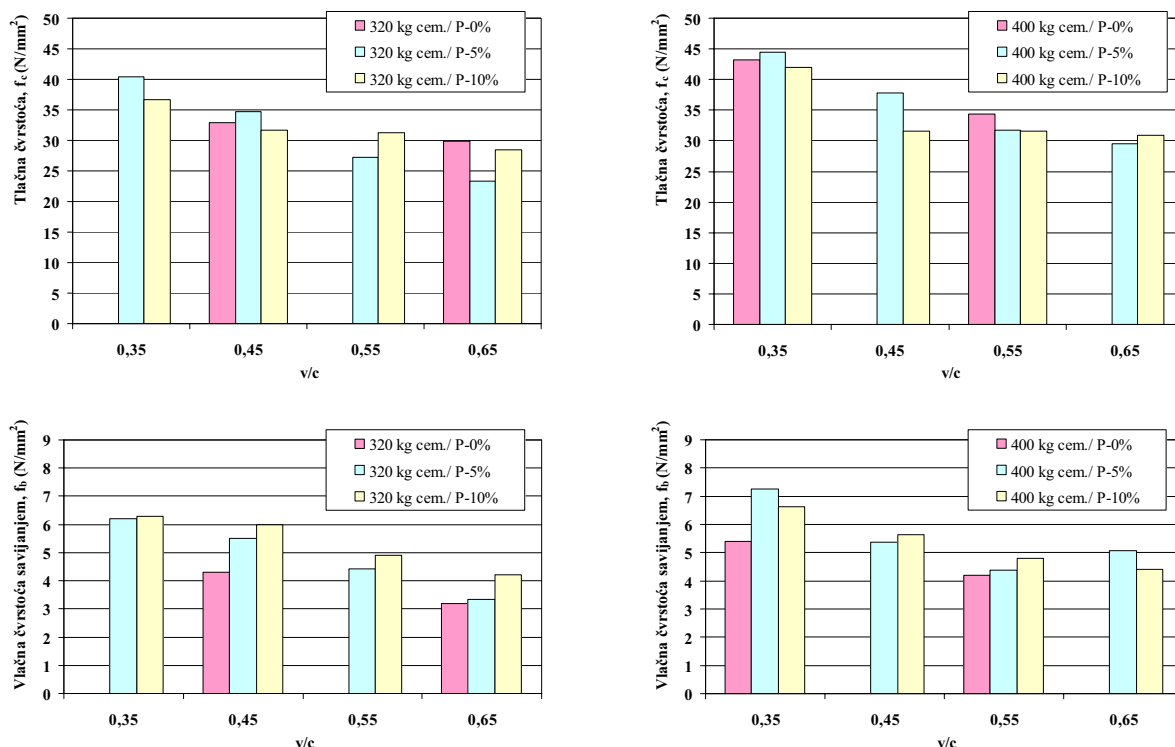
Slika 4. Određivanje statičkog modula elastičnosti

deća svojstva očvrstnalog betona: tlačna čvrstoća ( $f_c$ ), vlačna čvrstoća savijanjem ( $f_b$ ), statički modul elastičnosti ( $E_{st}$ ) (slika 4.), dok je dinamički modul elastičnosti ( $E_{din}$ ) proračunat iz rezultata mjerenja prolaska ultrazvučnog impulsa kroz beton (slika 5.). Također je mjereno i indeks sklerometra na uzorcima na kojima je ispitivana tlačna čvrstoća. Režim njege uzoraka u potpunosti je identičan za sve mješavine.



Slika 5. Određivanje dinamičkog modula elastičnosti

Iz rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće uočeno je da mješavine betona s maksimalnim zrnom agregata veličine 8

Slika 6. Rezultati ispitivanja tlačne i savojne čvrstoće betona ( $D_{max}=16$  mm)

mm (tablica 4.) imaju vrijednosti tlačne čvrstoće povećane do približno 10 % u usporedbi s mješavinama istog sastava, ali s maksimalnim zrnom 16 mm (slika 6.). To se objašnjava činjenicom da je kod manjeg promjera zrna omogućeno bolje "pakiranje" strukture, a isto tako je manja vjerojatnost pojave defektnih zrna. Vidljivo je da se povećanjem količine polimera povećava i čvrstoća betona na savijanje.

