



PD 15288



003101575

COBISS

UNIVERSITET U BEOGRADU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Mr Dragica Lj. Jevtić

**UTICAJ TERMOHIGROMETRIJSKIH
PARAMETARA SREDINE
NA NEKA SVOJSTVA SVEŽEG
I OČVRSLOG BETONA U FUNKCIJI
PRIMENE SUPERPLASTIFIKATORA,
ČISTOG PORTLAND CEMENTA
I CEMENTA SA DODATKOM ZGURE**

DOKTORSKA DISERTACIJA

BEOGRAD, 1995.

PII 15288



UNIVERZITET U BEOGRADU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Mr Dragica Lj. Jevtić

UTICAJ TERMOHIGROMETRIJSKIH
PARAMETARA SREDINE
NA NEKA SVOJSTVA SVEŽEG
I OČVRSLOG BETONA U FUNKCIJI
PRIMENE SUPERPLASTIFIKATORA,
ČISTOG PORTLAND CEMENTA
I CEMENTA SA DODATKOM ZGURE

DOKTORSKA DISERTACIJA

BEOGRAD, 1995.

Izradom ove doktorske disertacije rukovodio je dr Mihailo Muravljov, dipl.inž.građ., redovni profesor Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Ovom prilikom mu izražavam svoju najtopliju zahvalnost na nesebičnoj pomoći tokom izrade ovog rada, dragocenim savetima i sugestijama.

Zahvaljujem se saradnicima Rudarsko-geološkog fakulteta - Laboratoriji za mineralogiju, na pomoći u delu eksperimentalnog rada.

Na kraju, duboku zahvalnost dugujem mom kolektivu, Građevinskom fakultetu - Institutu za materijale i konstrukcije, na finansijskoj pomoći neophodnoj za realizaciju ovoga rada. Zahvaljujem se svim članovima Sektora za materijale i Instituta za materijale i konstrukcije, koji su učestvovali u eksperimentalnim istraživanjima. Takođe se zahvaljujem članovima Instituta za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta koji su učestvovali u tehničkoj obradi crteža i teksta.

Autor

Uticaj termohigrometrijskih parametara sredine na neka svojstva svežeg i očvrslog betona u funkciji primene superplastifikatora, čistog portland cementa i cementa sa dodatkom zgure

R e z i m e

Rad obuhvata teorijska razmatranja vezana za karakteristike svežeg i očvrslog betona u funkciji strukture betonske mešavine kao i strukture očvrslog betona. Ove strukture se razmatraju sa stanovišta poznatih činjenica vezanih za hidrataciju cementa i njenog uticaja na strukturu betona, ali i u funkciji vrste cementa, prisustva zgure i superplastifikatora. Isto tako, data je i iscrpna analiza osnovnih svojstava svežeg i očvrslog betona u zavisnosti od termohigrometrijskih parametara.

U okviru eksperimentalnih istraživanja tretirani su kako betoni spravljeni na bazi čistog portland cementa, tako i oni spravljeni sa dodatkom zgure. Isto tako, kod pojedinih betona bio je prisutan i superplastifikator. Pri ovim ispitivanjima su u prvih 7 dana varirane tri temperature betona i ambijenta (10°C , 20°C i 30°C) pri neprimenjenoj relativnoj vlažnosti sredine (cca 100%). Nakon toga uzorci betona su negovani u laboratorijskim uslovima pri relativnoj vlažnosti od cca 55-60%, i na temperaturi $T = 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$, do vremena ispitivanja od 28 dana. Kod svih betonskih mešavina konzistencija svežeg betona održavana konstantnom i pripadala je klasi tekuće konzistencije. Pri ovome je za različite vrste betona i za različite temperature varirana masa vode, tj. masa tečne faze (voda + superplastifikator), da bi se postigla ista konzistencija.

Na bazi izvršenih ispitivanja zaključeno je da se konzistencija svežeg betona značajno menja u zavisnosti od temperature ambijenta i od sastava betona, u prvom redu od vrste cementa i prisustva superplastifikatora, pri čemu je ova primena najviše izražena u prvih 10-15 minuta. Ispitivanja na očvrslogu betonu (čvrstoća, brzina ultrazvuka, dinamički modul), pak, pokazala su takođe zavisnost svojstava betona od prisustva zgure i superplastifikatora, naročito u odnosu na režim nege betona - termohigrometrijski parametar. Zaključeno je da je u ovom smislu pored temperature, od posebnog uticaja prisustvo zgure u betonu i da betoni spravljeni uz ovaj dodatak imaju veoma različite karakteristike u odnosu na betone sa čistim portland cementom.

Ključne reči: konzistencija, svež beton, cement sa dodatkom zgure, superplastifikator, temperatura, relativna vlažnost, čvrstoća pri pritisku, brzina ultrazvuka, dinamički modul elastičnosti, skupljanje.

The influence of thermo-hygrometric parameters to some properties of fresh and hardened concrete in function of the presence of superplasticizer, ordinary portland cement and cement with slag

S u m m a r y

The thesis deals with theoretical consideration related to the properties of fresh and hardened concrete as a function of both the structure of concrete mix and of the hardened concrete. These structures are considered with respect to the well known facts connected with the hydration of cement and its influence to the structure of concrete but also in the function of the type of cement, the presence of slag and the superplasticizer. In addition, a detailed analysis has been presented of the basic properties of fresh and hardened concrete depending on the temperature and relative humidity parameters.

In experimental research work concrete mixes made with ordinary portland cement as well as concrete mixes with the addition of slag have been treated. At the same time some concrete mixes contained superplasticizer. During the investigations in the first 7 days there was a variation of three temperatures of concrete and the ambient (10°C, 20°C and 30°C) at a constant relative humidity (nearly 100%). After that the concrete samples were cured in laboratory conditions with relative humidity of 55-60% and temperature $20 \pm 2^\circ\text{C}$ to the age of 28 days.

The consistency of fresh concrete was constant in all mixes and it was the type of flow consistency. Thereat the quantity of water has been varied for different kinds of concrete and various temperatures to achieve the same consistency.

The conducted investigations showed that consistency of the fresh concrete is changed significantly depending on the temperature of the ambient and the composition of concrete, primarily related to the kind of cement and the presence of superplasticizer. This change is mostly outstanding during the first 10-15 minutes. Investigations carried out on hardened concrete (strength, ultrasonic pulse velocity, dynamic modulus of elasticity) have shown the relationship between the properties of concrete and the presence of slag and superplasticizer, especially according to the curing conditions - temperature and relative humidity parameters. It has been concluded that beside the temperature, the presence of slag in concrete especially influence the characteristics of concrete mixes made with the addition of slag differ from the concrete mixes made with ordinary portland cements.

Key words: consistency, fresh concrete, cement with slag, superplasticizer, temperature, relative humidity, compressive strength, ultrasonic pulse velocity, dynamic modulus of elasticity, shrinkage.

S A D R Ź A J

1. UVOD	1
2. SVEŽ BETON	4
2.1 STRUKTURA BETONSKE MEŠAVINE	4
2.1.1 Unutrašnje sile u sistemu	4
2.1.2 Uticaj dodataka tipa superplastifikatora	7
2.1.3 Međudejstvo na relaciji cementna pasta - agregat	9
2.1.4 Tipovi strukture svežeg betona	13
2.1.5 Mogući defekti strukture svežeg betona	14
2.2 HIDRATACIJA CEMENTA - FORMIRANJE STRUKTURE OČVRSLOG BETONA	17
2.2.1 Teorije hidratacije	17
2.2.2 Hemijske reakcije pri hidrataciji	19
2.2.3 Hidratacija cementa sa zgurom	23
2.2.4 Faze formiranja strukture cementnog kamena	25
2.2.5 Uticaj dodatka superplastifikatora na proces hidratacije	32
3. STRUKTURA BETONA	36
3.1 UVOD	36
3.2 MAKROSTRUKTURA BETONA	37
3.3 MIKROSTRUKTURA BETONA	40
3.4 KONTAKTNA ZONA AGREGAT - CEMENTNI KAMEN	58
3.5 VODA U OČVRSLOM BETONU	63
3.6 DEFEKTI STRUKTURE	65
4. ZAVISNOST NEKIH SVOJSTAVA SVEŽEG I OČVRSLOG BETONA OD TERMOHIGROMETRIJSKIH PARAMETARA	68
4.1 UVODNE NAPOMENE	68
4.2 UTICAJ TEMPERATURE I VLAŽNOSTI SREDINE NA SVOJSTVA SVEŽEG BETONA	69
4.3 UTICAJ TERMOHIGROMETRIJSKOG FAKTORA NA FORMIRANJE STRUKTURE OČVRSLOG BETONA	81
4.4 ČVRSTOĆA BETONA U ZAVISNOSTI OD USLOVA FORMIRANJA STRUKTURE	83
4.5 OSTALE VAŽNIJE KARAKTERISTIKE BETONA U ZAVISNOSTI OD TERMOHIGROMETRIJSKOG FAKTORA	91

5. SOPSTVENA EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA	104
5.1 POSTAVKA RADA	104
5.2 KARAKTERIZACIJA POLAZNIH MATERIJALA	105
5.3 ISPITIVANJA NA SVEŽEM BETONU	114
5.4 ISPITIVANJA NA OČVRSLJOM BETONU	139
5.4.1 Planiranje eksperimenta	139
5.4.2 Rezultati ispitivanja čvrstoće betona	141
5.4.3 Rezultati ispitivanja brzine prostiranja ultrazvuka	150
5.4.4 Rezultati ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti	159
5.4.5 Rezultati ispitivanja skupljanja	168
5.4.6 Rezultati ispitivanja upijanja vode	173
6. INTERPRETACIJA REZULTATA ISPITIVANJA MATEMATIČKOM METODOM FAKTORIJALNOG EKSPERIMENTA	174
6.1 UVOD	
6.2 ANALITIČKI IZRAZI ZA FUNKCIJE ODZIVA - ČVRSTOĆE BETONA	175
6.3 ANALIZA FAKTORIJALNOG EKSPERIMENTA	178
6.3.1 Jednorodnost disperzije	179
6.3.2 Adekvatnost modela	179
6.3.3 Analiza značajnosti uticajnih faktora	179
6.3.4 Testiranje značajnosti koeficijenata	180
7. ANALIZA I DISKUSIJA REZULTATA ISPITIVANJA	184
7.1 ISPITIVANJA NA SVEŽEM BETONU	184
7.2 ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA OČVRSLJOG BETONA	187
7.2.1 Čvrstoće pri pritisku	187
7.2.2 Promene i odnosi eksperimentalno utvrđenih svojstava betona kroz vreme	188
7.2.3 Analiza čvrstoća betona pri pritisku na bazi parametra zrelosti	194
7.2.4 Zavisnosti između 28-dnevnih (nominalnih) čvrstoća betona i vodocementnog faktora	197
7.2.5 Veze između brzina ultrazvuka i čvrstoća betona	198
7.2.6 Skupljanje betona	205
7.2.7 Modul elastičnosti	205
7.2.8 Upijanje vode	207
8. ZAKLJUČCI	208
9. LITERATURA	214

1. UVOD

Savremena nauka o materijalima tretira beton kao kompozit tipa aglomerata [92], [139], tj. kao veštački materijal koji nastaje očvršćavanjem mešavina različitih materijala tipa agregata (granulata, materijala za ispunu, inertnih materijala) i raznih veziva. Kombinovanje komponentnih materijala u ovom slučaju podrazumeva njihovo međusobno spajanje u jedan sistem ne putem nekih mehaničkih spojnih sredstava, već isključivo uspostavljanjem određenih atomskih veza, odnosno dejstvom različitih međumolekulskih sila.

Predmet izlaganja u ovom radu biće isključivo betoni kod kojih se kao vezivo javlja cement, odnosno betoni koji se definišu kao obični ili normalni [91]. To su u stvari betoni koji imaju najširu primenu i koji danas u građevinarstvu predstavljaju osnovni konstrukcijski materijal. Kao što je već rečeno, u okviru ovakvih betona kao vezivo se primenjuje cement, dok kao agregat u obzir dolazi prirodni šljunak i pesak (prirodni agregat), kao i agregat dobijen usitnjavanjem nekih vrsta prirodnog kamena koji zadovoljava određene uslove u pogledu fizičko-mehaničkih i drugih svojstava (drobljeni agregat). Ovde treba posebno istaći da navedene tipove agregata uvek karakteriše vrlo mala poroznost zrna, tako da se može smatrati da se u okviru običnih (normalnih) betona koristi praktično apsolutno kompaktan agregat.

Cement predstavlja svakako najznačajniju komponentu svakog betona i u zavisnosti od njegove vrste i količine dobijaju se betoni različitih svojstava. Poznato je da u svetskoj proizvodnji raznih tipova cemenata, cementi na bazi portlandcementnog klinkera zauzimaju najviše mesto po proizvodnji i potrošnji. Međutim, i cement se u opštem slučaju može tretirati kao kompozitni materijal [18], [92], pošto u okviru njega mogu da budu primenjene i različite materije (prirodni i veštački pucolani, razne vrste zgura, elektrofilterski pepeo, silikatna prašina i dr.) koje poseduju latentna hidraulička svojstva. Ove materije se koriste u mnogim zemljama kao dodaci cementu ne samo iz ekonomskih razloga, već i zbog prednosti koje ovakvi cementi imaju u poređenju sa tzv. "čistim" cementima. Tako, na primer, proizvodnja cementa sa zgurom je razvijena u Belgiji, bivšem SSSR-u, Francuskoj, Kini, skandinavskim zemljama, Južnoj Africi, zemljama Zaliva i dr., a u novije vreme razvio se i interes za ovim cementima u SAD i Kanadi.

Pored već poznatih specifičnosti koje su prisutne kod cemenata sa dodatkom zgure (usporena hidratacija, niže početne čvrstoće, osetljivost na temperaturu i režim negovanja, niža toplota hidratacije), najnovija istraživanja u svetu (pomoću difrakcije x-zraka), pokazala su da cementi sa određenim procentom zgure imaju sposobnost da preko različitih mehanizama smanje debljinu kontaktne zone, tzv. interface-a ili tranzitne zone, između cementnog kamena i agregata, i da na taj način poboljšaju svojstva betona, kao što su hemijska otpornost, permeabilnost, otpornost na dejstvo mraza, deformaciona svojstva itd [36], [81], [82].

Pored napred navedenih osnovnih konstituenata svakog betona (agregata i cementa), među koje kao obavezna spada još i voda, savremena tehnologija betona podrazumeva i primenu još jedne fakultativne komponente - primenu različitih dodataka betonu. S obzirom na predmet istraživanja u ovom radu, u njemu će se pažnja isključivo posvetiti primeni

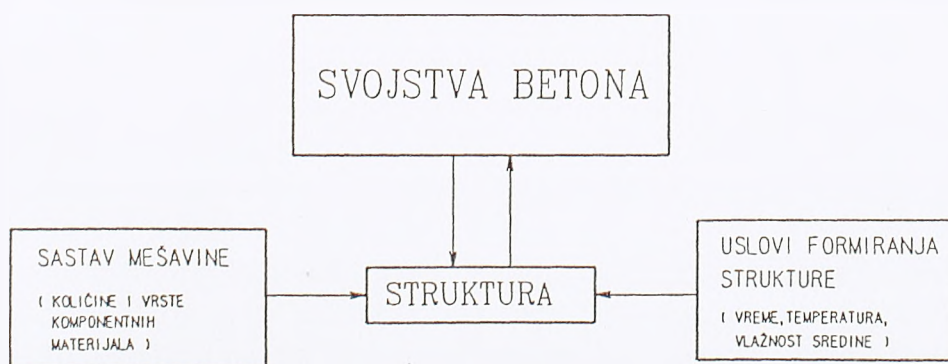


dodataka betonu tipa superplastifikatora, koji pri određenoj količini vode poboljšavaju obradljivost i ugradljivost svežeg betona, odnosno pri unapred utvrđenoj konzistenciji omogućavaju značajno smanjivanje količine vode potrebne za spravljanje.

Uticaj dodatka betonu- superplastifikatora - na svojstva svežeg i očvrslog betona umnogome zavisi od količine i vrste primenjenog cementa, odnosno od mineraloškog sastava cementa. Drugim rečima, ovaj uticaj je funkcija koja zavisi od toga da li se primenjuje "čisti" portland cement ili portland cement sa nekim dodatkom. Kako se u nas u najvećem obimu koriste baš cementi sa različitim dodacima (preko 90%), dok se u drugim zemljama znatno više koriste "čisti" portland cementi, u našim uslovima se ne mogu bez rezerve prihvatiti i primenjivati svi stavovi formirani na bazi ispitivanja sprovedenih u inostranstvu [57], [60], [62].

Sve ovo ukazuje da betoni koji se spravlja sa cementima sa dodatkom zgure i uz primenu nekog superplastifikatora mogu da imaju različita svojstva, kako u svežem tako i u očvrsnom stanju, u zavisnosti od vrste cementa i upotrebljenog superplastifikatora, odnosno od kompatibilnosti ovih komponenata. Ova problematika još uvek nije dovoljno rasvetljena, tako da će u ovom radu biti učinjen pokušaj da se kroz konkretna eksperimentalna ispitivanja odgovori na neka od otvorenih pitanja.

Svojstva betona u opštem slučaju su funkcija izvanredno velikog broja uticajnih faktora. Ona zavise od karakteristika primenjenih komponenata - agregata, cementa, vode i dodataka betonu, od kvantitativnih odnosa ovih materijala u masi svežeg betona, od niza tehnoloških faktora, od postupka izrade konkretnog betonskog elementa, od uslova eksploatacije itd. Međutim, bez obzira na kompleksnost pitanja o kojima je reč, danas je nepobitno utvrđeno da najveći broj svojstava betona, i to ne samo betona u očvrsnom stanju već i svežeg betona, zavisi od ostvarene strukture. S druge strane, pak, dosadašnja istraživanja na ovom polju ukazuju da struktura svežeg i očvrslog betona, osim od upotrebljenih komponenata, zavisi i od uslova pod kojima se to formiranje odvija, tj. da na formiranje strukture bitno utiču parametri vreme, temperatura i vlažnost sredine. Napred iskazana zavisnost "sastav-struktura - svojstva betona", koja načelno važi kako za svež tako i za očvrsli beton, a koja predstavlja i osnovu tzv. strukturalističkog koncepta teorije i tehnologije betona, može se šematski prikazati na način dat na slici 1.1.



Sl. 1.1 Funkcionalna zavisnost svojstva betona - sastav - struktura

S obzirom da strukturalistički koncept teorije i tehnologije betona podrazumeva precizno definisanje strukturnih karakteristika kako svežeg tako i očvrslog betona, pre prelaska na izlaganja koja se direktno odnose na predmet ovog rada u daljem će prvo biti razmotrena neka osnovna pitanja formiranja i tipova strukture običnih (normalnih) betona (betoni sa zapreminskim masama između 1900-2500 kg/m³). Pri ovome će se posebno razmatrati strukture betona spravljenih sa cementima sa dodatkom zgure, kao i pitanja formiranja strukture pri primeni dodataka betonu - superplastifikatora. Takođe će se dužna pažnja posvetiti i mehanizmima formiranja strukture u funkciji kinetike hidratacije cementa za slučaj različitih ambijentalnih uslova, u prvom redu nivoa temperatura.

2. SVEŽ BETON

2.1. STRUKTURA BETONSKE MEŠAVINE

2.1.1 Unutrašnje sile u sistemu

Betonska mešavina, ili kako se još naziva sveži beton, predstavlja složen, višekomponentan i polidisperzan sistem koji se formira u fazi homogenizacije betona, kada se čvrstim komponentnim materijalima (agregatu i cementu) doda određena količina vode. U ovako dobijenom sistemu prisutne su fino disperzne čestice cementa, vrlo sitne čestice agregata i eventualno neki praškasti mineralni dodaci, zatim znatno krupnija zrna sitnog i krupnog agregata, kao i voda, aditivi (dodaci betonu) i mehurići vazduha. Vazduh je prisutan ili kao komponenta koja je "namerno" uvučena u svež beton upotrebom određenih dodataka betonu (u prvom redu aeranata, ali i superplastifikatora, koje često karakteriše i sposobnost aeriranja betona), ili je reč o mehurićima vazduha koji su u masu betona uvučeni pri mešanju komponenata, a koji tokom postupka ugrađivanja nisu potpuno odstranjeni.

U ovakvom materijalnom sistemu postoje različite unutrašnje sile koje se prvenstveno javljaju kao sile međudejstva između vode i sitnih čestica čvrste faze. Reč je o međumolekularnim silama - Vandervalsovim silama, silama unutrašnjeg trenja, kapilarnim i drugim silama, čije prisustvo uslovljava povezanost primenjenih komponenata i određena specifična svojstva datog sistema. U ova svojstva se u prvom redu ubraja strukturna čvrstoća, odnosno kohezivnost, što ovakve sisteme razlikuje kako od čvrstih tela, tako i od pravih tečnosti. U suštini, svež beton se po svojim karakteristikama nalazi na sredini između pravih viskozničkih tečnosti i čvrstih tela, pa se stoga, saglasno kriterijumima fizičke hemije, on može definisati kao tzv. strukturirana viskozna tečnost (strukturirani sistem). Svež beton se od pravih tečnosti, dakle, razlikuje posedovanjem određene strukturne čvrstoće, dok se od čvrstih tela razlikuje srazmerno malom elastičnošću i sposobnošću podnošenja značajnih plastičnih (ireverzibilnih) deformacija, čak i pri vrlo malim naprezanjima [91].

Svojstva svežeg betona zavise od vrlo velikog broja uticajnih parametara, ali se celokupan kompleks ovih parametara, kao što je već i u uvodu istaknuto, generalno može svesti na dva osnovna faktora: na karakteristike komponenata i na strukturu mešavine. Jedna od najznačajnijih karakteristika ovog sistema ogleda se u njegovoj sposobnosti da pod uticajem različitih mehaničkih dejstava menja svoja svojstva; reč je o tiksotropiji, tj. o pojavi promenljivosti reoloških parametara u funkciji mirovanja, odnosno kretanja čestica. Druga bitna karakteristika svežeg betona je stalna promenljivost njegovih svojstava u funkciji vremena (gubljenje fluidnosti, povećanje viskoznosti i dr.), što je uslovljeno odvijanjem fizičko-hemijskih procesa tokom hidratacije cementa. Ova promenljivost je i suštinski razlog teškoća za precizno definisanje samog pojma svežeg betona, ali će se u okviru ovog rada, bez obzira na svu uslovnost pojma "vezivanja" betona, pod "svežim betonom" podrazumevati beton od trenutka spravljanja pa do početka vezivanja cementa u betonu. Ovo vreme obično iznosi 6-10 časova i u tom periodu beton se lako oblikuje, tako da za ovo vreme

treba izvršiti njegovo ugrađivanje u kalup - oplatu.

Strukturu svežeg betona najcelishodnije je razmatrati kao strukturu sistema koji se sastoji od dve glavne komponente: cementne paste i agregata. U sastav cementne paste uvek se uračunavaju i vrlo fine čestice agregata, kao i eventualno prisutne prašinate čestice nekih mineralnih dodataka. Čestice koje ulaze u sastav ove strukturne komponente odlikuju se vrlo malim dimenzijama (maksimalna dimenzija cca 0,1 mm), što ima za posledicu vrlo velike specifične površine. Ovo je osnovni razlog za pojavu unutrašnjih sila u okviru ove komponente, ali i u svežem betonu posmatranom u celini, koje mogu da budu sile adsorpcionog, molekularnog i kapilarnog međudejstva [7]. Ove sile bitno utiču na sva svojstva svežeg betona, a u prvom redu na stepen povezanosti - kohezivnosti - sistema.

Svojstva cementne paste zavise od odnosa čvrste i tečne faze: sa povećanjem sadržaja vode povećava se fluidnost, a smanjuje strukturna čvrstoća ove paste. Voda o kojoj je reč najčešće je vezana u okviru sistema, pri čemu ona može da bude hemijski, fizičko-hemijski i fizički (mehanički) vezana.

U tabeli 2.1 dati su neki podaci koji se odnose na vodu prisutnu u cementnoj pasti, odnosno u svežem betonu [7], [91], a na sl. 2.1 dat je šematski prikaz strukture i vode u svežem betonu prema [141].

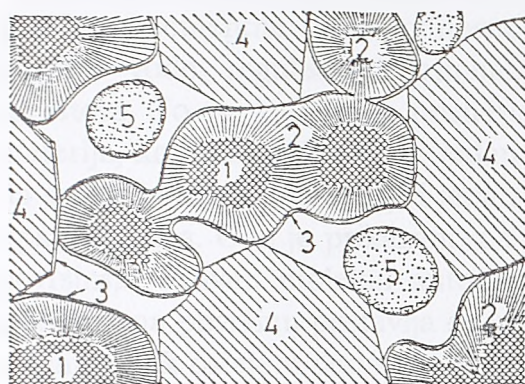
Kao što pokazuje priložena tabela, u hemijsku reakciju sa cementom u svežem betonu stupa srazmerno mala količina vode i na osnovu sprovedenih ispitivanja proizilazi da se ova količina postepeno povećava. Međutim, ona i u vremenu tzv. vezivanja cementa u betonu (max. 6-10 h), ne prelazi granicu od 5%.

Tabela 2.1 Količine i načini vezivanja vode u svežem betonu

Karakter veze	Orijentacioni relativni sadržaji vode u odnosu na ukupnu količinu (%)	
	u sveže pripremljenoj mešavini	u periodu vezivanja cementa
Hemijska - u tačno određenim kvantitativnim odnosima	1 - 2	4 - 5
Fizičko-hemijska - adsorpciona voda na površinama zrna	3 - 5	20 - 25
Mehanička - strukturna (voda u šupljina, porama i kapilarima)	93 - 95	70 - 75

Drugi deo vode u svežem betonu je pod uticajem adsorpcionih sila koje uslovljavaju njenu fizičko-hemijsku povezanost sa površinom čvrste faze - sitnih čestica. Prema savremenim gledištima [1], površina čvrste faze koja stupa u međudejstvo sa vodom ima značajne

nekompenzovane molekularne sile koje su sposobne da privuku molekule vode, pri čemu



1. - *nehidratirani cement*
2. - *hidratirani cement (gel sa vezanom vodom)*
3. - *adsorbovana voda*
4. - *agregat*
5. - *kapilarna voda*

Sl. 2.1 Šematski prikaz strukture i vode u svežem betonu

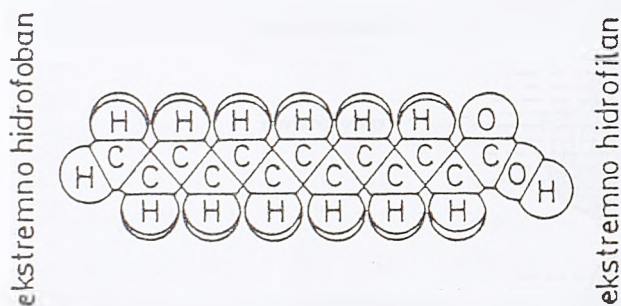
se ovi molekuli, s obzirom da poseduju značajne dipolne momente, u zoni dejstva površinskih sila čvrste faze orijentišu i zgušnjavaju. Električna orijentacija i značajni pritisci koji se u ovakvim slučajevima javljaju u zoni delovanja molekularnih sila, dovode do toga da se voda (film) na površini čvrste faze ponaša na način koji u izvesnom smislu odgovara svojstvima čvrstih tela, a to znači da ovu vodu karakteriše određena elastičnost, čvrstoća na pritisak, snižena tačka smrzavanja i dr. (na primer, ispitivanja su pokazala da sloj vode adsorbovan na površini čvrste faze ima modul smicanja od 0,19 Pa). Udaljavanjem od površine čvrste faze uticaj molekularnih sila se smanjuje, ali molekuli vode, usled svoje polarnosti, u zonama udaljenim od ove površine, obrazuju lance od nekoliko desetina ili stotina molekula koji su involvirani u dubinu cementne paste. Dužina ovih lanaca zavisi od površinskih karakteristika čvrste faze i od procesa prisutnih tokom hidratacije cementa. Debljina slojeva ovako orijentisanih čestica vode, pak, koja je po mnogim karakteristikama izmenjena u odnosu na svojstva prave tečnosti, iznosi nekoliko stotina ili nekoliko desetina μm (obično ispod 0,15 μm) [44], [132].

Količina napred definisane fizičko-hemijski vezane vode takođe se menja u procesu hidratacije cementa, koji obično prati značajno povećanje specifične površine čvrste faze. U svežem betonu ova količina, kako pokazuje tabela 2.1, iznosi 3-5%, dok je ona u periodu vezivanja cementa do 25% ukupne količine vode.

Kao što pokazuje tabela 2.1, osnovna količina vode u betonu, odnosno u cementnoj pasti, nalazi se u prostorima između zrna čvrste faze, pri čemu su ovi prostori reda veličine 1-50 μm , a ponekad i nešto veći, što je nekoliko desetina, pa i stotina puta veće od slojeva fizičko-hemijski vezane vode koja je adsorbovana na površinama čestica koje formiraju cementnu pastu. Voda u ovim prostorima, usled delovanja kapilarnih sila i obrazovanja gela u procesu hidratacije cementa, u suštini je fizičko-mehanički vezana sa strukturom cementne paste, odnosno docnije cementnog kamena. Ova voda se često naziva i slobodnom vodom, pošto ona nije hemijski vezana i nije izložena uticaju molekularnih sila čvrste faze. Količina vode o kojoj je reč iznosi oko 95% neposredno po spravljanju betona, a u toku vezivanja cementa njena količina se smanjuje na 65-70%. U suštini ova, tzv. slobodna voda, najviše utiče na fluidnost (pokretljivost) cementne paste, a preko nje i na fluidnost, odnosno viskoznost svežeg betona.

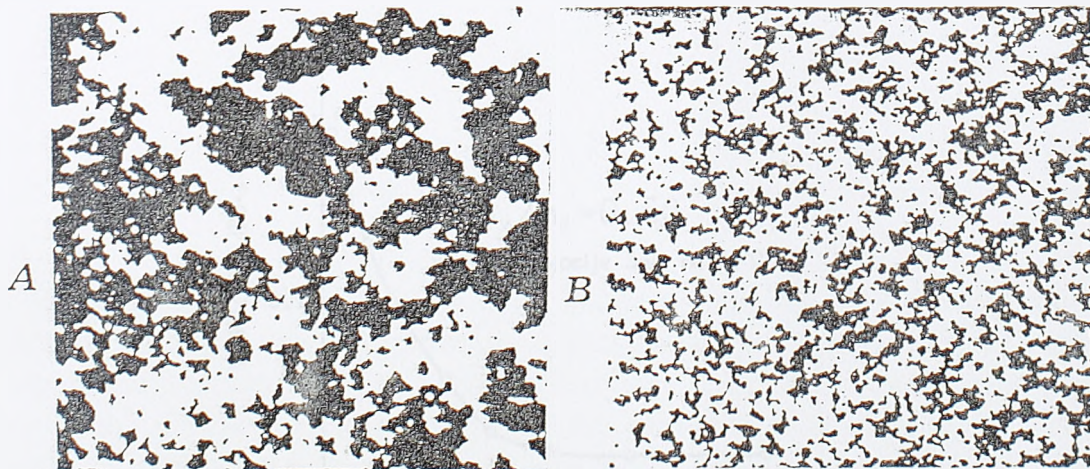
2.1.2 Uticaj dodatka tipa superplastifikatora

Fluidnost cementne paste, odnosno svežeg betona, može se, osim upotrebom određene količine vode, regulisati i primenom dodatka betonu tipa plastifikatora i superplastifikatora. To su, kao što je poznato, različita organska jedinjenja tipa površinski aktivnih materija, koja najčešće sadrže jedan hidrofobni deo sa dugim lancem ugljenika (koji može da sadrži benzensko jezgro), i jedan hidrofilni deo sastavljen od grupe tipa karboksilata ili tipa sulfonata. Ovo je prikazano na sl. 2.2 [59]. Ovakav sklop dejstvuje na takav način da površinski aktivan molekul automatski izbija na površinu vode; njegov hidrofobni kraj izlaskom na površinu postavlja se upravno na površinu razdvajanja faza, ali on, posmatran u celini, ipak ostaje u dodiru sa vodom, pošto ima i jedan kraj koji je hidrofilan. To drugim rečima znači da se molekuli ovakvih organskih supstanci u sistemu cement-voda adsorbuju na česticama cementa i usmeravaju ka površini razdvajanja.



Sl. 2.2 Šema strukture površinski aktivnog molekula

U prisustvu plastifikatora, a posebno superplastifikatora, između čestica cementa u cementnoj pasti javljaju se određene odbojne elektrostatičke sile, koje načelno proizvode dva efekta: deflokulaciju (individualizaciju) eventualno grupisanih čestica, i efekat "podmazivanja" površina zrna. Prvi od navedenih efekata prikazan je na sl. 2.3 na kojoj se vidi da se u slučaju cementne paste bez upotrebe superplastifikatora (a), čestice cementa drže u grupicama, dok se u drugom slučaju (b), zahvaljujući upotrebi navedenog dodatka betonu, proizvodi efekat deflokulacije [14], [77]. S obzirom da su čestice cementa naelektrisane istim znakom (-), što znači da se one uzajamno odbijaju, deflokulacija pod ovakvim uslovima doprinosi da disperzija cement-voda bude vrlo stabilna i homogena. Jedan od efekata deflokulacije je i u tome što se njom omogućava bolje "kvašenje" zrna cementa, čime se veća površina cementa izlaže hidrataciji.

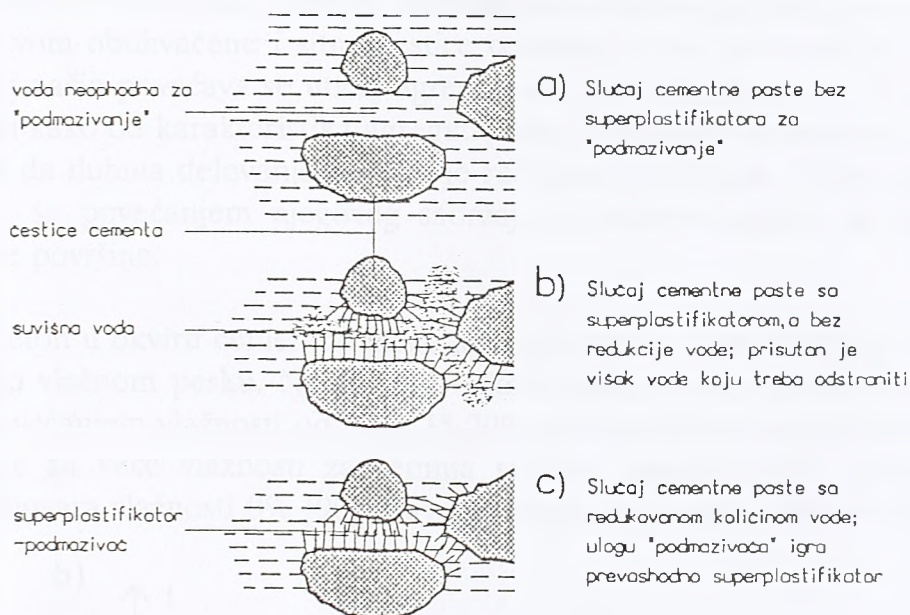


Sl. 2.3 Efekat deflokulacije zrna cementa

Druga značajna uloga dodatka betonu tipa superplastifikatora je uloga vrlo intenzivnog podmazivača čestica cementa primenom mehanizma koji je identičan tzv. "uljnom

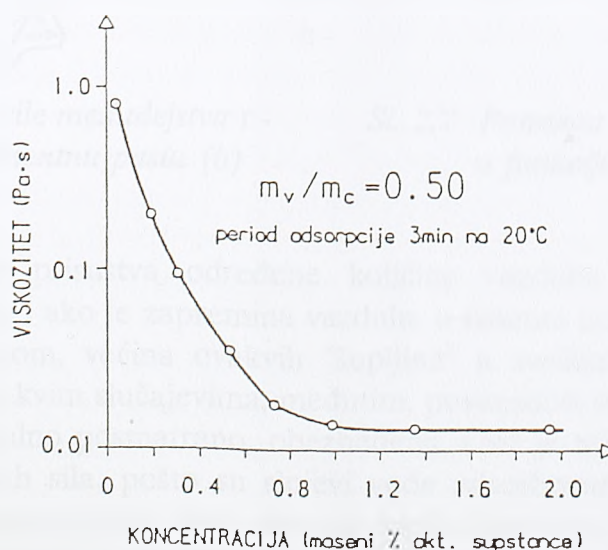


podmazivanju" [57], [84]. Ovo podmazivanje se obavlja posredstvom jednog monomolekularnog filma - premaza - koji se formira na površinama zrna cementa, a koji se sastoji od adsorbovanih i orijentisanih dugih molekula primenjenog dodatka. Na ovaj način se ostvaruje efekat "dlaka u četki", koji obezbeđuje podmazivanje čestica, pošto su čestice okružene jednim solvatiranim omotačem i savršeno klize jedna u odnosu na drugu. Opisani mehanizam delovanja superplastifikatora prikazan je na sl. 2.4 i on, kao što se može zaključiti, omogućava dobijanje zahtevane fluidnosti cementne paste, a to znači i svežeg betona, uz upotrebu manjih količina vode (ovo smanjenje iznosi i do 30% - [61],[62],[63]).



Sl. 2.4 Mehanizam uljnog podmazivanja

Značajno povećanje fluidnosti, odnosno smanjenje viskoziteta ovakvih sistema primenom jednog superplastifikatora tipa sulfonovanog naftalin-formaldehid-kondenzata, može se ilustrovati dijagramom prikazanim na sl. 2.5, prema Hatoriu [47].

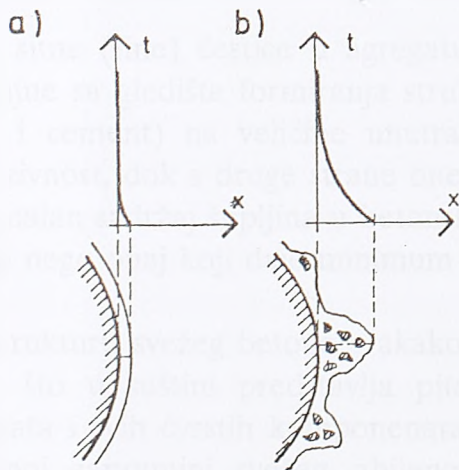


Sl. 2.5 Uticaj superplastifikatora na viskozitet cementne paste

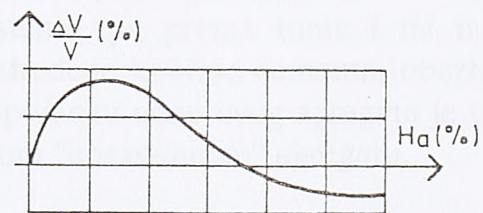
2.1.3 Međudejstvo na relaciji cementna pasta - agregat

Kada se u cementnu pastu uvedu krupnija zrna agregata, dolazi do suštinskih promena svojstava sistema. Površine zrna agregata stupaju u kontakt sa cementnom pastom, pa u zonama ovog kontakta dolazi do kvašenja zrna agregata, odnosno do pojave novih adsorpcionih, molekularnih i kapilarnih sila. S obzirom na to, u ovim zonama se povećava kohezivnost, čime se smanjuje fluidnost (pokretljivost) celokupne mase. U ovakvim okolnostima međudejstvo između agregata i cementne paste ne obuhvata samo tanak vodeni film, kao što bi to bio slučaj "čistog" međudejstva između agregata i vode (sl. 2.6a), već su međudejstvom obuhvaćene i sitne čestice cementa u zoni kontakta sa agregatom (sl. 2.6b). Na ovaj način povećava se uticaj agregata na cementnu pastu, pri čemu dubina ovog uticaja zavisi kako od karakteristika agregata, tako i od svojstava cementa. Prema [7] može se smatrati da dubina delovanja o kojoj je reč iznosi 10-15 μm . Uticaj agregata na ovu pojavu raste sa povećanjem njegovog sadržaja u mešavini, kao i sa povećanjem njegove specifične površine.

U slučaju kada beton u okviru cementne paste sadrži relativno malu količinu vode, on se ponaša vrlo slično vlažnom pesku. Naime, kao i kod peska, i kod betona se u ovakvim slučajevima sa povećanjem vlažnosti od 0 do 15-20% prvo ispoljava povećanje zapremine (sl. 2.7), da bi se za veće vlažnosti zapremina sistema smanjila čak i ispod početne vrednosti koja odgovara vlažnosti 0% [90]. Navedeno povećanje zapremine svežeg betona



Sl. 2.6 Uticaj agregata - sile međudejstva t - na vodu (a) i cementnu pastu (b)



Sl. 2.7 Promena zapremine betona u funkciji vlažnosti

ostvaruje se na račun prisustva određene količine vazduha (ovaj vazduh je pod atmosferskim pritiskom), i ako je zapremina vazduha u sistemu znatno veća od zapremine prostora ispunjenih vodom, većina ovakvih "šupljina" u svežem betonu čini povezanu kontinualnu fazu. I u ovakvim slučajevima, međutim, povezanost strukturnih komponenata svežeg betona je, generalno posmatrano, obezbeđena. Ovo je takođe posledica prisustva odgovarajućih unutrašnjih sila, pošto su slojevi vode adsorbovani na površinama čvrste faze i u ovakvim okolnostima vrlo mali, tako da među česticama i dalje deluju privlačne sile o kojima je napred već bilo reči. Ako se sveži beton ovakve strukture zbije, što podrazumeva da se iz njega u dovoljnoj meri eliminišu "prazni" prostori, dobiće se

izvanredno koherentan sistem, tj. sistem sa još jače izraženim unutrašnjim silama, što opet predstavlja posledicu prisustva vrlo tankih slojeva vode adsorbovane na površinama čestica čvrste faze.

Povećanjem količine vode u betonu iznad granice koja odgovara maksimalnom volumenu saglasno sl. 2.7, zapremina šupljina u sistemu se smanjuje, a pri dovoljno visokom sadržaju vode prisutni prazni prostori su u minimumu, pri čemu se oni transformišu u približno sferne oblike. U okviru ovakvih praznih prostora u masi svežeg betona sada vladaju povišeni vazdušni pritisci, koji su posledica površinskog napona na granici tečne i gasovite faze.

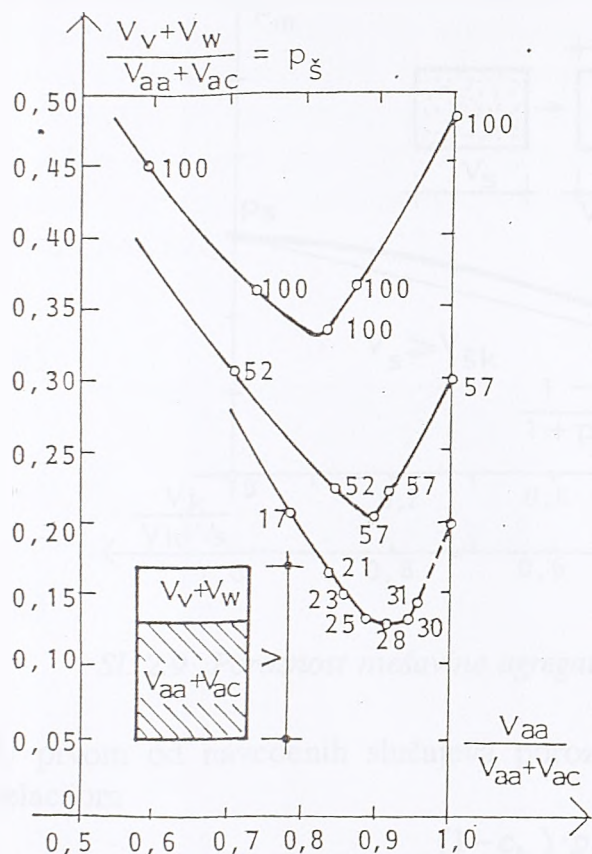
Prema Pauersu [31], najmanja količina vode u svežem betonu pri kojoj dolazi do izraženog ispoljavanja dejstva kapilarnih sila je količina za koju se dobija minimalan sadržaj šupljina u mešavini. Sa povećanjem količine vode, pak, smanjuje se udeo kapilarnih sila u sklopu unutrašnjih sila sistema, pa se njegova kohezivnost (povezanost) obezbeđuje prisustvom drugih unutrašnjih sila - međumolekulskih, Vandervalsovih i dr. Minimalnu količinu vode koja u svežem betonu obezbeđuje minimalan sadržaj šupljina, Pauers naziva "osnovnim sadržajem vode", a odgovarajuću konzistenciju "osnovnom konzistencijom". Konzistencija cementne paste, kada ona sadrži osnovnu količinu vode, prema Pauersu, približno odgovara tzv. standardnoj konzistenciji cementa, dok u slučaju svežeg betona osnovni sadržaj vode odgovara konzistenciji sa merom sleganja 4-5 cm.

Vrlo sitne (fine) čestice u agregatu (čestice krupnoće ispod cca 0,125 mm) su veoma značajne sa gledišta formiranja strukture svežeg betona, pošto one sa jedne strane utiču (kao i cement) na veličine unutrašnjih sila u sistemu, pa prema tome i na njegovu kohezivnost, dok s druge strane one, pri primeni određene količine cementa, obezbeđuju minimalan sadržaj šupljina u betonskoj mešavini. Optimalni udeo ovog agregata je obično manji nego onaj koji daje minimum šupljina u samom "upakovanom" agregatu.

Na strukturu svežeg betona svakako je od uticaja, osim agregata i upakovanosti njegovih zrna, što u suštini predstavlja pitanje granulometrijskog sastava, i međusobni odnos agregata i svih čvrstih komponenata mešavine. Ako se učešća pojedinih komponenata u ukupnoj zapremini svežeg, zbijenog betona V_b označe sa V_{aa} (apsolutna zapremina agregata), V_{ac} (apsolutna zapremina cementa), V_v (zapremina vode) i V_w (zapremina vazduha), onda se zavisnost između sadržaja "praznih" prostora u masi svežeg betona (prostora neispunjenih čvrstom fazom, već vodom i vazduhom) - parametar "šupljina" $p_s = (V_v + V_w)/(V_{ac} + V_{aa})$, i sadržaja čvrste faze, u kojoj dominantnu ulogu ima agregat (odnos $V_{aa}/(V_{ac} + V_{aa})$), može prikazati putem dijagrama datog na sl. 2.8 [137].

Kao što pokazuje ova slika, predmetna zavisnost je, između ostalog, i funkcija odnosa krupnog i sitnog agregata u mešavini, tako da se, generalno posmatrano, sa smanjivanjem učešća sitnog agregata parametar šupljina p_s , pri povećanju odnosa $V_{aa}/(V_{ac} + V_{aa})$, vrlo značajno smanjuje. Najniža kriva prikazana na sl. 2.8 odnosi se u stvari na mešavine spravljene sa najmanjim količinama vode i najvećim sadržajima krupnog agregata koji omogućavaju efikasno zbijanje, odnosno vibriranje betona. U ovakvim slučajevima, kako pokazuju ispitivanja, pri upotrebi veće količine krupnog agregata, prilikom vibriranja dolazi

do odbacivanja "viška" tog agregata, odnosno "višak" krupnog agregata ostaje slobodan na površini betona. Ovo je prema Bergstremu [137] karakteristika svih stabilnih mešavina.



Sl. 2.8 Zavisnost parametra šupljina p_s od relativnog učešća agregata

Mada se ovaj problem na zadovoljavajući način može rešiti jedino putem konkretnih eksperimentalnih ispitivanja, dosadašnje iskustvo pokazuje da se potrebna svojstva betona u svežem i očvrslog stanju mogu dobiti ukoliko su u granulometrijskom sastavu agregata zastupljene određene proporcije, što se u stvari svodi na prihvatanje različitih referentnih granulometrijskih krivih predloženih od niza autora. Sve ovakve krive, u suštini, polazeći od različitih koncepata autora, iskazuju uslove za ostvarivanje optimalne "upakovanosti" zrna agregata, preko koje će se ostvariti najpovoljnija struktura betona.

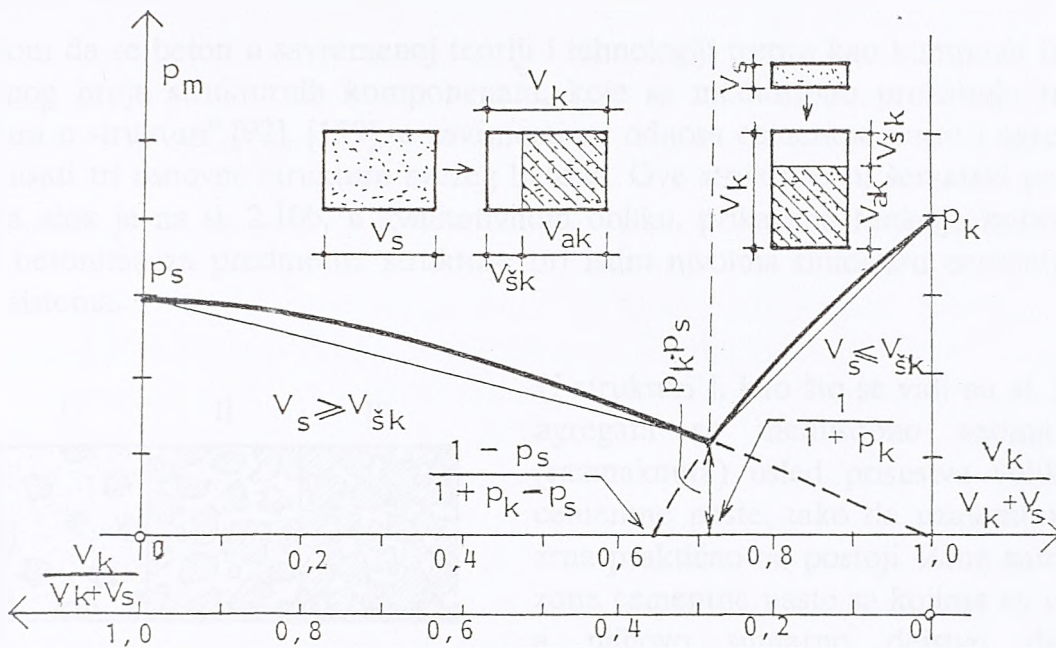
Vrlo jednostavno, ali ipak sa praktične tačke gledišta dovoljno tačno rešenje problema najbolje "upakovanosti" zrna, može se dobiti razmatranjem mešavina agregata kao nevezanih sistema sastavljenih od dve kategorije zrna - od krupnog i sitnog agregata. Pri ovome se još, iz razloga jednostavnije analize, može smatrati da se zrna ovako usvojenih frakcija značajno razlikuju po veličini, pa shodno tome pri mešanju zapremina V_s (sitnog agregata) i V_k (krupan agregat) ovih frakcija (sl. 2.9) mogu da se jave dva slučaja:

- slučaj kada je zapremina sitnog agregata veća ili jednaka zapremini šupljina između zrna krupnog agregata $V_{sk} = V_k \cdot p_k$ (p_k - poroznost - šupljine između zrna krupnog agregata);
- slučaj kada je $V_s \leq V_{sk}$ (poroznost - sadržaj šupljina između zrna sitnog agregata je takođe poznata i iznosi p_s).

U svežem betonu zrna agregata su, kao što je već napred objašnjeno, vezana u koherentnu celinu posredstvom cementne paste, pri čemu ova pasta treba ne samo da obavije sva zrna agregata, već i da u potpunosti ispuni sve prazne prostore - šupljine - između pojedinih zrna. Međutim, ne treba posebno objašnjavati da će se najpovoljnija svojstva betona, kako u svežem tako i u očvrslog stanju, dobiti primenom izvesne optimalne količine cementne paste, što istovremeno podrazumeva i primenu mešavine agregata odgovarajućeg granulometrijskog sastava.

Istraživanja i praksa pokazuju da se najpovoljniji tehno-ekonomski pokazatelji u odnosu na svojstva svežeg i očvrslog betona dobijaju izborom takvog granulometrijskog sastava koji će pri upotrebi određene mešavine frakcija garantovati najveću moguću "upakovanost" agregata, odnosno najmanji sadržaj šupljina između njegovih





Sl. 2.9 Poroznost mešavine agregata u funkciji odnosa krupne i sitne frakcije

U prvom od navedenih slučajeva poroznost mešavine agregata p_m može se definisati relacijom

$$p_m = \frac{(1 - c_k) \cdot p_s}{(1 - c_k \cdot p_k)}, \quad c_k \leq \frac{1}{(1 + p_k)}, \quad (2.1)$$

a u drugom relacijom

$$p_m = p_k - \frac{(1 - c_k)}{c_k} \cdot (1 - p_s), \quad c_k \geq \frac{1}{(1 + p_k)}, \quad (2.2)$$

gde je

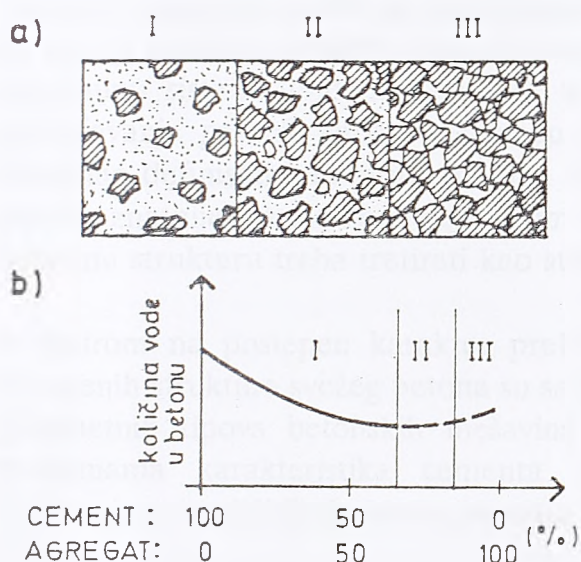
$$c_k = \frac{V_k}{V_k + V_s}. \quad (2.3)$$

Analizom dobijenih izraza može se zaključiti da poroznost mešavine p_m ima minimum $p_k \cdot p_m$ koji odgovara teorijskom slučaju kada je sitan agregat u stanju da u potpunosti ispuni sve prazne prostore između zrna krupnog agregata. Za uobičajene veličine poroznosti krupnog i sitnog agregata, koje se kreću u granicama od 0,3-0,5, ova minimalna poroznost se kreće između 0,12 i 0,15, što se dobija pri odnosu $c_k = 0,65-0,75$. Ovaj stav se vrlo dobro slaže sa odnosima koji se dobijaju analizom niza referentnih granulometrijskih krivih koje se danas primenjuju u tehnologiji betona.

Svi napred izneti zaključci su, kao što se vidi, vrlo jasno ilustrovani slikom 2.9.

2.1.4 Tipovi strukture svežeg betona

S obzirom da se beton u savremenoj teoriji i tehnologiji tretira kao kompozit formiran od određenog broja strukturnih komponenata, koje se međusobno prožimaju na principu "struktura u strukturi" [92], [139], u zavisnosti od odnosa cementne paste i agregata mogu se definisati tri osnovne strukture svežeg betona. Ove strukture su šematski prikazane na sl. 2.10a, dok je na sl. 2.10b, u kvalitativnom obliku, prikazana funkcija količine vode u svežim betonima za predmetne strukture pri istim nivoima fluidnosti cementne paste u sklopu sistema.



Sl. 2.10 Tipovi strukture svežeg betona

U strukturi I, kao što se vidi na sl. 2.10a, zrna agregata su međusobno veoma udaljena (razmaknuta) usled prisustva velike količine cementne paste, tako da uzajamno delovanje zrna praktično ne postoji. Zrna samo utiču na zone cementne paste sa kojima su u kontaktu, a njihovo sumarno dejstvo direktno je proporcionalno sadržaju, odnosno specifičnoj površini zrna. Pod ovakvim uslovima, s obzirom na ukupno veliku površinu čvrste faze, mešavina zahteva i određenu veću količinu vode za kvašenje zrna. Međutim, ako se ova količina pravilno usvoji, mešavina će imati dobru fluidnost, odnosno kompaktilnost, tako da praktično ne dolazi u pitanje njena ugradljivost i obradljivost.

U strukturi II cementne paste je manje (a to znači i cementa) i ona samo ispunjava prostore između zrna agregata, sa neznatnim razdvajanjem susednih zrna slojem "maziva" debljine 1-3 prečnika zrna cementa (do cca 0,06 mm). Pod ovakvim uslovima zone dejstva pojedinih zrna se preklapaju i javlja se dopunski efekat trenja. Ovakve mešavine, mada imaju daleko manju površinu čvrste faze, nemaju dovoljno veliku količinu vode za dobro kvašenje svih prisutnih zrna, pošto je sada u njima sadržana ukupno manja količina vode nego u prethodnom slučaju. Posledica ovoga je to da ovakve mešavine imaju lošiju ugradljivost i obradljivost od mešavina prvog tipa. Da bi u pogledu ugradljivosti i obradljivosti bile identične slučaju I, ovakve mešavine bi trebalo spravljati sa većim količinama vode, odnosno sa dodacima betonu tipa superplastifikatora, ili bi ih u fazi ugrađivanja trebalo izlagati uticajima koji će dovesti do smanjenja viskoznosti sistema.

U strukturi III cementne paste je malo; ona samo obavija zrna agregata tankim slojem, a prostore između zrna ispunjava delimično. Fluidnost ovakvih mešavina je praktično zanemarljiva i pri njihovom ugrađivanju, ako se ono uopšte može efikasno ostvariti, mora se ići na primenu naročitih tehnoloških postupaka.

Svaka od opisanih struktura ima svoje zakonitosti i određena svojstva. U odnosu na strukturu I odlučujući značaj imaju svojstva cementa; njena reološka svojstva se dovoljno

tačno određuju zavisnostima koje odgovaraju pravim viskoznim tečnostima. U strukturi II je od značaja i agregat, odnosno kohezivnost njegovih zrna uslovljena prisustvom cementne paste; ova struktura u suštini najviše odgovara definiciji strukturirane tečnosti. Agregat posebno značajno utiče na svojstva strukture III; reološka svojstva mešavina sa ovakvim strukturama treba opisivati vodeći računa i o značajnom uticaju tzv. suvog trenja.

Ako se pretpostavi da se u okviru cementne paste sve više povećava sadržaj agregata, moći će da se registruje postepen prelaz od jedne strukture ka drugoj. Prelazi će se prvo zapažati u okviru manjih delova zapremine, da bi se postepeno proširili i na celokupnu zapreminu svežeg betona. Pri prelazu strukture II u strukturu III, pri srazmerno malom "manjku" cementne paste za popunjavanje prostora između zrna agregata, u sveži beton će se pri mešanju uvlačiti mehurići vazduha koji će u izvesnoj meri prividno povećati zapreminu sistema (videti sliku 2.7), u prvom redu cementne paste, i time omogućiti zapunjavanje praznih prostora između zrna agregata. Iz tih razloga takve strukture je pravilnije definisati kao strukture tipa II. Međutim, kada se učešće agregata u mešavini poveća znatnije i kada se u vezi s tim značajnije poveća i volumen uvučenog vazduha, dobijenu strukturu treba tretirati kao strukturu III.

S obzirom na postepen karakter prelaza iz jedne strukture u drugu, granice između navedenih struktura svežeg betona su samo uslovne pa su uslovne i pojedine karakteristike predmetnih tipova betonskih mešavina. Ove granice se mogu značajno pomerati pri promenama karakteristika cementa i agregata, pri promeni fluidnosti mešavine korišćenjem različitih dodataka betonu, pri promeni postupka ugrađivanja i na niz drugih načina.

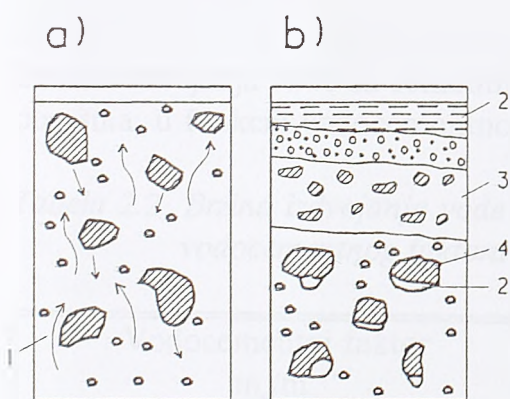
Konkretan tip strukture ostvaren u svežem betonu određuje njegove tehnološke karakteristike (ugradljivost i obradljivost), a u krajnjoj liniji i praktično sva svojstva očvrsllog betona. Znači, tip strukture u velikoj meri utiče na sposobnost svežeg betona da primenom određenog postupka zbijanja (kompaktiranja) homogenom masom u potpunosti ispuni sve prostore ograničene oplatom (kalupom), a takođe utiče i na mogućnost završne obrade površine betona, što sve zajedno opredeljuje karakteristike očvrsllog kompozita.

U praksi se u najvećem broju slučajeva koriste betonske mešavine koje po strukturi odgovaraju tipu II. Mešavine sa ovakvom strukturom po pravilu omogućavaju dobijanje vrlo kompaktnih betona, što je jedan od osnovnih činilaca u odnosu na zadovoljavanje zahtevanih uslova kvaliteta. Kao što se može zaključiti na osnovu prethodnih izlaganja, ukoliko se formira povoljna struktura svežeg betona, i ona održi tokom vremena, ostvarena struktura će se preslikati na strukturu očvrsllog betona, tako da će i očvrslili beton, zahvaljujući povoljnoj strukturi, moći da zadovolji sve uslove koji se pred njega postavljaju.

2.1.5 Mogući defekti strukture svežeg betona

Međutim, u praksi se često dešava da se tokom vremena u svežem betonu događaju različite promene u smislu narušavanja početne strukture dobijene neposredno nakon homogenizacije komponenata. Naime, usled nedovoljne povezanosti (kohezivnosti), može da dođe do izdvajanja nekih delova iz inače heterogene betonske mešavine, i da se dobije

izrazito neujednačen prostorni raspored sastojaka. Do ovakvih pojava, koje u suštini predstavljaju defekte strukture, uvek dolazi usled delovanja nekih spoljašnjih mehaničkih uticaja na betonsku mešavinu, uključujući tu i delovanje sile teže. Ovakve pojave se najviše ispoljavaju tokom transporta, ugrađivanja i završne obrade betona, ali i docnije, u periodu nakon završne obrade, kada zbog nedovoljne kohezivnosti dolazi do izdvajanja vode i cementne paste, do segregacije (razdvajanja) krupnijih zrna od sitnijih i sl. Kao što je napred već rečeno, na karakteristiku kohezivnosti betonske smeše od posebnog značaja je prisutna količina vode, pa kod smeša spravljenih sa većim količinama vode, u slučajevima delovanja mehaničkih uticaja, dolazi do zbližavanja čvrstih komponenata i do kretanja vode na gore. Voda će pod ovakvim uslovima zaobilaziti zrna agregata stvarajući kapilarne kanale, a pored toga ona će se sakupljati ispod zrna krupnog agregata stvarajući tzv. "džepove" vode, što sve pogoršava strukturu betona i utiče na njegova svojstva. Slika 2.11a prikazuje kretanje vode (1) i čvrstih čestica prilikom potresanja (vibriranja) svežeg betona, dok je na slici 2.11b predstavljena šema raslojene smeše u okviru koje figurišu voda (2), sitan agregat (3) i krupan agregat (4). Ovde treba reći da se pojava raslojavanja, odnosno segregacije betonske smeše, može izbeći upotrebom odgovarajuće količine cementa i sitnog agregata, odnosno prisustvom određene količine čestica do 0,125 mm, ali i do 0,25 mm. Kod betona ovakvog sastava u optimalnoj meri se popunjavaju svi prostori između zrna i time utiče na povećanje sila međudejstva između krupnog agregata i malterske komponente svežeg betona, odnosno između konstituenata same malterske komponente.



Sl. 2.11 Raslojavanje betonske mešavine

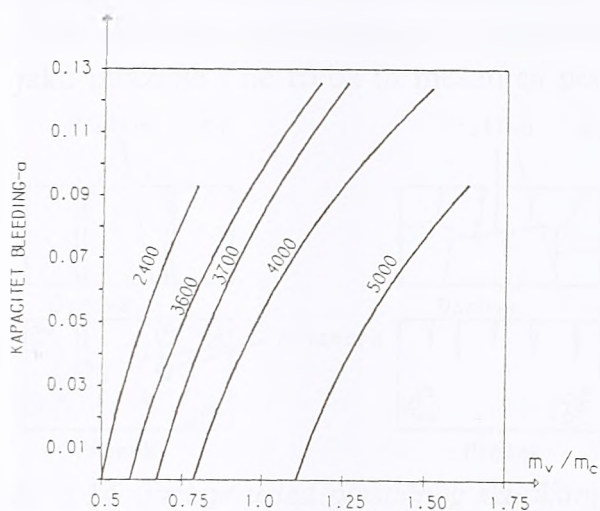
Prema Pauersu [31], kod izdvajanja vode, koje je moguće sve dok se cementna pasta ne stegne toliko da se obustavi proces sedimentacije, treba razlikovati brzinu, kapacitet i trajanje. Na ovu pojavu, osim količine vode u svežem betonu, svakako utiču još i vrsta i količina cementa, temperatura, prisustvo dodataka - aditiva (naročito aeranata) i dr. Uticaj finoće mliva i vodocementnog faktora na kapacitet izdvajanja vode (bleeding) prikazan je na slici 2.12, dok je na slici 2.13 prikazan uticaj količine cementa na izdvajanje vode, za različite vrednosti sleganja svežeg betona.

Kapacitet izdvajanja vode, koji predstavlja zapreminu izdvojene vode u odnosu na jediničnu zapreminu betona, prema Pauersu je uvek niži kod betona nego kod cementne paste. Naprotiv, brzina izdvajanja vode, koja je data jednačinom

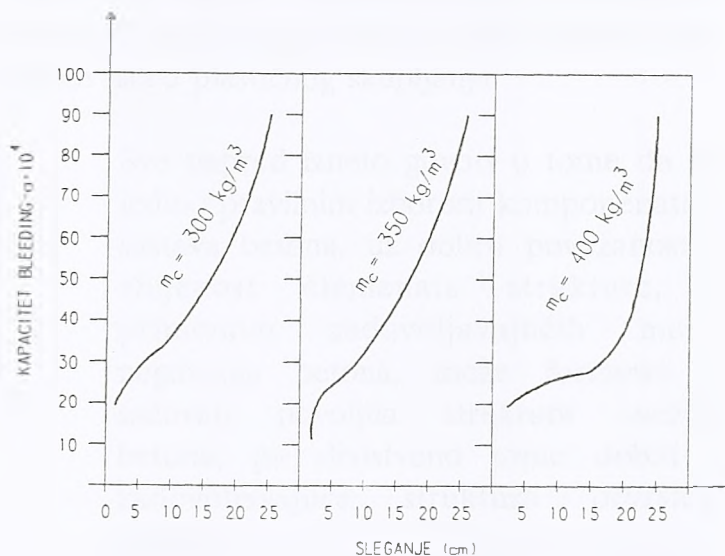
$$\frac{Q_b}{Q_p} = \left(\frac{p}{v}\right)^2 (1+M) \frac{(\gamma_{sb} - \gamma_{sv})}{(\gamma_{sc} - \gamma_{sv})} \cdot \frac{1}{1+M(\sigma_i/\sigma_c)}, \quad (2.4)$$

kod betona je uvek veća nego u cementnoj pasti, što je posledica veće specifične mase betona koja proizvodi veći hidraulički pritisak.

Simboli koji figurišu u izrazu (2.4) imaju sledeća značenja: Q_p - brzina izdvajanja vode u cementnoj pasti, Q_b - brzina izdvajanja vode u betonu, p/v - udeo zapremine paste (p) u odnosu na beton (v), M - odnos zapremine zauzete cementnom i inertnom komponentom, γ_{sb} , γ_{sc} , γ_{sv} - specifične mase betona, cementa i vode, σ_i i σ_c - specifične površine inertne komponente i cementa.



Sl. 2.12 Uticaj odnosa m_v/m_c i finoće mliva na izdvajanje vode



Sl. 2.13 Uticaj količine cementa na izdvajanje vode za različite vrednosti sleganja

Brzina izdvajanja vode za cementnu pastu prema Pauersu, za cimente različitih specifičnih površina, u funkciji vodocementnog faktora, prikazana je u tabeli 2.2.

Tabela 2.2 Brzina izdvajanja vode u cementnoj pasti ($cm/s \cdot 10^6$) u funkciji vodocementnog faktora i specifične površine cementa

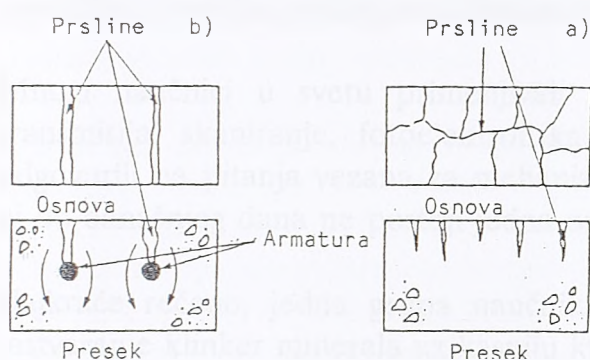
Vodocementni faktor m_v/m_c	Specifična površina (cm^2/g)	
	2045	2550
0,26	17	9
0,32	38	20
0,39	73	40
0,48	133	75
0,59	223	128
0,74	-	213

Dodaci betonu tipa aeranata, a i pojedini plastifikatori i superplastifikatori, smanjuju izdvajanje vode putem povećanja specifične površine i smanjenja specifične mase čvrstog medijuma.

Ako dođe do isparavanja vode sa površine betona, bez njenog nadoknađivanja, javlja se još jedno narušavanje strukture svežeg betona (defekt strukture) - pojava prslina usled tzv. plastičnog skupljanja. Ovakvi defekti se javljaju u prvih nekoliko časova po ugrađivanju

betona i manifestuju se u obliku kratkih, mrežastih prslina (sl. 2.14a), koje su posledica značajnog zblizavanja čestica sadržanih u svežem betonu usled gubitka vode.

U prvih nekoliko časova po ugrađivanju kod svežeg betona mogu se javiti i prsline usled sleganja ("sedanja"), i to na mestima promene debljine betona (oblika preseka) i u površinskim zonama iznad armature (sl. 2.14b). Ove prsline, koje se pružaju po različitim privilegovanim pravcima, npr. u pravcu armaturnih šipki, mogu da budu većih dužina i vrlo jako izražene i ne treba ih mešati sa prslinama usled plastičnog skupljanja.



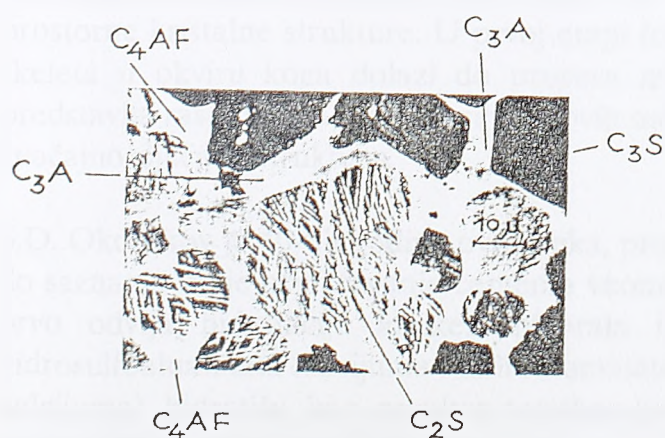
Sl. 2.14 Prsline usled plastičnog skupljanja (a) i usled "sedanja" betona (b)

Sve napred izneto govori o tome da se jedino pravilnim izborom komponenata i sastava betona, uz dobru povezanost i zbijenost elemenata strukture, i primenom zadovoljavajućih mera negovanja betona, može formirati i sačuvati povoljna struktura svežeg betona, pa sledstveno tome dobiti i zadovoljavajuća struktura očvrslog betona.

2.2 HIDRATACIJA CEMENTA - FORMIRANJE STRUKTURE OČVRSLOG BETONA

2.2.1 Teorije hidratacije

Kao što je poznato, portland cement ima vrlo složen mineraloški sastav. Ovaj sastav čini niz kristalnih i jedna staklasta faza, a ove se faze međusobno razlikuju kako po hemijskom sastavu, tako i po optičkim (kristalografskim) osobinama. Osnovne mineralne komponente prisutne u portland cementu su tzv. klinker minerali: trikalcijumsilikat (C_3S -alit), dikalcijumsilikat (C_2S -belit), trikalcijumaluminat (C_3A -celit) i tetrakalcijumaluminoforit (C_4AF -zelit) - sl. 2.15 [34].



Sl. 2.15 Mikrofotografija konstituenata portland cementa

Treba istaći da je režim hlađenja klinkera, čijom se meljavom dobija portland cement, veoma značajan, jer on bitno utiče na njegovu strukturu, mineraloški sastav, na odnos kristalne i staklaste faze, pa u krajnjoj liniji i na proizvode hidratacije. Brzim hlađenjem zamrzava se ravnotežna faza koja odgovara temperaturi sinterovanja, tako da se dobija veća količina minerala C_3S , kao i minerala C_2S u β obliku, koji poseduje željena hidraulička svojstva. Količina stakla u

komercijalnim klinkerima, ustanovljena postupkom merenja toplote rastvaranja, kreće se između 2-21% [106] i ima naročito uticaja na sastav minerala C_3A i C_4AF .

Pod hidratacijom se podrazumeva reakcija i klinker minerala sa vodom, pri čemu se kao njen rezultat javljaju čvrsti produkti - hidrati koji zapreminu prvobitno zauzetu cementom i vodom - cementnom pastom - zapunjavaju gustim sistemom čestica gela; ove čestice, pak, predstavljaju nosioce strukturne čvrstoće novog sistema - cementnog kamena. Proces hidratacije je izvanredno kompleksan i vrši se na granici faza tečno-čvrsto, pri čemu se specifična površina produkata hidratacije enormno povećava.

Mnogi naučnici u svetu primenjivali su različite tehnike (elektronska mikroskopija, transmisija, skaniranje, fotoelektronska spektrometrija, difrakcija x-zraka i dr.), da bi odgovorili na pitanja vezana za mehanizam hidratacije i rezultujuću strukturu. Međutim, ni do današnjeg dana ne postoji jedna opšte prihvaćena teorija hidratacije [16], [133].

Najkraće rečeno, jedna grupa naučnika smatra da u osnovi hidratacije cementa leži rastvaranje klinker minerala uz kasniju kristalizaciju i taloženje produkata hidratacije, dok druga grupa smatra osnovnim direktne reakcije vode i cementa (tzv. topohemijski mehanizam). Na primer, Lešateljje, koji je među prvima proučavao ovo pitanje (1882-1887), nosilac je tzv. kristalizacione teorije, koja pretpostavlja isključivo formiranje kristalnog sistema od kristala - produkata hidratacije minerala cementa - dobijenih iz tzv. prezasićenih rastvora.

Mihaelis (1893) je, pak, zastupnik koloidne teorije po kojoj se pri hidrataciji formiraju hidrogeli silikata, aluminata i ferita kalcijuma, dok Bajkov (1907-1925) pretpostavlja formiranje kristalnih produkata kroz proces prethodnog obrazovanja koloida (koloidno-kristalizaciona teorija).

Rebinder (1950) je tvorac tzv. koagulaciono-kristalizacione teorije po kojoj je prvi stadijum procesa hidratacije prelaz jona iz rešetki minerala cementa u vodenu sredinu, drugi stadijum hidratacija klinker minerala, i na kraju kristalizacija iz prezasićenih rastvora, uz formiranje koagulacione strukture. Na osnovu ispitivanja Rebinder je zaključio da se navedena kristalizacija odvija u dve etape i da se njom obezbeđuje stvaranje čvrstog skeleta prostorne kristalne strukture. U prvoj etapi formira se struktura osnovnog kristalizacionog skeleta u okviru koga dolazi do procesa međukristalnog srastanja. Druga etapa, pak, predstavlja rast kristala, bez stvaranja novih međukristalnih kontakata, pri čemu ovaj proces značajno ojačava strukturu.

S.D. Okorokov je 40-tih godina ovog veka, proučavajući hidrataciju cementa, takođe došao do saznanja da je očvršćavanje cementa veoma kompleksan proces, i da se u okviru njega prvo odvija hidratacija klinker minerala C_3A , koja kao rezultat ima obrazovanje hidrosulfoaluminata kalcijuma i hidroaluminata kalcijuma, a da drugi deo minerala (silikati kalcijuma) hidratišu kao rezultat topohemijskih (koloidno-hemijskih) reakcija, što je u saglasnosti sa stavovima Bajkova.

Bernal (1952) polazi od stava da je hidratacija prosto mehaničko preplitanje formiranih

kristala, što je slično šemi predloženoj od strane Lešatelijeja. Zavisno od stepena orijentacije zrna cementa, prema Bernalu, povećava se broj spojenih - vezanih kristala i smanjuje zapremina "praznih" prostora između zrna, što doprinosi zgušnjavanju sistema i njegovoj transformaciji u telo veće monolitnosti.

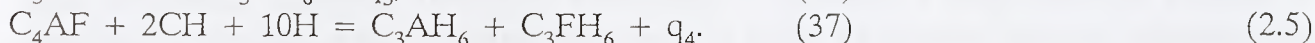
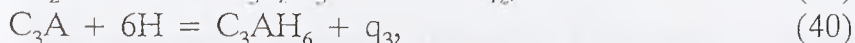
Pedesetih godina ovog veka Bog je na bazi primene elektronske mikroskopije dao šemu ojačanja cementnog kamena na bazi pojave sitnih sfernih čestica koje se formiraju pri hidrataciji cementa. Po Bogu, ove čestice imaju visoku površinsku energiju, što se odražava na njihovo snažno međusobno privlačenje, na njihovo srastanje u agregate i na formiranje gusto upakovanog gela.

Danas su, međutim, dugogodišnje diskusije o kristaličnosti ili koloidnosti produkata hidratacije skoro potpuno prekinute, jer su primenom savremenih tehnika ispitivanja dobijene kompleksne i vrlo pouzdane informacije o strukturnim karakteristikama cementnog kamena. Naime, blagodareći elektronskoj mikroskopiji dokazano je da je i cementni gel - osnovni konstituent cementnog kamena - u suštini kristalične strukture, ali sa izuzetno visokim stepenom disperznosti svojih elemenata tj. sa vrlo malim dimenzijama kristala (submikrokristali). Drugim rečima, u slučaju cementog gela radi se o kristaličnoj strukturi sa koloidnom disperzijom.

2.2.2 Hemijske reakcije pri hidrataciji

Nezavisno od napred navedenih teorija, ispitivanja su pokazala da se tokom hidratacije cementa odigrava izvestan broj potpuno definisanih hemijskih reakcija, što je u vezi sa činjenicom da su sva četiri osnovna klinker minerala portland cementa po svojoj prirodi kalcijumove soli veoma slabih kiselina. Pošto takve soli poseduju energetski nestabilnu kristalnu rešetku, one veoma lako reaguju sa vodom, podvrgavajući se pri tom prvo razlaganju (hidroliza), a docnije i hidrataciji (neposredno vezivanje nekoliko molekula vode) [66]. Drugim rečima, klinker minerali su u većoj ili manjoj meri rastvorljivi u vodi, ali su zato produkti hidratacije ovih minerala (izuzev CaO) u vodi praktično nerastvorljivi.

Posle mešanja portland cementa sa vodom, ona se veoma brzo zasićuje krečom dobijenim prvenstveno hidrolizom trikalcijumsilikata i trikalcijumaluminata, pa koncentracija kreča postaje veća od granične za sve ostale minerale (posle njihove hidratacije). Na ovaj način stvaraju se uslovi za odvijanje osnovnih reakcija hidratacije koje mogu da se predstavje sledećim jednačinama:



Kao što se vidi, u ispisanim relacijama korišćene su uobičajene skraćene oznake za pojedine konstituente klinker minerala i to: $CaO \hat{=} C$, $SiO_2 \hat{=} S$, $Al_2O_3 \hat{=} A$ i $Fe_2O_3 \hat{=} F$, kao i one koje se koriste za vodu $H_2O \hat{=} H$ i kalcijumhidroksid $Ca(OH)_2 \hat{=} CH$. Vrednosti ispisane u zagradama iza pojedinih jednačina, pak, predstavljaju masene delove vode koja

je potrebna za potpunu hidrataciju 100 delova pojedinih klinker minerala, što je 1959. utvrdio Černin [34]. Veličine q_i ($i = 1,2,3,4$) su količine toplote koje se oslobađaju pri navedenim hemijskim reakcijama.

Kao što se vidi iz relacija (2.5), minerali C_3S i C_2S traže približno istu količinu vode za hidrataciju, međutim, mineral C_3S proizvodi pri hidrataciji oko 40% $Ca(OH)_2$, što je preko dva puta veće od količine $Ca(OH)_2$ koji se stvara pri hidrataciji C_2S .

Kao što se vidi iz napred ispisanih relacija, jedna od važnih karakteristika procesa hidratacije je oslobađanje određene količine toplote - toplote hidratacije. Ukupna toplota hidratacije cementa jednaka je zbiru toplote koje se razvijaju tokom hidratacije pojedinih klinker minerala. Ove toplote, izražene u J/g, prikazane su u tabeli 2.3 kao funkcije vremena, tj. kao funkcije trajanja procesa hidratacije [91].

Tabela 2.3 Toplote hidratacije klinker minerala (J/g)

Minerali	Trajanje procesa hidratacije (t)					
	3 dana	7 dana	28 dana	3 meseca	6 meseci	$t \rightarrow \infty$
C_3S	406	461	486	519	566	670
C_2S	63	105	168	197	230	352
C_3A	591	662	876	930	1026	1090
C_4AF	176	252	377	415	-	570

Važno je istaći da se hidrataciona toplota sastoji iz dva dela: hemijske toplote, nastale usled same reakcije hidratacije, i toplote koja se javlja usled adsorpcije vode na površinama gela formiranog u procesu hidratacije.

Iz tabele 2.3 se vidi da minerali C_3S i C_3A imaju visoke toplote hidratacije, pri čemu C_3A pokazuje i vrlo brz priraštaj ove toplote. Treba istaći da se na veličinu toplote hidratacije može uticati ne samo promenom mineraloškog sastava cementa (posebno sadržaja C_3A i C_3S), već i finoćom mliva; cementi grubljeg mliva imaju nižu toplotu hidratacije.

Pošto su nakon mešanja portland cementa sa vodom hidrolizi prvenstveno izloženi trikalcijum aluminat i trikalcijum silikat, proizilazi da je proces hidratacije u osnovi selektivan i da on u principu započinje reakcijama ovih minerala sa vodom. Ovde takođe treba istaći da su saglasno eksperimentalnim istraživanjima produkti hidratacije minerala C_3S i C_2S u najvećem obimu u obliku gela, dok u slučaju minerala C_3A i C_4AF kao produkti hidratacije nastaju kristalna jedinjenja [16].

Osim navedenih osnovnih minerala, hidrolizuju i hidratišu i drugi sastojci prisutni u cementu. Na primer, kada staklasta faza dođe u dodir sa vodom, nastaju produkti koji imaju sastav između $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$ i $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot 6H_2O$. Isto tako, pri hidrolizi i eventualno prisutne alkalije prelaze u rastvor, pa se, ukoliko ima slobodnog CaO i MgO , dobijaju odgovarajući hidroksidi koji povećavaju svoju zapreminu.

Treba naglasiti da se reakcija između C_3A i vode odvija veoma burno i brzo, tako da bi to

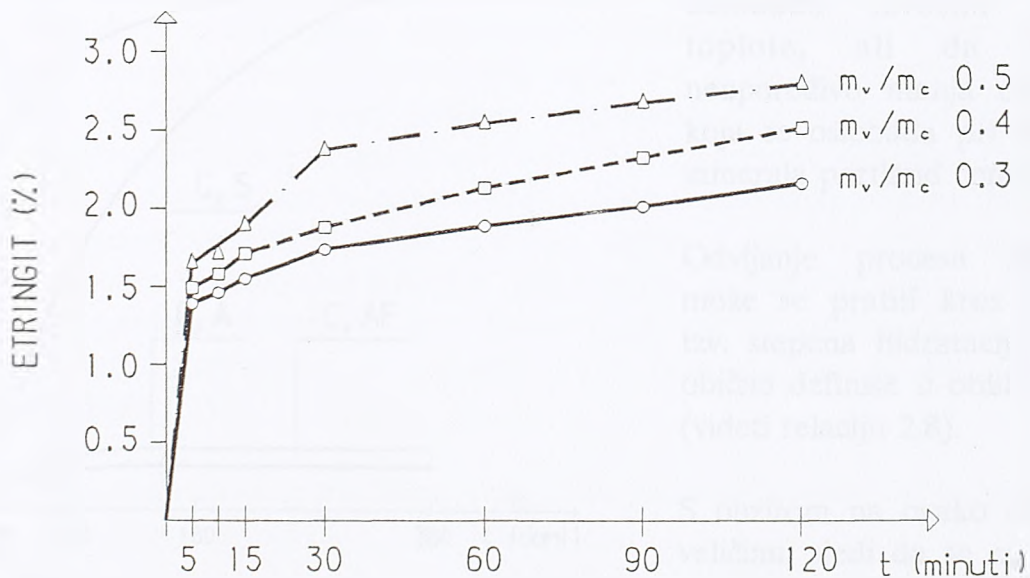
dovelo do prebrzog gubitka plastičnosti i praktično trenutnog "vezivanja" portland cementa. Zbog navedene reakcije, cementu se uvek dodaje gips, koji ima zadatak da uspori proces hidratacije trikalcijumaluminata. Ovo se može prikazati jednačinom



Znači, pri reakciji gipsa sa trikalcijumaluminatom dolazi do stvaranja dvogube soli - sulfoaluminata - koji kristališe u obliku igličastih kristala i vezuje, kao što se vidi, tridesetjedan molekula vode; ovo jedinjenje naziva se etringit ili "cementni bacil" (ovaj naziv potiče stoga što se isto jedinjenje stvara pri sulfatnoj koroziji cementa, ukoliko je u njemu prisutan veći procenat minerala C_3A). Pri ovoj reakciji, kao što se vidi, takođe se oslobađa izvesna toplota - q_5 .

Usporavanje procesa hidratacije portland cementa je rezultat vrlo brzog formiranja etringita i stvaranja određenih kristalnih ljuski oko cementnih zrna. Na ovaj način otežava se pristup vode do cementa i usporava hidratacija [81].

Brzina formiranja etringita u zavisnosti od vodocementnog faktora prema Benstedu [9] prikazana je na slici 2.16. Kao što se vidi, oko 50% etringita formira se već nakon 5 minuta.



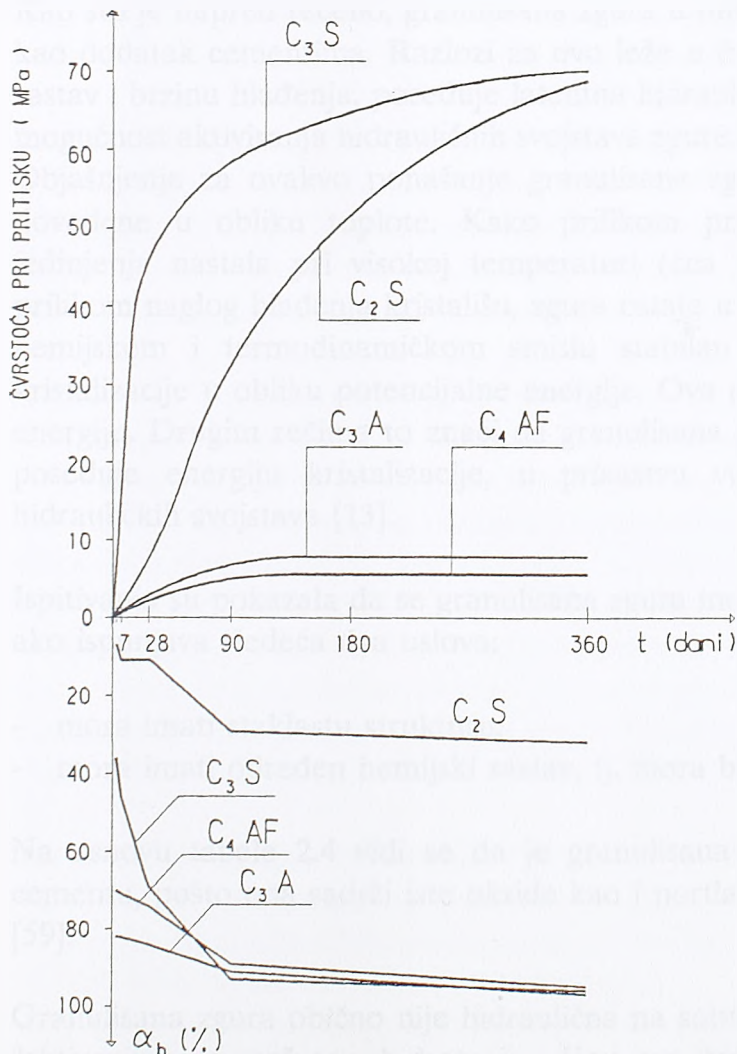
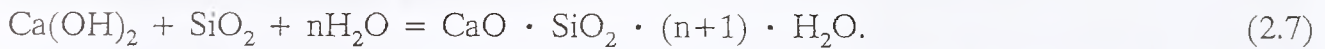
Sl. 2.16 Brzina formiranja etringita u zavisnosti od vodocementnog faktora

Kao što pokazuju napred ispisane jednačine (2.5), pri hidrataciji klinker minerala C_3S i C_2S stvara se hidrosilikat kalcijuma $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ (tzv. sistem C-S-H), koji se veoma često, zbog svoje sličnosti sa prirodnim mineralom istog sastava, naziva i Tobermoritov gel. Međutim, neki naučnici, na primer Tejlor [31], izbegavaju da nazovu ovaj produkt hidratacije imenom tobermorit, već insistiraju da se on naziva gel trikalcijum-silikathidrat, pri čemu se pozivaju na njihove različite difraktograme.

Hidratacijom minerala C_3A i C_4AF dobijaju se C_3AH_6 i C_3FH_6 - trikalcijum aluminat hidrat i trikalcijum ferit hidrat. Može se takođe uočiti da je produkt hidratacije minerala C_3S i C_2S uvek i kalcijumhidroksid - $\text{Ca}(\text{OH})_2$, koji se dobija u obliku kristala. Ovo je jedna od

vrlo važnih karakteristika hemizama koji se odigravaju tokom hidratacije portland cementa, i ona, između ostalog, omogućava da se portland cement meša sa različitim materijalima koji poseduju pucolanska, odnosno latentna hidraulička svojstva. S tim u vezi danas se vrlo široko proizvode cementi kod kojih je portland cement samo jedna od komponenata, dok su ostale komponente različiti dodaci (pucolani, zgure) čija se vezivna svojstva aktiviraju zahvaljujući prisustvu $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Reakcije između navedenih dodataka portland cementu moguće su stoga što svi oni, kao i portland cement, sadrže iste okside (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3). Na taj način, u okviru produkata hidratacije ovakvih cemenata, prisutni su i neki novi hidrosilikati, hidroaluminati i hidroferiti kalcijuma, pri čemu se, logično, nakon ovoga, kao produkt hidratacije, u okviru cementnog kamena dobija smanjena količina $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Kao karakteristična reakcija koja će ilustrovati ovo "trošenje", odnosno vezivanje kalcijumhidroksida, može da posluži reakcija između $\text{Ca}(\text{OH})_2$ rastvorenog u vodi i SiO_2 prisutnog u upotrebljenom pucolanskom dodatku, čiji je produkt sledeći hidrosilikat kalcijuma nerastvoran u vodi:



Ispitivanja pokazuju da se pri ovakvim hemijskim reakcijama oslobađa izvesna količina toplote, ali da je ona neuporedivo manja od toplote koja se oslobađa pri hidrataciji minerala portland cementa.

Odvijanje procesa hidratacije može se pratiti kroz promenu tzv. stepena hidratacije, koji se obično definiše u obliku odnosa (videti relaciju 2.8).

S obzirom na ovako definisanu veličinu, sledi da se α_h kreće u granicama od 0 do 1, pri čemu prva vrednost odgovara cementnoj pasti neposredno nakon mešanja cementa i vode, a druga slučaju potpune (stoprocentne) hidratacije.

Produkti hidratacije cementa razlikuju se i po čvrstoći. Kao što pokazuje slika 2.17, glavni nosioci čvrstoće cementnog kamena su silikati kalcijuma.

Sl. 2.17 Čvrstoće pri pritisku i stepeni hidratacije pojedinih klinker minerala

Naročito brz prirast čvrstoće imaju produkti hidratacije minerala C_3S , što se objašnjava prisustvom karakterističnih otvorenih šupljina u njegovoj strukturi koje se mogu ispuniti $(OH)^-$ jonima, i dovesti do brže hidratacije. Mineral C_2S nema tako brz prirast čvrstoće, međutim, tokom vremena produkti hidratacije ovog minerala praktično se izjednačavaju po čvrstoćama sa produktima minerala C_3S . Na slici 2.17 prikazani su i stepeni hidratacije (u %) pojedinih klinker minerala u funkciji vremena [16], [91].

$$\alpha_h = \frac{\text{količina hidratisanog cementa}}{\text{ukupna količina cementa}} \quad (2.8)$$

Zbog danas vrlo značajne primene cemenata sa dodatkom zgure, a posebno zbog pravca istraživanja u okviru ovog rada, o zguri i hidrataciji cemenata sa zgurom biće posebno reči u narednom poglavlju.

2.2.3 Hidratacija cementa sa zgurom

Kao što je napred rečeno, granulisana zgura u fino samlevenom obliku može da se koristi kao dodatak cementima. Razlozi za ovo leže u činjenici da ova zugra, s obzirom na svoj sastav i brzinu hlađenja, poseduje latentna hidraulička svojstva. Pod ovim se podrazumeva mogućnost aktiviranja hidrauličnih svojstava zgure u prisustvu određenih mineralnih veziva. Objašnjenje za ovakvo ponašanje granulisane zgure leži u načinu preobražaja energije dovedene u obliku toplote. Kako prilikom proizvodnje granulisane zgure, hemijska jedinjenja nastala pri visokoj temperaturi (cca $1400^{\circ}C$) nemaju dovoljno vremena da prilikom naglog hlađenja kristališu, zgura ostaje u staklastom stanju, koje ne predstavlja u hemijskom i termodinamičkom smislu stabilan sistem i koje u sebi sadrži toplotu kristalizacije u obliku potencijalne energije. Ova energija predstavlja latentnu hidrauličku energiju. Drugim rečima to znači da granulisana zgura, kao nestabilan sistem, budući da poseduje energiju kristalizacije, u prisustvu vode daje stabilna kristalna jedinjenja hidrauličkih svojstava [13].

Ispitivanja su pokazala da se granulisana zgura može smatrati latentno hidrauličnom samo ako ispunjava sledeća dva uslova:

- mora imati staklastu strukturu,
- mora imati određen hemijski sastav, tj. mora biti dovoljno bazična.