Modul elastičnosti betona općenito se smanjuje s povećanjem količine polimera. Usporedbom rezultata ispitivanja modula elastičnosti mortne matrice (prosijani beton) uočavaju se manje vrijednosti od modula elastičnosti betona istog sastava, što se može objasniti utjecajem

Tablica 4. Rezultati ispitivanja mehaničkih karakteristika mortne matrice (prosijani beton)

Udio cementa ( $kg/m^3$ )	v/c	Udio polimera (%)	$f_c$ ( $N/mm^2$ )	$f_t$ ( $N/mm^2$ )	$E_{st}$ (GPa)	$E_{din}$ (GPa)
320	0,55	5	29,13	3,0	26,37	35,14
	0,65	5	26,61	3,2	20,40	31,84
	0,65	0	33,39	3,8	26,19	38,09
400	0,55	5	31,21	5,2	25,16	37,20
	0,65	5	34,36	4,8	23,25	35,42
	0,55	0	40,77	3,3	27,06	39,94

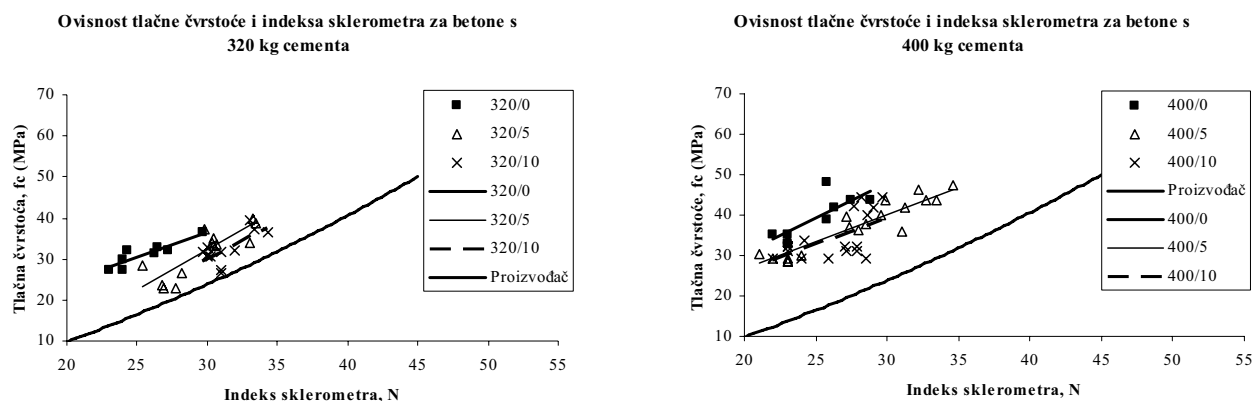
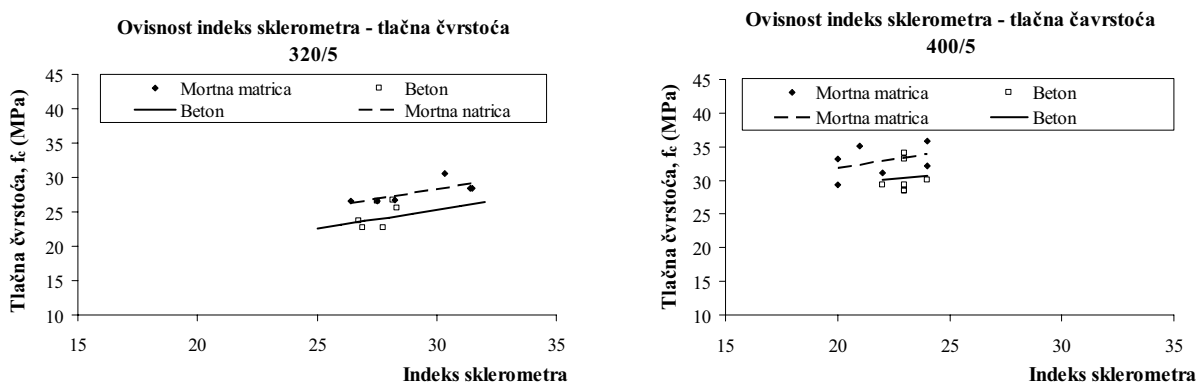
agregata. Naime, kako agregat ima veći modul elastičnosti od cementne paste, očito je da manji udio zrna agregata rezultira i manjim modulom elastičnosti.

Uz jednaki v/c omjer, dinamički modul elastičnosti smanjuje se s povećanjem količine polimera. Vrijednost dinamičkog modula elastičnosti kod betona izrađenih s 400 kg cementa veća je nego kod betona s 320 kg cementa. Smanjenjem maksimalnog zrna agregata, za isti sastav betona smanjuje se dinamički modul elastičnosti.