Na osnovu tabele 2.4 vidi se da je granulisana zgura po sastavu vrlo slična portland cementu, pošto ona sadrži iste okside kao i portland cement, ali u drugim odnosima [13], [59].

Granulisana zgura obično nije hidraulična na sobnoj temperaturi i ona zahteva određenu "aktivaciju" za početnu hidrataciju. Koncept hidratacije cementa sa dodatkom zgure pretpostavlja aktiviranje zgure na jedan od sledećih načina: hemijski (dodatkom jakih alkalija, sulfata i dr.), mehanički (finim mlevenjem) ili termički.

Tabela 2.4 Prosečan hemijski i mineraloški sastav baznih granuliranih zguira

Hemijski sastav				Prisutni minerali
35	-	39,05 %	SiO ₂	Gelenit 2CaO · Al ₂ O ₃ · SiO ₂ ;
9,6	-	23,44 %	Al ₂ O ₃	Akermanit 2CaO · MgO · 2SiO ₂ ;
0,6	-	1,46 %	Fe ₂ O ₃	Melilit - smeša gelenita i akermanita, moguće prisustvo oksida gvožđa, mangana i baza
0,46	-	1,11 %	FeO	α - dikalcijumsilikat - α - 2CaO · SiO ₂ ;
0,67	-	5,61 %	MnO	β - dikalcijumsilikat - β - 2CaO · SiO ₂ ;
0,08	-	2,16 %	MgO	γ - dikalcijumsilikat - γ - 2CaO · SiO ₂ ;
29,34	-	52,0 %	CaO	Pseudovolastonit
0,32	-	2,38 %	S	

Pored jakih alkalija, ispitivanja su pokazala da i portland cement može da bude hemijski aktivator zguire, samim tim što pri svojoj hidrataciji oslobađa kalcijumhidroksid. Isto tako, ispitivanja su pokazala [13] da ako se ne bi primenila aktivacija, proces bi tekao toliko sporo da bi trebalo nekoliko meseci da se evidentiraju produkti hidratacije.

Reaktivnost same zguire (procenat staklaste faze, sastav ove faze, finoća mliva) igra veoma važnu ulogu u procesu hidratacije i naročito utiče na njen prvi stadijum. Dalje, na hidrataciju utiče još i prisustvo aktivnih centara u staklastoj fazi - tj. različiti hemijski i fizički defekti, zatim već istaknuto postojanje alkalne sredine, kao i prisustvo drugih komponentata koje mogu da se pretvore u proizvode sa niskom slobodnom energijom.

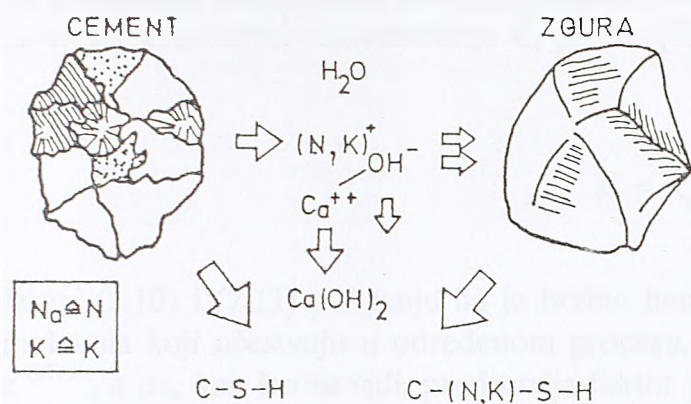
Istraživanja su pokazala da je za proces hidratacije portland cementa sa zgurom karakteristično to da se u jednom momentu proces inhibira (usporava) formiranjem nepropustljivih kiselih gela na površini zrna zguire, međutim, u prisustvu kalcijumhidroksida, ova površinska prevlaka se razara i hidratacija se nastavlja [13], [42]. Slično se dešava i ako se, umesto Ca(OH)₂, kao aktivatori upotrebe NaOH ili CaSO₄ · 2H₂O.

U poređenju sa hidratacijom portland cementa, reakcija hidratacije portland cementa sa dodatkom zguire je sporija i zahteva veću energiju aktivacije. Tako, na primer, ako energija aktivacije za čist portland cement iznosi 46 kJ/mol, za cement sa dodatkom 80% zguire iznosi 50 kJ/mol [126].

Što se tiče produkata hidratacije, Nurs [126] je 1964. godine identifikovao u hidratisanom portland cementu sa zgurom sledeće konstituente:

- fazu kalcijumsilikathidrata sličnu tobermoritu;
- fazu kalcijumsulfoaluminata tipa etringita;
- heksagonalni aluminijumhidrat, kalcijumaluminatmonosulfathidrat i različite čvrste rastvore;
- kalcijumhidroksid.

Kao što se vidi, produkti hidratacije portland cementa sa dodatkom zguire su veoma slični



Sl. 2.18 Šema hidratacije cementa sa zgurom u ranoj fazi

onima za čist portland cement [66], [134], [143]. Najvažnija faza je svakako, kao i kod čistog portland cementa, faza slična tobermoritu, s tim što je C-S-H faza u velikoj meri zamenjena jonima Mg^{2+} , Al^{3+} i Na^+ , dok je količina $\text{Ca}(\text{OH})_2$ daleko manja nego u slučaju čistog portland cementa. Na slici 2.18 prikazana je šema nastanka produkata hidratacije cementa sa dodatkom zgurom u ranoj fazi procesa, na osnovu [126].

2.2.4 Faze formiranja strukture cementnog kamena

Struktura cementnog kamena formira se u izvesnom vremenskom periodu koji je, sasvim logično, određen kinetikom procesa hidratacije. Ovaj proces po svojim bitnim odlikama pripada tzv. heterogenim hemijskim reakcijama koje karakteriše odvijanje hemizama na površinama koje predstavljaju granice dve ili više faza sistema. U slučaju hidratacije, to podrazumeva da reakcije teku na granici između zrna cementa i prisutne vode, pri čemu za slučaj jedne takve reakcije izraz koji definiše brzinu ima oblik

$$v = k \cdot C \quad (2.9)$$

(k - konstanta brzine reakcije, C - koncentracija supstance koja se stvara ili gubi tokom hemijskog procesa).

Konstanta k koja figuriše u ispisanom izrazu zavisi, između ostalog, i od reakcione površine, što znači da će brzina reakcije hidratacije bitno zavisiti i od finoće mliva cementa; pri većim finoćama mliva, logično, brzina hidratacije će biti veća.

Relacija (2.9) važi za slučaj određene konstantne temperature T, a ako se u odnosu na brzinu hemijske reakcije uzme u obzir i temperatura, brzina reakcije će biti definisana Arenijusovim izrazom

$$v = v_0 e^{-\frac{E}{RT_k}}, \quad (2.10)$$

gde je v_0 - brzina reakcije pri beskonačno velikoj temperaturi, T_k - temperatura u °K, E - efektivna energija aktivacije (energija neophodna za iniciranje hemijske reakcije, nakon čega, usled uvek prisutnog viška tzv. slobodne energije, proces nastavlja da teče "sam od sebe"), R - univerzalna gasna konstanta.

Sa promenom temperature menja se, logično, i konstanta brzine reakcije, pa saglasno tome, za slučaj konstantne koncentracije C, prema [122], važi analogna relacija

$$k = k_0 e^{-\frac{E}{RT_k}} \quad (2.11)$$

Izrazi (2.10) i (2.11) pokazuju da je brzina hemijske reakcije, što je povezano sa brojem molekula koji učestvuju u određenom procesu, proporcionalna tzv. aktivacionom činiocu e^{-E/RT_k} , a on, kao što se vidi, predstavlja faktor preko koga temperatura utiče na brzinu v.

Mada je, s obzirom na napred ispisane relacije, reakcija hidratacije sa teorijske tačke gledišta relativno jednostavna za analizu, eksperimentalna istraživanja pokazuju da je to jedna izuzetno složena fizičko-hemijska reakcija u koju nauka još uvek nije u potpunosti ušla. Zbog toga i nije čudo što postoji veći broj teorija hidratacije (o kojima je napred već bilo reči), i što mnogi naučnici nisu u potpunosti saglasni u odnosu na kinetiku ovog procesa. U vezi sa ovim neki od njih [7], [31], [85] hidrataciju dele na tri faze, a neki na pet [67], pri čemu se većina slaže da u okviru ovog procesa uvek postoji početni - inicijalni period, jedan docniji period - period intenzivne hidratacije, i završni period - period stabilizacije procesa.

Bez obzira na različita mišljenja i stavove u vezi sa hidratacijom cementa, danas se, po svemu sudeći, za najprihvatljiviju može smatrati koloidno-kristalizaciona teorija, pa će u daljem sva izlaganja biti uglavnom zasnovana na postavkama ove teorije.

S obzirom da je u granulometrijskom sastavu cementa zastupljen vrlo širok spektar zrna u odnosu na krupnoću, mešanjem cementa sa vodom, dobija se jedan veoma heterogen sistem u okviru koga su prisutne relativno krupne čestice koje odgovaraju definiciji suspenzija, ali i daleko sitnije čestice koje se mogu smatrati konstituentama tzv. koloidnih sistema. Pored ovoga, sve prisutne čestice su u većoj ili manjoj meri izložene rastvaranju (hidrolizi), tako da u okviru sistema cement-voda nesumnjivo postoji i komponenta koja odgovara definiciji tzv. pravih rastvora. U odnosu na pojavu rastvaranja može se slobodno reći da je ona uglavnom površinskog karaktera, što znači da prvo dolazi do pojave adsorpcije vode na površinama zrna, nakon čega se oslobođeni molekuli, atomi ili joni konstituenata klinker minerala involviraju u tečnu fazu - rastvor, gde u opštem slučaju započinju haotično kretanje. Ovde je, dakle, prisutan fenomen prenosa mase (difuzija) nakon čega, ukoliko postoje neophodni nukleusi, započinje i proces kristalizacije [18]. Prema tome, suštinski se može govoriti o prisustvu dva osnovna procesa - procesa rastvaranja konstituenata cementa u vodi i procesa kristalizacije iz rastvora novih supstanci - produkata hidratacije. Ova dva procesa uvek teku paralelno, pri čemu kristalizacija počinje u momentu dobijanja tzv. prezasićenih rastvora, odnosno u momentu kada koncentracija oslobođenih molekula, atoma ili jona dostigne određenu kritičnu veličinu.

Na sve navedene pojave - adsorpciju, rastvaranje, prenos mase i kristalizaciju, kao i na brzinu i trajanje ovih faza, velikog uticaja ima temperatura, koja prvenstveno bitno menja

koncentracije supstanci u rastvoru, odnosno brzinu procesa rastvaranja.

Za ilustraciju ovog navoda mogu da posluže podaci prezentirani u tabeli 2.5, koja prikazuje

Tabela 2.5 Rastvorljivost u vodi nekih konstituenata cementa

Mineralna komponenta	Temperatura vode (°C)	Rastvorljivost (mol/l)
Gips $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	20	0,0153
	40	0,0154
Trikalcijumsilikat $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S -alit)	10	0,0015
	20	0,0015
Dikalcijumsilikat $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S -belit)	20	0,0011
	40	0,0012
Trikalcijumaluminat $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A -celit)	20	0,0071
	40	0,0076
	60	0,0078

rastvorljivost u vodi nekih konstituenata cementa u zavisnosti od temperature [93]. Vidi se da najveću rastvorljivost ima gips, iza njega trikalcijumaluminat, zatim C_3S i na kraju C_2S .

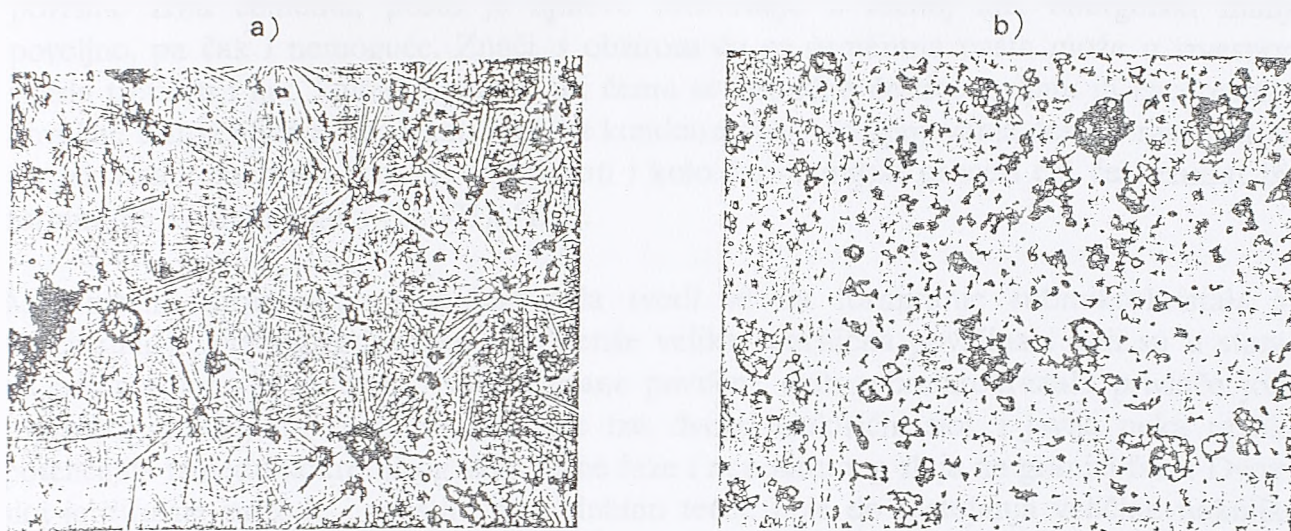
U tabeli 2.6, pak, dati su odnosi brzina rastvaranja nekih konstituenata cementa na različitim temperaturama, na osnovu kojih se takođe može sagledati uticaj temperaturnog parametra na kinetiku hidratacije [93], [122].

Tabela 2.6 Odnosi brzina rastvaranja nekih konstituenata cementa na različitim temperaturama

Temperatura (°C)	$\frac{v_{\text{gips}}}{v_{\text{celit}}}$	$\frac{v_{\text{celit}}}{v_{\text{alit}}}$	$\frac{v_{\text{celit}}}{v_{\text{belit}}}$
20	8,1	1,5	3,4
30	8,0	1,5	3,0
40	7,0	1,8	3,5
50	6,7	2,0	3,7
57	5,5	-	4,0

Jedan od glavnih faktora koji opredeljuje pojavu kristalizacije u početnom periodu hidratacije je sadržaj staklaste faze i prisustvo minerala C_3A u kristalnom obliku. Na osnovu ispitivanja Lerha i Boga kod sporo hlađenog klinkera nakon 30 minuta od mešanja cementa i vode vide se igličasti kristali kalcijumsulfoaluminata i hidratisanog kalcijum aluminata. Međutim, ukoliko se isti klinker brzo hladi (kao što je to već pomenuto u tački 2.2.1) i posmatra hidratacija nakon 30 minuta, neće se videti kristalni produkti, već tamno obojena amorfna masa koja se između zrna cementa formira kao film. Ovi stavovi se mogu ilustrovati slikama 2.19a i 2.19b, [16].

Na osnovu svega iznetog sledi da kristalna jedinjenja i staklasta faza imaju sasvim drugačija



Sl. 2.19 Hidratacija sporo hlađenog cementa (a) i brzo hlađenog cementa (b) nakon 30 minuta

ponašanja pri hidrataciji.

Eksperimentalna ispitivanja pokazuju da se u prvih nekoliko časova (2-3) na normalnim temperaturama ne zapažaju značajnije promene na cementnoj pasti, pošto su u tom periodu prisutne neznatne količine produkata hidratacije cementa. Mnogi autori ovaj vremenski period nazivaju i periodom "pokrivenje hidratacije" (dormant period), nakon koga se tek, u vremenu od 6-10 časova od mešanja cementa i vode, uočavaju vrlo značajne količine novoformiranih produkata. To su u prvom redu kristali dobijeni kao rezultat reakcija gipsa, C_3A i C_3S sa vodom, odnosno igličasti kristali etringita i C-S-H. Pored ovoga, u cementnoj pasti je prisutna i veoma značajna količina rastvorenog kalcijum hidroksida. Ovaj period od 0 do 6-10 časova najčešće se definiše kao period formiranja početne strukture cementnog kamena u kojoj, kao što pokazuju ispitivanja, dominira tzv. aluminatna struktura [7], [90].

U opisanom početnom periodu formiranja strukture cementnog kamena, tanki igličasti kristali formiraju se na površinama zrna cementa, a takođe i u vodi koja ih okružuje, pa tokom vremena, zahvaljujući povećanju broja ovakvih kristala, između zrna cementa počinju da se uspostavljaju izvesne prostorne veze koje dovode do fenomena "vezivanja" cementa. Nakon 6-10 časova praktično ceo volumen mešavine cement-voda biće ispunjen skeletom od igličastih kristala, pri čemu se može konstatovati i određeno smanjivanje zrna cementa. Masa koja je do ovog momenta bila plastična, nadalje počinje ubrzano da očvršćava, pa se definitivno formiranje ovakve strukture, u kojoj dominiraju aluminati, uzima kao završetak vezivanja i početak očvršćavanja cementa.

Paralelno sa aluminatnom, a delimično i silikatnom igličastom strukturom, u cementnoj pasti se razvijaju i drugi produkti hidratacije, naročito produkti hidratacije minerala C_3S i C_2S . Po mišljenju mnogih istraživača, a što je osnov koloidno-kristalizacione teorije Bajkova, formiranje produkata hidratacije ovih klinker minerala sada teče putem mehanizma prethodnog obrazovanja tzv. koagulacione strukture [44]. Produkti hidratacije

ovih minerala, određeni hidrosilikati kalcijuma, u ovom slučaju formiraju se neposredno uz površine zrna cementa, pošto je njihovo formiranje u tečnoj fazi energetski manje povoljno, pa čak i nemoguće. Znači, s obzirom da se cementna pasta može u izvesnom smislu tretirati i kao koloidni sistem, pri čemu se koloidne čestice javljaju ili kao rezultat dovoljne usitnjenosti zrna, ili kao rezultat kondenzacije i ukрупnjavanja čestica rastvora, na površinama cementnih zrna će se inicirati i koloidno-hemijski procesi čiji će rezultat biti formiranje koloidnih gela [1], [71], [132].

Mehanizam obrazovanja koloidnih gela svodi se na formiranje submikrokristala sa veličinama koloidnog reda, koje karakteriše velika specifična površina i koji su u stanju da privlače jone iz rastvora. Naelektrisane površine ovih submikrokristala privlače jone suprotnog znaka, pri čemu se obrazuje tzv. dvojni električni sloj, i javlja neka razlika potencijala između pokretljivog sloja tečne faze i nepokretnog sloja na granici faza. Dvojni sloj je difuzne prirode i prostire se u dubinu tečne faze do rastojanja veličine nekoliko molekula od površine submikrokristala. Čestice ovih faza na površinama cementnih zrna proizvode efekat zapreminske ekspanzije pozitivno naelektrisanih koloida, što je posledica formiranja solvatnih ljuski oko naelektrisanih površina. Rezultat ovakvih koloidno-hemijskih procesa na površinama zrna je njihovo bubrenje, usled čega, nakon izvesnog vremena, dolazi do spajanja susednih zrna i obrazovanja tzv. koagulacionih kontakata [132].

Ovakvu strukturu cementne paste, u kojoj su pojedina zrna povezana kroz vrlo tanke vodene slojeve, a čime se dobija rastresita i porozna prostorna mreža povezana Vandervalsovima međumolekulskim silama, naziva se koagulacionom strukturom.

Obrazovanjem koagulacione strukture, zajedno sa već napred pomenutim formiranjem aluminatne strukture, dolazi do zgušnjavanja, odnosno vezivanja cementne paste.

Ako u cementnoj pasti ne bi bilo gipsa, koloidna struktura, zajedno sa strukturom od igličastih kristala o kojoj je napred već bilo reči, formirala bi se u vrlo kratkom vremenskom periodu, tako da bi vrlo brzo nakon mešanja cementa i vode došlo do "vezivanja" cementne paste.

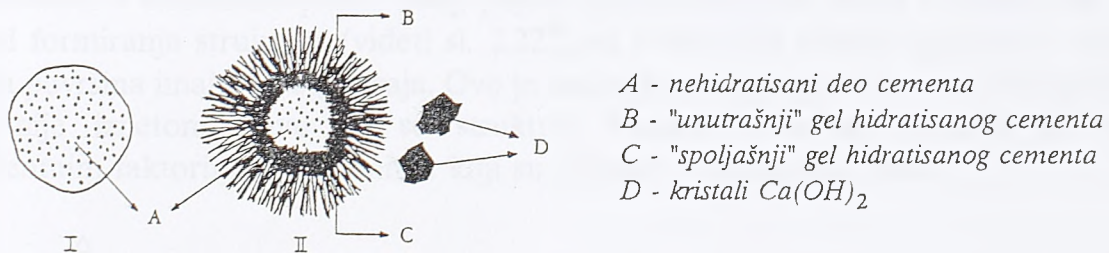
Submikrokristali koji formiraju koagulacionu strukturu, s obzirom da su rezultat hemizama između vode i klinker minerala C_3S i C_2S , predstavljaju u suštini hidrosilikate kalcijuma - sistema za koji je već ranije uvedena oznaka C-S-H. Zbližavanjem ovih submikrokristala, pak, što je s jedne strane uslovljeno povećanjem njihovog broja, a s druge strane većim intenzitetima privlačnih sila, dolazi do koagulacije predmetne koloidno-disperzne faze i do njene transformacije u nov sistem - tzv. gel. Treba istaći da je bitna karakteristika navedene transformacije u tome da tokom tog procesa ne dolazi do razdvajanja disperzne faze (koloidne čestice) i disperzione sredine (voda), i da su u ovakvo dobijenom cementnom gelu (tzv. krtom gelu, odnosno tobermoritovom gelu), uvek prisutni prostori ispunjeni vodom. Ova voda se naziva gelskom vodom i na osnovu svega do sada izloženog proizilazi da je ona neizbežna, pošto leži u osnovi strukture cementnog gela.

Cementni gel u suštini predstavlja tzv. silikatnu strukturu cementnog kamena formiranu paralelno sa aluminatnom strukturom, pri čemu proces formiranja gela teče manje

intenzivno u poređenju sa formiranjem aluminatne strukture. Čestice silikatne strukture u početku samo ispunjavaju praznine između igličastih kristala koji se formiraju na samom početku procesa hidratacije, međutim, vremenom značaj silikatne strukture - cementnog gela - se uvećava i ona postaje stvarni nosilac mehaničkih svojstava cementnog kamena. Ovo se u prvom redu odnosi na čestice strukture koje su produkti hidratacije minerala C_3S [90].

Formiranje gela kao osnovnog konstituenta cementnog kamena danas je opšte prihvaćeno u vezi sa kompleksnim problemom hidratacije cementa. Međutim, mnogi istraživači i gel tretiraju kao nehomogen sistem tako da se vrlo često sreću mišljenja da gel konstituše spoljašnja i unutrašnja komponenta, posmatrano u odnosu na nehidratirani cement [31], [35]. Ovakva konstitucija cementnog gela može se ilustrovati slikom 2.20, pri čemu se u vezi sa datom šemom smatra da je spoljašnji gel znatno poroznije (sastoji se od igličastih elemenata koji između sebe drže kristale $Ca(OH)_2$) i rastresitije strukture od unutrašnjeg, pa samim tim i nižih mehaničkih karakteristika, veće propustljivosti za tečnosti i gasove, veće deformabilnosti itd.

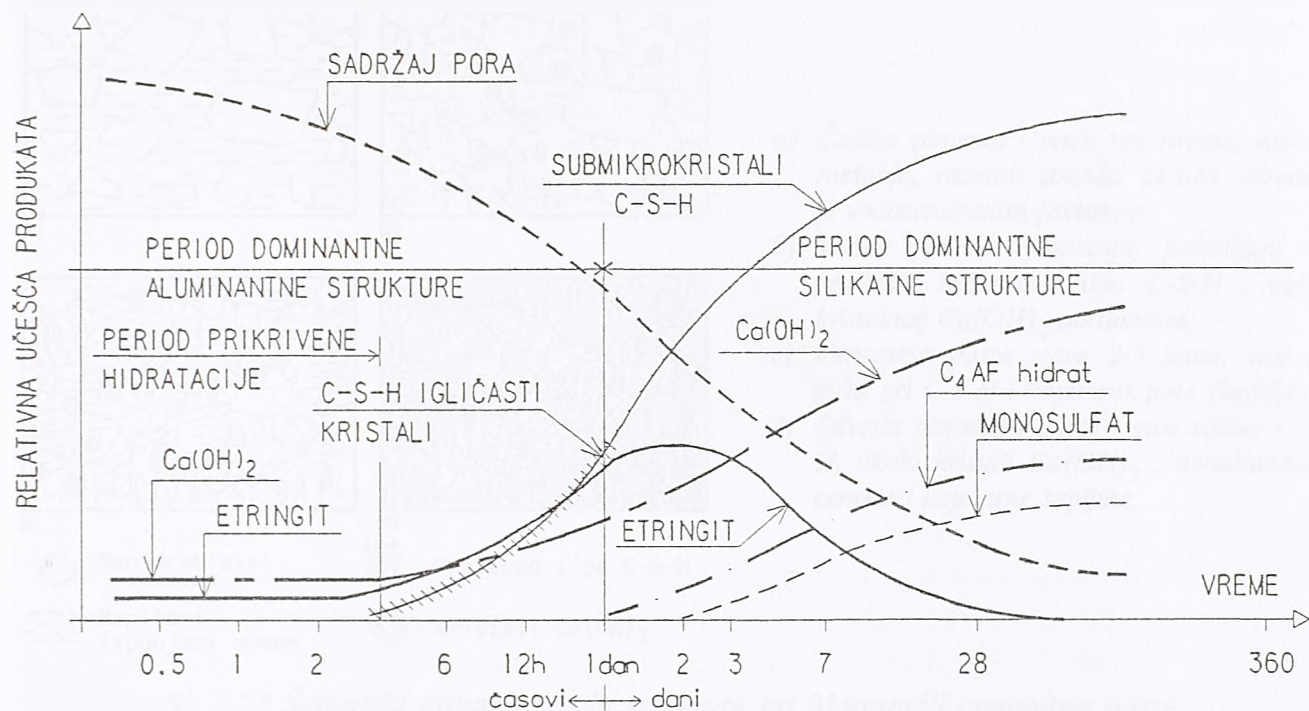
Približno posle 24 časa silikatna struktura počinje da potiskuje - prekriva aluminatnu strukturu, tako da nakon cca 4 nedelje (28 dana) u cementnom kamenu uglavnom dominira silikatna struktura. Pored ovoga, u cementnom kamenu se u ovo vreme, a i docnije, zapažaju krupni kristali kalcijumhidroksida, kao i neiskorišćeni - nehidratirani delovi (jezgra) cementnih zrna. Ovo znači da proces hidratacije nije u celini okončan i da on u opštem slučaju može da traje vrlo dugo, pa čak i da nikada ne bude završen.



Sl. 2.20 Šematski prikaz unutrašnjeg i spoljašnjeg cementnog gela
 I: nehidratirani cement; II: cement u fazi hidratacije

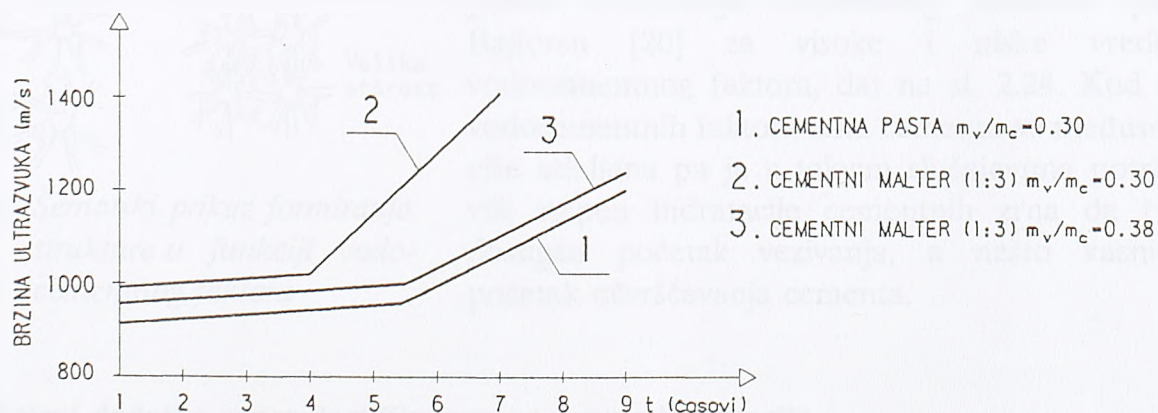
Prema Nevilu [106], hidratirani cement se čvrsto povezuje sa cementom koji još nije stupio u reakciju, ali još nije izvesno na koji način se to vrši. Jedna mogućnost je ta da novoproduzvedeni hidrat formira jedan omotač koji narasta iznutra pod uticajem vode koja je prodrla u opkoljavajuću skramu hidrata. S druge strane moguće je da rastvoreni silikati prolaze kroz omotač i talože se kao spoljni sloj. Treća mogućnost je da se koloidni rastvor taloži kroz masu, pošto se dostigne zasićenost, a da se dalja hidratacija nastavlja u okviru te strukture.

Polazeći od napred opisanih hemijskih reakcija i njihove kinetike, Loher i Rihards [85] su proces hidratacije cementa predstavili u vidu šeme date na sl. 2.21 koja je saglasna i sa



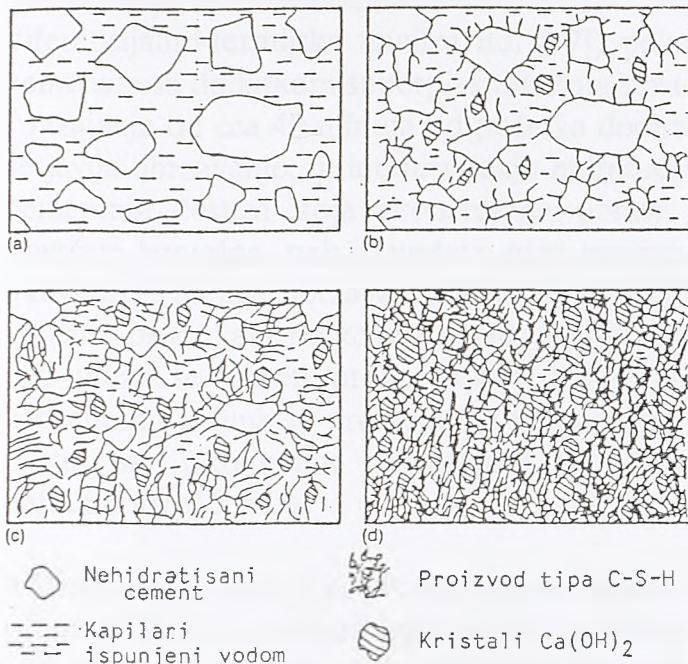
Sl. 2.21 Šema procesa hidratacije cementa i obrazovanja strukture cementnog kamena

eksperimentalnim podacima dobijenim ispitivanjem brzine ultrazvuka (sl. 2.22) u početnom, a i u docnijim periodima formiranja strukture cementnog kamena [7]. Ovim ispitivanjima je, na primer utvrđeno da brzina ultrazvuka zavisi od trajanja formiranja strukture i da agregat uveden u cementnu pastu, zbog pojave površinskih sila, može značajno da utiče na period formiranja strukture (videti sl. 2.22), pri čemu veći sadržaj agregata i njegova specifična površina imaju većeg uticaja. Ovo je analogno smanjenju vodocementnog faktora i već ranije iznetom stavu da se struktura betona u suštini formira pri nižim vodocementnim faktorima nego onima koji su prisutni u cementnoj pasti.



Sl. 2.22 Brzina ultrazvuka u funkciji vremena

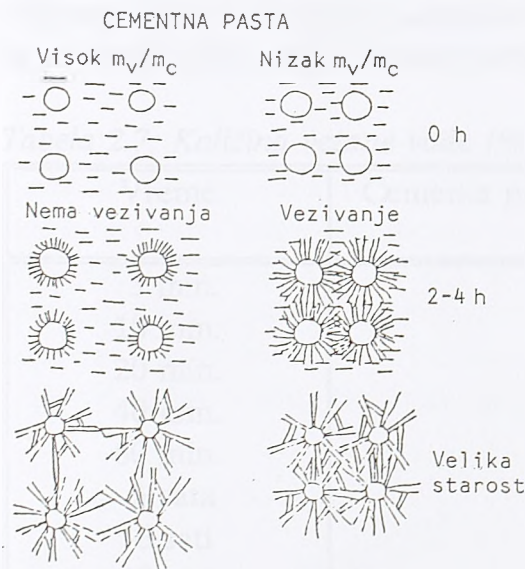
Na slici 2.23 daje se šematski prikaz razvoja strukture cementne paste prema Domonu [41]. Kao što se vidi, razmak između čestica cementa prikazanih na ovoj slici određen je količinom prisutne vode. Znači, i količina vode je od velikog uticaja na brzinu hidratacije,



Sl. 2.23 Šematski prikaz razvoja strukture pri hidrataciji cementne paste

pa se s tim u vezi, kao i na osnovu svega napred izloženog, može izvesti zaključak da brzina hidratacije u opštem slučaju zavisi od četiri osnovna faktora:

- mineraloškog sastava cementa,
- finoće mliva cementa,
- temperature i
- vodocementnog faktora.



Sl. 2.24 Šematski prikaz formiranja strukture u funkciji vodocementnog faktora

Za ilustraciju ovog stava može da posluži šematski prikaz formiranja cementnog kamena prema Bajforsu [20] za visoke i niske vrednosti vodocementnog faktora, dat na sl. 2.24. Kod viših vodocementnih faktora zrna cementa su međusobno više udaljena pa je u takvim slučajevima potreban viši stepen hidratacije cementnih zrna da bi se dostigao početak vezivanja, a nešto kasnije i početak očvršćavanja cementa.

2.2.5 Uticaj dodatka superplastifikatora na proces hidratacije

O uticaju dodatka betonu tipa superplastifikatora na fluidnost cementne paste već je bilo reči u poglavlju 2.1.2, gde je prikazan efekat deflokulacije, kao i efekat podmazivanja čestica. Na ovom mestu, međutim, biće analiziran uticaj superplastifikatora na sam proces hidratacije cementa.

Proučavanja na osnovu savremenih tehnika (difrakcija x-zraka, infracrvena spektroskopija, diferencijalno-termijska analiza itd. [37]) pokazala su da u okviru prve faze hidratacije cemenata sa dodatkom superplastifikatora postoji jedan kratak period, tzv. inicijalni period (u trajanju od cca 40 minuta od početka dodira cementa, vode i superplastifikatora), kada se javlja ubrzavanje, tj. intenziviranje hidratacije. To se objašnjava pojačanom disperzijom cementnih čestica koja prouzrokuje porast površine kontakta sa vodom. Povećanje površine kontakta, pak, povećava njen zasićen napon pare, rastvorljivost, kao i hemijsku aktivnost. Tako se ubrzava reakcija na granici faza čvrsto-tečno, što dovodi do povećanja količine produkata reakcije i formiranja debljeg sloja - filma hidratiranih produkata. Sve ovo može se pratiti preko tabele 2.7, u kojoj je prikazana količina vezane vode u procentima u funkciji vremena za jednu pastu na bazi čistog portland cementa, kao i za pastu sa određenim procentom dodatka superplastifikatora tipa sulfonovanog naftalinformaldehida.

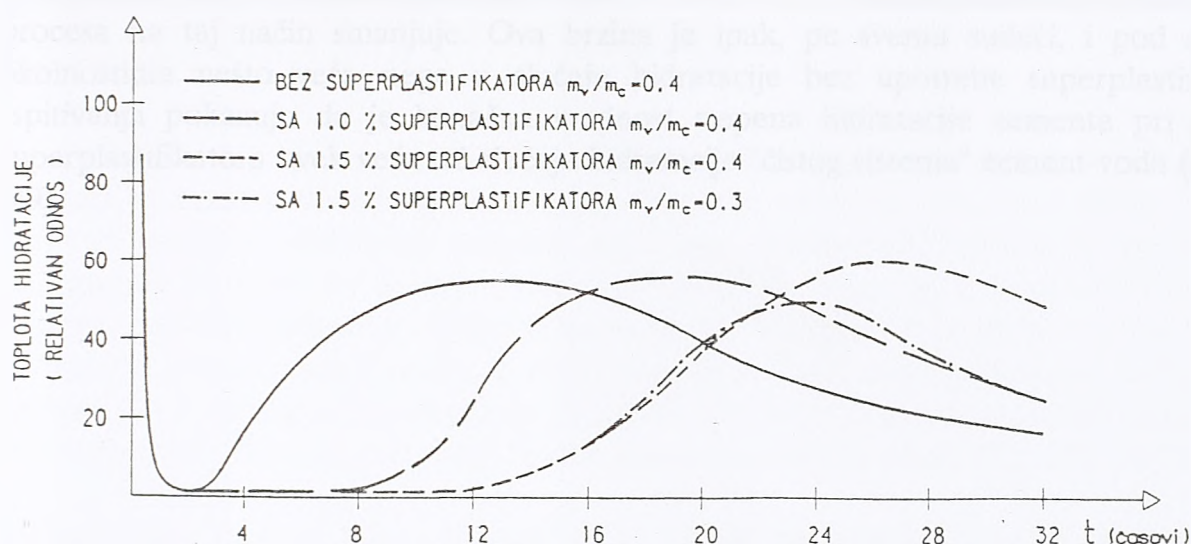
Nakon ovog kratkog, inicijalnog perioda, u svim ostalim fazama hidratacije sledi usporavanje procesa. Tako, na primer, ispitivanja su pokazala da je količina formiranog etringita u prvih 6 časova veća u prisustvu superplastifikatora; efekat je izraženiji ukoliko je doziranje superplastifikatora veće. Zbog ove pojave kod mešavina sa superplastifikatorom javlja se produženo vreme vezivanja. Objašnjenje za ovo može biti hipoteza [32], [121] po kojoj sloj etringita prekriva zrna klinkera i usporava prvobitnu reakciju C_3A sa vodom. Svakako da ovo usporavanje vezivanja zavisi od vrste i količine upotrebljenog superplastifikatora, što se precizno može utvrditi samo prethodnim probama.

Tabela 2.7 Količina vezane vode (%) u funkciji vremena

Vreme	Cementa pasta bez dodatka	Cementna pasta sa dodatkom 0,5% superplastifikatora
5 min.	1,41	1,54
10 min.	1,45	1,60
20 min.	1,59	1,82
40 min.	1,63	1,97
60 min.	1,68	1,91
3 sata	1,93	2,16
6 sati	2,59	2,54
18 sati	3,83	3,64
24 sata	4,40	4,11
3 dana	8,89	8,36
7 dana	9,91	9,16
28 dana	14,32	13,73

Nadalje, i oslobađanje toplote u prvim časovima procesa hidratacije kod mešavina spravljenih sa superplastifikatorom je promenjeno u odnosu na mešavine spravljene bez ovog dodatka. Ovo je prikazano na sl. 2.25 prema Kolepardiu, Koradiu i Valentu [32].

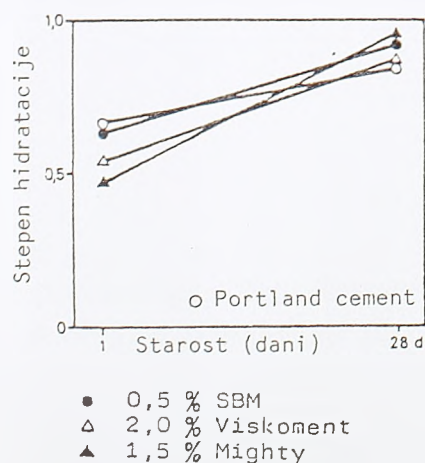
Kako se nakon kratkog inicijalnog perioda u procesu hidratacije cementa sa dodatkom superplastifikatora javlja usporavanje kod svih narednih faza, formiranje proizvoda



Sl. 2.25 Uticaj superplastifikatora na toplotu hidratacije u funkciji vremena

hidratacije je takođe vremenski pomeneno. Naime, upotrebom skaning elektronskog mikroskopa (SEM) kod čistih cementnih mešavina u starosti od jednog dana dokazano je prisustvo vlaknastih kristala, dok se u prisustvu superplastifikatora kod istih mešavina i u istoj starosti primećuje da je hidratirani proizvod uglavnom u obliku gela [32].

Što se, pak, tiče produkata hidratacije, oni su isti kao i kod hidratacije cementa bez dodatka superplastifikatora. Naime, ispitivanja su pokazala da ultravioletni spektrogrami tečne faze pre i posle adsorpcije pokazuju da se ovom prilikom ne formiraju nova hemijska jedinjenja; vrednosti pikova koji se dobijaju pri ovim ispitivanjima se samo smanjuju kao rezultat adsorpcije na cementnim česticama. Takođe i ispitivanja pomoću infracrvenog spektra pokazuju da se pri primeni superplastifikatora u cementnoj pasti ne odvijaju nikakve dodatne hemijske reakcije [37].



Sl. 2.26 Stepen hidratacije u funkciji primene superplastifikatora

Ispitivanja, međutim, pokazuju da primena superplastifikatora utiče na morfološke karakteristike očvrslog cementnog kamena. Naime, cementni kamen dobijen kao produkt hidratacije paste koja je sadržala određenu količinu superplastifikatora, ima znatno gušću strukturu koja je rezultat prisustva sitnih čestica hidrosilikata C-S-H. Ovo se može tumačiti manjim razmacima između cementnih zrna u pasti, a takođe i većom razvijenom površinom zrna usled efekta deflokulacije. Na ovaj način dispergovane čestice ostaju u takvom stanju duže vreme pa ne dolazi do suviše brze koagulacije čestica, a to je osnovni razlog povećanja razvijene površine zrna. Ovaj fenomen, logično, dovodi i do intenziviranja

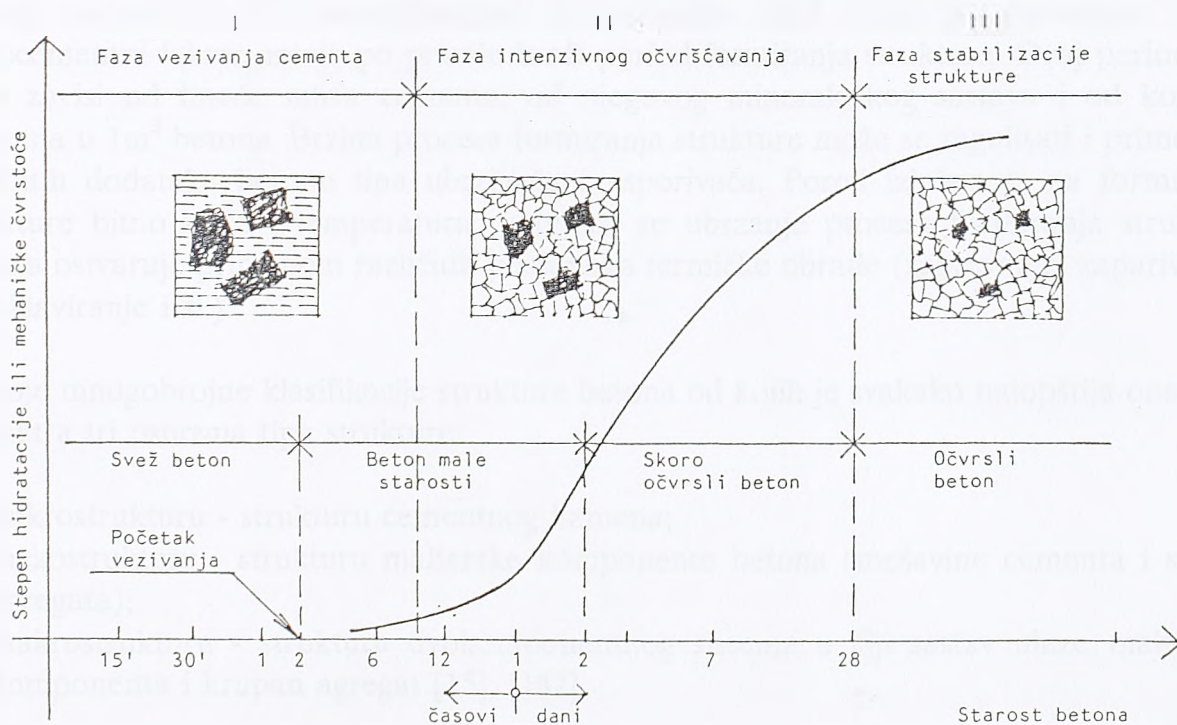
hidratacije u njenom najranijem stadijumu. Međutim, nadalje superplastifikator asociran na molekulima vode sprečava jedan deo vode da učestvuje u procesu hidratacije, pa se brzina procesa na taj način smanjuje. Ova brzina je ipak, po svemu sudeći, i pod ovakvim okolnostima nešto veća nego u slučaju hidratacije bez upotrebe superplastifikatora. Ispitivanja pokazuju da je konačna vrednost stepena hidratacije cementa pri primeni superplastifikatora uvek veća od slučaja hidratacije "čistog sistema" cement-voda (sl. 2.26) [49].

3. STRUKTURA BETONA

3.1. UVOD

Struktura očvrsllog betona je, načelno, rezultat dostizanja određenog stepena hidratacije cementa, tj. rezultat dovoljnog očvršćavanja betonske mešavine. Međutim, veoma je teško potpuno precizno definisati trenutak kada se, zahvaljujući hidrataciji, sveži beton transformiše u sistem sa dovoljno visokom čvrstoćom. Stoga se u literaturi, kao strogo uslovan, najčešće prikazuje dijagram saglasno sl. 3.1, gde se u zavisnosti od stepena hidratacije, odnosno od ostvarenog nivoa čvrstoće betona, osim područja svežeg betona (starosti 2-3 h), razlikuju i područja betona male starosti (1-3 dana), skoro očvrsllog betona (do starosti od 28 dana) i očvrsllog betona (starosti preko 28 dana) [7], [20], [147].

Imajući u vidu karakter krive prikazane na sl. 3.1, čini se da je ipak mnogo celishodnije da se proces formiranja strukture betona zasnjuje na kinetici formiranja aluminatne i silikatne strukture cementnog kamena (videti sl. 2.21), i da se on podeli na tri sledeće faze:



Sl. 3.1 Faze formiranja strukture betona

- I - početnu fazu, fazu formiranja početne strukture, kada usled vezivanja cementa masa svežeg betona počinje da prelazi u čvrsto agregatno stanje;
- II - fazu postepenog formiranja strukture očvrsllog betona koju karakteriše povećanje čvrstoće (u početku vrlo naglo);
- III - fazu stabilizacije strukture, kada se dostignuta čvrstoća tokom vremena bitnije ne menja.

Ovakva podela na faze ima puno opravdanosti i stoga što je ispitivanjima dokazano da je za početak rasta čvrstoće cementnog kamena (tačka koja odgovara početku II faze) potreban tzv. "kritičan stepen hidratacije" $\alpha_{h,kr}$ koji je prema [118] određen izrazom

$$\alpha_{h,kr} = k \frac{m_v}{m_c} \quad (3.1)$$

(k - empirijski parametar koji ima vrednost 0,40-0,46).

Na sl. 3.1 dat je i šematski prikaz postepenog transformisanja svežeg betona u očvršli konglomerat, do čijeg formiranja dolazi aglomeracijom zrna agregata; ova aglomeracija se, sasvim logično, ostvaruje posredstvom cementnog kamena (gela) nastalog kao rezultat hidratacije sistema cement-voda.

Tok procesa formiranja strukture betona i njegovo trajanje zavise od mnogih faktora: od sastava svežeg betona, svojstava cementa, od eventualno prisutnih aditiva i dr. Mešavine svežeg betona suve i niskoplastične konzistencije, kod kojih je primenjen nizak vodocementni faktor, imaju po pravilu kraći period formiranja strukture. Ovaj period isto tako zavisi od finoće mliva cementa, od njegovog mineraloškog sastava i od količine cementa u $1m^3$ betona. Brzina procesa formiranja strukture može se regulisati i primenom različitih dodataka betonu tipa ubrzivača i usporivača. Pored izloženog, na formiranje strukture bitno utiče i temperatura; u praksi se ubrzanje procesa formiranja strukture betona ostvaruje primenom različitih postupaka termičke obrade (zagrevanje, zaparivanje, autoklaviranje i sl.).

Postoje mnogobrojne klasifikacije strukture betona od kojih je svakako najopštija ona koja razmatra tri osnovna tipa strukture:

- mikrostrukturu - strukturu cementnog kamena;
- mezostrukturu - strukturu malterske komponente betona (mešavine cementa i sitnog agregata);
- makrostrukturu - strukturu dvokomponentnog sistema u čiji sastav ulaze malterska komponenta i krupan agregat [15], [142].

Međutim, ovakva klasifikacija najčešće ne može da posluži za sveobuhvatnu analizu izuzetno značajne strukturne karakteristike betona - poroznosti, pa je stoga mnogo celishodnije da se u okviru strukturnih karakteristika betona razmatraju njegova makro i mikrostruktura. Ovo je opravdano stoga, što se u očvrslom betonu kao osnovni strukturni elementi jasno izdvajaju agregat i cementni kamen, pri čemu je ove elemente strukture moguće sasvim precizno izdvojiti i kvantifikovati.

3.2 MAKROSTRUKTURA BETONA

Makrostruktura betona može da se razmatra na isti način, kao struktura, odnosno tekstura

prirodnih kamenih materijala - konglomerata. Ako se pođe od ovakvog koncepta, onda makrostruktura može da se izrazi u vidu odnosa zapremine agregata i cementnog kamena prema ukupnoj zapremini betona.

Da bi se došlo do potrebnih kvantitativnih zavisnosti, u vezi sa ovim može se poći od izraza za jediničnu zapreminu svežeg ugrađenog betona koji je dat u obliku

$$\bar{v}_a + \bar{v}_{cp} + v_p = 1 . \quad (3.2)$$

Ovde je \bar{v}_a apsolutna zapremina agregata, \bar{v}_{cp} apsolutna zapremina cementne paste, dok je v_p zapremina vazduha zaostalog u svežem betonu nakon ugrađivanja, odnosno eventualna zapremina vazduha koji je "namerno" uvučen u strukturu betona u cilju povećanja njegove otpornosti na dejstvo mraza. U slučajevima kada se ne koriste aeranti, a pri korektnom ugrađivanju svežeg betona, v_p obično nije veće od 1-3%, pa se najčešće može zanemariti.

S obzirom da je

$$\bar{v}_{cp} = \bar{v}_c + \bar{v}_v , \quad (3.3)$$

(\bar{v}_c - apsolutna zapremina cementa, \bar{v}_v - apsolutna zapremina vode u jedinici zapremine svežeg ugrađenog betona), na bazi definicije pojma apsolutne zapremine, kao i na bazi poznatih specifičnih masa cementa (γ_{sc}) i vode (γ_{sv}), može se napisati relacija

$$\bar{v}_a = 1 - v_p - \frac{m_c}{\gamma_{sc}} \left(1 + \frac{m_v}{m_c} \cdot \frac{\gamma_{sc}}{\gamma_{sv}} \right) . \quad (3.4)$$

Ukoliko se uzme da je $\bar{v}_{cp} \approx \bar{v}_{ck}$, gde je \bar{v}_{ck} apsolutna zapremina cementnog kamena u jediničnoj zapremini betona, dobija se da je

$$\bar{v}_{ck} = 1 - v_p - \bar{v}_a \quad (3.5)$$

Zapremina v_p koja figuriše u izrazu (3.5), a koja predstavlja eventualno prisutne vazdušne mehuriće u očvrslom betonu, uvek je inkorporirana u okviru cementnog kamena, tako da zbir $\bar{v}_{ck} + v_p$, koji se može označiti sa v_{ck} , predstavlja u stvari zapreminu cementnog kamena sa eventualno prisutnim mehurićima vazduha u jediničnoj zapremini betona. Prema tome, konačno se može ispisati sledeća relacija

$$v_{ck} = 1 - \bar{v}_a . \quad (3.6)$$

Konkretne vrednosti za \bar{v}_a i v_{ck} mogu se dobiti samo kada je poznata veličina v_p . Međutim, kako se u slučajevima betona koji se izrađuju bez aeranata v_p može zanemariti (a može i izmeriti), dok se u slučajevima aeriranih betona ova vrednost uvek meri, definisanje makrostrukture betona na bazi datih relacija ne predstavlja naročit problem.

S obzirom na izloženo, dakle, makrostruktura betona može da se izrazi u vidu odnosa agregata i cementog kamena. Kako je već rečeno u tački 2.1.4, u okviru ovog rada će se razmatrati samo betoni sa strukturama koje se dobijaju preslikavanjem strukture II prikazane na slici 2.10 na očvrslu beton, pa će u očvrslim betonima koji zadovoljavaju taj uslov cementnog kamena biti uglavnom samo toliko da on ispunjava prazne prostore između zrna agregata, uz određeni "višak" koji je neophodan za formiranje tankog sloja na kontaktu susednih zrna. Ovaj sloj, kao što se može zaključiti iz prethodnih izlaganja, obično iznosi 1-3 prečnika zrna cementa, odnosno do cca 0,06 mm.

Uzimanjem u obzir relacija (3.4) i (3.6) i pretpostavljajući da je $v_p \approx 0$, dobija se da je

$$\bar{v}_{ck} \approx v_{ck} = \frac{m_c}{\gamma_{sc}} \left(1 + \frac{m_v}{m_c} \cdot \frac{\gamma_{sc}}{\gamma_{sv}} \right). \quad (3.7)$$

Uvođenjem u postupak i vrednosti $\omega = \frac{m_v}{m_c}$, a takođe smatrajući da se sa dovoljnom

tačnošću može usvojiti $\gamma_{sc} \approx 3000 \text{ kg/m}^3$, izraz (3.7) se konačno može napisati u obliku

$$v_{ck} \approx \frac{m_c}{3000} (1 + 3\omega). \quad (3.8)$$

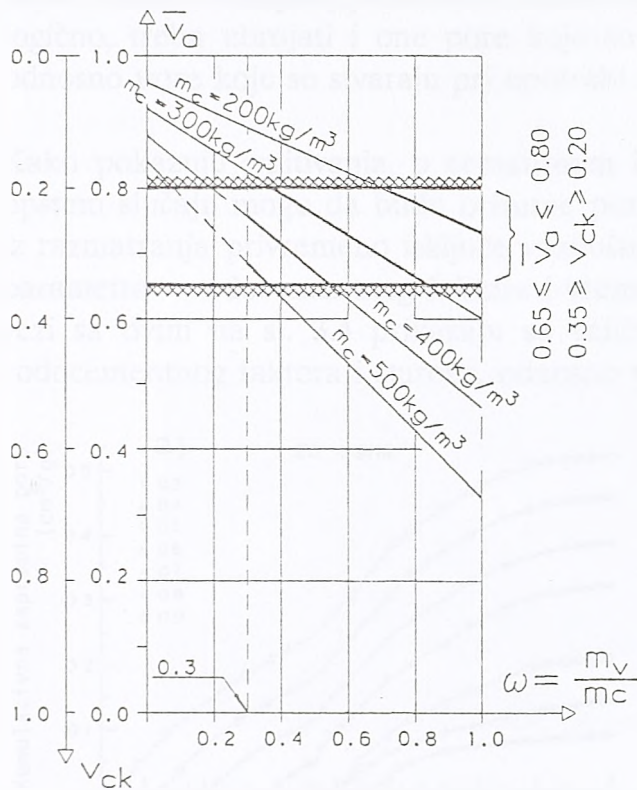
U betonima koji ispunjavaju uslove u pogledu napred opisane strukture (struktura II prema sl. 2.10) zapremina cementnog kamena v_{ck} najčešće se kreće u granicama od 0,2 do 0,35 m^3/m^3 . Ako se uzme u obzir ova činjenica i izraz (3.8) prikaže grafički, dobiće se za različite vrednosti m_c linije date na sl. 3.2. Kao što pokazuje ova slika, na kojoj je jasno istaknuto područje primenljivosti relacije (3.8) s obzirom na veličine v_{ck} , \bar{v}_a i ω , dati grafički prikaz omogućava vrlo jednostavnu analizu makrostrukturnih karakteristika betona za različite količine cementa u betonu i različite vodocementne faktore.

Makrostrukturne karakteristike betona mogu se dovesti u vezu i sa njegovim fizičko-mehaničkim svojstvima - u prvom redu sa čvrstoćom pri pritisku. Za ilustraciju ovog stava može da posluži dijagram dat na sl. 3.3, koji daje zavisnost između veličine \bar{v}_a odnosno veličine $\bar{v}_{ck} \approx v_{ck}$ i čvrstoće betona pri pritisku, iskazane preko vrednosti $f_{k,28}$; reč je, u stvari, o čvrstoći pri pritisku betonske kocke sa ivicama dužine 20 cm za slučaj starosti od 28 dana.

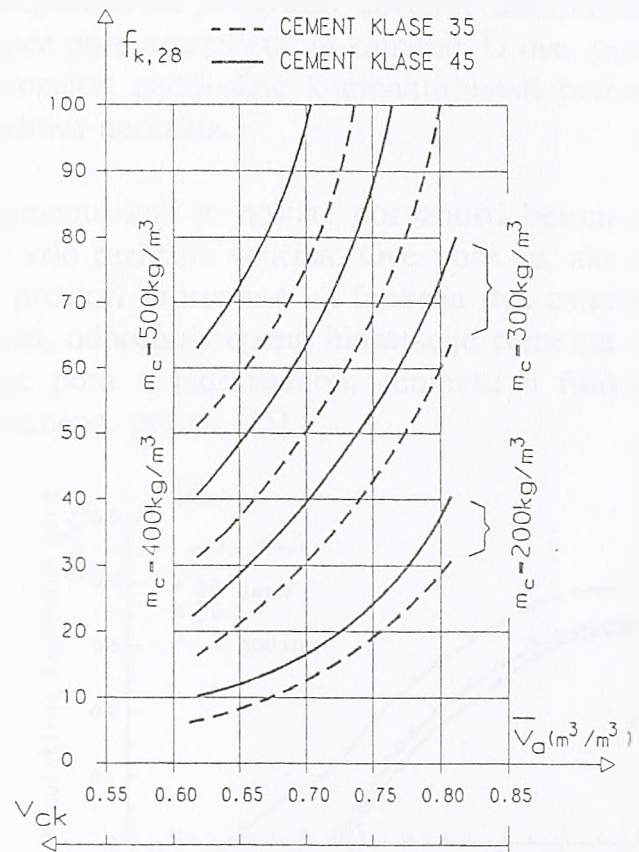
Grafički prikaz dat na sl. 3.3 dobijen je korišćenjem poznatog Fereovog obrasca

$$f_{k,28} = \frac{k}{\left(1 + \omega \frac{\gamma_{sc}}{\gamma_{sv}} \right)^2} \approx \frac{k}{(1 + 3\omega)^2}, \quad (3.9)$$

u koji je uvrštena veličina $(1 + 3\omega)$ dobijena preko izraza (3.8).



Sl. 3.2 Zavisnost \bar{v}_a (v_{ck}) od vodo-cementnog faktora i količine cementa



Sl. 3.3 Zavisnost između \bar{v}_a (v_{ck}) i čvrstoće betona pri pritisku

Analizom krivih prikazanih na sl. 3.3 može se zaključiti da agregat i njegov uticaj na čvrstoću betona počinje veoma značajno da se ispoljava pri vrednostima $\bar{v}_a > 0,70$. Ovaj zaključak je potpuno u skladu sa rezultatima ispitivanja većeg broja autora [7], [133] prema kojima agregat ne utiče na čvrstoću betona ako je njegov sadržaj u m^3 betona manji od $0,8 m^3$. Ovo odgovara betonima sa strukturom I prikazanom na sl. 2.10, tj. betonima kod kojih se dok su u svežem stanju može reći da zrna agregata "plivaju" u cementnoj pasti.

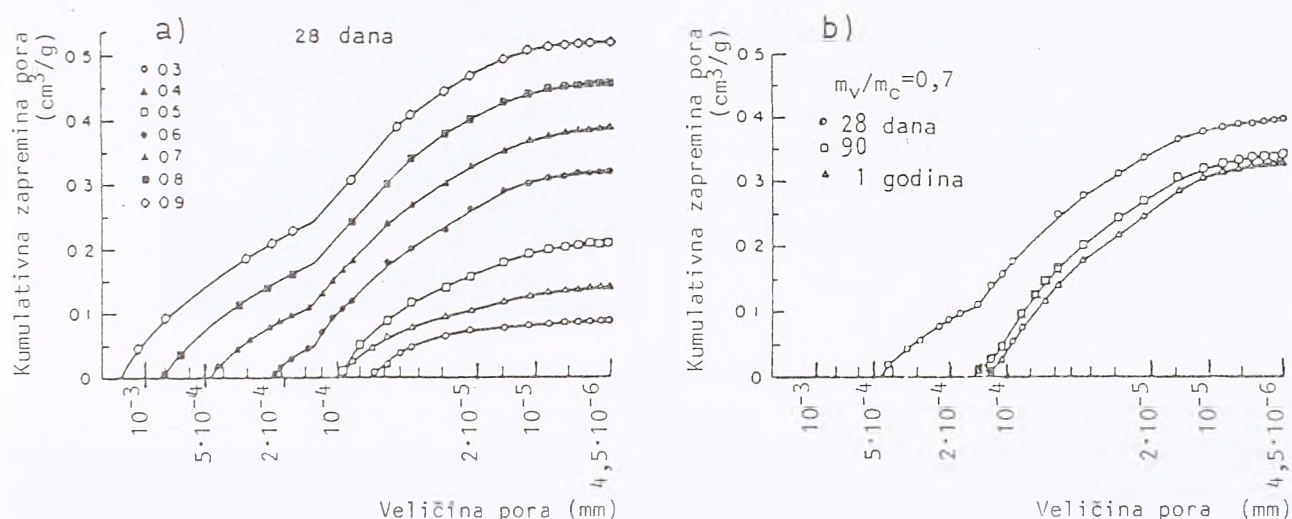
3.3 MIKROSTRUKTURA BETONA

S obzirom da su u okviru izlaganja o makrostrukтури betona definisana dva osnovna strukturna elementa - agregat i cementni kamen - mikrostruktura, koju je nemoguće determinisati golim okom, podrazumeva definisanje unutrašnje strukture svakog od ovih elemenata, odnosno definisanje njihove poroznosti. U okviru mikrostrukture mnogi autori [91] podrazumevaju i analizu građe kontaktnog sloja na granici agregat - cementni kamen, ali će se ovaj sloj, s obzirom na njegov veliki uticaj na mnoga svojstva betona, razmatrati posebno, u okviru poglavlja 3.4.

Kao što je već rečeno, najčešće se može smatrati da je zadovoljen uslov apsolutne

kompaktnosti zrna agregata, pa prisustvo agregata nije od interesa za analizu mikrostrukture betona. Stoga, ukoliko se pretpostavi da je agregat dovoljno kompaktna, najveći udeo u ukupnoj poroznosti betona imaće pore u cementnom kamenu. U ove pore, logično, treba ubrojati i one pore koje su rezultat nedovoljne kompaktiranosti betona, odnosno pore koje se stvaraju pri upotrebi aditiva aeranata.

Kako pokazuju ispitivanja, u cementnom kamenu, koji je nosilac poroznosti betona, u opštem slučaju mogu da budu prisutne pore vrlo različitih veličina. Ove pore su, ako se iz razmatranja privremeno isključe vazdušni prostori zapremine v_p , funkcija dva osnovna parametra - vodocementnog faktora i vremena, odnosno stepena hidratacije cementa. U vezi sa ovim na sl. 3.4 prikazuju se veličine pora u hidratisanom cementu u funkciji vodocementnog faktora i starosti, odnosno vremena, prema [15].



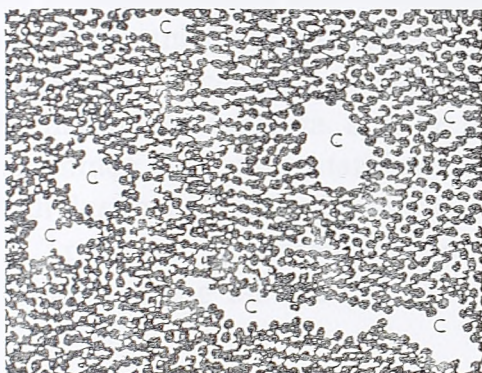
Sl. 3.4 Raspored pora u hidratisanom cementnom kamenu

Ispitivanja su pokazala da su najsitnije pore u cementnom kamenu reda veličine 10^{-7} - 10^{-5} mm konstituenti gela. Ovakve pore su, dakle, sadržine u gelu, pri čemu se može govoriti o "pravim" gelskim porama i o porama istog reda veličine, takođe sadržanim u gelu, koje se javljaju kao posledica kontrakcije cementnog kamena pri hemizmima tokom hidratacije cementa. Ove dve vrste pora zajedno najčešće se jednim imenom nazivaju gelske pore. One su, s obzirom na svoju prirodu, konstitutivni element gela C-S-H i kao takve su neizbežne i uvek prisutne u cementnom kamenu. Pore u gelu su međusobno povezane prostorima između čestica gela, pri čemu su ovi prostori uvek ispunjeni vodom - tzv. gelskom vodom, takođe konstitutivnim elementom gela, odnosno sistema C-S-H. U suštini, gelske pore zapremaju oko jedne trećine zapremine gela, pri čemu se preostali deo gela može smatrati čvrstom fazom. Specifična površina gela je približno $200.000 \text{ m}^2/\text{kg}$, što je hiljadu puta više od vrednosti koja odgovara nehidratisanom cementnom prahu - $200 - 500 \text{ m}^2/\text{kg}$. Smatra se, po konvenciji, da termin cementni gel uključuje u sebe i kristalni $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Pošto ukupni volumen gela raste uporedo sa napredovanjem hidratacije, isto tako raste i ukupni volumen gelskih pora.

Pored gelskih pora, u strukturi - cementnog kamena su pristune i znatno veće - tzv. kapilarne pore čije se veličine kreću od 10^{-4} - 10^{-2} mm. Ove pore se javljaju samo pri

višim vodocementnim faktorima i posledica su "viška" vode u odnosu na onu količinu koja je potrebna za hemijsku reakciju između klinker minerala i vode i za fizičko-hemijske reakcije čiji je rezultat formiranje cementnog gela. Kako pokazuju ispitivanja [90], kapilarne pore se javljaju samo u slučajevima kada je $m_v/m_c > 0,4$. Kapilarne pore u bilo kom stepenu hidratacije cementa predstavljaju onaj deo ukupne zapremine koji nije ispunjen proizvodima hidratacije. Pošto ti proizvodi zapremaju više od dvostrukog volumena prvobitne čvrste faze (cementa), to se kapilarni sistem o kome je reč stalno smanjuje pri napredovanju hidratacije.

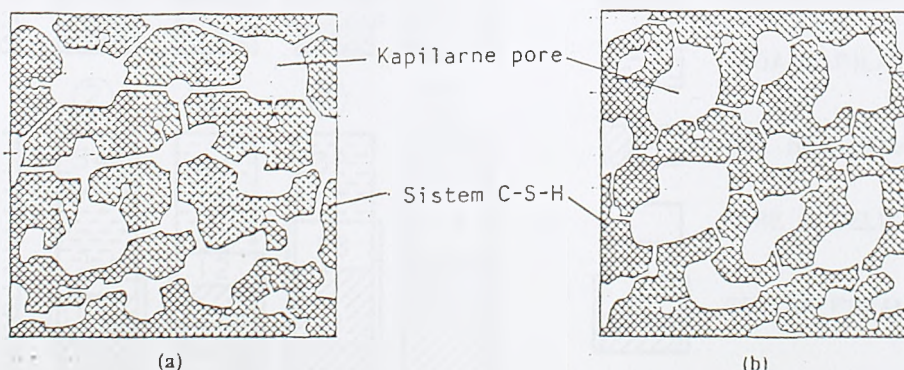
Struktura očvrslog cementnog kamena prikazana je prema Pauersu [106], na slici 3.5.



Crne tačke predstavljaju čestice gela; međuprostori su pore u gelu; prostori označeni sa C su kapilarne šupljine. Veličine pora u gelu su preuveličane.

Sl. 3.5 Uprošćen model strukture cementnog kamena

Kapilarne pore su promenljivog oblika i kako pokazuju merenja one formiraju jedan povezan sistem bez reda raspoređenih praznih prostora u masi cementnog kamena. Ovo je prikazano prema Nevilu i Bruksu na sl. 3.6a. Međutim, treba istaći činjenicu da se napredovanjem hidratacije povećava sadržina čvrste faze u gelu, tako da u očvrsлом cementnom kamenu može doći do blokade kapilara gelom i prekida u kontinuitetu kanalića. Kapilari se tako pretvaraju u kapilarne pore, koje imaju komunikaciju još samo preko gelskih pora. Ovo je prikazano na sl. 3.6b. prema [106]. Prekidanje kontinualnih kapilara može se postići, dakle, podesno izabranim vodocementnim faktorom i dovoljno dugim negovanjem u vodi. Aproksimativna zavisnost između vodocementnog faktora, stepena hidratacije i vremena nege koja definiše stanje kada kapilari prestaju da budu povezani prikazana je putem tabele 3.1 saglasno rezultatima ispitivanja Nevila i Bruksa [107].

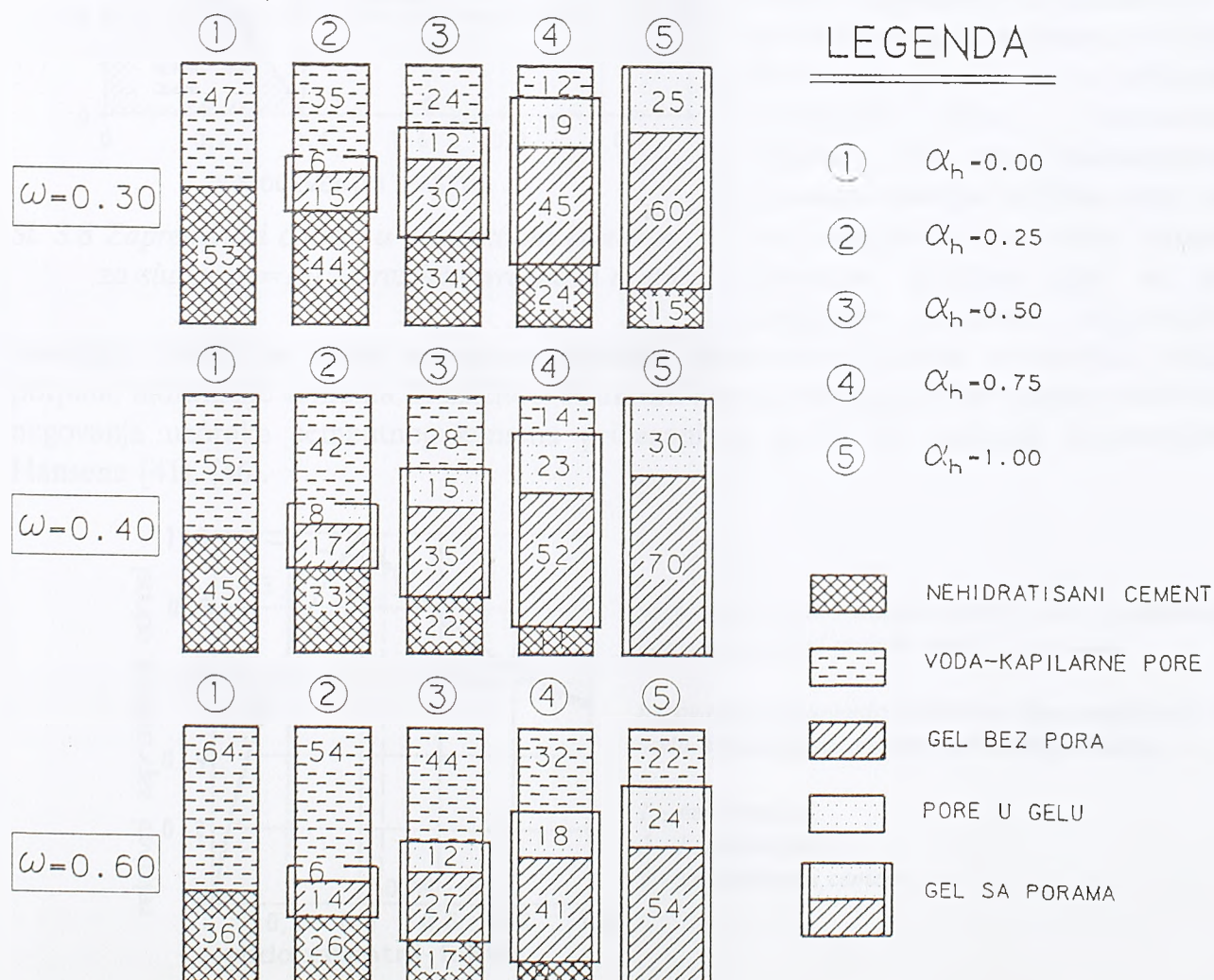


Sl. 3.6 Šematski prikaz kapilarnih pora (a) povezanih i (b) isprekidanih

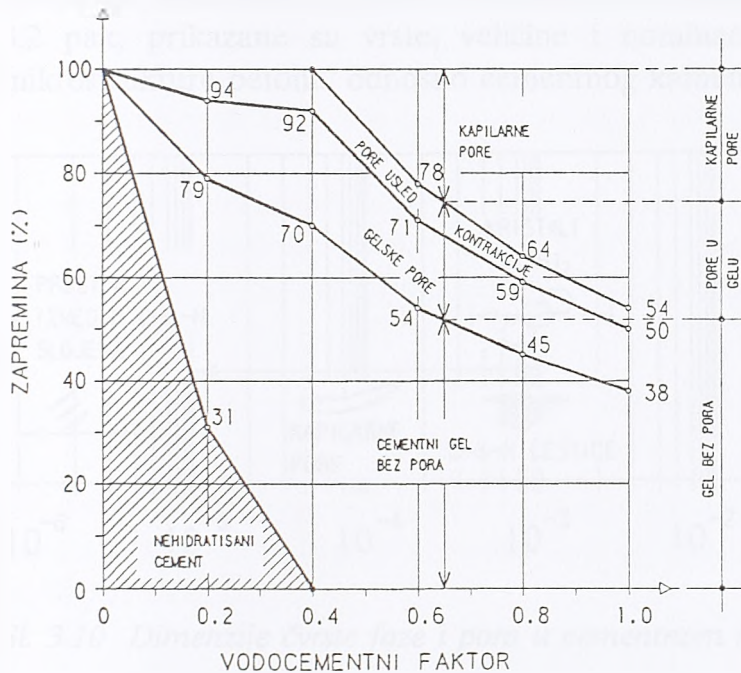
Tabela 3.1 Zavisnost između vodocementnog faktora, stepena hidratacije i vremena nege

Vodocementni faktor m_v/m_c	Stepen hidratacije α_h (%)	Potrebno vreme nege
0,40	50	3 dana
0,45	60	7 dana
0,50	70	14 dana
0,60	92	6 meseci
0,70	100	1 godina
preko 0,70	100	neostvarljivo

Ako se uzme u obzir činjenica da je, teorijski posmatrano, za potpunu hidrataciju cementa potreban vodocementni faktor cca 0,4 [90], [106] proizilazi da će se pri vodocementnim faktorima preko 0,4 u cementnom kamenu uvek formirati sistem kapilarnih pora, uz stoprocentnu hidrataciju cementa, a da će pri vodocementnim faktorima manjim od 0,4 iz strukture cementnog kamena izostati kapilarne pore, uz obavezno prisustvo nehidratiranog cementa. Radi ilustracije izloženih stavova, a na bazi podataka preuzetih iz literature [34], [106], na sl. 3.7 prikazuju se zapreminski odnosi u cementnom kamenu za tri karakteristične vrednosti vodocementnog faktora (0,3, 0,4 i 0,6) i za pet različitih stepena hidratacije (0, 0,25, 0,5, 0,75 i 1,0).

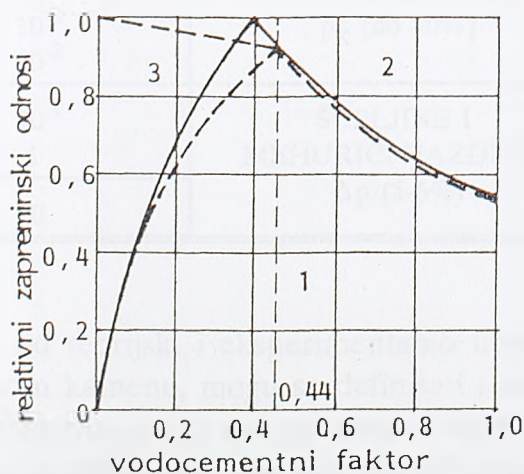
Sl. 3.7 Zapreminski odnosi u cementnom kamenu za različite vrednosti m_v/m_c i α_h

Na sl. 3.8, pak, daju se zapreminski odnosi u cementnom kamenu za slučaj potpune hidratacije cementa, a za različite veličine vodocementnih faktora [141]. Kao što pokazuju ove slike, za $\omega = 0,4$, hidratacija se obavlja u potpunosti, bez ostatka, što znači da se cementna pasta u potpunosti transformiše u cementni kamen sačinjen od gela sa gelskim porama. Za slučaj $\omega < 0,4$ u okviru cementnog kamena, osim gela i gelskih pora, biće prisutni i delovi nehidratiranog cementa, dok će u slučaju $\omega > 0,4$ celokupna količina cementa biti transformisana u cementni kamen (gel sa gelskim porama) uključujući i prisustvo kapilarnih pora u okviru cementnog kamena.



Sl. 3.8 Zapreminski odnosi u cementnom kamenu za slučaj $\alpha_h = 1,0$ za različite vrednosti m_v/m_c

Prethodna razmatranja su se odnosila na slučaj kada se hidratacija cementa odvija u uslovima obezbeđenosti dovoljne količine vode za odvijanje procesa, na primer, na slučaj kada se uzorci cementnog kamena neguju u vodi. Ovo podrazumeva mogućnost transfera vode iz cementnog kamena u okolni prostor (vodu) tokom napredovanja hidratacije i permanentnog smanjivanja sistema kapilarnih pora. Ako se međutim hidratacija odvija u izolovanim uslovima, što opet podrazumeva prisustvo dovoljne količine vode, ali bez mogućnosti da voda napusti kapilarne prostore koji se pri odvijanju procesa neprekidno smanjuju, dobiće se nešto izmenjena struktura cementnog kamena za teorijski slučaj potpune hidratacije cementa. Različitosť struktura koje se dobijaju pri navedenim uslovima negovanja uzoraka cementnog kamena prikazani su na sl. 3.9, saglasno ispitivanjima Hansena [41], [46].



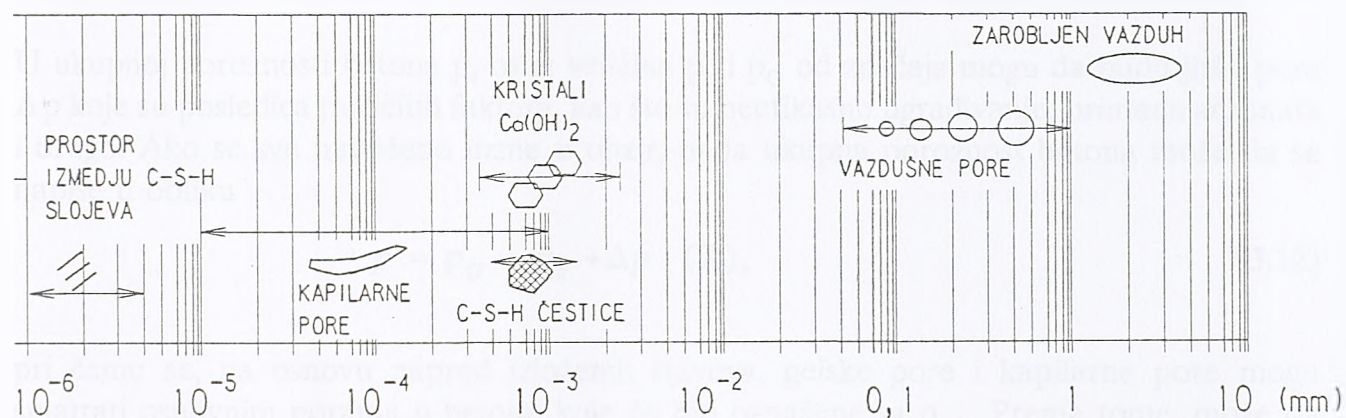
negovanje u vodi - moguć transfer vode iz cementnog kamena u okolni prostor (vodu), —

negovanje u izolovanim uslovima - bez mogućnosti da voda napusti porni prostor cementnog kamena, - - -

- 1 - cementni gel;
- 2 - kapilarne pore;
- 3 - nehidratirani cement.

Sl. 3.9 Struktura cementnog kamena u funkciji načina negovanja

Imajući u vidu opisanu strukturu cementnog kamena može se zaključiti da se identični strukturni elementi javljaju i u okviru mikrostrukture betona. To znači da se u mikrostrukтури betona javljaju strukturni elementi koji u najvećem procentu sačinjava cementni gel - skup submikrokristalnih čestica uglavnom hidrosilikata kalcijuma. Pored ovoga, u cementnom kamenu su prisutni i relativno krupni kristali kalcijum hidroksida, nehidratirana ili delimično hidratirana zrna cementa, kao i izvesna količina etringita. U cementnom kamenu su prisutni i "prazni" prostori - pore u gelu, kapilarne pore i šupljine i mehurići vazduha zaostali ili namerno uvučeni u cementi kamen. Na slici 3.10 date su dimenzije čvrste faze i pora u cementnom kamenu u okviru betona prema [15]. U tabeli 3.2 pak, prikazane su vrste, veličine i nominacije šupljih prostora - pora u okviru mikrostrukture betona, odnosno cementnog kamena u betonu.



Sl. 3.10 Dimenzije čvrste faze i pora u cementnom kamenu u okviru betona

Tabela 3.2 Pore u betonu

RADIJUS (mm)	VRSTA (ORIJENTACIONI UDEO)	
10^{-7}	PORE U GELU p_G (5-6%)	MIKRO PORE
10^{-6} 10^{-5}		MEZO PORE
10^{-4} 10^{-3} 10^{-2}	KAPILARNE PORE p_K (do 10%)	MIKRO KAPILARI
		KAPILARI
10^{-1} 1	ŠUPLJINE I MEHURIĆI VAZDUHA Δp (5-6%)	MAKRO KAPILARI
10		VELIKE OTVORENE PORE

Polazeći od teorijski i eksperimentalno utvrđenih zakonitosti formiranja pora u "čistom" cementnom kamenu, mogu se definisati i analitički izrazi za poroznost betona, uzimajući u obzir činjenicu da je ova poroznost najtešnje povezana sa količinom cementa u betonu m_c . Na ovaj način dolazi se do sledećih izraza:

$$\text{- kapilarna poroznost } p_k = 0,1 m_c \left(\frac{m_v}{m_c} - 0,4 \alpha_h \right) \% , \text{ za } \frac{m_v}{m_c} \geq 0,4 \alpha_h \quad (3.10)$$

$$\text{- pore u gelu } p_G = 0,016 \alpha_h m_c + 0,006 \alpha_h m_c = 0,022 \alpha_h m_c (\%) \quad (3.11)$$

U izrazu (3.11) prvi sabirak, u stvari, predstavlja pravu gelsku poroznost, dok je drugi sabirak poroznost koja je rezultat kontrakcije gela pri hidrataciji cementa. Ispitivanja su pokazala da su ove-kontraktione pore-istog reda veličine kao i "prave" gelske pore, pa se stoga sasvim umesno može izvršiti sabiranje saglasno relaciji (3.11). To znači da su izrazom (3.11) u suštini definisane pore u gelu, mada se vrlo često ceo izraz (3.11) definiše terminom gelske pore, što će i u ovom radu biti prihvaćeno.

U ukupnoj poroznosti betona p , osim veličina p_k i p_G od značaja mogu da budu još i pore Δp koje su posledica različitih faktora, kao što su neefikasno ugrađivanje, primena aeranata i drugo. Ako se sve navedeno uzme u obzir, onda ukupna poroznost betona može da se napiše u obliku

$$p = p_G + p_k + \Delta p (\%) , \quad (3.12)$$

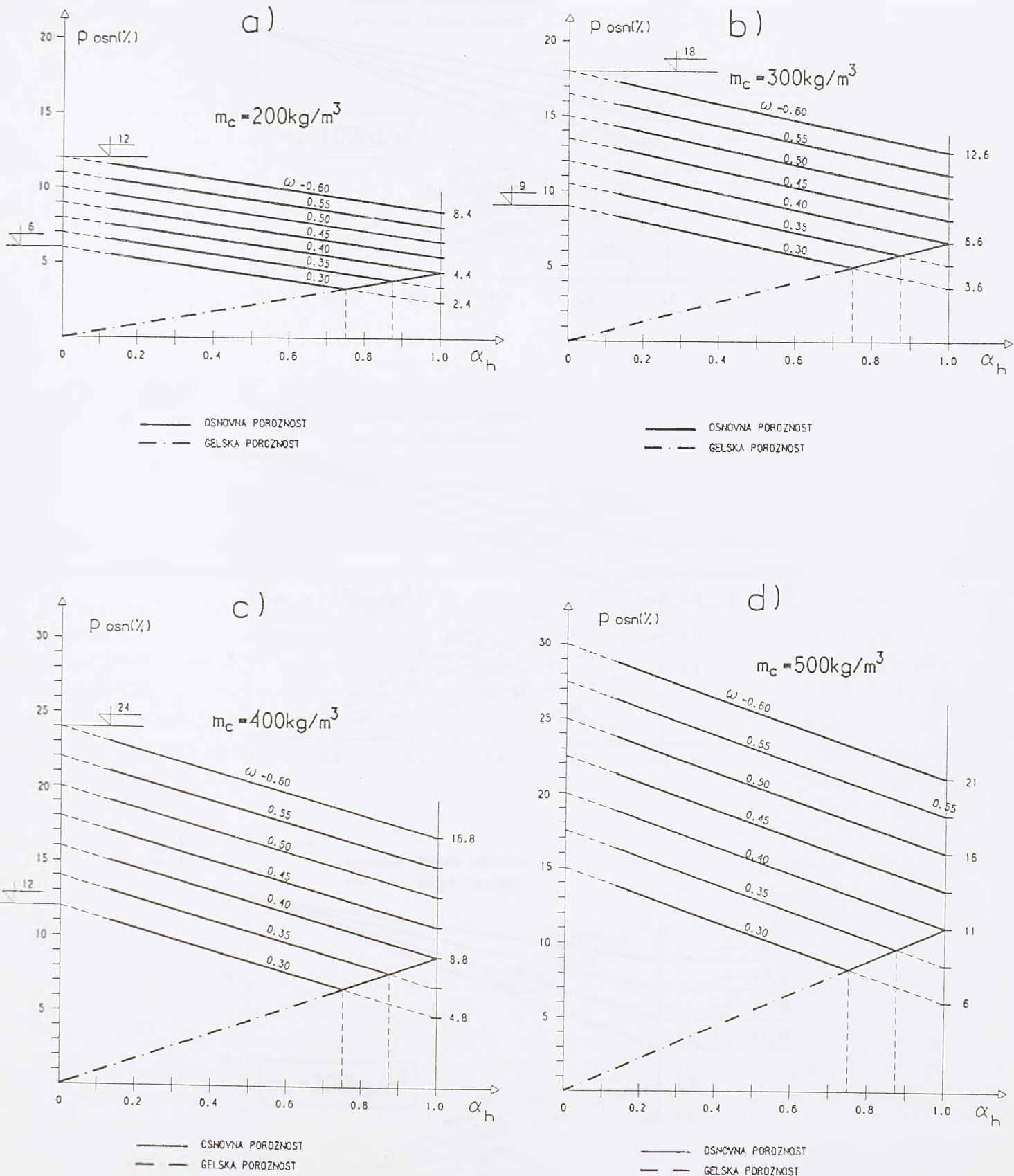
pri čemu se, na osnovu napred izloženih stavova, gelske pore i kapilarne pore mogu smatrati osnovnim porama u betonu koje će biti označene sa p_{osn} . Prema tome, može da se napiše sledeće:

$$p = p_{osn} + \Delta p (\%) , \quad (3.13)$$

$$p_{osn} = p_G + p_k (\%) . \quad (3.14)$$

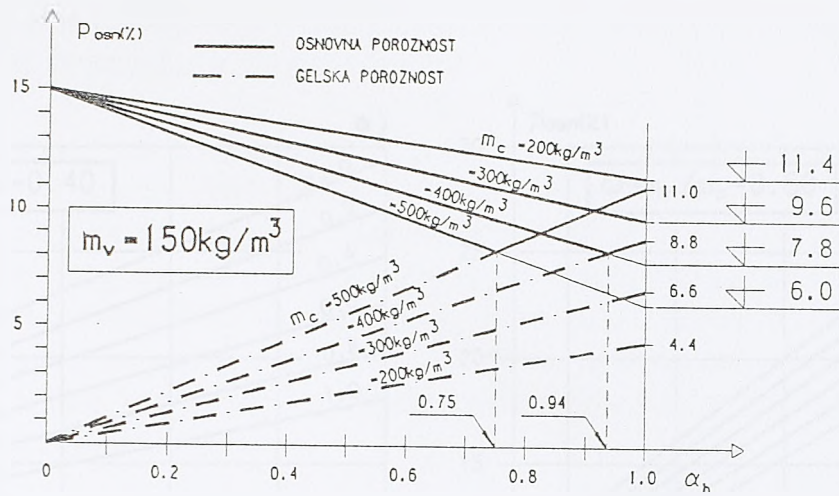
Na bazi relacija (3.10) i (3.11) izrađeni su dijagrami koji se daju na sl. 3.11, sl. 3.12 i sl. 3.13, a koji definišu zavisnosti između p_{osn} , ω i α_h u funkciji količine cementa m_c i količine vode m_v u betonu. Na osnovu prikazanih dijagrama sledi da poroznost betona p_{osn} pri $\omega < 0,4$ za određene vrednosti parametra α_h ima izvesne minimalne vrednosti, a ukoliko se proces hidratacije nastavi i ova vrednost premaši, poroznost će se povećati. Razlozi za ovo leže u činjenici da se tokom hidratacije povećava količina cementnog gela, pa shodno tome povećava i poroznost p_G . S druge strane, pak, prikazani dijagrami jasno pokazuju da se sa povećanjem α_h , bez obzira na količinu vode u betonu, odnosno bez obzira na veličinu vodocementnog faktora, kapilarna poroznost betona u funkciji stepena hidratacije neprekidno smanjuje.

Kada je $\omega \geq 0,4$, minimalna poroznost betona p_{osn} dobija se pri potpunoj hidrataciji cementa. Ovde, međutim, treba napomenuti da se hidratacija cementa u betonu praktično nikada ne obavlja do kraja i da u realnim uslovima α_h najčešće ima maksimalnu vrednost 0,8 - 0,9. To znači da je u opštem slučaju u betonu, obuhvaćeno najviše 80-90% mase cementa, pri čemu su, logično, stoprocentno hidratirana samo sitnija zrna cementa, dok se u slučaju krupnijih zrna hidratacija obavlja samo u sloju debljine od oko 0,01 mm.

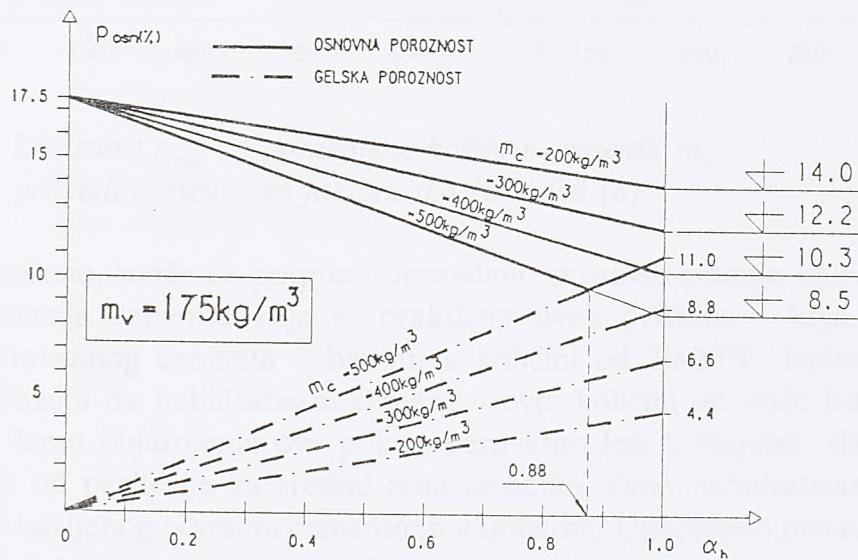


Sl. 3.11 Zavisnost p_{osn} , ω i α_h u funkciji količine cementa m_c : (a) - 200 kg/m³, (b) - 300 kg/m³, (c) - 400 kg/m³ i (d) - 500 kg/m³

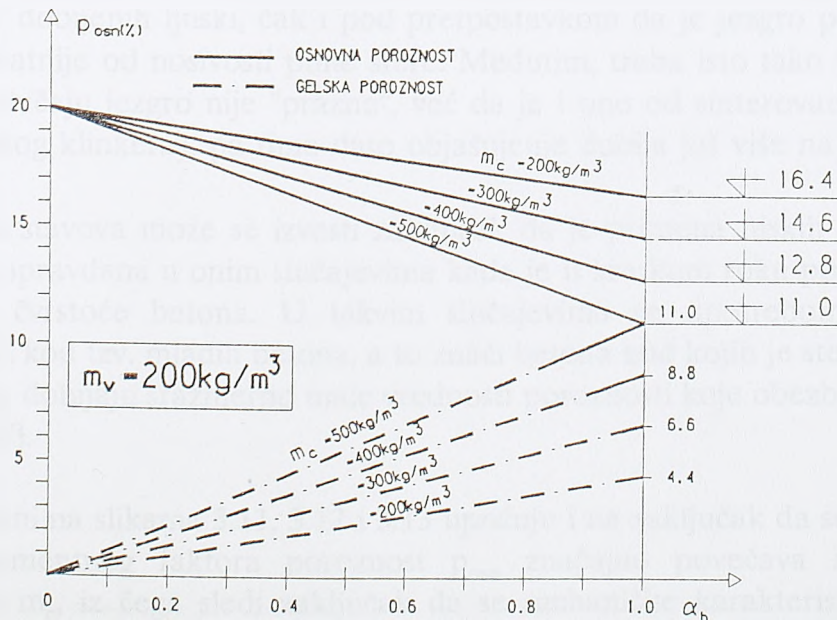
a)



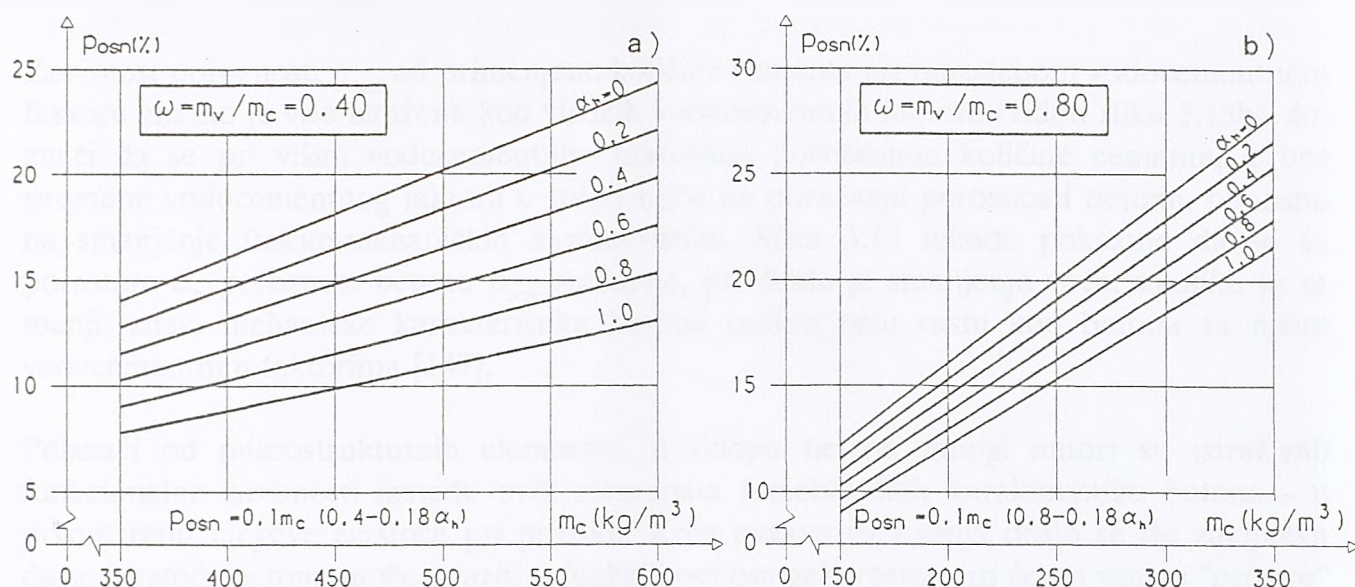
b)



c)



Sl. 3.12 Zavisnost p_{osn} , α_h i m_c u funkciji količine vode m_v



Sl. 3.13 Zavisnost p_{osn} od primenjene količine cementa m_c pri vodocementnom faktoru 0,4 (a) i 0,8 (b)

S obzirom na izloženo, može se potpuno opravdano postaviti pitanje kakve su posledice nepotpune hidratacije cementa koja je praktično uvek prisutna i koja, podrazumeva postojanje nehidratisanog cementa u betonu u količini od 10-20%. Ispitivanja vršena u ovom smislu pokazuju da nehidratirani cement u ovoj količini ne utiče bitno na svojstva betona [90], pri čemu objašnjenje ove pojave verovatno leži u činjenici da se hidratacija po pravilu odvija od periferije ka sredini zrna cementa, čime nehidratirana masa ostaje unutar prostora obavijenog očvrslim cementnim kamenom. Uprošćeno posmatrano, na ovaj način se dobijaju debele sferne ljuske od hidratiranog cementa, u okviru kojih su prisutna nehidratirana jezgra sa prečnicima 0,4-0,6 u odnosu na spoljašnje prečnike. Pod ovakvim uslovima nosivost dobijenih ljuski, čak i pod pretpostavkom da je jezgro potpuno prazno, ne razlikuje se znatnije od nosivosti pune sfere. Međutim, treba isto tako imati u vidu da u posmatranom slučaju jezgro nije "prazno", već da je i ono od sinterovanog materijala - kamena (cementnog klinkera), pa time dato objašnjenje dobija još više na snazi.