Vežano za rezultate prikazane u dijagramima na slici 6. i u tablicama 3. i 4., vidi se da je dinamički modul elastičnosti manji kod uzoraka mortne matrice iako im je

tlačna čvrstoća veća nego kod betonskih uzoraka. Ukupni se volumenski udio agregata kod uzoraka mortne matrice smanjuje, što rezultira manjom brzinom ultrazvučnog impulsa, odnosno manjim dinamičkim modulom elastičnosti. Manje zrno agregata omogućuje kvalitetnije pakiranje zrna, što povećava tlačnu čvrstoću.

Na slici 7. prikazani su rezultati ispitivanja sklerometrom na betonima izrađenim s 320  $kg/m^3$

Slika 7. Rezultati ispitivanja indeksa sklerometra za betone s 320 kg/m<sup>3</sup> cementa (lijevo) i 400 kg/m<sup>3</sup> cementa i (desno)Slika 8. Ovisnost tlačne čvrstoće i indeksa sklerometra betona i mortne matrice za betone s 320 kg/m<sup>3</sup> cementa i 5 % polimera (lijevo) i za betone s 400 kg/m<sup>3</sup> cementa i 5 % polimera (desno)

i 400 kg/m<sup>3</sup> cementa. Za betone koji su izrađeni s dodatkom polimera, krivulja za određivanje tlačne čvrstoće translirana je udesno i prema dolje. Iz toga slijedi da je za istu veličinu tlačne čvrstoće na PM betonima potreban veći indeks sklerometra. Iz prikazanih se rezultata može zaključiti da se indeks sklerometra ne smanjuje proporcionalno s količinom dodanog polimera. Kako polimerni dodatak ujedno smanjuje i tlačnu čvrstoću za nekoliko postotaka, translaciju krivulje ne može se tumačiti isključivo kao smanjenje indeksa sklerometra.

Smanjenje maksimalnog zrna sa 16 na 8 mm ne utječe na vrijednost indeksa sklerometra u istoj mjeri koliko utječe na povećanje tlačne čvrstoće (slika 8.). Zbog toga dolazi do translacije krivulja za određivanje tlačne čvrstoće prema gore. Kako se za pripremu betona velikih čvrstoća najviše rabe agregati s maksimalnim zrnom 8 mm, to potvrđuje rezultate pokusa. Vrlo je vjerojatno da bi uporabom zrna maksimalnog promjera 4 mm ili manje došlo do smanjenja indeksa sklerometra [13,14].

## 6 Zaključak

Određivanje mehaničkih karakteristika betona nerazornim metodama jedan je od najzahtjevnijih zadataka u građevinarstvu. Usprkos ograničenjima u interpretaciji

rezultata i korelaciji s relevantnim svojstvima za proračun sigurnosti konstrukcija, ostvaren je znatan napredak u razvoju nerazornih metoda ispitivanja. Do sada su poznati odnosi između izmjerenih veličina nerazornim metodama i, primjerice, čvrstoće za obične betone, ali uočeno je da takvi odnosi ne vrijede za betone u koje se dodaje polimer, a koji se u posljednje vrijeme često rabe.

U radu su prikazani rezultati ispitivanja betonskih mješavina koje obuhvaćaju širok raspon čvrstoća i time omogućavaju kalibriranje sklerometra i ultrazvuka. Varirana je i količina polimera, čime su stvorene pretpostavke za razumijevanje mogućih varijacija u čvrstoći.

Dodavanjem polimera smanjuje se i dinamički modul elastičnosti betona proporcionalno s količinom dodanog polimera. Kako se dodavanjem polimera smanjuju tlačna čvrstoća i modul elastičnosti, očito je da sve navedeno utječe na izlazne rezultate ispitivanja nerazornim metodama. Smanjenje maksimalnog zrna agregata povećava tlačnu čvrstoću jer omogućava bolje "pakiranje" strukture, ali smanjuje modul elastičnosti jer je potrebno više cementne paste manjeg modula elastičnosti da obavije sva zrna agregata.

Jednako tako, manje maksimalno zrno agregata utječe na smanjenje dinamičkog modula elastičnosti, a to se



može objasniti povećanjem udjela cementne paste koja ima manju vrijednost dinamičkog modula elastičnosti nego agregat. Usporedbom betona različitog sastava (bez polimera i s njim) očit je utjecaj veličine zrna na prije spomenute vrijednosti.