Na bazi izloženih stavova može se izvesti zaključak da je primena niskih vodocementnih faktora posebno opravdana u onim slučajevima kada je u kratkom roku potrebno ostvariti relativno visoke čvrstoće betona. U takvim slučajevima se upotrebom odgovarajuće količine cementa i kod tzv. mladih betona, a to znači betona kod kojih je stepen hidratacije α_h relativno nizak, dobijaju srazmerno male vrednosti poroznosti koje obezbeđuju potreban nivo čvrstoće [147].

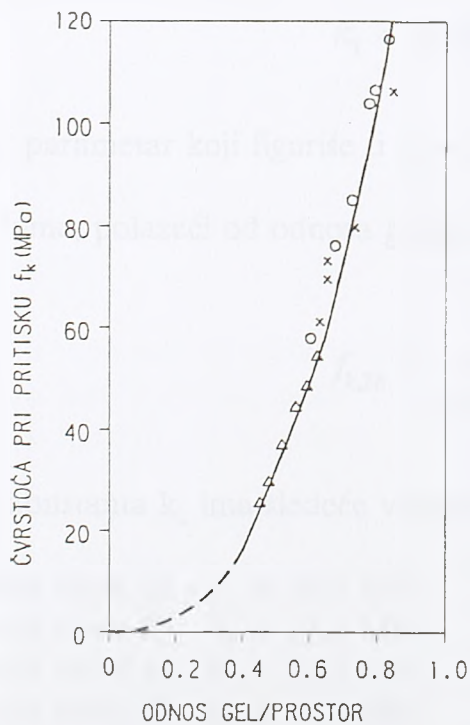
Dijagrami prikazani na slikama 3.11, 3.12 i 3.13 upućuju i na zaključak da se pri određenoj vrednosti vodocementnog faktora poroznost p_{osn} značajno povećava sa povećanjem količine cementa m_c , iz čega sledi zaključak da se mehaničke karakteristike betona ne mogu povećavati isključivo povećanjem količine cementa. Iz prikazanih dijagrama sledi takođe da se poroznost p_{osn} može smanjiti samo smanjivanjem količine vode u betonu,

odnosno vodocementnog faktora, a to znači da se na ovaj način, smanjivanjem poroznosti, jedino može uticati na povećanje čvrstoće betona.

Zavisnost poroznosti p_{osn} od primenjene količine cementa pri određenom vodocementnom faktoru znatno je više izražena kod visokih vodocementnih faktora (videti sliku 3.13b), što znači da se pri višim vodocementnim faktorima povećanjem količine cementa, a bez promene vodocementnog faktora u stvari utiče na povećanje poroznosti betona, odnosno na smanjenje fizičko-mehaničkih karakteristika. Slika 3.13 takođe pokazuje da se sa porastom α_h poroznost betona p_{osn} smanjuje, pri čemu je smanjenje veće, ukoliko je ω manji; znači mehaničke karakteristike betona osetno brže rastu kod betona sa nižim vodocementnim faktorima [147].

Polazeći od mikrostrukturnih elemenata u sklopu betona mnogi autori su istraživali funkcionalne zavisnosti između ovih elemenata i mehaničkih karakteristika betona - u prvom redu njegove čvrstoće pri pritisku. Kroz ovakva ispitivanja došlo se do zaključka da se čvrstoća betona može izraziti u funkciji odnosa gel/prostor, pri čemu pojam "prostor" podrazumeva volumen gela i eventualnih kapilarnih pora sadržanih u njemu. Ako se uzmu u obzir poznate relacije (3.10) i (3.11) koje definišu zapremine gela (uključujući tu i sve gelske pore) i kapilarnih pora u okviru njega, onda se odnos gel/prostor, koji će ovde biti označen sa x može prikazati putem izraza

$$x = \frac{0,72 \alpha_h}{0,32 \alpha_h + \omega} \quad (3.15)$$



Sl. 3.14 Zavisnost odnosa gel/prostor (x) i čvrstoće pri pritisku ($f_{k,28}$)

Prema [107] zavisnost između čvrstoće betona pri pritisku $f_{k,t}$ (čvrstoća betonske kocke sa ivicama dužine 20 cm u starosti od 28 dana) može se prikazati putem izraza

$$f_{k,t} = a \cdot x^b \quad (3.16)$$

gde su a i b konstante koje uglavnom zavise od vrste upotrebljenog cementa. Konstanta a , u stvari određuje maksimalnu vrednost čvrstoće za slučaj kada je $x = 1$, odnosno kada je kapilarna poroznost betona jednaka nuli (slučaj kad je $\omega = 0,4$).

Na slici 3.14 prikazana je zavisnost $x - f_{k,28}$ dobijena ispitivanjima prema Pauersu [106], [107].

Zavisnost čvrstoće betona pri pritisku od njegove mikrostrukture može se na bazi

odnosa gel/prostor, a primenom opšte relacije (3.16) analizirati i na sledeći način.

Ako se izraz (3.15) za slučaj starosti betona od 28 dana, odnosno za $\alpha_n \approx 0,75$ ispiše u

$$\text{formi} \quad x = \frac{0,54}{0,24 + \omega} \quad (3.17)$$

relacija (3.16) će dobiti oblik

$$f_{k,28} = a \left(\frac{0,54}{0,24 + \omega} \right)^b = \frac{k_1}{(0,24 + \omega)^b}, \quad (3.18)$$

$$\text{gde je} \quad k_1 = a \cdot 0,54 \quad (3.19)$$

jedna nova konstanta koja će u opštem slučaju, s obzirom na usvojenu postavku problema jedino zavisiti od čvrstoće (klase) upotrebljenog cementa.

Relacija (3.18) je, kao što se vidi, po svom obliku identična poznatom Fereovom obrascu za određivanje čvrstoće $f_{k,28}$, pa se veličine parametara (konstanti) k_1 i b koje u njoj figurišu mogu odrediti tako da se vrednosti $f_{k,28}$ po Fereu i preko izraza (3.18) u zadovoljavajućoj meri podudare. S tim u vezi može se postaviti uslov da funkcija (3.18) za $\omega = 0,4$ i $\omega = 0,8$ ima vrednosti koje odgovaraju Fereovom obrascu, pa se na taj način, pretpostavljajući da je $\gamma_{sc} \approx 3000 \text{ kg/m}^3$, dolazi do veličina

$$k_1 = 0,0928k, \quad b = 1,793, \quad (3.20)$$

gde je k parametar koji figuriše u Fereovom obrascu.

Prema tome, polazeći od odnosa gel/prostor, dobija se relacija

$$f_{k,28} = \frac{k_1}{(0,24 + \omega)^{1,793}}, \quad (3.21)$$

u kojoj konstanta k_1 ima sledeće vrednosti:

- cement klase 25 - $k_1 = 16,7 \text{ MPa}$,
- cement klase 35 - $k_1 = 23,2 \text{ MPa}$,
- cement klase 45 - $k_1 = 29,7 \text{ MPa}$,
- cement klase 55 - $k_1 = 36,2 \text{ MPa}$.

Nije teško pokazati da se izraz (3.21) i Fereov obrazac za $0,3 \leq \omega \leq 1,0$ izvanredno slažu; apsolutna vrednost greške je ispod 2%. Ovde treba istaći činjenicu da je Fereov obrazac

u suštini koncipiran na bazi parametara makrostrukture betona (na šta je već ukazano u tački 3.2), pri čemu je osnova za njegovo izvođenje bila opšta relacija

$$f_{k,28} = k \cdot d^m; \quad (3.22)$$

d predstavlja relativnu gustinu cementnog kamena u okviru betona koja se može izraziti u obliku

$$d = \frac{\bar{v}_c}{\bar{v}_{cp}} = \frac{\bar{v}_c}{1 - v_p - \bar{v}_a}. \quad (3.23)$$

Ako se uzme u obzir da je $\bar{v}_c = \frac{m_c}{\gamma_{sc}}$, a $\bar{v}_{cp} = \frac{m_c}{\gamma_{sc}} + \frac{m_v}{\gamma_{sv}}$, dobiće se da je

$$d = \frac{1}{1 + \omega \frac{\gamma_{sc}}{\gamma_{sv}}}, \quad (3.24)$$

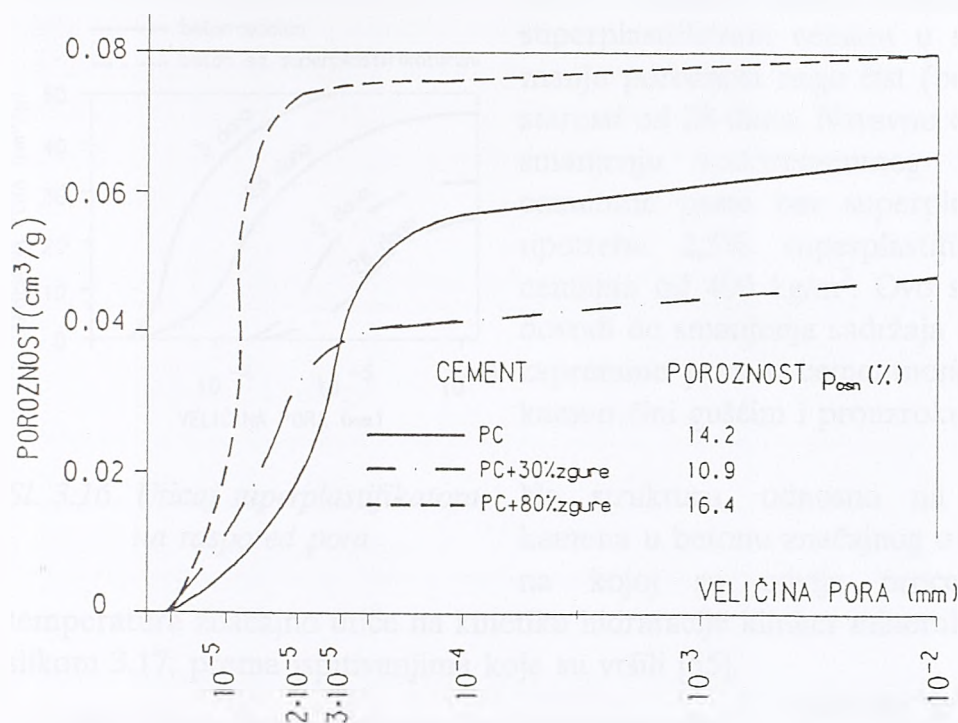
pa se relacija (3.22) konačno može napisati u obliku

$$f_{k,28} = \frac{k}{\left(1 + \omega \frac{\gamma_{sc}}{\gamma_{sv}}\right)^m}. \quad (3.25)$$

Kao što se vidi, za slučaj $m = 2$ izraz (3.25) u potpunosti odgovara Fereovom obrascu saglasno [91].

Imajući u vidu sve do sada izloženo može se zaključiti da Fereov obrazac karakteriše svojevrsna univerzalnost, pošto on omogućava da se čvrstoća betona izrazi i u funkciji makro i u funkciji mikrostrukture.

Mikrostruktura betona sa cementima sa dodatkom zgure u principu je identična mikrostrukтури betona na bazi čistog portland cementa. Ispitivanja međutim, pokazuju da se pri primeni zgure kao dodatka cementu menja dimenzionalni raspored pora tako da se dobija veći procenat sitnijih pora. Pri ovome, međutim, kod cementa sa dodatkom zgure do 30% osnovna poroznost se smanjuje u odnosu na slučaj primene čistog portland cementa, dok se pri većim količinama zgure osnovna poroznost betona povećava u odnosu na beton sa čistim portland cementom. O ovome vrlo ubedljivo svedoče rezultati ispitivanja [126] čiji se dijagram dobijen ispitivanjima daje na sl. 3.15.



Sl. 3.15 Uticaj vrste cementa na dimenzionalni raspored pora

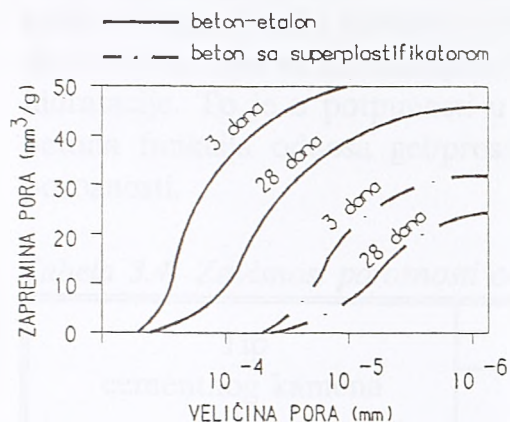
primena superplastifikatora smanjuje procenat krupnijih pora povećavajući u izvesnoj meri sadržaj sitnih pora. Navedeni autori klasifikuju pore na krupne i sitne s obzirom na granicu od $1000 \text{ \AA} = 10^{-4} \text{ mm}$, pri čemu po njima, krupne pore predstavljaju opasne pore koje snižavaju čvrstoću betona, a povećavaju njegovu paropropustljivost, vodopropustljivost i dr. Rezultati ispitivanja ovih autora daju se u tabeli 3.3, koja jasno pokazuje da se pri starosti od 28 dana sadržaj krupnih pora u cementnom kamenu pri primeni superplastifikatora skoro dva puta smanjuje.

Tabela 3.3 Uticaj superplastifikatora na veličinu pora

Tipovi cementnih pasta	Zapremina kapilarnih pora, cm^3/g			Pore, %	
	Ukupna zapremina	Sitne pore	Krupne pore	Krupne	Sitne
Referentna pasta	0,0720	0,0433	0,0287	40	60
Pasta sa dodatkom melamin kondenzata	0,0860	0,0663	0,0197	23	77
Pasta sa dodatkom naftalin kondenzata	0,0870	0,0692	0,0178	20	80

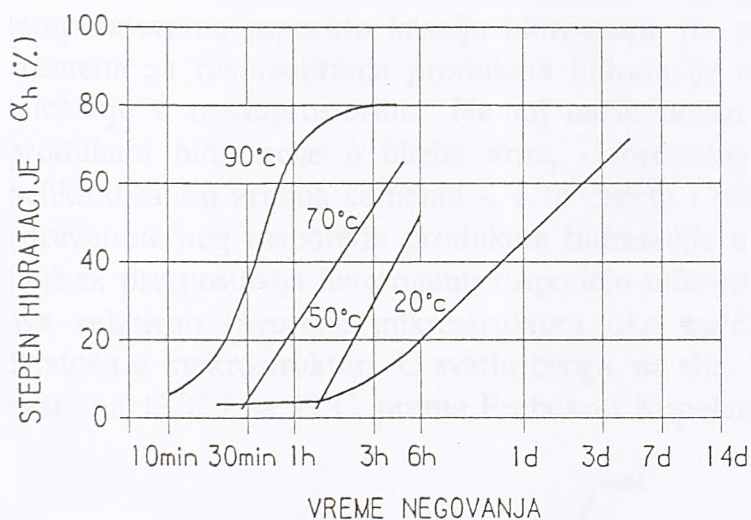
Isto tako, Monosi i Kolepardi [87] daju kumulativnu zapreminu pora u funkciji radijusa pora i to za cementnu pastu uz primenu superplastifikatora kao i za čistu cementnu pastu. Sa slike 3.16 može se videti da se dodatkom 2,5% superplastifikatora ukupna zapremina,

Za objašnjenje ovog fenomena neki autori [13], [42], [126] uzimaju veliku reaktivnost zgure koja reaguje sa $\text{Ca}(\text{OH})_2$, koji se stvara pri hidrataciji portland cementa, uz obrazovanje amornog kalcijumhidrosilikata. Pri primeni dodatka betonu tipa superplastifikatora takođe se značajno menja raspored pora u mikrostrukturi betona, odnosno u cementnom kamenu. Prema ispitivanjima Mora i Mehte [89]



Sl. 3.16 Uticaj superplastifikatora na raspored pora

temperatura značajno utiče na kinetiku hidratacije klinker minerala što se može ilustrovati slikom 3.17, prema ispitivanjima koje su vršili [55].



Sl. 3.17 Uticaj temperature na kinetiku hidratacije klinker minerala C_3S

se očvršćavanje betona odvija u uslovima povećane temperature i potpunog zasićenja atmosfere vodenom parom. Ispitivanja pokazuju da zaparivani betoni imaju veoma uvećanu integralnu poroznost p_{osn} . Primera radi, ovde se navode podaci iz literature [133], koji se mogu prikazati putem tabele 3.4.

Ispitivanja takođe pokazuju da se dodatnim negovanjem u vodi, prethodno zaparivanih betona u izvesnoj meri smanjuju poroznost p_{osn} i radijusi kapilara, međutim, ovakvi betoni praktično uvek zadržavaju osnovnu karakteristiku - veliku osnovnu poroznost i veću mikrokapilarnu poroznost.

Kao što je već ranije rečeno, povišena temperatura ubrzava hemijske reakcije pri hidrataciji cementa (videti relaciju 2.11), što povoljno utiče na rane čvrstoće betona, ali

kao i veličine pora značajno smanjuju, tako da superplastificirani cement u starosti od 3 dana ima manju poroznost nego čist (bez superplastifikatora) u starosti od 28 dana. Naravno ovde se radilo o velikom smanjenju vodocementnog faktora od 0,55 kod cementne paste bez superplastifikatora, na 0,32 uz upotrebu 2,5% superplastifikatora, a pri količini cementa od 400 kg/m^3 . Ovo smanjenje sadržaja vode dovodi do smanjenja sadržaja kapilarnih pora i uopšte zapremine pora u cementnom kamenu, što cementni kamen čini gušćim i prouzrokuje porast čvrstoće.

Na strukturu, odnosno na poroznost cementnog kamena u betonu značajnog uticaja ima i temperatura na kojoj se odvija proces hidratacije. Naime,

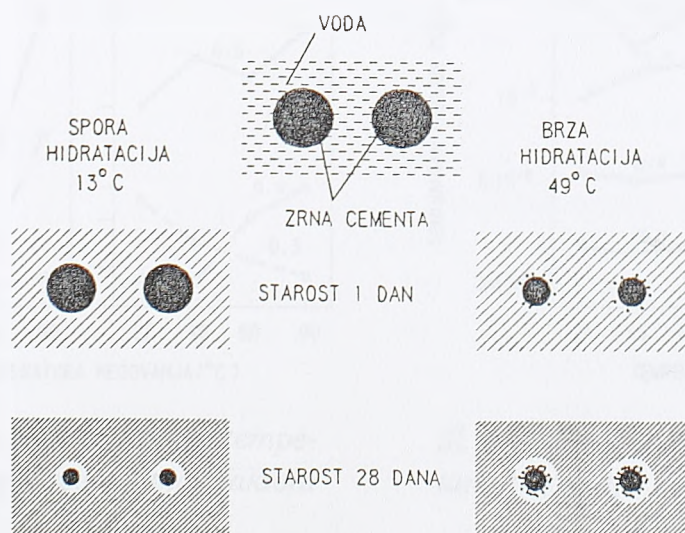
Kao što je poznato, voda koja se nalazi u kapilarnim prostorima u okviru svežeg betona, kao i u porama očvrslog betona sa radijusima većim od 10^{-4} mm , može da isparava čak i kada je vazduh potpuno zasićen vodenom parom [15], [81]. Na taj način često dolazi do pojave da se prostori u cementnoj pasti, odnosno cementnom kamenu, ranije ispunjeni vodom ne mogu popuniti gelom, pa stoga u betonu dolazi do pojave dodatnih pora i mikrokapilara. Ova pojava se ispoljava čak i pri hidrotermalnoj obradi betona zaparivanjem, kada

se to negativno odražava na docnije čvrstoće. Objašnjenje ove pojave je potpuno logično kada se imaju u vidu podaci o poroznosti prikazani u tabeli 3.4, koji navode na zaključak da se brzom ranom hidratacijom formiraju porozniji - slabije fizičke strukture - proizvodi hidratacije. To je u potpunosti u skladu sa zavisnošću (3.16), koja kazuje da je čvrstoća betona funkcija odnosa gel/prostor (x), na koju presudnog uticaja ima nivo kapilarne poroznosti.

Tabela 3.4 Zavisnost poroznosti od načina nege

Tip cementnog kamena	Poroznost (cm^3/g) - Način nege	
	28 dana u vodi	zaparivanje
"Čist" cementni kamen	0,061	0,115
Cementni kamen u betonu	0,066	0,092

S druge strane, prema Ferbeku i Helmutu [140], ubrzana početna hidratacija na povišenim temperaturama usporava kasniju hidrataciju, jer pri ubrzanoj hidrataciji nema dovoljno vremena za rasprostiranje produkata hidratacije od zrna cementa u polje i za njihovo taloženje u međuprostorima. Na taj način dolazi do obrazovanja visoke koncentracije produkata hidratacije u blizini zrna, - formiranja kondenzovane prevlake hidrata na nehidratiranim zrnima cementa -, a to ometa i usporava kasniju hidrataciju i dovodi do neravnomernog rasporeda produkata hidratacije u cementnom kamenu. Drugim rečima Ferbek pretpostavlja heterogenu raspodelu mikrostrukture na povišenim temperaturama; ova relativno otvorena mikrostruktura oko gušćih zrna je razlog za dobijanje nižih čvrstoća u makrostrukтури. U svetlu ovoga, na slici 3.18 prikazana je hidratacija cementne paste na 13°C i na 49°C , prema Ferbeku i Kopelandu [12].

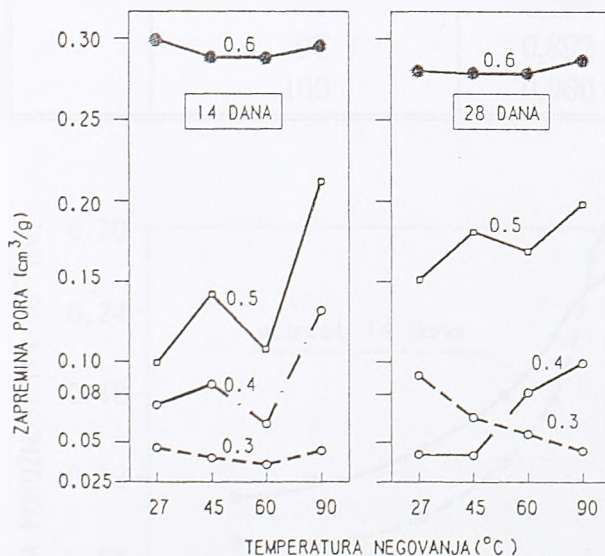


Sl. 3.18 Uticaj temperature na količinu i homogenost produkata hidratacije

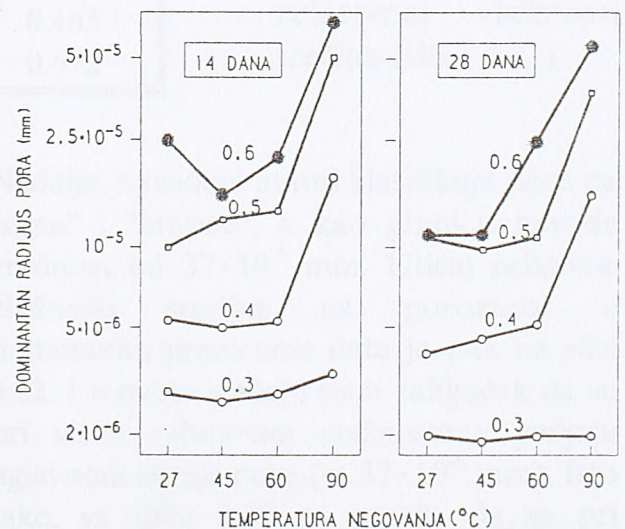
Kao što se vidi sa slike 3.18, hidratacijom na umerenoj temperaturi (13°C) dobija se homogenija mikrostruktura, kao i veći procenat proizvoda hidratacije, što dovodi i do većih konačnih mehaničkih karakteristika betona. S druge strane, pak, pri ubrzanoj početnoj hidrataciji (49°C) nema dovoljno vremena za ravnomernu difuziju i taloženje primarnih proizvoda hidratacije, tako da se u većoj starosti smanjuje krajnji stepen hidratacije. To dovodi do formiranja lokalno slabih mesta u strukturi betona, pa i nižih mehaničkih čvrstoća. Drugim rečima, čvrstoća betona pri pritisku u velikoj meri zavisi od fizičke strukture formiranog gela.

Povišena temperatura ima uticaja na specifičnu površinu produkata hidratacije kao i na zapreminu i radijus pora. Istraživanjima [108] se došlo do zaključka da specifična površina produkata hidratacije ne utiče bitno na svojstva očvrslog cementnog kamena pa i betona. Međutim, kao što je poznato, zapremina, a posebno radijus pora i njihov raspored bitno utiču na mehanička svojstva. Ispitivanja pokazuju da se osim sa vodocementnim faktorom, poroznost povećava i sa temperaturom negovanja betona. Temperatura negovanja takođe utiče i na veličinu formiranih pora koje se javljaju kao dominantne u okviru ukupne poroznosti cementnog kamena.

Uticaj povišene temperature na zapreminu kao i na radijus pora prikazan je na slikama 3.19 i 3.20. U oba slučaja radilo se o cementnim pastama spravljenim uz dodatak 40% zgure pri različitim vodocementnim faktorima (0,3; 0,4; 0,5 i 0,6). Kao što se vidi, a prema istraživanjima Roja i Idorna [126] povišene temperature, a naročito one preko 60°C utiču na intenzivno povećanje radijusa pora u strukturi cementnog kamena.



Sl. 3.19 Zapremina pora u funkciji temperature negovanja i vodocementnog faktora



Sl. 3.20 Radijus pora u funkciji temperature negovanja i vodocementnog faktora

I relativna vlažnost sredine, kao medijum u kome se vrši negovanje tj. obrazovanje strukture, ima uticaja na osnovnu poroznost i veličinu pora u cementnom kamenu. Rezultati novijih istraživanja (Patel, Kiloh, Parot, Gatridž), [113], pomoću difrakcije x zraka pokazuju da brzine hidratacije sva četiri osnovna klinker minerala u velikoj meri zavise od relativne

vlažnosti sredine. Naime, smanjivanjem relativne vlažnosti, na primer sa 97 na 70% reakcije hidratacije se usporavaju.

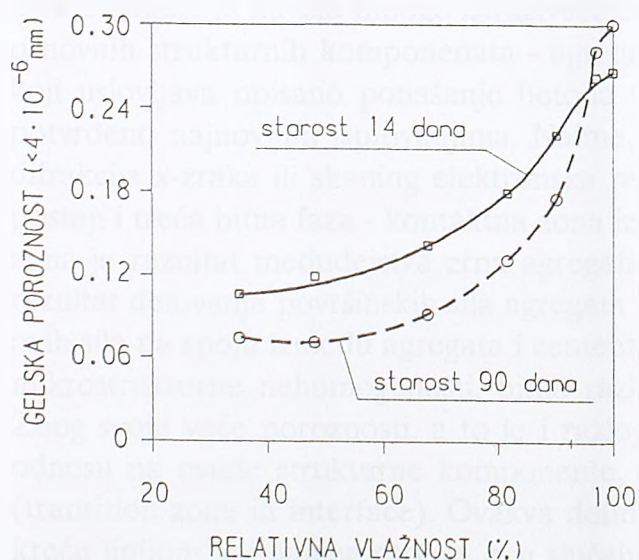
U tabeli 3.5 prema [113] prikazuju se stepen hidratacije i osnovna poroznost u funkciji relativne vlažnosti sredine za različite starosti cementnog kamena. Prema ovim

Tabela 3.5 Zavisnost α_h i p_{osn} od relativne vlažnosti i starosti

Starost (dani)	Relativna vlažnost (%), pri 20°C	Stepen hidratacije	Osnovna poroznost
2	100	0,474	0,518
14	33	0,538	0,516
	49	0,581	0,528
	69	0,621	0,512
	81	0,635	0,523
	91	0,705	0,513
	97	0,764	0,502
	100	0,762	0,513
90	33	0,553	0,503
	49	0,560	0,502
	69	0,605	0,506
	81	0,687	0,503
	91	0,788	0,475
	97	0,892	0,463
	100	0,900	0,472

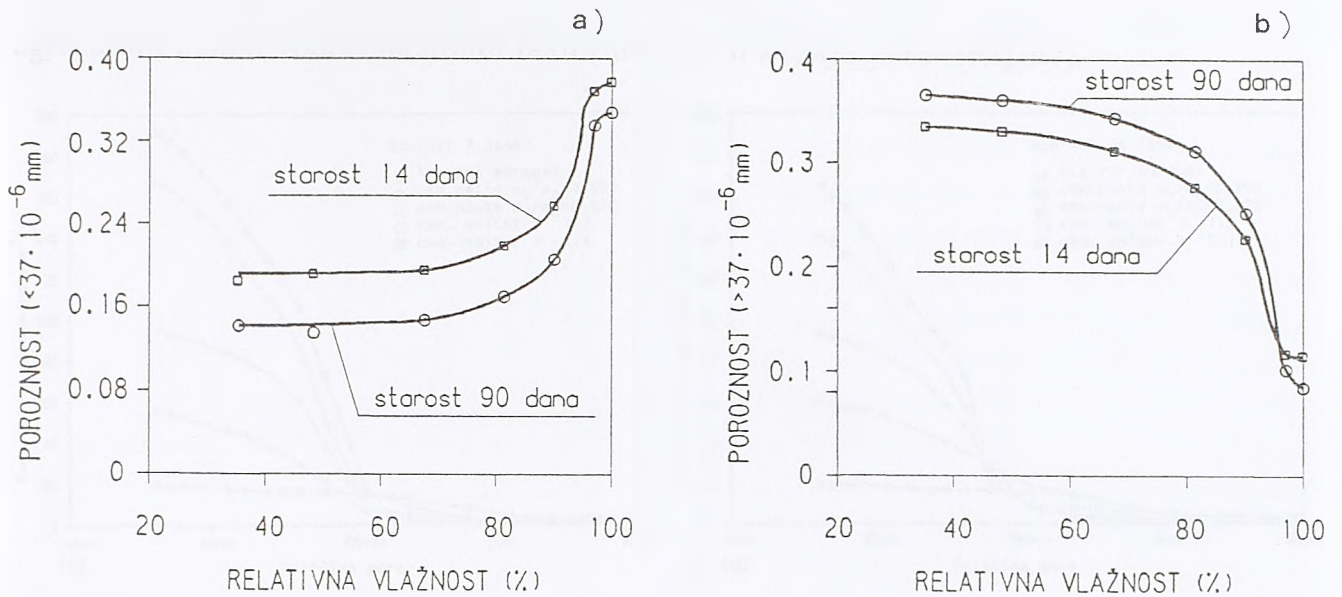
istraživanjima, poroznost cementnog kamena posebno u starosti od 90 dana se smanjuje pri povećanju relativne vlažnosti sredine. Ovo se naročito odnosi na relativnu vlažnost veću od 81%, pri čemu se, kao što se vidi, i stepen hidratacije značajno povećava.

Isti autori navode da se i gelska poroznost (prema njihovoj klasifikaciji dimenzija manjih od $4 \cdot 10^{-6}$ mm) povećava pri visokoj relativnoj vlažnosti sredine (slika 3.21).



Sl. 3.21 Uticaj relativne vlažnosti sredine na obrazovanje gelske poroznosti

Nadalje, navedeni autori klasifikuju pore na "sitne" i "krupne", a kao granicu navode vrednost od $37 \cdot 10^{-6}$ mm. Uticaj relativne vlažnosti sredine na poroznost u pomenutim granicama data je pak na slici 3.22. I u ovom slučaju sledi zaključak da se pri višim relativnim vlažnostima javljaju uglavnom sitnije pore ($< 37 \cdot 10^{-6}$ mm). Isto tako, sa slike 3.22 se zapaža da se pri visokoj relativnoj vlažnosti (90-95%), zapremina krupnih pora može smanjiti oko 3 puta. Napred navedeni autori ističu da se visoka poroznost ($> 37 \cdot 10^{-6}$ mm) dobijena pri niskim relativnim vlažnostima može dovesti u vezu sa značajnim povećanjem brzine difuzije u procesu hidratacije cementa.



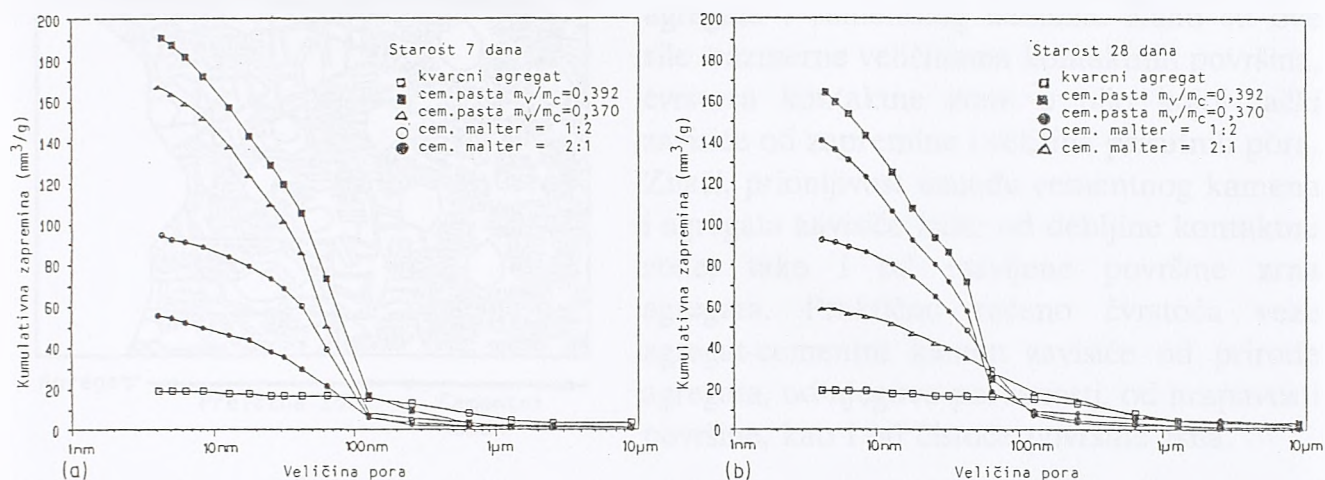
Sl. 3.22 Uticaj relativne vlažnosti sredine na obrazovanje "sitne" (a) i "krupne" (b) poroznosti

3.4 KONTAKTNA ZONA AGREGAT-CEMENTNI KAMEN

Ispitivanja pokazuju da su u opštem slučaju svojstva betona (čvrstoća pri pritisku, modul elastičnosti, skupljanje, tečenje i dr.) negde na sredini između odgovarajućih svojstava cementnog kamena i agregata. Međutim, ispitivanja pokazuju da permeabilnost, koja se danas uzima kao vrlo pouzdan pokazatelj trajnosti betona, neodgovara navedenom stavu. Naime, poznata je činjenica da je permeabilnost uobičajenih agregata izuzetno visoka, dok je permeabilnost cementnog kamena skoro dvostruko niža od permeabilnosti betona za istu vrednost vodocementnog faktora i druge relevantne parametre.

Ova okolnost je navela mnoge istraživače na zaključak da u okviru strukture betona, osim osnovnih strukturnih komponenata - agregata i cementnog kamena - postoji i treći faktor koji uslovljava opisano ponašanje betona u vezi sa permeabilnošću, što je u potpunosti potvrđeno najnovijim ispitivanjima. Naime, ispitivanja savremenim tehnikama, kao što su difrakcija x-zraka ili skaning elektronska mikroskopija, pokazala su da u strukturi betona postoji i treća bitna faza - kontaktna zona između zrna agregata i cementnog kamena. Ova zona je rezultat međudejstva zrna agregata i cementne paste u svežem betonu, odnosno rezultat delovanja površinskih sila agregata i niza drugih faktora na cementnu pastu. Usled ovih sila na spoju između agregata i cementnog kamena formira se kontaktna zona izrazite mikrostrukturne nehomogenosti, bitno različita od strukture ostalog cementnog kamena. Zbog svoje veće poroznosti, a to je i razlog veće permeabilnosti ovog kontaktnog sloja u odnosu na ostale strukturne komponente, ova zona se često naziva i tranzitnom zonom (transition zone ili interface). Ovakva definicija je potpuno na mestu, pošto se fluidi uvek kreću linijom najmanjeg otpora, a u slučaju betona, ova zona baš ima ovakvu osobinu. O većoj poroznosti kontaktne zone na vrlo ilustrativan način govore krive prikazane na slikama 3.23a i 3.23b, koje se odnose na raspored pora kod čistog kvarcnog agregata, kod cementnih pasta sa različitim vodocementnim faktorima, kao i kod betona sa kvarcnim

agregatom i istim vodocementnim faktorima kao u slučaju paste [65],[67].



Sl. 3.23 Raspored pora kod kvarcnog agregata, cementnih pasta i odgovarajućeg betona

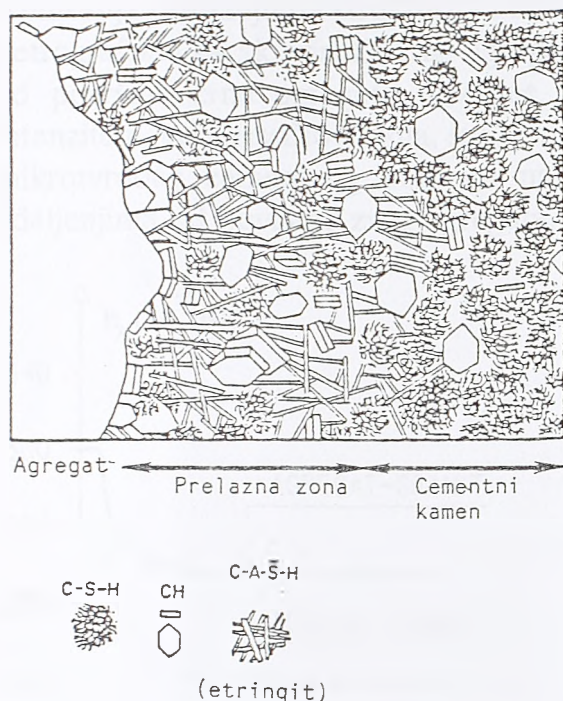
Ispitivanja su pokazala da se kontaktna zona sastoji od pločastih kristala kalcijum hidroksida, koji nastoje da se orijentišu po slojevima paralelno sa površinom agregata, zatim od etringita povećane koncentracije, kao i od izvesne manje količine produkata hidratacije tipa C-S-H. Ispitivanjima se došlo do zaključka da širina ove zone iznosi oko 0,06 mm (2-3 prečnika zrna cementa - prema [90]), mada neki autori smatraju da širina ove zone može da se kreće u granicama između 0,05 - 0,1 mm. Cimbelman [67] je pomoću skaning elektronskog mikroskopa došao do zaključka da debljina ove zone iznosi svega 2-3 μm .

Kod visokih vodocementnih faktora proizvodi hidratacije u blizini velikih zrna agregata sastoje se od relativno velikih kristala [15], [36], [91]. Ovo se dešava stoga što kontaktna zona sadrži relativno malu količinu cementa, a mnogo više prostora ispunjenog vodom, tako da kristali, u prvom redu $\text{Ca}(\text{OH})_2$, mogu nesmetano da rastu. Na taj način praktično dolazi do taloženja kristala $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na površini zrna agregata i do svojevrsnog srastanja cementne paste sa agregatom. Prisustvo ovih kristala je osnovni razlog zbog koga dolazi do stvaranja jako porozne strukture ove zone, strukture sa relativno velikim porama. Ovo je prema Mehti i Ajcinu [82] prikazano na sl. 3.24.

Imajući u vidu izloženo, može se zaključiti da će sile veze između agregata i cementnog kamena u kontaktnoj zoni između ostalog, biti i funkcije upotrebljene količine cementa. Prema [91] smatra se da sa ovog stanovišta minimalna količina cementa u betonu treba da iznosi 150-200 kg/m^3 .

Kao što je poznato, čvrstoća cementnog gela, pa i betona, proizilazi iz dve vrste veza:

- prva vrsta je u fizičkom privlačenju između čvrstih površina razdvojenih samo sitnim gelskim porama, koje se nazivaju Vandervalsove sile;
- druga vrsta veza su hemijske veze (uglavnom vodonične veze) koje su mnogo jače od Vandervalsovih, ali pokrivaju samo mali deo kontakta gelskih čestica.

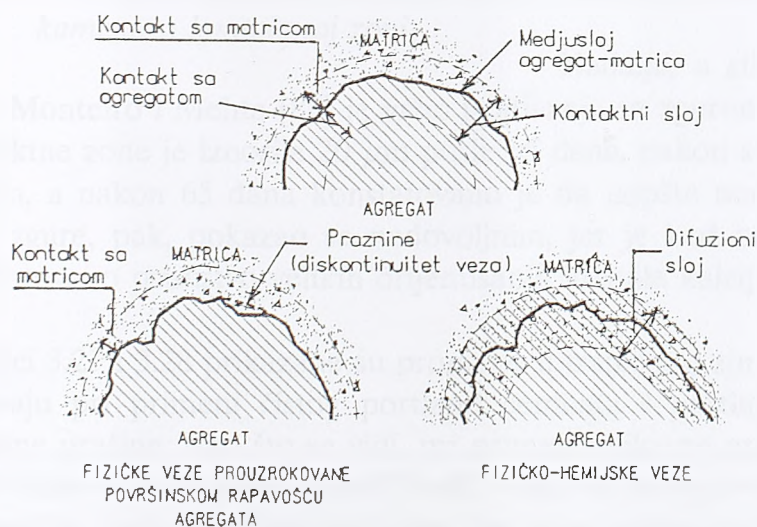


Sl. 3.24 Šematski prikaz kontaktne zone

Vandervalsove sile takođe predstavljaju osnovni faktor prijanjanja između zrna agregata i cementnog kamena. Kako su ove sile srazmerne veličinama kontaktnih površina, čvrstoća kontaktne zone u bilo kojoj tački zavisice od zapremine i veličine prisutnih pora. Znači, prionljivost između cementnog kamena i agregata zavisice kako od debljine kontaktne zone, tako i od razvijene površine zrna agregata. Praktično rečeno čvrstoća veze agregat-cementni kamen zavisice od prirode agregata, od njegove poroznosti, od hrapavosti površine, kao i od čistoće površine zrna.

Šematski prikaz međuzavisnosti između agregata i cementne paste dat je na slici 3.25. [131]. Kao što se vidi, dodatne hemijske veze u docnijem stadijumu hidratacije takođe imaju uticaja na čvrstoću kontaktne zone.

Važnost kontaktne zone dolazi do izražaja i kod betona visokih čvrstoća kod kojih je



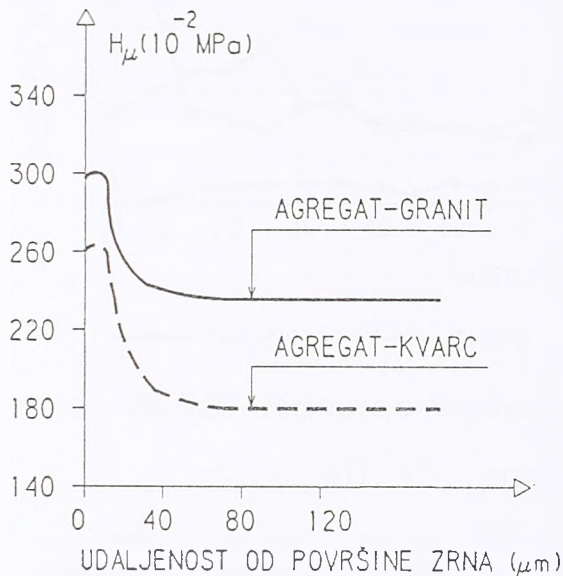
Sl. 3.25 Šematski prikaz međuzavisnosti između agregata i cementne paste u kontaktnoj zoni

veoma značajno da integralna poroznost bude što je moguće niža. S tim u vezi potrebno je dobiti i što nižu poroznost kontaktnog sloja, a takođe i slabo kristalne proizvode i homogenu mikrostrukturu [13], [82]. U tom smislu potrebno je što više smanjiti vodocementni faktor uz pažljivo odabran sastav agregata i dovoljnu količinu cementa.

Generalno govoreći

čvrstoća betona raste pri propisnom negovanju sa vremenom, i to sve dok nehidratirane čestice cementa nastavljaju da formiraju produkte hidratacije, koji teže da smanje veličinu i ukupnu zapreminu šupljina, posebno u tranzitnoj zoni. Drugim rečima, daljim napredovanjem hidratacije, kada kristali C-S-H i druga generacija malih kristala etringita i $\text{Ca}(\text{OH})_2$ počinju da popunjavaju prazne prostore između mreže sastavljene od velikih kristala etringita i $\text{Ca}(\text{OH})_2$, povećava se gustina i čvrstoća tranzitne zone, a smanjuje propustljivost - permeabilnost.

Ispitivanja pokazuju da strukturna i druga svojstva kontaktne zone zavise i od mineraloško-petrografskih karakteristika zrna agregata i da se svojstva ove zone menjaju sa udaljavanjem od površine zrna agregata. Ovo se najčešće objašnjava odgovarajućim smanjivanjem intenziteta Vandervalsovih sila, što se može ilustrovati slikom 3.26, koja pokazuje promenu mikrotvrdoće cementnog kamena na samom kontaktu sa agregatom i na različitim udaljenjima od površine zrna agregata, [7].



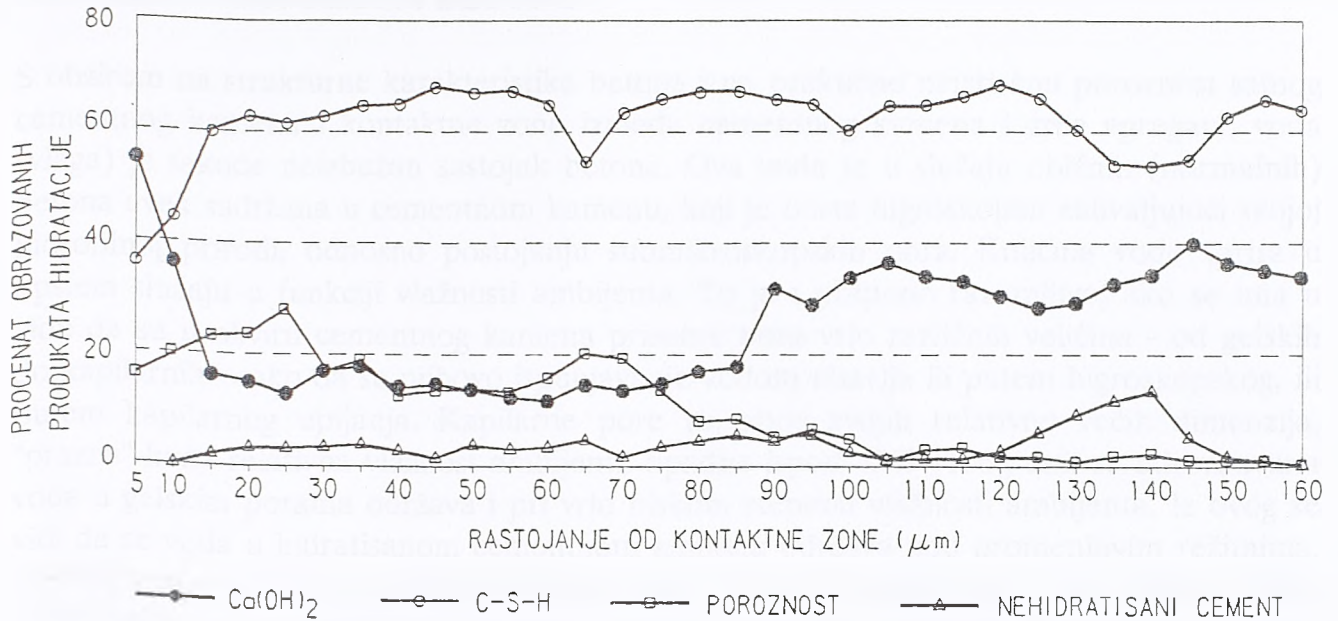
Sl. 3.26 Promena mikrotvrdoće cementnog kamena u kontaktnoj zoni

U cilju poboljšanja svojstava i smanjenja debljine kontaktnog sloja u betonu vršena su različita ispitivanja. Tako, na primer, prema Mehti [36], [134] dodatkom pucolana moguće je smanjiti debljinu ove zone preko nekoliko mehanizama. Kao prvo, uključanjem sitnih čestica smanjuje se defekt strukture - izdvajanje vode (bleeding). Drugo, fine čestice pucolana služe kao centri nukleacije za kristalizaciju $\text{Ca}(\text{OH})_2$, tako da se umesto velikih kristala $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formiraju brojni sitni kristali haotične orijentacije. Treće, spora hemijska reakcija dozvoljava transformaciju kalcijum hidroksida u kalcijumsilikathidrate, redukujući time debljinu kontaktne zone.

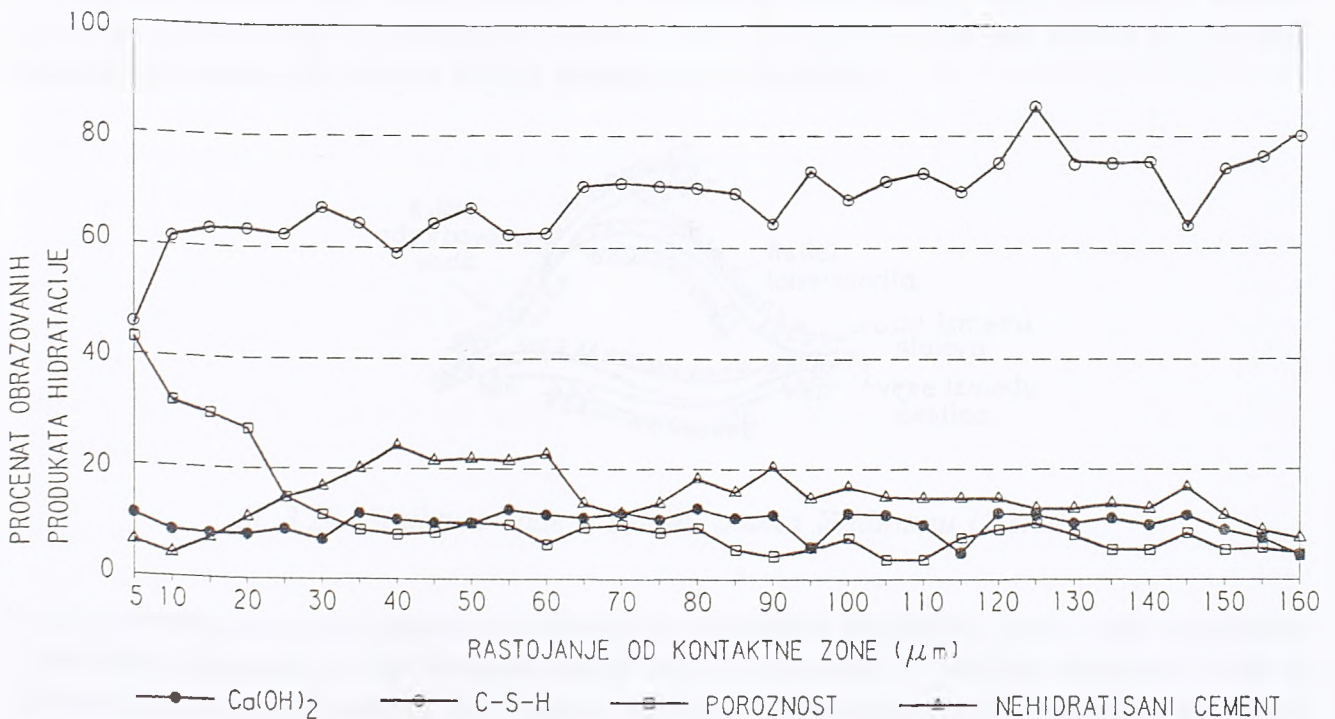
Nadalje, u cilju smanjenja debljine kontaktne zone Monteiro i Mehta [88] je vršio ispitivanja sa zgurom. Dodatkom 30% zgure debljina kontaktne zone je iznosila 20 μm posle tri dana, nakon sedam dana nešto malo manje od 20 μm, a nakon 65 dana konstatovano je da uopšte nema kontaktne zone. Dodatak od 10% zgure, pak, pokazao se nedovoljnim, jer je kod ovih mešavina u kontaktnoj zoni, konstatovano prisustvo velikih orijentisanih kristala kalcijum hidroksida .

Na slici 3.27 i 3.28 prikazane su promene u tranzitnoj zoni nakon 28 dana starosti, koje se dešavaju pri primeni čistog portland cementa i portland cementa sa dodatkom 20% silikatne prašine. Kao što se vidi, pri primeni silikatne prašine odvija se hemijska reakcija preko koje se kalcijumhidroksid "troši", tako da je njegov sadržaj zanemarljiv u odnosu na cement bez dodatka silikatne prašine. Isto tako, procenat obrazovanih produkata hidratacije tipa C-S-H kod cementa sa 20% silikatne prašine je veći, a dobijena struktura je gušća i boljih mehaničkih karakteristika.

Usled prisustva relativno velikih nepopunjenih prostora, u kontaktnoj zoni se javljaju mikroprslina mnogo lakše nego u samom cementnom kamenu. Istraživanja pokazuju da vrlo fine prslina postoje na kontaktu agregata i cementnog kamena još pre nego što je beton izložen opterećenju. Te prslina ostaju bez promena sve dok se ne dostigne oko 30% graničnog opterećenja, a tada počinju da se povećavaju [106]. Isto tako, pod uticajem termičkih naprezanja ili skupljanja opet se javljaju brojne mikroprslina. Prema tome, bez obzira na to koji je uzrok javljanju prslina, one se prvo manifestuju baš u kontaktnoj zoni. Zbog toga se sasvim osnovano kontaktna zona smatra najslabijim mestom u betonu i to

$m_v/m_c = 0.45$, portland cement, 28dana


Sl. 3.27 Promene u kontaktnoj zoni pri primeni čistog portland cementa

 $m_v/m_c = 0.45$, portland cement sa 20% SiO₂, 28dana


Sl. 3.28 Promene u kontaktnoj zoni pri primeni portland cementa sa 20% silikatne prašine

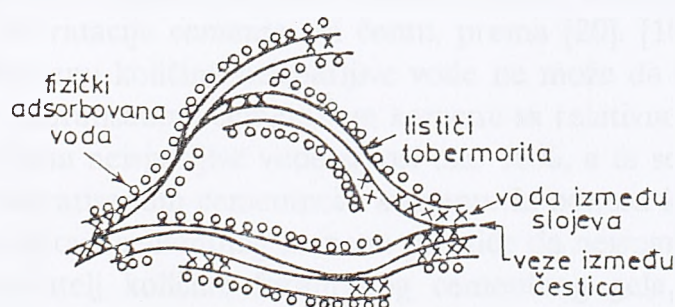
kako u pogledu mehaničkih svojstava, tako i u pogledu trajnosti.

Neki autori [91] ističu činjenicu da zaprljanost zrna agregata filmom gline (kod rečnog agregata) ili slojem prašine (kod drobljenog agregata) utiče na kontaktni sloj, tj. da veza agregat-cementni kamen ovim biva bitno ugrožena. Međutim, ni najnovijim ispitivanjima ova činjenica nije u potpunosti dokazana [78].

3.5 VODA U OČVRSLOM BETONU

S obzirom na strukturne karakteristike betona i na praktično neizbežnu poroznost samog cementnog kamena i kontaktne zone između cementnog kamena i zrna agregata, voda (vlaga) je takođe neizbežan sastojak betona. Ova voda je u slučaju običnih (normalnih) betona uvek sadržana u cementnom kamenu, koji je dosta higroskopan zahvaljujući svojoj hidrofilnoj prirodi, odnosno postojanju submikroskopskih pora. Količina vode varira u opštem slučaju u funkciji vlažnosti ambijenta. To je i potpuno razumljivo, ako se ima u vidu da su u okviru cementnog kamena prisutne pore vrlo različitih veličina - od gelskih do kapilarnih - tako da se njihovo ispunjavanje vodom obavlja ili putem higroskopskog, ili putem kapilarnog upijanja. Kapilarne pore se, zbog svojih relativno većih dimenzija, "prazne" kada relativna vlažnost ambijenta opadne ispod 45% [106], dok se adsorbovana voda u gelskim porama održava i pri vrlo niskom stepenu vlažnosti ambijenta. Iz ovog se vidi da se voda u hidratisanom cementnom kamenu održava pod promenljivim režimima. S jedne strane postoji potpuno slobodna voda, a hemijski vezana voda, kao integralni deo hidratiranih jedinjenja. Između ove dve krajnje kategorije nalazi se gelska voda, koja se održava u cementnom kamenu na više različitih načina.

Klasifikacija vode u betonu obično se bazira na mogućnostima za odstranjenje iz hidratiranog cementnog kamena. S tim u vezi postoji više podela vode prisutne u betonu i nekoliko modela koji ih prikazuju, međutim, čini se najprihvatljivijim model koji su dali Feldman i Sereda [59], [91], a koji je prikazan na slici 3.29.



Sl. 3.29 Struktura vode u betonu prema Feldmanu i Seredi

Pored vodene pare, koja zajedno sa vazduhom ispunjava kapilarne pore i veće šupljine u cementnom kamenu, a čija količina zavisi od temperature i pritiska vazduha, voda u očvrsлом cementnom kamenu koji formira strukturu betona nalazi se u sledećim stanjima:

- hemijski vezana voda, tj. voda vezana tokom procesa hidratacije u različita jedinjenja koja formiraju cementni gel; ova voda može biti vezana u obliku hidroksilnih jona ili u molekularnim jedinjenjima tipa kristalohidrata; to je voda koja se ne gubi sušenjem, već se odstranjuje jedino visokom temperaturom (preko 1000°C); voda vezana na ovaj način ne učestvuje u prenosu vlage i toplote u betonu;
- adsorbovana voda, voda koja je pod uticajem površinskih sila i koja je vezana za površinu gela; smatra se da do 6 molekulskih slojeva vode može biti fizički vezano

vodoničnim vezama; ove sile su u sloju navedene debljine veoma jake tako da i taj deo vode predstavlja gelsku - konstitucionu vodu cementnog kamena; glavni deo ove adsorbovane vode se može izgubiti u uslovima sušenja do 30% relativne vlažnosti, a ovaj gubitak vode je faktor koji opredeljuje skupljanje usled sušenja;

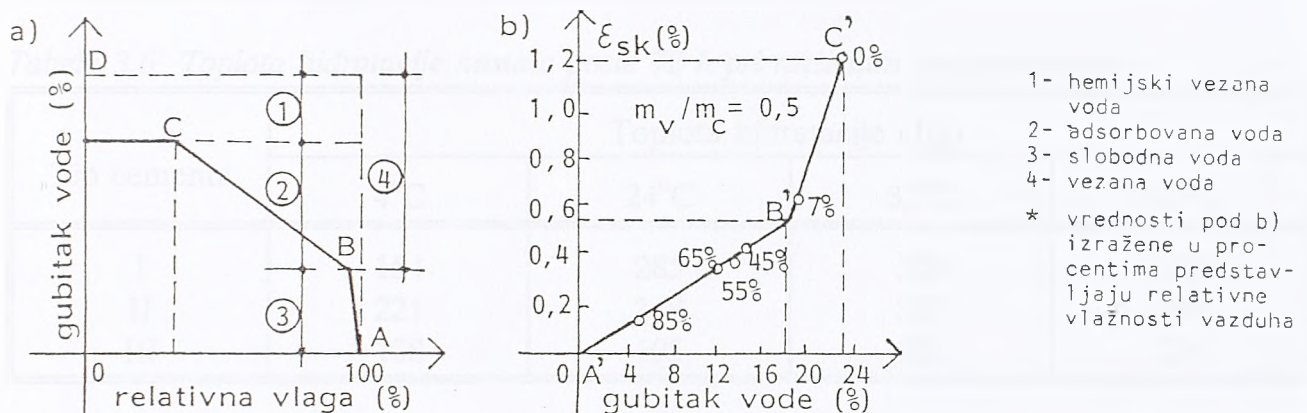
- međuslojna voda, koja penetrira u međuslojeve gela ili međukristalne prostore, slično kao kod glina; debljine ovih međuslojeva, koji su mnogo jače vezani nego kod adsorbovane vode, su reda veličine 10^{-6} mm, što odgovara dimenzijama gelskih pora, tako da se ova voda može na neki način tretirati kao deo gelske vode; međuslojna voda se gubi jedino jakim isušivanjem pri povišenim temperaturama i pri relativnoj vlažnosti < 10%, pri čemu struktura C-S-H može da pretrpi znatne promene (skupljanje); ovo se dešava usled prisustva značajnih Vandervalsovih sila koje su sposobne da drže čvrste površine na manjem udaljenju;
- kapilarna voda, koja se nalazi u kapilarnim porama i šupljinama; uputno je ovu vodu podeliti na dve kategorije, na vodu u velikim šupljinama reda veličine > 0,05 mm koju možemo smatrati slobodnom vodom, jer se ona nalazi van domašaja površinskih sila čvrste faze i njeno odstranjivanje ne izaziva nikakve zapreminske promene, i na vodu u manjim kapilarima (0,005-0,05 mm) koja je pod silama površinskog napona i pri njeno odstranjivanje izaziva skupljanje sistema.

Pored napred navedene podele, u literaturi se često sreće i podela vode u betonu na isparljivu i neisparljivu vodu. U skladu sa ovim, sasvim logično, količina neisparljive vode postaje sve veća tokom hidratacije cementa pri čemu, prema [20], [106], [117] u vodom zasićenom cementnom kamenu količina neisparljive vode ne može da bude veća od 50% ukupno prisutne vode. U hidratisanom cementnom kamenu sa relativno visokim stepenom hidratacije (80-90%), količina neisparljive vode iznosi oko 18%, a ta se količina povećava do oko 23% u potpuno hidratisanom cementnom kamenu. Iz odnosa količine neisparljive vode i zapremine čvrstih delova cementnog kamena proističe da neisparljiva voda može da bude vrlo pouzdan pokazatelj količine formiranog cementnog gela, odnosno stepena hidratacije.

Prisustvo pora i vode u okviru cementnog kamena proizvodi dimenzionalnu nestabilnost cementnog kamena, a to znači i betona. Ispitivanje pokazuje da se pri stopostotnoj relativnoj vlažnosti vazduha, na cementnom kamenu, odnosno betonu praktično ne događaju nikakve dimenzionalne promene. Međutim, u uslovima kada je relativna vlažnost sredine ispod 100%, beton počinje da gubi vodu i da se skuplja saglasno slici 3.30b. Kada je relativna vlažnost malo ispod 100% dolazi do isparavanja vode sadržane u većim porama (preko 50 μ m), (sl. 3.30a - linija AB). Pri ovome dolazi do relativno velikog smanjivanja količine vode u betonu, međutim taj gubitak je praćen srazmerno malim skupljanjem koje odgovara području A'B' prikazanom na sl. 3.30b. Kada se usled isparavanja pri nižim relativnim vlažnostima ambijenta iz betona evakuiše veći deo slobodne vode, (linija BC na sl. 3.30a), ovo smanjivanje količine vode rezultira znatnim skupljanjem (linija B'C' na sl. 3.30b). Ovo skupljanje je u stvari rezultat adsorbovane vode i vode sadržane u malim kapilarima cementnog kamena. Treba međutim istaći da međuslojna voda sadržana kao molekularni film unutar C-S-H sistema takođe može da

bude odstranjena intenzivnim sušenjem [15], [140].

Iz navedenog jasno se vidi da je pojava skupljanja betona, a to isto važi i za tečenje najtešnje povezana sa prisustvom vode u strukturi cementnog kamena i da se ove pojave mogu objasniti prisustvom kapilarnih sila u kapilarnim porama, kao i transportom vode iz kapilarnih pora u gelske pore i međuprostore u okviru gela, i obrnuto. Svakako, sve ove promene u odnosu na stanje vode uslovljene su s jedne strane termohigrometrijskim faktorima, a sa druge strane promenama naponskog stanja betona uslovljenim spoljašnjim opterećenjima.



Sl. 3.30 Gubitak vode u funkciji relativne vlažnosti (a) i skupljanje cementnog kamena kao funkcija gubitka vode (b)

3.6 DEFEKTI STRUKTURE BETONA

Osim što je struktura betona grubo nehomogena, u njemu, u opštem slučaju, postoji niz defekata, što sve zajedno ima vrlo velikog uticaja na ponašanje betona pod opterećenjem i pri delovanju drugih faktora. Ako se, u daljem iz razmatranja izuzmu nehomogenost betona, onda se kao najizrazitiji strukturni defekti i diskontinuiteti u betonu mogu označiti makropore, prsline i pukotine.

U literaturi se vrlo često, a naročito u onom njenom delu koji se bavi problemima mehanike loma betona defekti strukture dele na defekte prvog reda - okrugle defekte tipa mikropora i defekte drugog reda - defekte tipa prsline i pukotina koje karakterišu oštri završeci [144]. Kada je reč o prslinama i pukotinama onda se kao prsline najčešće definišu defekti sa otvorima do 0,3 mm, a kao pukotine defekti sa otvorima većim ili jednakim 0,3 mm.

Prsline i pukotine se javljaju zbog vrlo različitih uzroka. One se javljaju i u betonu koji nije izložen delovanju spoljašnjih opterećenja. Ovakvi defekti, a naročito fine prsline najčešće se javljaju na kontaktu agregata i cementnog kamena - u tranzitnoj zoni - i one su najčešće posledica skupljanja cementa i termičkih napona. U slučaju skupljanja, pošto je agregat

kruto povezan sa cementnim kamenom, dolazi do pojave unutrašnjih napona u masi betona, a na onim mestima gde ovi naponi premašuju zateznu čvrstoću, dolazi do pojave prslina. Ako je reč o prslinama i pukotinama od termičkih naprezanja, onda se njihova pojava objašnjava toplotom hidratacije cementa i spoljašnjim temperaturnim uticajima, kao i različitim koeficijentima linearnog širenja cementnog kamena i agregata.

Način na koji temperatura ambijenta pri kojoj se vrši hidratacija utiče na brzinu prirasta hidratacione toplote može se sagledati iz tabele 3.6 [106], ovo je od naročitog značaja kod masivnih elemenata, kod kojih nema adekvatne razmene toplote sa spoljašnjom sredinom. Tada može doći do značajnih termičkih naprezanja u betonu.

Tabela 3.6 Toplota hidratacije nastala posle 72 h pri različitim temperaturama

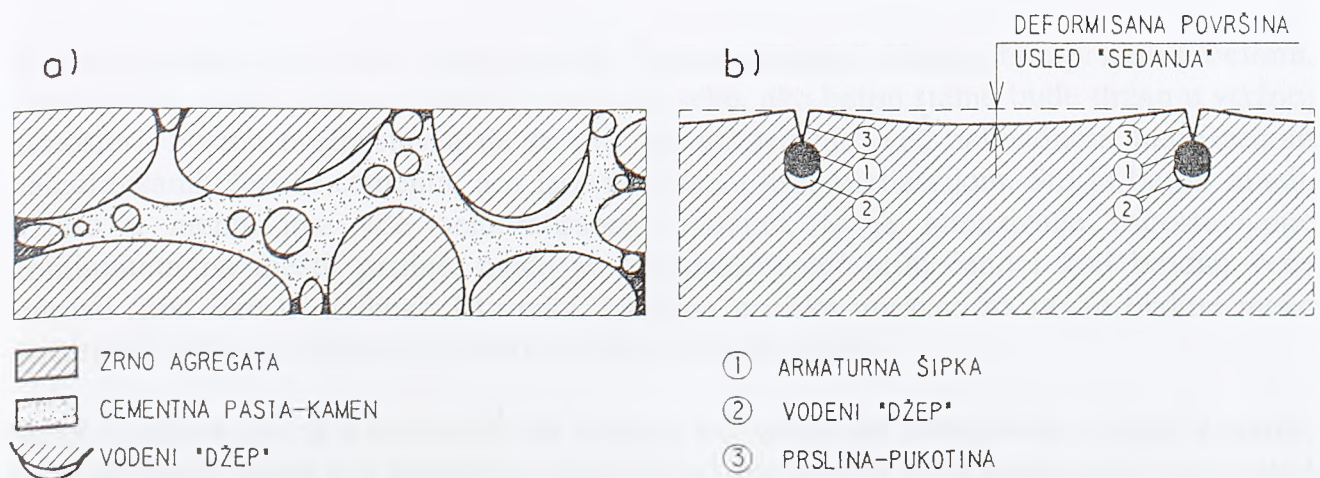
Tip cementa	Toplota hidratacije (J/g)			
	4°C	24°C	32°C	41°C
I	154	285	309	335
II	221	348	357	390
III	108	195	192	214

Tipovi cementa prema ASTM:

Tip I - običan portland cement, Tip II - "modifikovani" cement, Tip III - brzo očvršćavajući cement

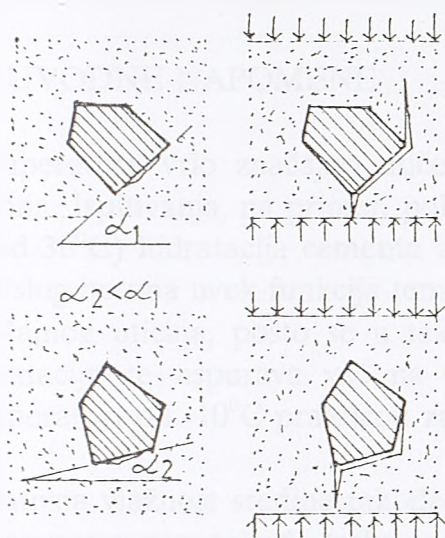
Na isti način kao i agregat u masi betona deluje i armatura, pa je njeno prisustvo u opštem slučaju takodje jedan od uzroka nastanka prslina i pukotina.

U defekte strukture betona svakako treba ubrojati i vodene "džepove" koji su vrlo često prisutni ispod krupnijih zrna agregata i armature (sl. 3.31a i sl. 3.31b). Ovi "džepovi" se, štaviše, zajedno sa već pomenutim prslinama u okviru tranzitne zone, smatraju za inicijatore fisuracije betona pod opterećenjem, i u takvim slučajevima, kada su betonski elementi izloženi naponima pritiska, fisure u betonu se uvek razvijaju, prema Zajcevu [144],



Sl. 3.31 Defekti strukture očvrstlog betona: "džepovi" ispod agregata (a) i ispod armature (b)

od ovakvih defekata na način prikazan na slici 3. 32.



Sl. 3.32 Razvoj prslina u betonu na mestu inicijalnih defekata

primenom različitih cemenata (sa manjim ili većim skupljanjem), količinom upotrebljenog cementa, vodocementnim faktorom i dr. Na primer, pri primeni cementa sa dodatkom zgure, po pravilu, pojava prslina je verovatnija, pošto ovakvi cementi sami po sebi pri svim ostalim identičnim uslovima, pokazuju veće deformacije skupljanja.

Temperaturni faktor je najčešće od prvorazrednog značaja za pojavu prslina i pukotina, pošto se pri temperaturnim razlikama u betonu mogu da jave značajni termički naponi i nehomogenost deformacija, kako u samoj masi betona (zbog različitih karakteristika konstituenata), tako i zbog različitih nivoa temperatura u masi betona i na spojašnjim površinama. Isto kao temperaturni gradijenti, na pojavu prslina (pukotina) mogu da imaju uticaja i gradijenti vlažnosti [110].

Na ovom mestu treba istaći i fenomen tzv. "samozalečenja". Naime, fine prsline u betonu, vrlo često se mogu potpuno "zalečiti" same od sebe, ako beton stalno bude držan u vlažnoj atmosferi. Postoji pretpostavka da se ovo "samozalečenje" vrši naknadnom hidratacijom nehidratiranih čestica cementa, a u izvesnoj meri i karbonatizacijom. Što je beton mlađi, tj. što u njemu ima više nehidratiranog cementa, to je intenzivnije uspostavljanje kontinuiteta na mestu prsline, mada je "samozalečenje" primećeno i kod betona veće starosti (npr. oko tri godine). Isto tako, primena pritiska upravno na ravan prsline može dovesti do bržeg i efikasnijeg "samozalečenja" betona [106].

Stvarna pojava prslina u betonu, ili čak i njegov lom zavise od kombinacije mnogih činilaca, pa se slobodno može reći da pojavu prslina retko kad izaziva samo jedan jedini nepovoljni činilac.

U hidratiranoj cementnoj pasti međuslojni prostori unutar C-S-H strukture i sitne pore koje su pod uticajem Vandervalsovih sila, ne mogu štetno uticati na čvrstoću, jer koncentracija naprezanja i odgovarajuća pojava prslina primenom opterećenja počinje od velikih kapilarnih pora [15], [81].

Imajući u vidu sve napred izloženo, proizilazi da će se defekti strukture betona pre njegovog izlaganja opterećenju uvek javljati kao posledica sastava betona, skupljanja i temperaturnih uticaja. Na primer, "džepovi" će uvek biti prisutni kod betona spravljenih sa većim količinama vode, a to znači da će njihovo postojanje biti svedeno na najmanju moguću meru upotrebom plastifikatora, odnosno superplastifikatora. S druge strane, pak, pojava prslina i pukotina će biti uslovljena

4. ZAVISNOST NEKIH SVOJSTAVA SVEŽEG I OČVRSLJENOG BETONA OD TERMOHIGROMETRIJSKIH PARAMETARA

4.1 UVODNE NAPOMENE

Temperatura vrlo značajno utiče kako na svojstva svežeg, tako i na svojstva očvrsljenog betona. Ispitivanja, na primer, pokazuju da se na povišenim temperaturama (temperature iznad 30°C) hidratacija cementa značajno ubrzava (videti sl. 3.17), što čini da su svojstva očvrsljenog betona uvek funkcija temperature. S druge strane, pak, i niske temperature imaju značajnog uticaja, pošto se u takvim uslovima hidratacija usporava. Na primer, proces hidratacije se usporava već na temperaturi ispod +5°C, a smatra se da se ona na temperaturi od -10°C praktično zaustavlja [91], [106].

Relativna vlažnost sredine takođe ima velikog uticaja na svojstva betona, pa nju, zajedno sa temperaturom takođe treba smatrati za vrlo važan faktor. Štaviše, ispitivanja pokazuju da temperaturu i relativnu vlažnost sredine uvek treba tretirati zajedno-kao jedinstven termohigrometrijski parametar. Termohigrometrijski uslovi su od posebnog značaja kada se radi o sredinama sa visokim temperaturama i niskim relativnim vlažnostima, na primer, u tzv. pustinjskim sredinama, gde relativna vlažnost najčešće iznosi 20-30%. Naime, mnogobrojna ispitivanja i iskustvo pokazuju da ovakvi uslovi dovode do pada mnogih karakteristika betona - čvrstoće pri pritisku, trajnosti i dr.

Uticaj termohigrometrijskih parametara na svojstva svežeg i očvrsljenog betona najtešnje je povezan sa uslovima formiranja strukture, odnosno sa strukturnim karakteristikama betona. Naime, uticaj termohigrometrijskog faktora na jedan način se manifestuje na svežem betonu - u periodu vezivanja, na drugi način u periodu očvršćavanja, a na treći način u periodu stabilizacije strukture betona (videti sl. 3.1). To znači da je starost betona u kojoj se on izlaže termohigrometrijskim uslovima od bitnog uticaja na svojstva betona, što se odnosi kako na beton male starosti i skoro očvrsljeni beton, tako i na očvrsljeni beton saglasno dijagramu prikazanom na sl. 3.1.

Kada se radi o svežem betonu, za njega je od presudnog uticaja temperatura sredine, pošto je on praktično uvek u stanju dovoljne vlažnosti. U ovakvim uslovima se, dakle, termohigrometrijski faktor u suštini svodi samo na faktor temperature, koja posebno utiče na konzistenciju svežeg betona.

Uticaj temperature najtešnje je povezan sa starošću betona i ako je reč o betonima male starosti ovaj uticaj može da bude naročito izražen. I u ovom slučaju efekti delovanja temperature su najtešnje povezani sa mehanizmima formiranja strukture betona, odnosno sa kinetikom hidratacije cementa. Ispitivanja pokazuju da povišene temperature u prvih nekoliko časova po spravljanju betona mogu vrlo značajno da utiču na kasnije mehaničke karakteristike betona, čak i u onim slučajevima kada se beton posle kratkotrajnog izlaganja povišenim temperaturama (2-3 časa) u daljem neguje u vodi.

Ispitivanja, međutim, pokazuju da relativna vlažnost sredine, kao i u slučaju svežeg betona

mного manje utiče na beton male starosti nego na beton veće starosti. Drugim rečima, za sveži beton i beton male starosti od velikog značaja je faktor temperature, dok je za očvrslu beton, a donekle i za tzv. skoro očvrslu beton, od primarnog uticaja relativna vlažnost sredine. Za ilustraciju ovog stava mogu da se uzmu veličine skupljanja i tečenja ovakvih betona za koje je dokazano da u prvom redu zavise od vlažnosti, a mnogo manje od temperature sredine.

Kada je reč o temperaturnom faktoru onda se pod njim strogo govoreći uvek podrazumeva temperatura samog betona. Međutim, ova temperatura je uvek funkcija vremena i ona zavisi od većeg broja uticajnih parametara: početne temperature mešavine, temperature sredine, toplote hidratacije cementa, razmene toplote sa okolinom i dr. Kao što se vidi, temperatura svežeg betona je vrlo kompleksna funkcija i nju je dosta teško odrediti računskim postupcima, tako da se problem temperature betona najčešće rešava neposrednim merenjima u konkretnim uslovima. Međutim, početna temperatura svežeg betona, tj. ona temperatura koja se dobija neposredno po završetku mešanja komponenata, može se precizno odrediti putem poznate jednačine toplotnog bilansa betona, koja se najčešće daje u obliku

$$T_{bo} = \frac{0,2 (T_a m_a + T_c m_c) + T_v m_v}{0,2 (m_a + m_c) + m_v} \quad (4.1)$$

U ispisanom izrazu, pored već ranije definisanih veličina m_a , m_c i m_v , figurišu i sledeće vrednosti temperature:

- T_{bo} - temperatura svežeg betona u °C,
- T_a - temperatura agregata (°C),
- T_c - temperatura cementa (°C) i
- T_v - temperatura vode (°C).

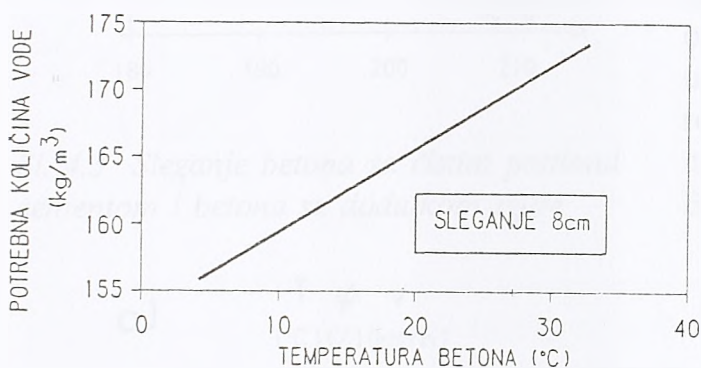
Kao što se može zaključiti iz prethodnih izlaganja, na svojstva svežeg i očvrsluog betona utiču kako niske, tako i povišene temperature. U ovom radu, međutim, neće biti reči o uticaju niskih temperatura, već će se govoriti samo o uticaju umerenih i povišenih, pri čemu će umerene temperature poslužiti kao etaloni pri komparisanju određenih svojstava betona dobijenih na povišenim temperaturama. Mada postoji vrlo veliki broj mišljenja o tome šta se u tehnologiji betona može smatrati normalnom, a šta povišenom temperaturom, u ovom radu će se kao normalne temperature tretirati temperature između 5-15°C, pošto su najnovija ispitivanja pokazala da su najpovoljniji uslovi za hidrataciju cementa baš temperature u ovom intervalu [91]. Prema tome, kao povišene temperature mogu se smatrati već temperature preko 20°C.

4.2 UTICAJ TEMPERATURE I VLAŽNOSTI SREDINE NA SVOJSTVA SVEŽEG BETONA

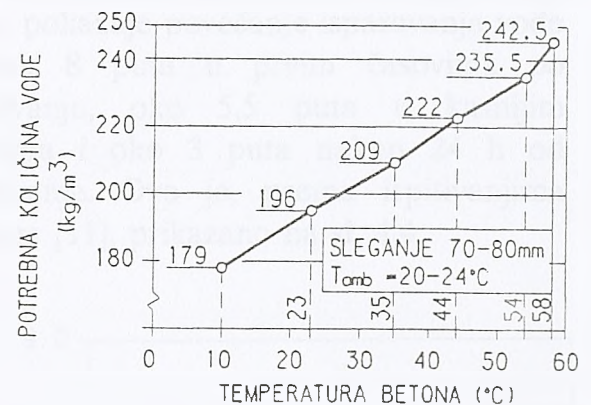
Uticaj termohigrometrijskog faktora na svojstva svežeg betona može se sagledati kroz promenu nekih svojstava betona kao što su:

- sadržaj vode,
- promena konzistencije,
- promena bleeding-a (izdvajanja vode),
- promena vremena vezivanja betona.

Sa porastom temperature svežeg betona, a za istu konzistenciju, dolazi do povećanja potrebe za vodom u betonskoj mešavini. To se može ilustrovati slikom 4.1, prema "US Bureau of Reclamation" [29]. Kao što se vidi, pri povećanju temperature svežeg betona sa 10°C na 20°C, ukoliko konzistencija u iznosu od 75 mm merena po metodi sleganja treba da ostane nepromenjena, količina vode treba da se poveća sa 160 kg/m³ na 173 kg/m³, ili za čitavih 13 kg/m³ (8,1%).



Sl. 4.1 Uticaj temperature svežeg betona na potrebnu količinu vode pri konstantnom sleganju



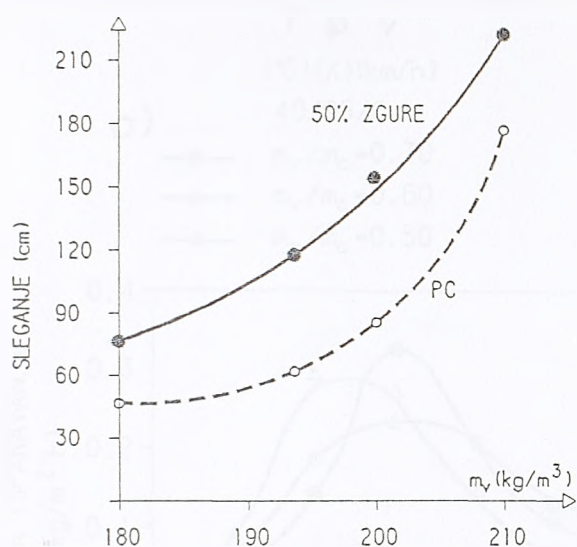
Sl. 4.2 Uticaj temperature svežeg betona na potrebnu količinu vode za cement sa dodatkom zgure

Međutim, zavisnost između temperature svežeg betona i potrebne količine vode ne mora da bude i nije uvek linearna funkcija; ovo se posebno odnosi na primenu cementa sa različitim dodacima tipa pucolana ili zgure, ili sa različitim dodacima betonu tipa plastifikatora i superplastifikatora. Tada zavisnost između temperature svežeg betona i količine vode treba utvrditi obaveznim prethodnim ispitivanjima.

Na sl. 4.2 prikazana je zavisnost temperatura svežeg betona - potrebna količina vode za istu vrednost konzistencije (sleganje 7-8 cm) kao i na sl. 4.1. Međutim, ovde se radi o cementu sa dodatkom zgure [148]. Kao što se vidi, kod primene cementa sa dodatkom zgure povećava se potrebna količina vode za istu promenu temperature svežeg betona i istu, nepromenjenu konzistenciju.

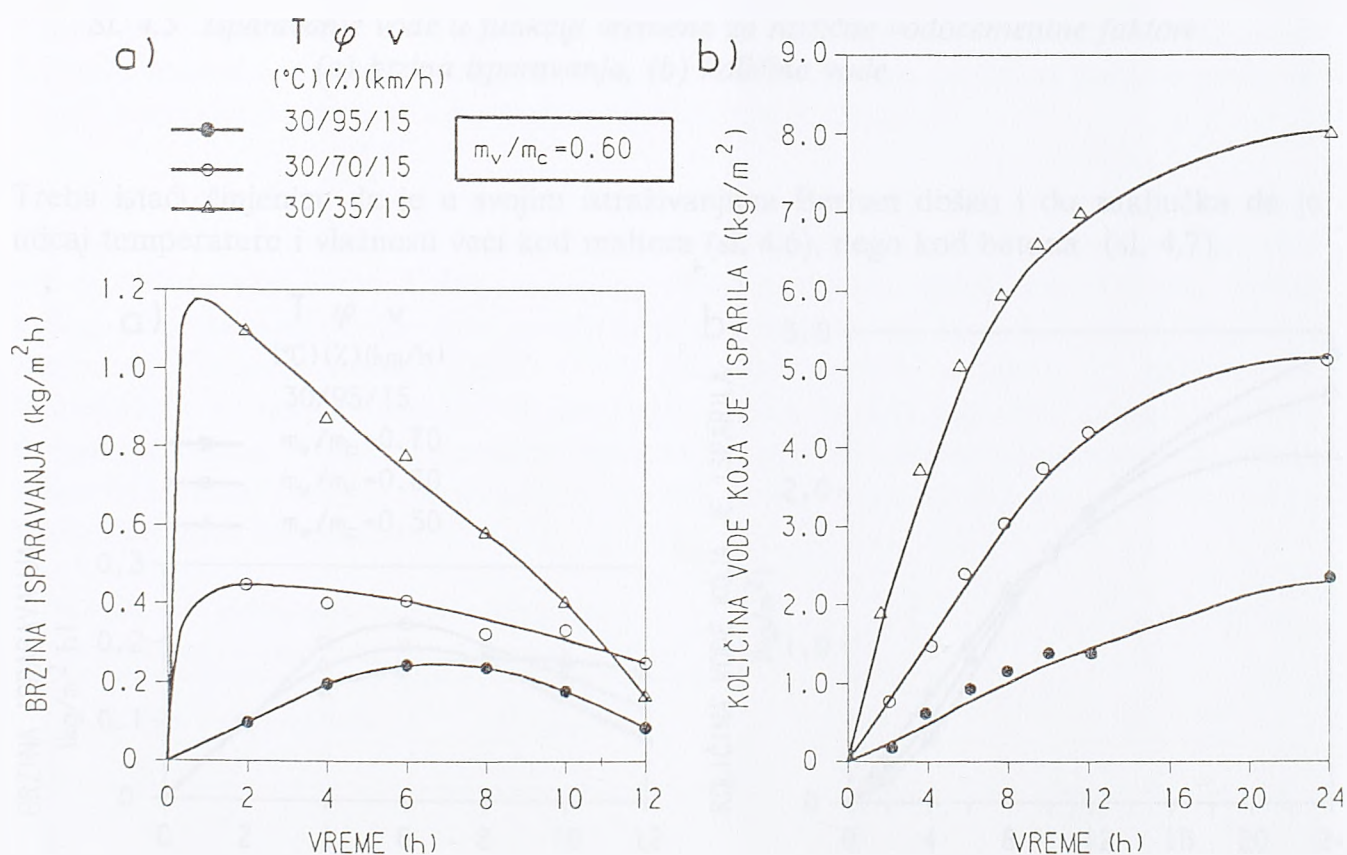
Dodatak zgure u količini od 50% može uticati na promenu konzistencije svežeg betona u smislu povećanja mere sleganja. Ovo je, prema Mezelu i Rouzu [83], prikazano na slici 4.3. Jedno od objašnjenja navedene pojave leži u činjenici da sama zgura, kao mineralni dodatak, poseduje izvestan plastificirajući efekat, pa tako utiče na promenu konzistencije svežeg betona.

Dosadašnja izlaganja odnosila su se na zavisnost temperature svežeg betona i potrebne



Sl. 4.3 Sleganje betona sa čistim portland cementom i betona sa dodatkom zgure

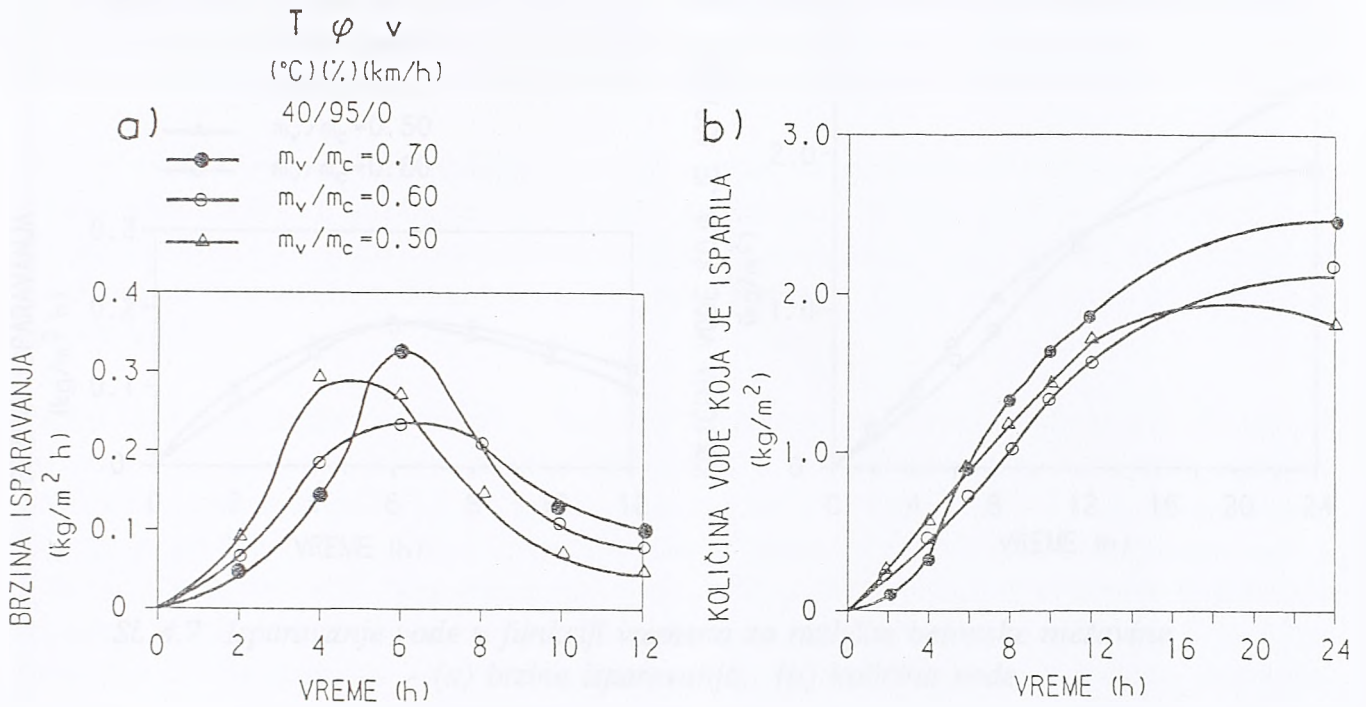
količine vode. Međutim, kako je napred već rečeno, relativna vlažnost sredine kao neminovni faktor u realnim uslovima, pa čak i brzina vetra, mogu imati posebnog uticaja na isparavanje vode iz svežeg betona. Tako, na primer, promena relativne vlažnosti sredine sa 95% na 70% povećava isparavanje vode oko 4 puta u prvim časovima po ugrađivanju, oko 3 puta u kasnijim rokovima, a oko 2,5 puta nakon 24 h po ugrađivanju betona. Promena relativne vlažnosti sa 95% na 35% (uslovi tople i suve klime) pokazuje povećanje isparavanja vode od čak 8 puta u prvim časovima po ugrađivanju, oko 5,5 puta u kasnijim rokovima i oko 3 puta nakon 24 h od ugrađivanja. Ovo je, prema ispitivanjima Berhana [11], prikazano na sl. 4.4.