Osim količine dodanog polimera, na brzinu prolaska ultrazvučnog impulsa i indeks sklerometra znatno utječe i količina cementa u betonu. Polimerni film koji se formira oko cementnog kamena ima zanemarivu debljinu u odnosu na ostale mjerljive debljine sloja, ali ima vrlo velik utjecaj na rezultate nerazornih ispitivanja. Kako polimerni film koji se formira oko cementnog kamena mijenja njegova svojstva u makroskopskom smislu, očito utječe i na izmjerene vrijednosti indeksa sklerometra. Općenito vrijedi da se dodavanjem polimera smanjuje vrijednost indeksa sklerometra, ali omjer postotka smanjenja indeksa sklerometra i količine dodanog polimera nije konstantan. Velike razlike u indeksima sklerometra primjetne su između betona s 0 % i 5 % dodatka polimera. Razlika između indeksa sklerometra za betone s 5 % i 10 % dodatka polimera vrlo je mala (1 do 2 %). Očito je

da već i male količine lateksa znatno mijenjaju svojstva betona. Isto tako iz navedenog se može zaključiti da se izlazni rezultati mjerenja ne smanjuju proporcionalno s povećanjem količine lateksa.

Ako se za određivanje čvrstoće polimerom modificiranog betona primjenjuju baždarni krivulje proizvođača opreme, procijenjena tlačna čvrstoća bit će manja od stvarne. Osim tlačne čvrstoće, na vrijednost indeksa sklerometra utječe čitav niz svojstava kao što su modul elastičnosti, tvrdoća, gustoća, ravnost površine itd. te je uređaj potrebno baždariti na vlastitim uzorcima. Najveći utjecaj na čvrstoću betona određenu sklerometrom ima čvrstoća cementnog kamena.

Analiza pokazuje da rezultati ispitivanja ultrazvukom bolje prikazuju varijacije u sastavu betonske mješavine od rezultata ispitivanja sklerometrom. Također je potrebno naglasiti da prikazani rezultati ispitivanja pokazuju isključivo trend kretanja rezultata. Za izradu baždarnih krivulja za betone posebnog sastava prema vrijednim je normama potrebno provesti ispitivanja na znatno većem broju uzoraka.

## LITERATURA

- [1] Ohama, Y.: *Handbook of polymer-modified concrete and mortars* – Properties and process technology; Noyes publications 1995
- [2] Qasrawi, H. Y.: *Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted*, Cement and Concrete Research 30 (2000)
- [3] ACI 548.3R-95: State-of-the-Art Report on Polymer-Modified Concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part 5, 1998
- [4] ACI 548.1R-97: Guide for the Use of Polymers in Concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part 5, 1998
- [5] ACI 548.5R-94: Guide for Polymer Concrete Overlays, ACI Committee 548, The Encyclopedia of Concrete Technology, 1995
- [6] Beeldens, A.; Van Gemert, D.; Schorn, H.; Ohama, Y.: *Integrated model for microstructure building in polymer cement concrete*, Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Congress on Polymers in Concrete, Berlin, Germany, 2<sup>nd</sup>-4<sup>th</sup> June, 2004, 1-10
- [7] Knapen, E.; Beeldens, A.; Van Gemert, D.; Van Rickstal, F.: *Modification of cement concrete by means of polymers in solution*, Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Congress on Polymers in Concrete, Berlin, Germany, 2<sup>nd</sup>-4<sup>th</sup> June, 2004, 83-90
- [8] Banjad Pečur, I.: *Optimalizacija sastava betona za tunelske obloge*, doktorski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2002.
- [9] Štirmer, N.: *Oštećenja nadslojeva industrijskih podova od udarnih opterećenja*, doktorski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2004.
- [10] Dogan, U.; Sengul, O.: *Mechanical properties and durability of polymer modified concretes*, Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Congress on Polymers in Concrete, Berlin, Germany, 2<sup>nd</sup>-4<sup>th</sup> June, 2004, 175-182
- [11] Lohaus, L.; Anders, S.: *Effects of polymer modification on the mechanical and fracture properties of high and ultra-high strength concrete*, Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Congress on Polymers in Concrete, Berlin, Germany, 2<sup>nd</sup>-4<sup>th</sup> June, 2004, 183-190
- [12] Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M.: *Concrete – Microstructure, Properties and Materials*, Third Edition, McGraw-Hill, 2006.
- [13] Galić, J.: *Određivanje karakteristika polimerom modificiranih betona nerazornim metodama*, magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2005.
- [14] Galić, J.; Banjad Pečur, I.: *Non-destructive testing of polymer modified concrete*, Proceedings of the Eight International Symposium on Brittle Matrix Composites, Warsaw, Poland, 23-25.10.2006.