Sl. 4.4 Uticaj relativne vlažnosti (φ) na gubitak vode iz svežeg maltera
- (a) brzina isparavanja, (b) količina vode

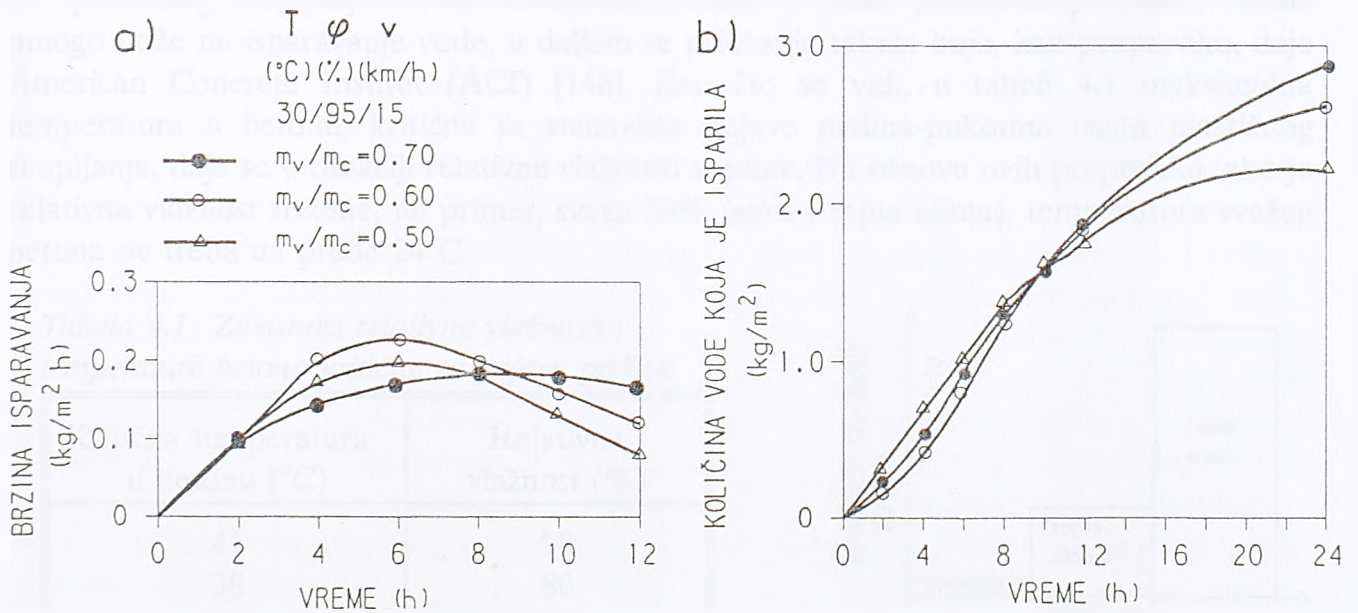
Ukoliko nema uticaja vetra, količina vode koja je isparila zavisi u najvećoj meri od vodocementnog faktora mešavine i ona je uvek veća kod viših vodocementnih faktora.

Ovaj interesantan rezultat istraživanja Berhana [11] prikazan je na sl. 4.5.



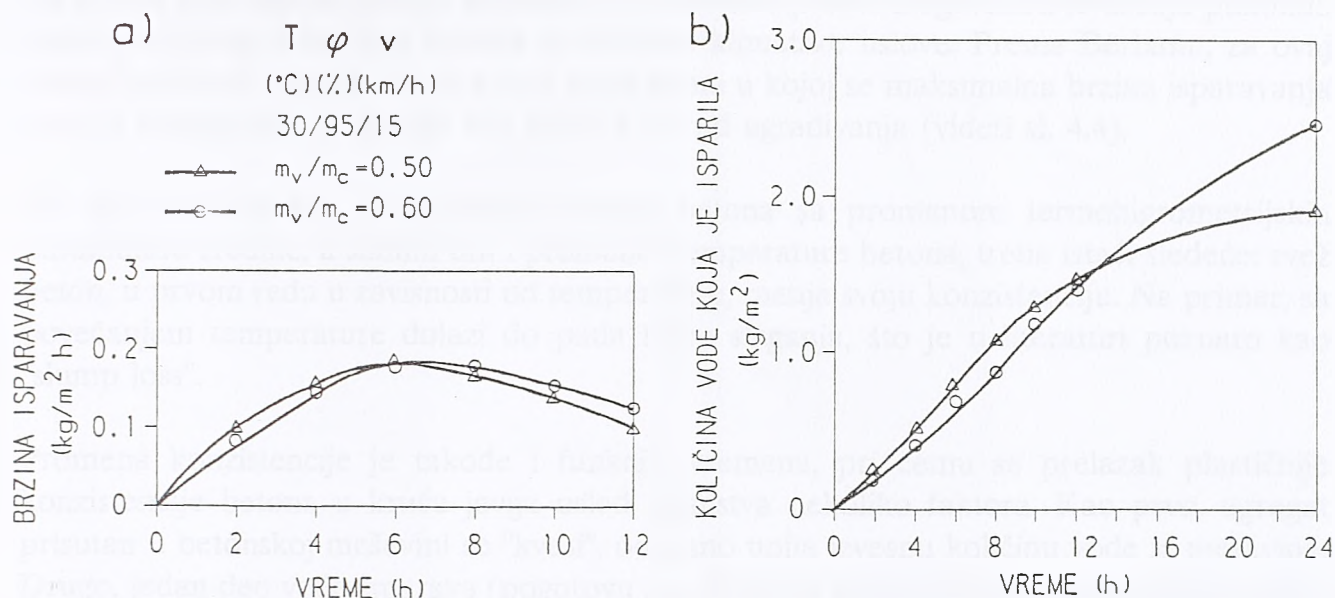
Sl. 4.5 Isparavanje vode u funkciji vremena za različite vodocementne faktore - (a) brzina isparavanja, (b) količina vode

Treba istaći činjenicu da je u svojim istraživanjima Berhan došao i do zaključka da je uticaj temperature i vlažnosti veći kod maltera (sl. 4.6), nego kod betona (sl. 4.7).



Sl. 4.6 Isparavanje vode u funkciji vremena za maltere sa različitim vodocementnim faktorima - (a) brzina isparavanja, (b) količina vode

Mnogi istraživači pokušali su da daju formule preko kojih bi bilo moguće izračunati



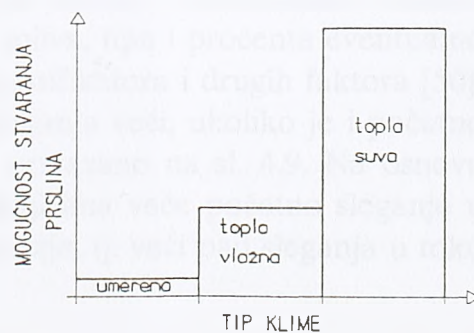
Sl. 4.7 Isparavanje vode u funkciji vremena za različite betonske mešavine
 - (a) brzina isparavanja, (b) količina vode

brzinu isparavanja vode iz svežeg betona. Jedna od poznatijih je svakako Menzelova formula, međutim nijedna od ovakvih formula nije univerzalna, pošto ne pokriva područje suve i tople klime zajedno sa područjem vlažne i tople klime.

Kao što je već rečeno u poglavlju 2.1.5 ovog rada, isparavanje vode iz svežeg betona bez njenog nadoknađivanja može dovesti i do defekata strukture u vidu pojave prslina usled tzv. plastičnog skupljanja. Pošto i relativna vlažnost sredine, pored temperature, veoma mnogo utiče na isparavanje vode, u daljem se prikazuje tabela koju, kao preporuku, daje American Concrete Institut (ACI) [148]. Kao što se vidi, u tabeli 4.1 maksimalna temperatura u betonu, kritična sa stanovišta pojave prslina-pukotina usled plastičnog skupljanja, daje se u funkciji relativne vlažnosti sredine. Na osnovu ovih preporuka, ako je relativna vlažnost sredine, na primer, svega 30% (suva i topla klima), temperatura svežeg betona ne treba da pređe 24°C.

Tabela 4.1 Zavisnost relativne vlažnosti i temperature betona kritične za pojavu prslina

Kritična temperatura u betonu (°C)	Relativna vlažnost (%)
41	90
38	80
35	70
32	60
29	50
27	40
24	30



Sl. 4.8 Šematski prikaz mogućnosti stvaranja pukotina u zavisnosti od klimatskih uslova

Na sl. 4.8, pak, daje se prema Berhanu [12] šematski prikaz mogućnosti stvaranja pukotina usled plastičnog skupljanja betona za različite klimatske uslove. Prema Berhanu, za ovaj defekt strukture najopasnija je suva i topla klima u kojoj se maksimalna brzina isparavanja vode iz svežeg betona dostiže već posle 1,5 h od ugrađivanja (videti sl. 4.4).

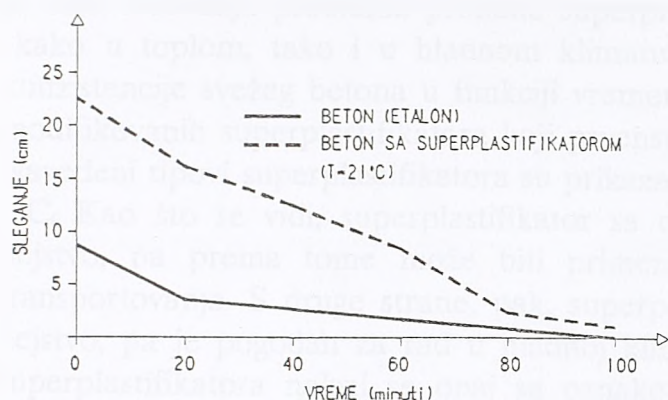
Što se tiče promene konzistencije svežeg betona sa promenom termohigrometrijskih parametara sredine, a samim tim i promene temperature betona, treba istaći sledeće: svež beton, u prvom redu u zavisnosti od temperature, menja svoju konzistenciju. Na primer, sa povećanjem temperature dolazi do pada mere sleganja, što je u literaturi poznato kao "slump loss".

Promena konzistencije je takođe i funkcija vremena, pri čemu se prelazak plastičnije konzistencije betona u kruću javlja usled prisustva nekoliko faktora. Kao prvo, agregat prisutan u betonskoj mešavini se "kvasi", odnosno upija izvesnu količinu vode iz mešavine. Drugo, jedan deo vode isparava (pogotovu ako je beton izložen visokoj temperaturi, suncu i vetru). Treće, deo vode biva angažovan (već posle nekoliko minuta) početnim hemijskim reakcijama pri hidrataciji cementa. Na osnovu istraživanja Hatori [47] je došao do zaključka da do promene konzistencije betona dolazi usled fizičkih i hemijskih promena koje se dešavaju u okviru cementne paste u svežem betonu. Naime, on smatra da na ovu pojavu veoma utiče proces koagulacije hidratiranih čestica cementa u prikrivenom periodu hidratacije (dormant period), čak mnogo više nego proces hemijskog vezivanja čestica cementa. Ovo je sasvim u skladu sa koagulaciono - kristalizacionom teorijom hidratacije koja je u ovom radu prihvaćena kao najverovatnija od svih ponuđenih teorija.

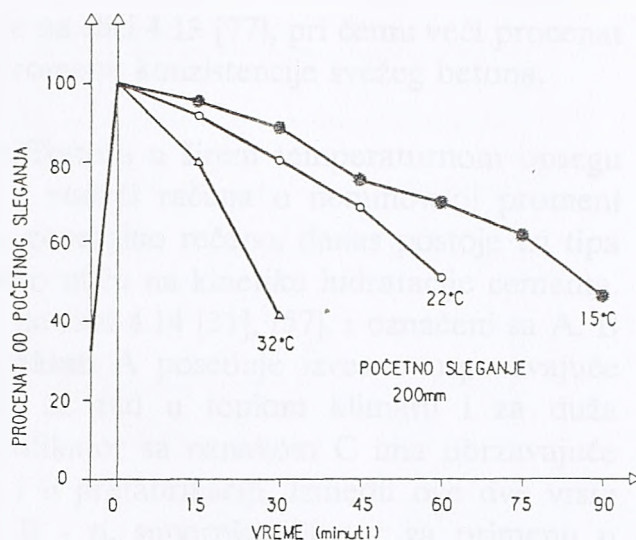
Neki istraživači [138], pak, smatraju da do pada sleganja dolazi usled stvaranja etringita (već posle nekoliko minuta od mešanja cementa i vode), koji imobilise veliku količinu vode, tako da beton izgleda kao "smrznut".

Treba istaći da je navedeni pad sleganja izražen i na nižim i umerenim temperaturama, a pojačava se pri povišenim temperaturama svežeg betona. To znači da promena konzistencije svežeg betona nije isključivo funkcija temperature, kako se negde u literaturi interpretira, već i funkcija proteklog vremena, početnog sleganja, količina i odnosa komponenata u betonskoj mešavini (agregatno-cementni odnos, vodocementni faktor, količina cementa), mineraloškog sastava cementa, finoće mliva, tipa i procenta eventualno prisutnog superplastifikatora, vremena dodavanja superplastifikatora i drugih faktora [50], [54], [72], [109]. Naime, ispitivanja pokazuju da je pad sleganja veći, ukoliko je i početno sleganje bilo veće. Ovo je, prema Ramakrišnanu [119], prikazano na sl. 4.9. Na osnovu ovih ispitivanja, beton sa dodatkom superplastifikatora koji ima veće početno sleganje u odnosu na referentni beton, ima i veću promenu konzistencije, tj. veći pad sleganja u toku vremena.

Nadalje, na sl. 4.10, daje se uticaj temperature na promenu konzistencije (opet preko mere sleganja) u funkciji vremena kod betona spravljenog sa superplastifikatorom na bazi melmenta (sulfonovanog melamin formaldehida). Kao što se vidi, najveća promena konzistencije odigrava se pri temperaturi od 32°C, pri kojoj je i isparavanje vode iz betona najveće [74].

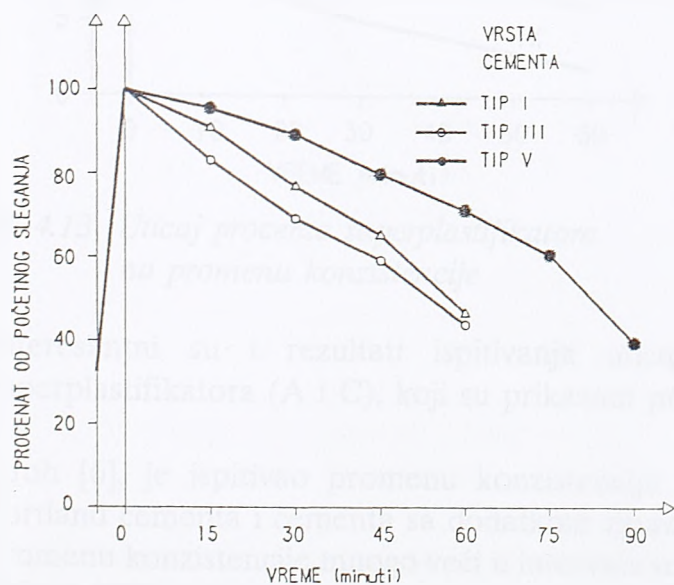


Sl. 4.9 Promena konzistencije u toku vremena u zavisnosti od početnog sleganja

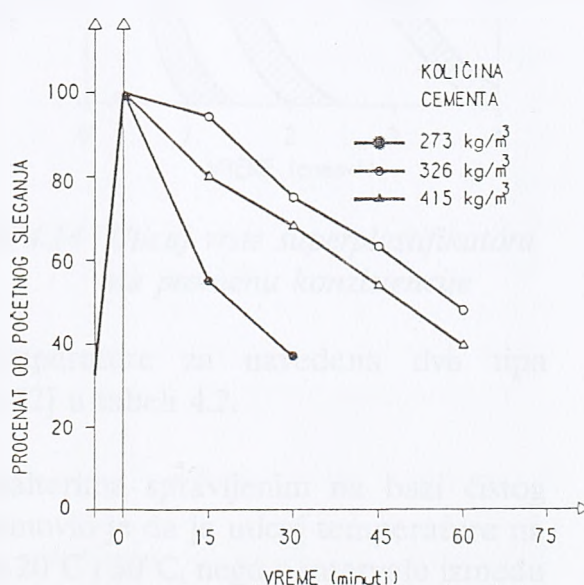


Sl. 4.10 Promena konzistencije u funkciji temperature

Na slikama 4.11 i 4.12, pak, prikazan je uticaj vrste cementa i količine cementa na promenu konzistencije [74]. Sa slike 4.11 se zapaža da vrsta cementa, a posebno procenat minerala C_3A , koji je ograničen kod cementa oznake V, ima značajnog uticaja na promenu konzistencije u toku vremena. Isto tako, prema Mailvaganamu [74] mešavine spravljene sa većom količinom cementa (326 i 415 kg/m^3) zadržavaju visoku meru sleganja duže vremena nego one sa manjom količinom cementa.



Sl. 4.11 Uticaj vrste cementa na promenu konzistencije

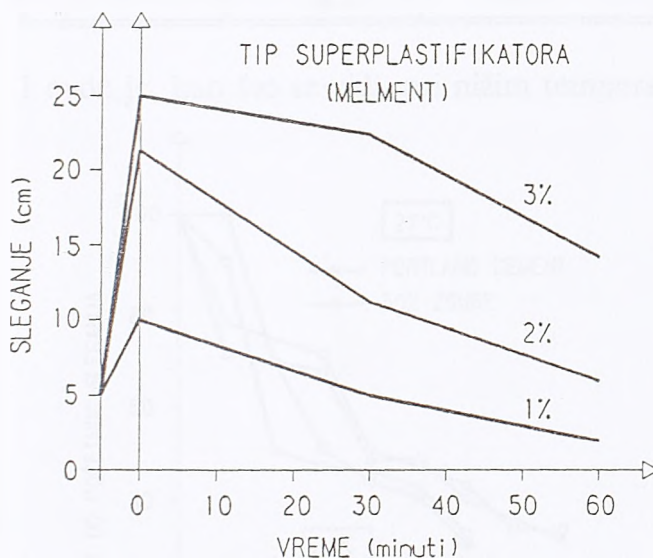


Sl. 4.12 Uticaj količine cementa na promenu konzistencije

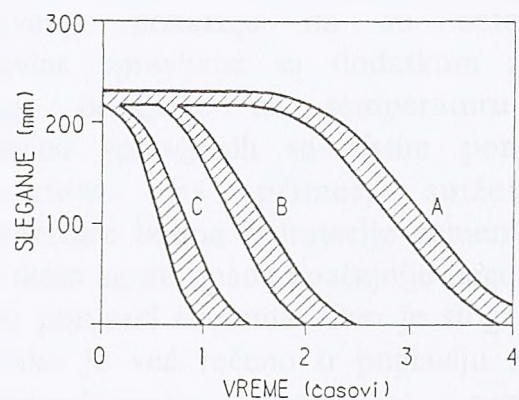
Kao što je napred već rečeno, na promenu konzistencije betona utiče i eventualno prisustvo dodataka betonu, posebno onih sa efektom plastificiranja. Obimnim eksperimentalnim ispitivanjima ustanovljeno je da promena konzistencije zavisi kako od vrste primenjenog plastifikatora ili superplastifikatora, tako i od njegove količine. Uticaj procenta superplastifikatora na bazi melmenta na promenu konzistencije (početno sleganje

6 cm) u toku vremena od jednog časa prikazan je na slici 4.13 [77], pri čemu veći procenat primenjenog superplastifikatora izaziva manju promenu konzistencije svežeg betona.

U cilju rešavanja problema primene superplastifikatora u širem temperaturnom opsegu (kako u toplom, tako i u hladnom klimatu), a vodeći računa o neminovnoj promeni konzistencije svežeg betona u funkciji vremena, generalno rečeno, danas postoje tri tipa modifikovanih superplastifikatora koji prvenstveno utiču na kinetiku hidratacije cementa. Navedeni tipovi superplastifikatora su prikazani na slici 4.14 [31], [57], i označeni sa A, B i C. Kao što se vidi, superplastifikator sa oznakom A poseduje izvesno usporavajuće dejstvo, pa prema tome može biti primenjen za rad u toplom klimatu i za duža transportovanja. S druge strane, pak, superplastifikator sa oznakom C ima ubrzavajuće dejstvo, pa je pogodan za rad u hladnoj klimi i u prefabrikaciji. Između ove dve vrste superplastifikatora nalazi se onaj sa oznakom B - tj. superplastifikator za primenu u uobičajenoj, umerenoj klimi.



Sl. 4.13 Uticaj procenta superplastifikatora na promenu konzistencije



Sl. 4.14 Uticaj vrste superplastifikatora na promenu konzistencije

Interesantni su i rezultati ispitivanja uticaja temperature za navedena dva tipa superplastifikatora (A i C), koji su prikazani prema [32] u tabeli 4.2.

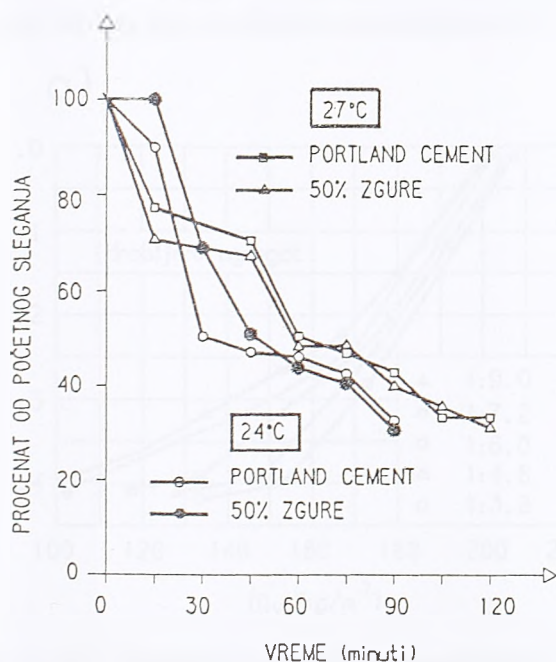
Aroh [6], je ispitivao promenu konzistencije na malterima spravljenim na bazi čistog portland cementa i cementa sa dodatkom zgure. Ustanovio je da je uticaj temperature na promenu konzistencije mnogo veći u intervalu između 20°C i 30°C , nego u intervalu između 30°C i 40°C .

Mezel i Rouz [83] su pratili pad konzistencije u toku vremena na temperaturama 24°C i 27°C i to na betonima spravljenim sa čistim portland cementom i betonima spravljenim sa cementom sa 50% zgure. Ispitivanja su pokazala da pri istoj količini vode povećanje procenta zgure povećava početno sleganje, ali da nema značajne razlike u promeni konzistencije kod ovih mešavina. To je i logično, pošto je razlika temperature ovih mešavina iznosila svega 3°C . Rezultati ovih ispitivanja prikazani su na sl. 4.15.

Tabela 4.2 Uticaj temperature i vrste superplastifikatora na promenu sleganja

KONZISTENCIJA - SLEGANJE (cm)					
Vreme (časovi)	Superplastifikator				
	Tip A			Tip C	
	Temperatura (°C)				
	4	21	42	5	19
0	22,0	22,0	21,0	21,0	22,0
0,5	20,5	20,0	19,5	19,0	10,0
1	21,0	19,5	18,5	19,5	6,0
2	21,0	20,0	15,0	12,0	1,5
4	18,5	14,0	3,0	4,0	0

I ovde je, kao što se vidi, pri nižim temperaturama manja promena konzistencije.



Sl. 4.15 Uticaj vrste cementa i temperature na promenu konzistencije

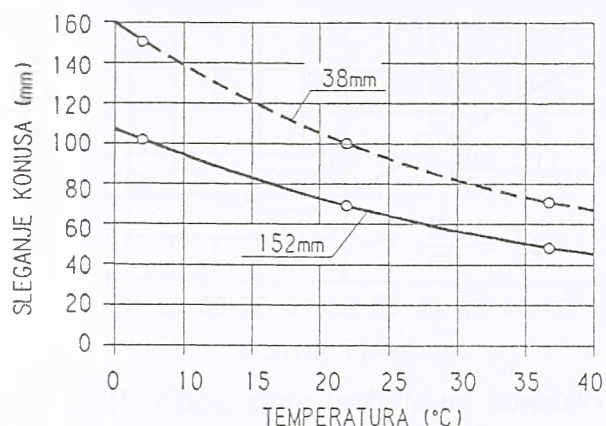
konzistencije. Ovo se posebno odnosi na vrstu, agregatno-cementni odnos, granulometrijski sastav (posebno sadržaj vrlo finih čestica, manjih od 0,250 mm), kao i na veličinu nominalno najkrupnijeg zrna agregata. Na slici 4.16 [106] daje se prikaz promene konzistencije svežeg betona u funkciji temperature u zavisnosti od veličine nominalno najkrupnijeg zrna agregata u mešavini. Na slici 4.17, pak, prikazuje se promenljivost konzistencije prema [91], u funkciji vremena za prirodni i drobljeni agregat. Vidi se da je vremenska promenljivost konzistencije mnogo izraženija kod drobljenog, nego kod prirodnog agregata.

Isto tako, prema [26], odnosi komponenata u betonskoj mešavini mogu imati značajnog uticaja na konzistenciju. Tako, na primer, za istu količinu vode (sl. 4.18) konzistencija varira

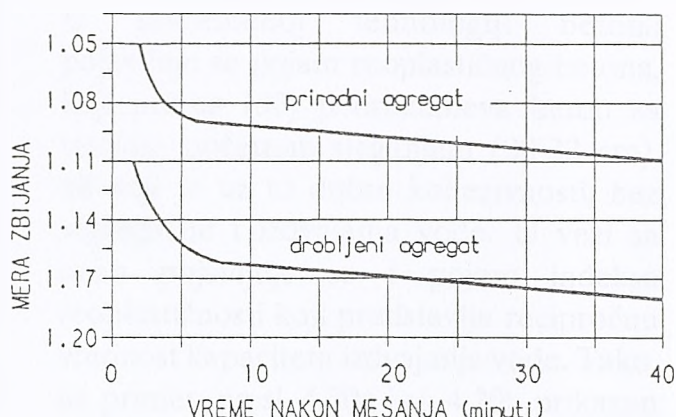
Ispitivanja pokazuju da su betonske mešavine spravljene sa dodatkom zgure mnogo osetljivije na temperaturu od mešavina spravljenih sa čistim portland cementom. Na primer, sniženjem temperature brzina hidratacije cementa sa dodatkom zgure opada značajnije nego kod čistog portland cementa. Ovo je stoga, što je, kako je već rečeno u poglavlju 2.2.3, energija aktivacije zgure veća, pa su cementi sa dodatkom zgure pogodni za termičku obradu. Ovo još jednom potvrđuje napred istaknutu činjenicu da je jedna od mogućnosti aktiviranja zgure termički način, odnosno primena povišenih temperatura.

Agregat kao najzastupljenija komponenta betona ima svoj udeo u promeni

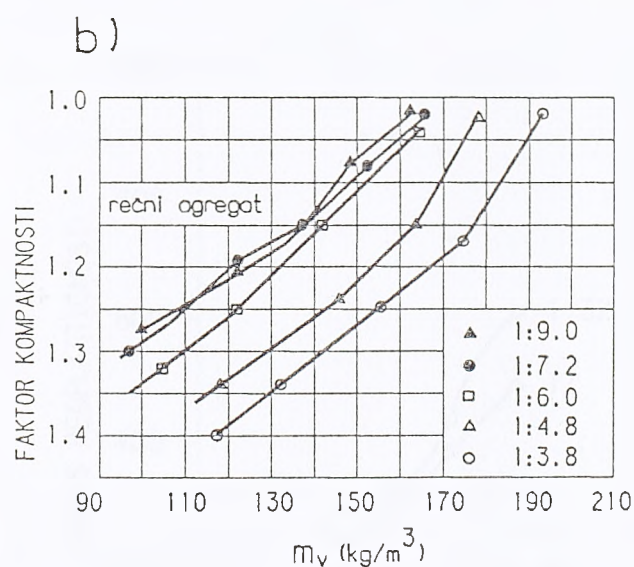
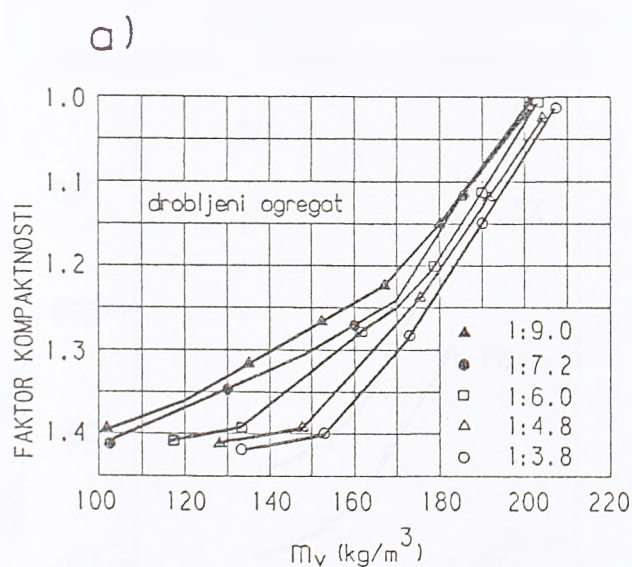
u zavisnosti od vrste agregata kao i zavisno od toga da li su u pitanju "bogatije" ili "mršavije" mešavine.



Sl. 4.16 Promena konzistencije betona u funkciji temperature zavisno od veličine D



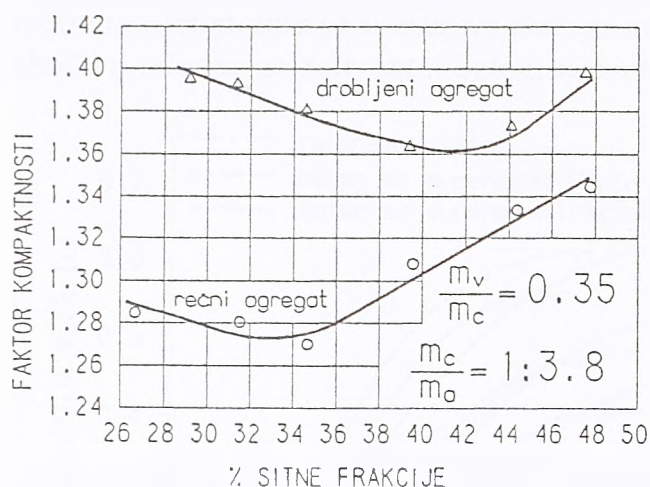
Sl. 4.17 Promena konzistencije u funkciji vremena zavisno od vrste agregata



Sl. 4.18 Zavisnost odnosa komponenata i vrste agregata - drobljeni (a) i rečni (b) - na konzistenciju betona

Uticaj sitne frakcije veoma je značajan na promenu konzistencije. Na sl. 4.19, prema [26], daje se za određen vodocementni faktor i agregatno-cementni odnos uticaj sitnog agregata na faktor kompaktnosti. Kao što se vidi, minimalna količina vode potrebna za dati beton iznosi oko 42% kod drobljenog agregata i oko 34% kod rečnog.

O izdvajanju vode - bleeding-u, kao i o faktorima koji na njega utiču bilo je reči u poglavlju 2.1.5. Ovde ćemo se posebno zadržati samo na uticaju vrste i količine cementa, superplastifikatora, kao i na uticaju temperature. Naime, poznato je da se kapacitet izdvajanja vode smanjuje ukoliko se povećava količina cementa, smanji vodocementni faktor ili poveća sadržaj klinker minerala C_3A u cementu. Isto tako kapacitet izdvajanja

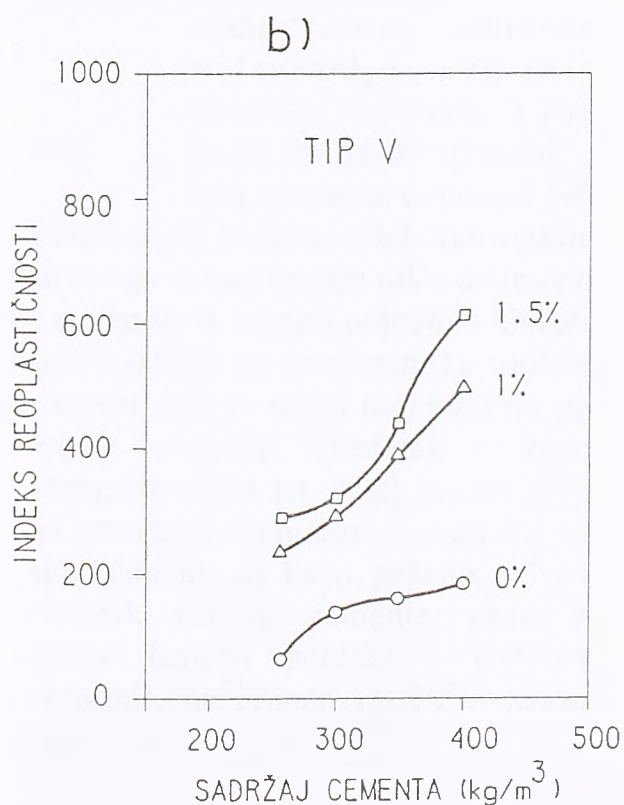
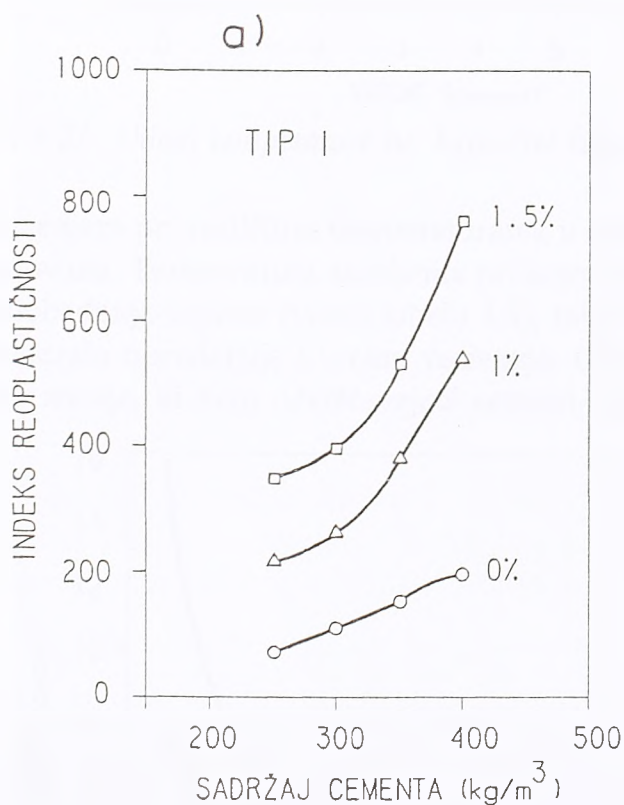


Sl. 4.19 Uticaj sitne frakcije na konzistenciju betona

[32] indeks reoplastičnosti u funkciji vrste i količine cementa i prisustva superplastifikatora. Kao što se vidi, sa povećanjem količine cementa i procenta superplastifikatora povećava se i indeks reoplastičnosti, tj. smanjuje se kapacitet izdvajanja vode.

vode se smanjuje u prisustvu alkalija, ili kada se betonu doda kalcijum hlorid.

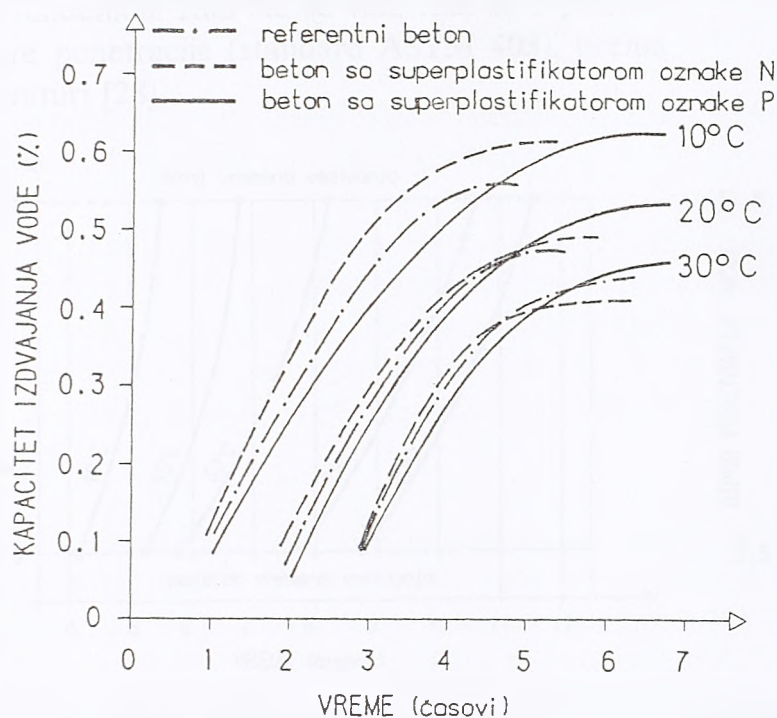
U savremenoj tehnologiji betona pojavljuje se pojam reoplastičnog betona, koji prema [30] podrazumeva beton sa visokim početnim sleganjem (20-22 cm), ali koji je uz to dobre kohezivnosti, bez segregacije i izdvajanja vode. U vezi sa ovim pojavljuje se i pojam indeksa reoplastičnosti koji predstavlja recipročnu vrednost kapaciteta izdvajanja vode. Tako, na primer, na sl. 4.20a i sl. 4.20b prikazan je prema Kolepardiju, Koradiju i Valentu



Sl. 4.20 Indeks reoplastičnosti u funkciji vrste i količine cementa, kao i prisustva superplastifikatora

Uticaj temperature na izdvajanje vode iz svežeg betona (bleeding) proučavala je grupa japanskih naučnika [48] i konstatovala da povišene temperature ubrzavaju tempo izdvajanja vode. Konačan rezultat dejstva povišenih temperatura na izdvajanje vode prema ovim istraživanjima može se prikazati na sl. 4.21. Vidi se da tip superplastifikatora (na bazi polikarbonata - P ili na bazi naftalina - N) ima uticaja na kapacitet izdvajanja vode tako

da se u prvom slučaju kapacitet izdvajanja vode kreće od 105 do 113% u odnosu na referentni beton, dok se u drugom slučaju ova vrednost kreće u granicama od 93 - 109%, takođe u odnosu na referentni beton, tj. na beton bez superplastifikatora.

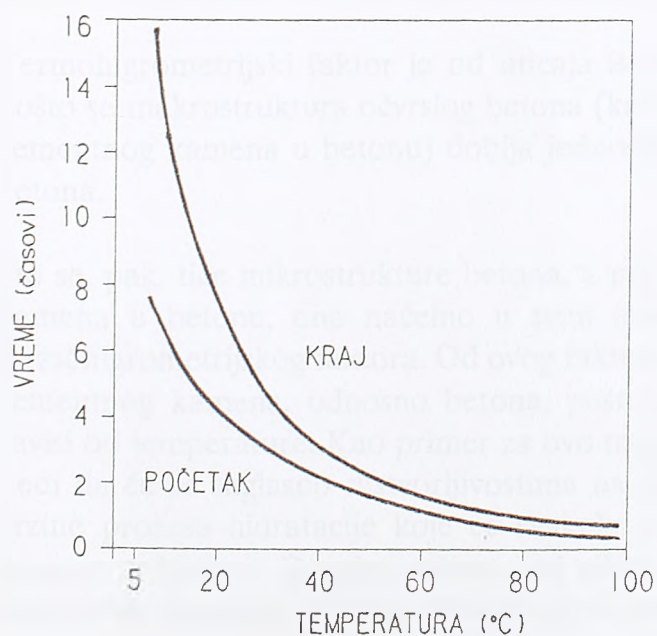


I na ovom mestu treba istaći činjenicu da prisustvo finih, sitnih čestica u agregatu, kao i prisustvo različitih mineralnih dodataka (pucolana, silikatne prašine, letećeg pepela i dr.) smanjuje izdvajanje vode na površini svežeg betona.

Temperatura ima velikog uticaja i na vreme vezivanja. Kako se sa porastom temperature ubrzava hidratacija cementa (posebno minerala C_3A), jasno je da će početak i kraj vremena vezivanja biti

Sl. 4.21 Uticaj temperature na kapacitet izdvajanja vode

izmenjeni pri različitim temperaturama u odnosu na etalon koji je čuvan u laboratorijskim uslovima. Temperatura ambijenta pri kojoj se vrši hidratacija veoma mnogo utiče na tempo oslobađanja toplote (videti tabelu 3.5), tako da vrsta cementa, tj. sadržaj pojedinih klinker minerala opredeljuje i vreme vezivanja. Ovo se posebno odnosi na cement niske toplote hidratacije, ili brzo očvršćavajući cement. Na ovom mestu daje se uticaj temperature na



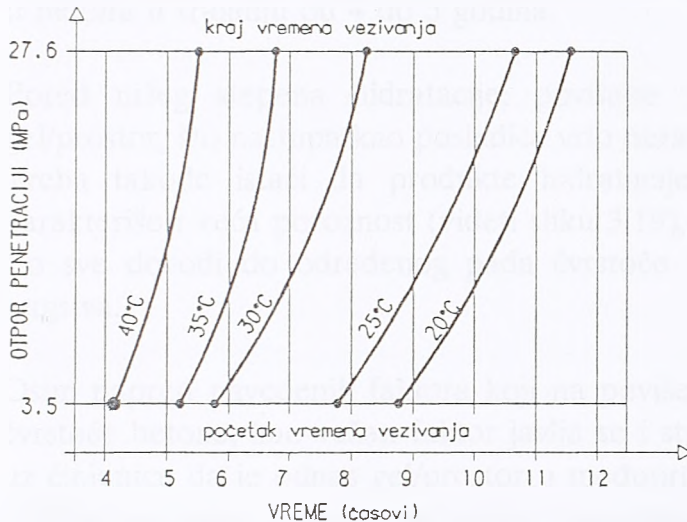
vreme vezivanja (početak i kraj) cementne paste (sl. 4.22) prema [31]. Sa porastom temperature, kao što se vidi, skraćuje se kako početak tako i svršetak vezivanja cementne paste, a vreme između početka i svršetka vezivanja, na primer, na 80°C, iznosi svega 0,5 h.

Sličan efekat, mada manje izražen, javlja se i kod betona. Na sl. 4.23 prikazan je uticaj temperature na vreme vezivanja betona-etalonu i superplastificiranih betona uz dodatak superplastifikatora oznake P i oznake N, saglasno sl. 4.21 [48].

Sl. 4.22 Uticaj temperature na vreme vezivanja cementne paste

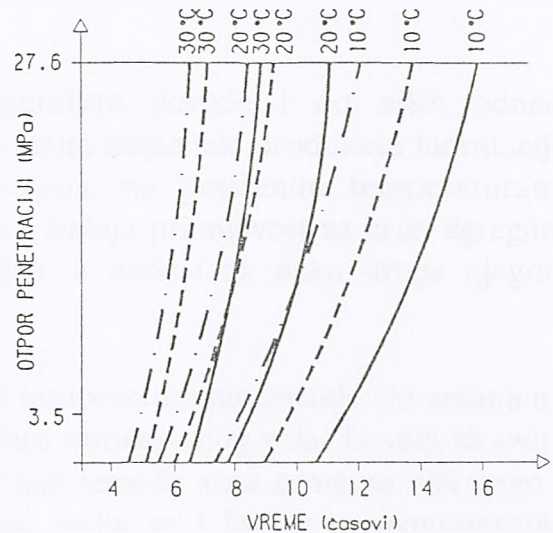
Uticaj temperature na vreme vezivanja

betona u jednom drugom dijapazonu, pak, dat je na sl. 4.24 samo za beton spravljen uz prisustvo superplastifikatora na bazi sulfonovanog naftalin formaldehida. Kao što se vidi, radi se o prikazu mere penetracije (standard ASTM 403), prema literaturi [28].



Sl. 4.23 Uticaj temperature i prisustva superplastifikatora na vreme vezivanja betona

— — referentni beton
 - - - - beton sa superplastifikatorom oznake N
 ——— beton sa superplastifikatorom oznake P



Sl. 4.24 Vreme vezivanja betona-etalona i uz prisustvo superplastifikatora u funkciji temperature

4.3 UTICAJ TERMOHIGROMETRIJSKOG FAKTORA NA FORMIRANJE STRUKTURE OČVRSLOG BETONA

Termohigrometrijski faktor je od uticaja isključivo na formiranje mikrostrukture betona, pošto se makrostruktura očvrslog betona (kao odnos zapremine agregata prema zapremini cementnog kamena u betonu) dobija jednostavnim preslikavanjem makrostrukture svežeg betona.

Što se, pak, tiče mikrostrukture betona, a pod njom se podrazumeva struktura cementnog kamena u betonu, ona načelno u svim fazama formiranja strukture betona zavisi od termohigrometrijskog faktora. Od ovog faktora, kao prvo, zavisi brzina formiranja strukture cementnog kamena, odnosno betona, pošto rastvorljivost konstituenata cementa u vodi zavisi od temperature. Kao primer za ovo mogu da posluže tabele 2.5 i 2.6 na osnovu kojih sledi da će se saglasno rastvorljivostima na određenim temperaturama dobijati i različite brzine procesa hidratacije koje će svakako uslovljavati i kinetiku formiranja cementnog kamena u betonu. Drugim rečima, pri višim temperaturama biće prisutna i veća brzina formiranja strukture betona, odnosno veća brzina hidratacije (videti sliku 3.17).

Međutim, na povišenim temperaturama u opštem slučaju dobijaju se niži stepeni

hidratacije, pošto su hidratacijom obuhvaćene samo površinske zone cementnih zrna, a to je posledica brzog odvijanja reakcije hidratacije na ovim površinama. Na ovaj način zrna cementa bivaju obavijena svojevrsnim skramama produkata hidratacije, koje u narednom vremenu usporavaju (videti sliku 3.18), a često i u potpunosti blokiraju dalji tok procesa. Prema tome, ovim se dobija i veća količina nehidratiranog cementa u betonu. Eksperimenti pokazuju da se, na primer, prema ispitivanjima Idorna [55], pri ubrzanoj početnoj hidrataciji dobija smanjeni stepen hidratacije, čak i u uslovima neprekidnog prisustva vlage u betonu u trajanju od 4 do 5 godina.

Pored nižeg stepena hidratacije, povišene temperature dovode i do nižih odnosa gel/prostor, što nastupa kao posledica vrlo neravnomerne raspodele produkata hidratacije. Treba takođe istaći da produkte hidratacije dobijene na povišenim temperaturama karakteriše i veća poroznost (videti sliku 3.19), kao i slabija prionljivost za zrna agregata, što sve dovodi do određenog pada čvrstoće betona, a utiče i na neka druga njegova svojstva.

Osim napred navedenih faktora koji na povišenim temperaturama dovode do smanjenja čvrstoće betona, kao važan faktor javlja se i struktura obrazovanog gela. U vezi sa ovim, uz činjenicu da je odnos gel/prostor u međuprostorima između zrna cementa niži nego u slučaju odvijanja procesa na nižim temperaturama, javlja se i faktor neravnomernosti strukture unutar samog gela. Naime, kako je već ranije pomenuto u poglavlju 2.2.4 (slika 2.20), pri višim temperaturama se formira u većem procentu gel sa spoljašnjom komponentom - spoljašnji gel, koji je porozniji i rastresitije strukture, a samim tim nižih mehaničkih karakteristika, pa i trajnosti. Ovo je sasvim u skladu sa stavom Vitmana [142] koji navodi da mehanička svojstva betona ne zavise direktno od stepena hidratacije, već od strukture i količine hidratiranih proizvoda formiranih u određeno vreme i stepena popunjenosti prostora između zrna.

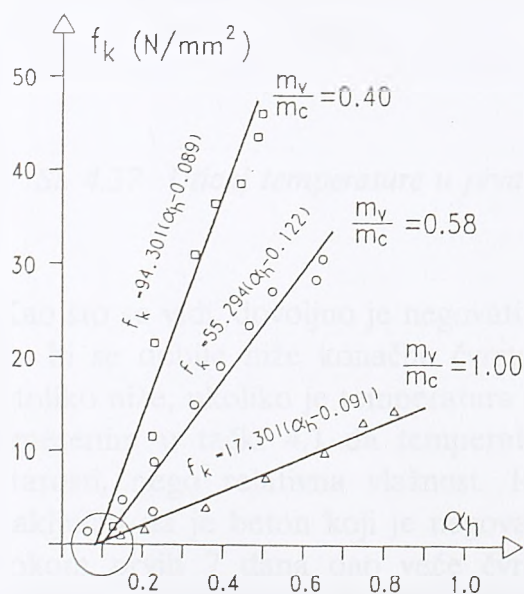
Relativna vlažnost sredine utiče na poseban način na obrazovanje strukture. Tako, na primer, smanjivanjem relativne vlažnosti sredine reakcije hidratacije se usporavaju, pa mogu čak biti i prekinute. Tabela 3.5, kao i slike 3.21 i 3.22, dovoljno rečito govore o uticaju relativne vlažnosti na stepen hidratacije, osnovnu poroznost, kao i gelsku poroznost. Treba istaći da se pri visokoj vlažnosti stepen hidratacije cementnog kamena u betonu značajno povećava, da se zapremina krupnijih pora može višestruko smanjiti, a da struktura betona, zahvaljujući ostvarenoj strukturi cementnog kamena, postaje "sitnija" (više gelska). S druge strane, pak, pri niskim vlažnostima, značajno se povećava brzina difuzije u procesu hidratacije cementa, što daje visoku poroznost i lošiji kvalitet obrazovanog gela.

Sve napred izloženo, a o čemu je mnogo detaljnije govoreno u prethodnom tekstu, još jednom treba da ukaže da svojstva betona bitno zavise od njegove strukture, a da strukturu, osim sastava betonske mešavine, opredeljuju i uslovi njenog formiranja, tj. opredeljuju vreme (kinetika hidratacije cementa), temperatura i vlažnost sredine, što je već prikazano na samom početku ovog rada - na sl. 1.1.

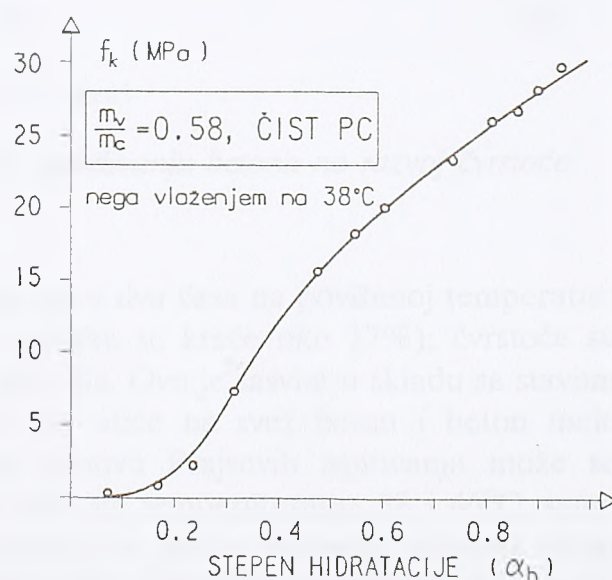
4.4 ČVRSTOĆA BETONA U ZAVISNOSTI OD USLOVA FORMIRANJA STRUKTURE

Jedna od osnovnih karakteristika betona - čvrstoća pri pritisku - postiže se u toku vremena, pri povoljnim uslovima hidratacije, tako što se prostor prvobitno ispunjen vodom lagano popunjava proizvodima hidratacije. Pri ovome, kinetika samog procesa hidratacije uslovljena je pojedinim fazama, kao što su adsorpcija, rastvaranje, prenos mase i kristalizacija, o čemu je detaljnije govoreno u poglavlju 2.2.4. Kvantitativni pokazatelj obavljene hidratacije, stepen hidratacije ima poseban značaj, jer se ispitivanjima došlo do zaključka da postoji tzv. kritičan stepen hidratacije neophodan za početak rasta čvrstoće pri pritisku (relacija 3.1), i faza II - period intenzivnog očvršćavanja predstavljen na slici 3.1.

Mnogi naučnici (Taplin, Katrin, Bajfors) u svojim istraživanjima vršenim kako na cementnim pastama, tako i na malterima i betonima, došli su do zaključka da na normalnim temperaturama postoji linearna zavisnost između stepena hidratacije (α_h) i čvrstoće pri pritisku (f_k). Na ovom mestu, putem slike 4.25, prikazuju se rezultati Bajforsovih ispitivanja stepena hidratacije (α_h) dobijeni na cementnim malterima [20], koji su dovedeni u funkcionalnu zavisnost sa čvrstoćom betona (f_k), a za istu vrstu cementa, iste vodocementne faktore i iste načine nege. Kao što se vidi, veza između čvrstoće pri pritisku i stepena hidratacije je linearna, a kritični stepen hidratacije praktično ne zavisi od primenjenog vodocementnog faktora. Međutim, treba istaći da na početku rasta čvrstoće pri pritisku zavisnost $\alpha_h - f_k$ donekle odstupa od linearosti i ima eksponencijalni karakter (za čvrstoće ispod 2 MPa); ovakav oblik krive najverovatnije leži u činjenici da u početku hidratacije preovladava aluminatna struktura koja ne daje značajan doprinos čvrstoći [91].



Sl. 4.25 Zavisnost stepena hidratacije i čvrstoće pri pritisku

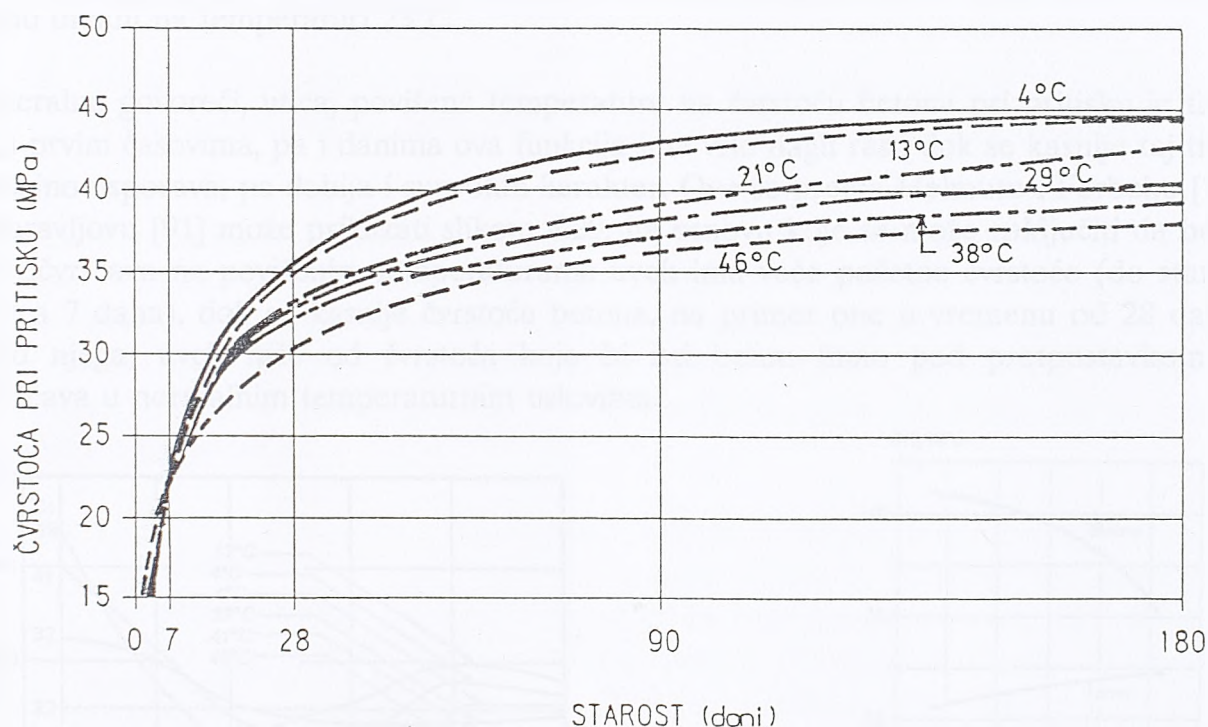


Sl. 4.26 Stepen hidratacije i čvrstoća pri pritisku u funkciji temperature

Poznato je da se pri povišenoj temperaturi ubrzavaju hemijske reakcije i da sa povećanjem temperature raste i stepen hidratacije. Međutim, kod povišenih temperatura zavisnost

između stepena hidratacije i čvrstoće pri pritisku se ne pokorava linearnom zakonu. Kao primer koji ilustruje ovaj stav mogu da posluže opet ispitivanja Bajforsa [20] sprovedena na temperaturi od 38°C i pri vodocementnom faktoru 0,58 (slika 4.26).

Primer uticaja temperaturnog faktora na mehaničke čvrstoće betona daju i poznati Prajsovi dijagrami [106] dobijeni za temperaturno područje od 4 do 46°C, pri vodocementnom faktoru 0,53. Radi se o betonima negovanim na navedenim temperaturama samo prva dva časa od spravljanja - tj. u fazi male starosti betona. Nakon ovog vremena uzorci betona su čuvani neprekidno na 21°C zaptiveni - "zapečaćeni", da bi se sprečilo kretanje vlage. Ovi dijagrami prikazani su na slici 4.27.



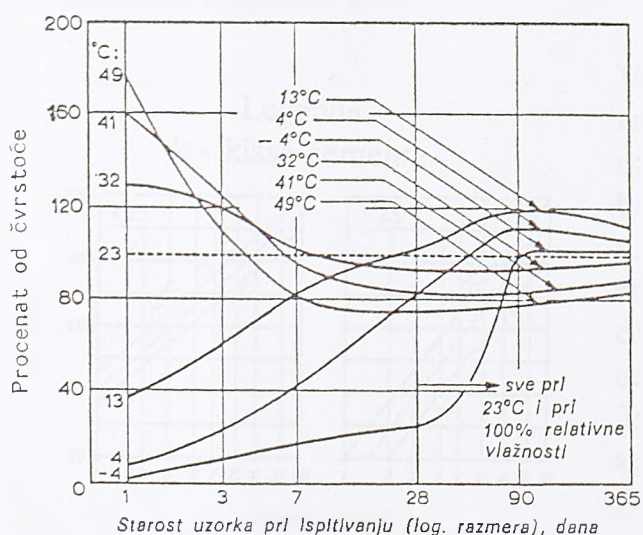
Sl. 4.27 Uticaj temperature u prva dva časa po ugrađivanju betona na razvoj čvrstoće

Kao što se vidi, dovoljno je negovati uzorke samo prva dva časa na povišenoj temperaturi da bi se dobile niže konačne čvrstoće betona (razlika se kreće oko 17%); čvrstoće su utoliko niže, ukoliko je temperatura negovanja bila viša. Ovo je sasvim u skladu sa stavom iznesenim u tački 4.1 da temperatura mnogo više utiče na svež beton i beton male starosti, nego relativna vlažnost. Isto tako, na osnovu Prajsovih ispitivanja može se zaključiti da je beton koji je negovan prva dva časa na temperaturama 38 i 46°C, samo tokom prvih 7 dana dao veće čvrstoće pri pritisku, a da je pri većoj starosti uticaj temperature suprotan. Nadalje, zapaža se da postoji jedna optimalna temperatura pri kojoj se postižu najveće čvrstoće betona u željenoj starosti (npr. 180 dana); u ovom slučaju to su temperature od 4 i 13°C.

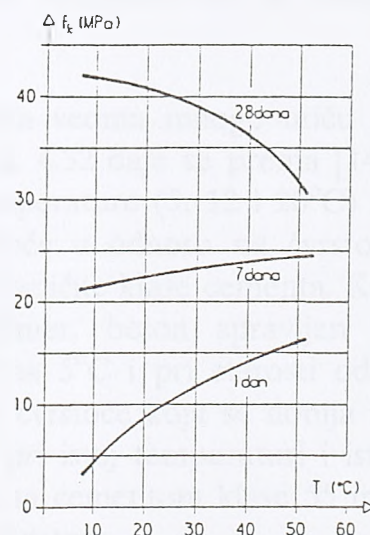
Na slici 4.28 prikazani su rezultati jednog vrlo interesantnog eksperimentalnog ispitivanja, koje je dosta davno (1958) sproveo Klajger [106]. Radi se o betonu spravljenom sa portland cementom ili sa portland cementom sa manjim procentom dodatka zgure ($m_c = 307 \text{ kg/m}^3$),

koji je prvih 28 dana negovan na temperaturama od -4 do 49°C , da bi kasnije svi uzorci betona bili negovani na temperaturi od 23°C i pri 100% relativne vlažnosti. Sa slike se vidi da je samo za prva tri dana negovanja temperatura iznad 30°C dala veće čvrstoće pri pritisku, a da su pri starostima od sedam i više dana najviše rezultate pokazali uzorci negovani, slično kao i kod Prajsovih ispitivanja, na 13°C . Za starost betona iznad 28 dana, na primer, uzorci negovani na 4°C pokazali su veće čvrstoće od uzoraka negovanih na 23°C , koji su kod ovih ispitivanja tretirani kao etalonski uzorci. Uzorci negovani na 49°C , pak, čija je jednodnevna čvrstoća za više od 70% premašivala čvrstoću etalona, već nakon 7 dana pokazivali su samo oko 80% čvrstoće etalona. Interesantno je uočiti da je čak i beton negovan prvih 28 dana na temperaturi od -4°C , a kasnije na temperaturi od 23°C , pri starostima od preko tri meseca pokazivao veće čvrstoće nego uzorci koji su stalno držani na temperaturi 23°C .

Generalno govoreći, uticaj povišene temperature na čvrstoću betona pri pritisku je takav da u prvim časovima, pa i danima ova funkcija ima vrlo nagli rast, dok se kasnije taj trend značajno usporava, pa dobija i suprotan karakter. Ovo se prema Helmutu i Ferbeku [140] i Muravlju [91] može prikazati slikom 4.29, na osnovu koje se može zaključiti da beton koji očvršćava na povišenim temperaturama uvek ima veće početne čvrstoće (do starosti od cca 7 dana), dok su kasnije čvrstoće betona, na primer one u vremenu od 28 dana i iznad njega, uvek niže od čvrstoća koje bi isti beton imao pod pretpostavkom da očvršćava u normalnim temperaturnim uslovima.

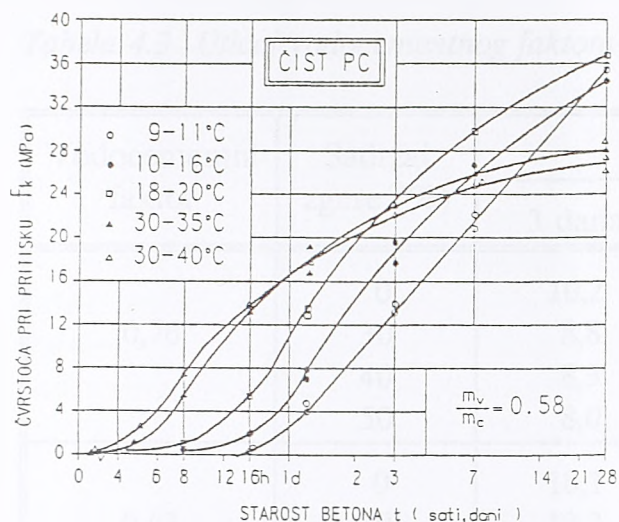


Sl. 4.28 Uticaj temperature tokom prvih 28 dana na čvrstoću betona

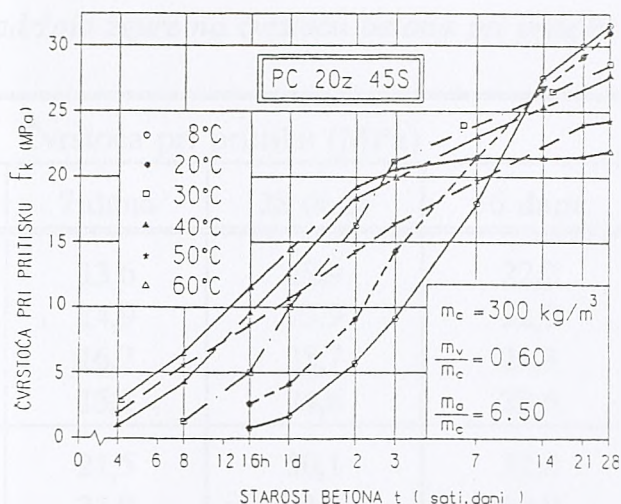


Sl. 4.29 Čvrstoća betona posle 1, 7 i 28 dana u funkciji temperature

Nadalje, na slici 4.30 prikazuju se rezultati ispitivanja Bajforsa [20] dobijeni sa čistim portland cementom, a na slici 4.31 oni sa cementom uz dodatak 20% zgure, prema ispitivanjima Živkovića [148]. U oba slučaja radilo se o uticaju temperature u širem intervalu ($8-60^{\circ}\text{C}$), a nega betona je sprovedena pri visokoj relativnoj vlažnosti. Pri tome, u oba slučaja količina upotrebljenog cementa iznosila je $m_c = 300 \text{ kg/m}^3$, vodocementni faktor u prvom slučaju iznosio je 0,58, a u drugom 0,60, dok je agregatno cementni odnos iznosio 6,68 i 6,50, respektivno.

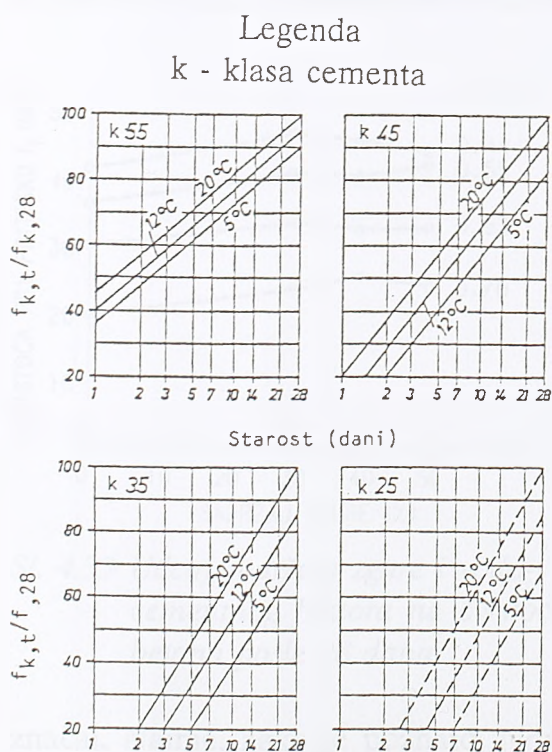


Sl. 4.30 Uticaj temperature na čvrstoću betona spravljenog sa čistim PC



Sl. 4.31 Uticaj temperature na čvrstoću betona spravljenog sa cementom sa dodatkom zgure

Na osnovu prikazanih rezultata datih putem slika 4.30 i 4.31 zapaža se već napred pomenuti trend razvoja čvrstoće pri povišenim temperaturama (videti sl. 4.29), ali je brzina prirasta čvrstoće i funkcija vrste cementa. Naime, cement sa dodatkom zgure ima nešto sporiji prirast čvrstoće, što je posledica same prirode zgure i specifičnog mehanizma hidratacije, pri čemu postoji potreba za aktiviranjem zgure na jedan od tri načina pomenuta u poglavlju 2.2.3.



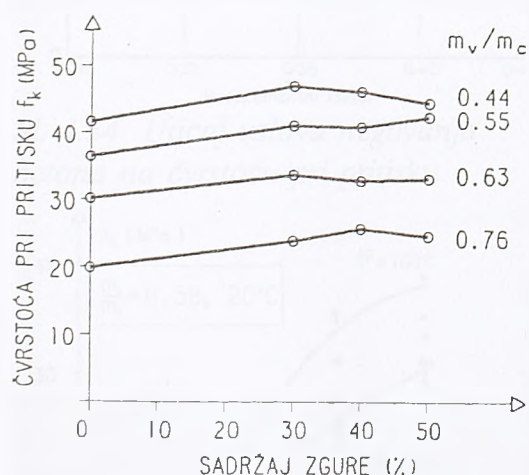
Sl. 4.32 Relativan odnos čvrstoća betona u funkciji temperature i klase cementa

Vrsta i klasa cementa veoma mnogo utiču na razvoj čvrstoće. Na sl. 4.32 daje se prema [141] uticaj tri različite temperature (5, 12 i 20°C) na brzinu prirasta čvrstoće u odnosu na čvrstoću na 28 dana za četiri različite klase cementa. Kao što se vidi, na primer, beton spravljen sa cementom klase 25 na 5°C i pri starosti od 7 dana ima samo 20% čvrstoće koja se dobija na 28 dana, dok beton pri istoj temperaturi i istoj starosti, ali spravljen sa cementom klase 55 ima čak 65% 28-dnevne čvrstoće.

I sam procenat zgure primenjen u spravljanju betona i pri umerenim temperaturama ima značaja. Prema Mezelu i Rouzu [83], u tabeli 4.2, kao i na slici 4.33, na kojoj su prikazane vrednosti čvrstoća iz ove tabele ali samo za starosti od 28 dana, date su čvrstoće betona pri pritisku za različite procenatke dodatka zgure, kao i različite vodocementne faktore. U ovom slučaju vidi se da postoji jedan optimalan sadržaj zgure za određen vodocementni faktor pri kome čvrstoća pri pritisku ima tendenciju porasta.

Tabela 4.3 Uticaj vodocementnog faktora i sadržaja zgure na čvrstoću betona pri pritisku

Vodocementni faktor	Sadržaj zgure (%)	Čvrstoća pri pritisku (MPa)			
		3 dana	7 dana	28 dana	56 dana
0,76	0	10,2	13,6	19,9	22,2
	30	8,8	14,9	23,9	32,9
	40	8,3	16,7	25,7	28,3
	50	8,0	15,1	24,6	28,6
0,63	0	18,1	21,5	30,1	32,8
	30	13,3	21,9	33,7	39,9
	40	11,5	20,6	32,8	38,3
	50	11,8	21,4	33,1	38,3
0,55	0	22,9	26,8	36,4	43,6
	30	18,9	29,3	41,1	49,5
	40	16,7	27,7	40,9	48,6
	50	19,2	30,6	42,4	54,0
0,44	0	29,1	33,0	41,6	48,3
	30	20,6	38,1	47,0	55,3
	40	20,4	30,6	46,2	54,3
	50	21,1	32,1	44,5	52,0



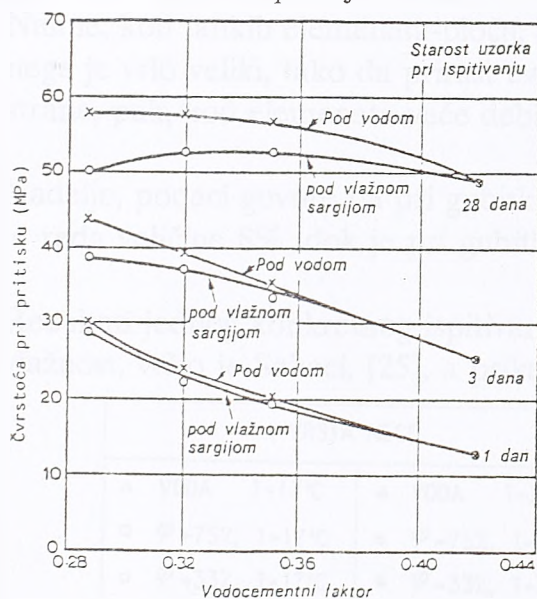
Sl. 4.33 Uticaj sadržaja zgure i vodocementnog faktora na čvrstoću betona posle 28 dana

Na osnovu svega napred izloženog sledi zaključak da postoje cementi koji bolje ili lošije "podnose" temperaturu, pa u konkretnom slučaju treba prethodnim ispitivanjima proveriti njihovu podobnost za termički tretman. Tako na primer, u uslovima povišenih temperatura, konačne čvrstoće betona spravljenih sa cementima sa dodatkom zgure ponekad su reda veličina 120-140% u odnosu na čvrstoću $f_{k,28}$ koja odgovara normalnom režimu očvršćavanja [91].

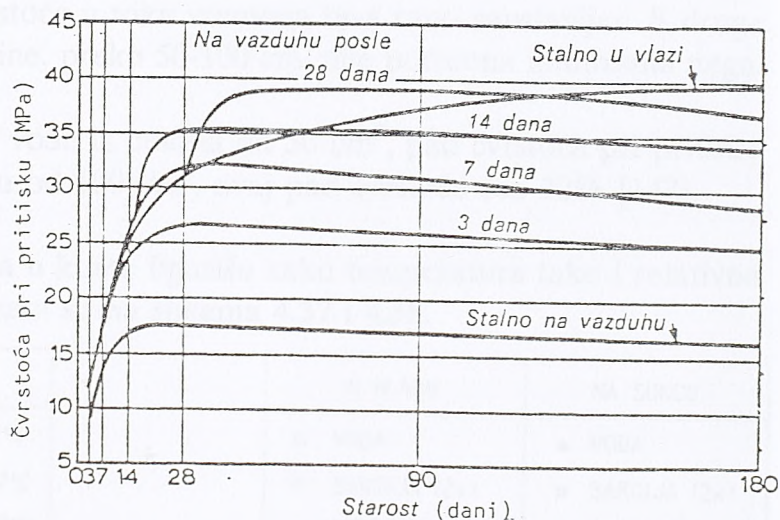
Relativna vlažnost vazduha koja je kod svežeg betona igrala sekundarnu ulogu, kod skoro očvrstlog i očvrstlog betona ima prvorazredni značaj. Naime, kako je poznato, hidratacija se može obavljati samo u kapilarima punim vode. Obezbeđenje visoke vlažnosti sprečava isparavanje vode iz kapilara u betonu i stvara uslove za kontinualnu hidrataciju. Samo na takav način dobijaju se kvalitetni proizvodi hidratacije (sa visokim odnosom gel/prostor) visokih mehaničkih karakteristika, koji će obezbediti i dovoljnu trajnost - dugovečnost betona u uslovima eksploatacije.

Stanje vlažnosti betona i efikasnost negovanja u velikoj meri zavisi i od primenjenog vodocementnog faktora. Tako na primer, prema ispitivanjima Klajgera, [106], na slici 4.34, daju se dijagrami prirasta čvrstoća dve serije uzoraka, načinjenih od iste mešavine betona, od kojih je jedna držana prvih 24 h pod vodom, a druga pod mokrim sargijama. Kao što se vidi, stalni dotok vode predstavlja bolju negu nego povremeno kvašenje, a razlika ova dva načina nege je najveća pri niskom vodocementnom faktoru, kada se sušenje uzoraka dešava znatno brže. Isto tako, uočava se da se razlika ova dva načina nege povećava sa starošću betona tj. najveća je pri starosti od 28 dana, dok u starosti od 1 dan razlike skoro uopšte nema. Ovo je i razumljivo s obzirom da u prva 24 časa i pored isušivanja, u betonu ima dovoljno vode za početnu hidrataciju.

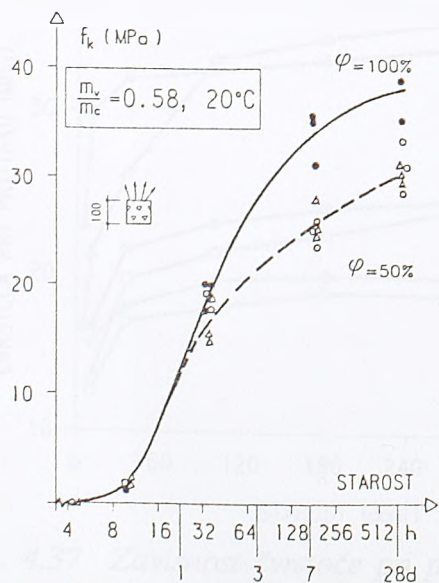
Uticaj načina i dužine trajanja negovanja betona može se sagledati i sa slike 4.35, koja se odnosi na beton spravljen sa vodocementnim faktorom 0,50, prema Prajsu [106].



Sl. 4.34 Uticaj uslova negovanja betona na čvrstoću pri pritisku



Sl. 4.35 Uticaj dužine trajanja i vrste negovanja na čvrstoću pri pritisku



Sl. 4.36 Uticaj relativne vlažnosti na čvrstoću betona

U svojoj doktorskoj disertaciji Bajfors [20] je posvetio pažnju i relativnoj vlažnosti vazduha i njenom uticaju na beton. Na sl. 4.36 prikazani su rezultati prirasta čvrstoće pri pritisku do 28 dana za beton spravljen sa čistim portland cementom, sa vodocementnim faktorom 0,58, pri temperaturi od 20°C, za dve varirane vlažnosti. Pri ovim ispitivanjima, kao što se vidi, sušenje uzoraka je bilo omogućeno samo preko gornje površine, dok je ostalih pet strana uzoraka (kocki) bilo zaptiveno nekim zaptivnim sredstvom. Sa sl. 4.36 se vidi da relativna vlažnost vazduha na kojoj su negovani uzorci praktično nema uticaja na čvrstoću betona pri pritisku u prvih 16 časova, kada i pored sušenja u betonu ima dovoljno vode za nesmetani proces hidratacije. Međutim, nadalje, uticaj smanjene vlažnosti (nekompletne nege) se stalno

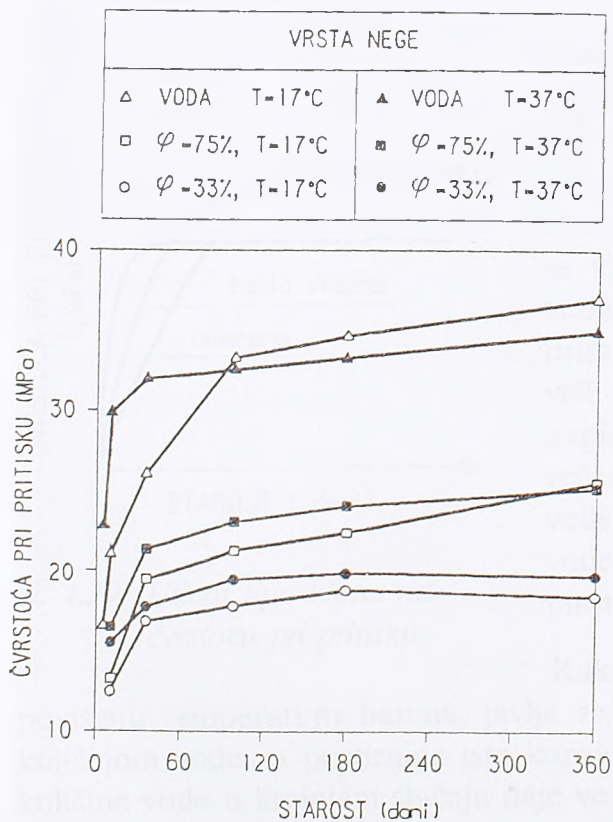
povećava, tako da posle 28 dana čvrstoće pri pritisku uzoraka negovanih pri 50% relativne vlažnosti imaju oko 25% niže vrednosti od onih negovanih pri stoprocentnoj vlažnosti.

Odloženo negovanje betona takođe ima uticaja na čvrstoću pri pritisku. Prema Nevilu [106], do pada čvrstoće pri pritisku ne dolazi ukoliko se beton odloženo neguje samo kod mešavina sa visokim vodocementnim faktorom. U svim drugim slučajevima zakasnela nega daje pad čvrstoće pri pritisku. Tako, na primer, autori [5] navode da prvi dan odloženog negovanja prouzrokuje najveći pad čvrstoća; radi se o gubitku od 56 do 64% čvrstoće pri pritisku u odnosu na onu dobijenu pri negovanju u uobičajenim uslovima.

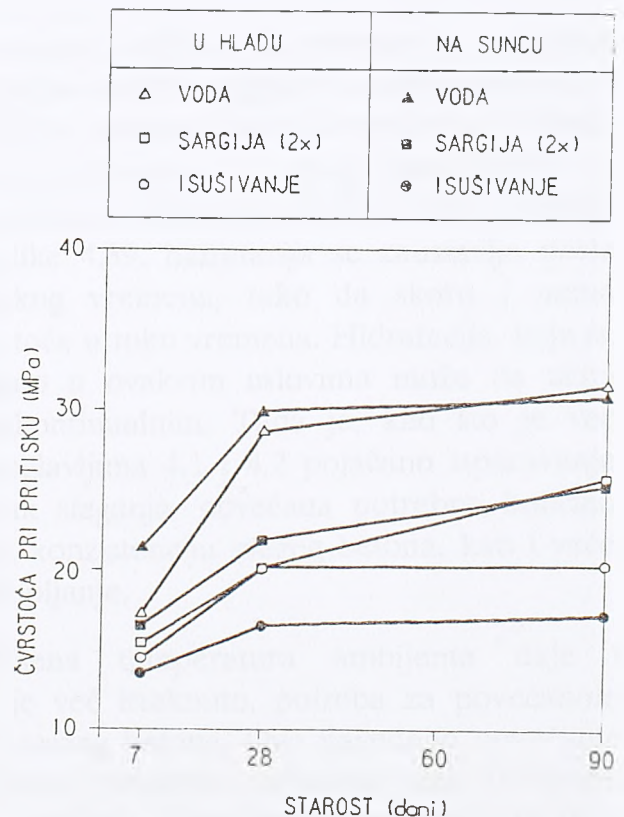
U realnim uslovima temperaturu i vlažnost sredine treba posmatrati kao jedinstven termohigrometrijski faktor, s tim da u razmatranje treba uzeti i brzinu vetra, intenzitet gubitka vode, osunčanost ili senovitost kao i dimenzije predmetnog betonskog elementa. Naime, kod tankih elemenata-ploča, na primer, intenzitet isparavanja vode kod nedovoljne nege je vrlo veliki, tako da prirast čvrstoće u toku vremena biva rano zaustavljen. S druge strane, pak, kod elemenata veće debljine, preko 50-100 cm, nije potrebna intenzivna nega.

Nadalje, podaci govore da pri gubitku vode iz betona od 50 l/m^3 , pad čvrstoća pri pritisku je reda veličine 8%, dok je pri gubitku od 100 l/m^3 , ovaj pad čvrstoće cca 32% [147].

Rezultati jednog konkretnog ispitivanja u kome figurišu kako temperatura tako i relativna vlažnost, vršio je Sebeci, [25], a prikazani su na slikama 4.37 i 4.38.



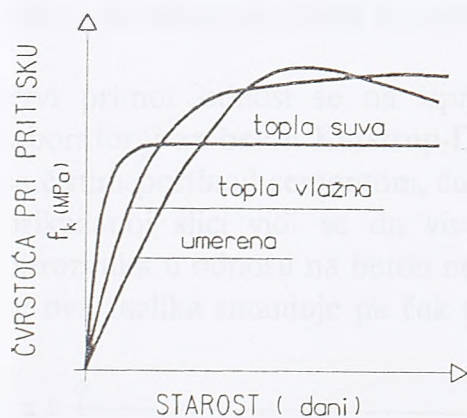
Sl. 4.37 Zavisnost čvrstoće pri pritisku od temperature i relativne vlažnosti



Sl. 4.38 Čvrstoća pri pritisku u zavisnosti od načina nege

Slika 4.37 prikazuje razvoj čvrstoća pri pritisku do starosti betona od 360 dana pri negovanju betonskih uzoraka u vodi pri temperaturama 17 i 37°C, zatim pri relativnoj vlažnosti od 75% i pri temperaturama 17 i 37°C i najzad, pri relativnoj vlažnosti od 33% i pri temperaturama 17 i 37°C. Kao što se vidi sa sl. 4.37, nega uzoraka betona na temperaturama od 17 i 37°C, kako pri različitim relativnim vlažnostima (75 i 33%), tako i u vodi, dala je bliske konačne vrednosti čvrstoća (na 360 dana). Drugim rečima, na osnovu obavljenih eksperimenata sledi zaključak da temperatura od 17 i 37°C pri istim relativnim vlažnostima, ili pri navedenim temperaturama i negovanju u vodi, ima uticaja samo na brzinu prirasta čvrstoće, dok na konačne čvrstoće (360 dana) praktično nema uticaja. Međutim, pri negovanju uzoraka u uslovima relativne vlažnosti od 75, odnosno 33%, vrednosti čvrstoća pri pritisku su drastično smanjene u odnosu na čvrstoće uzoraka negovanih u vodi.

Na slici 4.38 prikazan je prirast čvrstoća pri pritisku uzoraka koji su paralelno čuvani u vodi u hladu i na suncu, uzoraka koji su bili pokriveni sargijama i dva puta dnevno kvašeni vodom, kao i uzoraka negovanih u hladu i na suncu na kojima je bilo dozvoljeno slobodno isušivanje. Kako se zapaža na osnovu ovih ispitivanja, čvrstoća pri pritisku može biti pri slobodnom isušivanju na suncu i do 46% niža od one koja se postiže pri propisanom negovanju u vodi. Uzorci na kojima je dozvoljeno slobodno isušivanje u hladu ili na suncu praktično nemaju prirast čvrstoće između 28 i 90 dana, što znači da je hidratacija zaustavljena, a na 90 dana njihove čvrstoće su svega 40%-43% čvrstoće etalona (betona negovanog u vodi).



Sl. 4.39 Uticaj tipa klime na čvrstoću pri pritisku

Uticaj simultanog dejstva temperature i relativne vlažnosti sredine možda najbolje ilustruje slika 4.39 [12], na kojoj je prikazan razvoj čvrstoće pri pritisku u umerenoj, toploj-suvoj i toploj-vlažnoj klimi. U uslovima tople-suve klime (pustinjski uslovi), kao što se vidi sa slike 4.39, hidratacija se zaustavlja posle veoma kratkog vremena, tako da skoro i nema prirasta čvrstoća u toku vremena. Hidratacija, koja se vrši parcijalno u ovakvim uslovima može da učini kapilare diskontinualnim. Tada je, kao što je već rečeno u poglavljima 4.1 i 4.2 pojačano isparavanje vode, gubitak sleganja, povećana potrebna količina vode za istu konzistenciju svežeg betona, kao i veće plastično skupljanje.

Kako povišena temperatura ambijenta daje i povišenu temperaturu betona, javlja se, kako je već istaknuto, potreba za povećanom količinom vode za postizanje iste konzistencije svežeg betona. Ovo navedeno povećanje količine vode u krajnjem slučaju daje veću kapilarnu poroznost cementne paste u betonu ukoliko se istovremeno ne poveća i količina cementa u betonskoj mešavini, ili daje povećanu kapilarnu poroznost betona, veće skupljanje i tečenje, ukoliko se u odgovarajućem odnosu poveća i projektovana količina cementa u betonu radi očuvanja projektovanog vodocementnog faktora. Autori [5] navode da je uticaj tople klime utoliko veći, ukoliko je i sadržina cementa veća.

4.5 OSTALE VAŽNIJE KARAKTERISTIKE BETONA U ZAVISNOSTI OD TERMOHIGROMETRIJSKOG FAKTORA

Pored uticaja na čvrstoću betona pri pritisku, o čemu je detaljno elaborirano u poglavlju 4.4, termohigrometrijski faktor ima značajnog udela i na neke druge karakteristike betona, kao što su brzina prostiranja ultrazvuka, dinamički modul elastičnosti, deformaciona svojstva, skupljanje i tečenje, vodopropustljivost i dr.

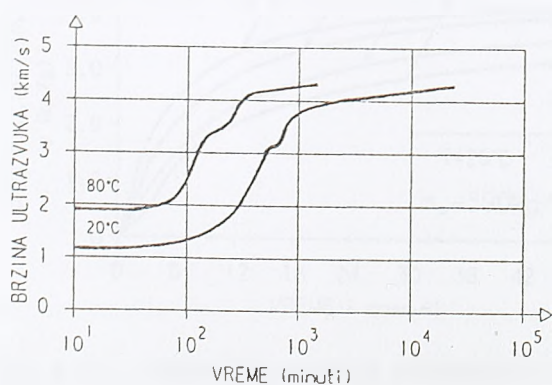
U uslovima variranja termohigrometrijskog faktora sredine svaka od ovih karakteristika ima svoje posebnosti, naročito u pojedinim etapama formiranja strukture betona i neće se pokoravati zakonitostima dobijenim kod ispitivanja čvrstoće pri pritisku betona. Drugim rečima, brzina prirasta čvrstoće, kao i odnos graničnih čvrstoća pri različitim temperaturama, na primer, ne mogu se direktno preslikati na neke druge karakteristike betona.

Brzina prolaza ultrazvuka (v) kao funkcija kompaktnosti betona, koja je definisana izrazom

$$v = \sqrt{\frac{E_D(1 - \mu_D)}{(1 + \mu_D)(1 - 2\mu_D) \cdot \gamma}} \quad (4.2)$$

(E_D , μ_D i γ - dinamički modul elastičnosti, dinamički Poasonov koeficijent i zapreminska masa), u velikoj meri zavisi od termohigrometrijskih faktora. U daljem će se prikazati rezultati ispitivanja brojnih istraživača koji se odnose, kako isključivo na uticaj temperature, tako i na simultani uticaj temperature i vlažnosti sredine na brzinu prostiranja ultrazvuka.

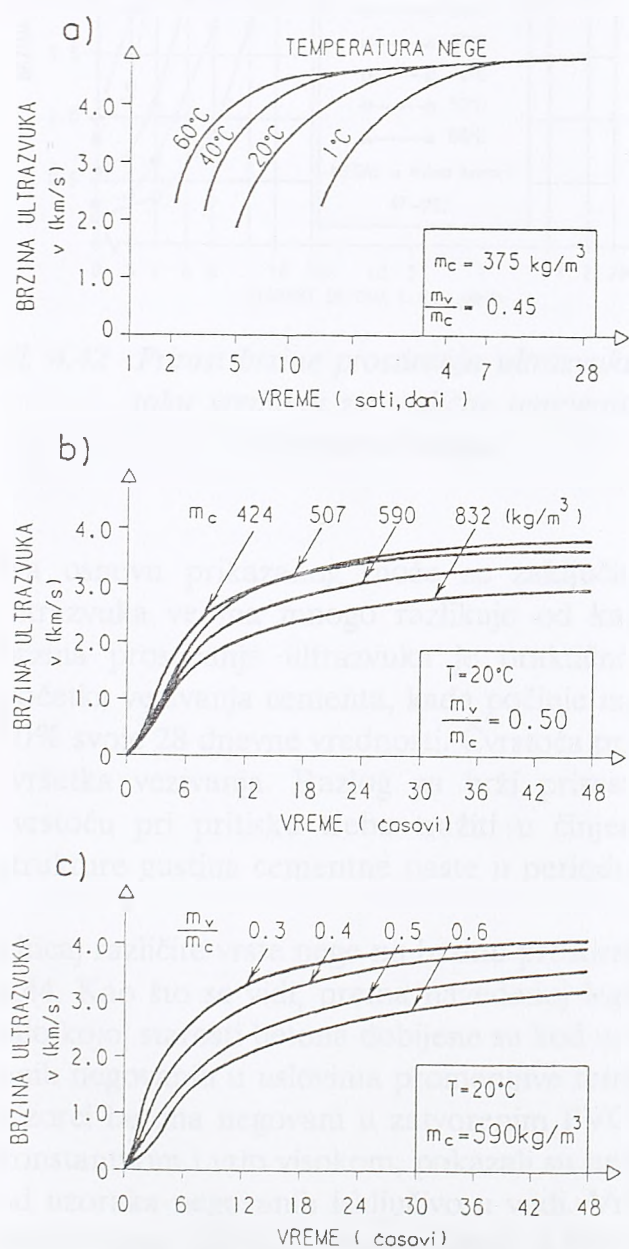
Prvi primer odnosi se na ispitivanja Idorna [55] sedamdesetih godina sprovedena u laboratoriji za beton Karstrup-Danska. Ovde se radilo o betonskim uzorcima spravljanim sa čistim portland cementom, čuvanim neprekidno na temperaturi 20 ili 80°C (sl. 4.40). Na prikazanoj slici vidi se da visoka temperatura (80°C) daje i veću brzinu prostiranja ultrazvuka u odnosu na beton negovan na 20°C u maloj starosti i sve do cca 16 dana, kada se ova razlika smanjuje pa čak postaje i zanemarljiva.



Sl. 4.40 Brzina prostiranja ultrazvuka u funkciji temperature i vremena

Nešto kasnije, Kason i Domon [24] su vršili obimna ispitivanja na uzorcima sitnozrnog betona, što je prikazano na slikama 4.41a, 4.41b i 4.41c. Uticaj temperature u opsegu od 1-60° na brzinu prostiranja ultrazvuka do starosti od 28 dana pri količini cementa od 375 kg/m³ i vodocementnom faktoru 0,45, prikazan je na slici 4.41a, uticaj količine cementa na brzinu prostiranja ultrazvuka pri konstantnoj temperaturi i nepromenjenom vodocementnom faktoru na slici 4.41b, dok je na slici 4.41c prikazana zavisnost brzine prostiranja ultrazvuka od vodocementnog faktora pri

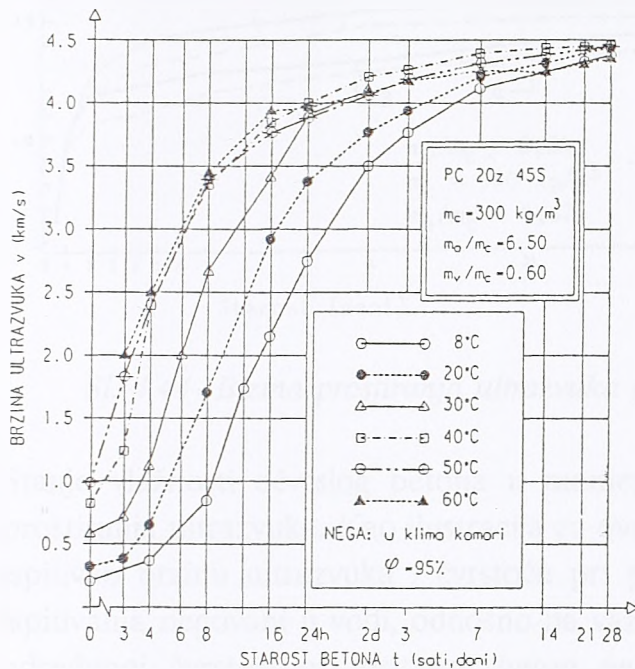
konstantnoj temperaturi i nepromenjenoj količini cementa. Kao što se vidi sa slike 4.41a, viša početna temperatura daje i veću brzinu prostiranja ultrazvuka u početnim starostima, dok kasnije, (posle cca 7 dana), brzina prostiranja ultrazvuka praktično više ne zavisi od temperature i konvergira jednoj vrednosti. Sa slika 4.41b i 4.41c može se zaključiti da sastav betonske mešavine tj. količina cementa po m^3 betona, kao i vodocementni faktor, bitno utiču na brzinu prostiranja ultrazvuka. Naime, nižim količinama cementa odgovaraju veće brzine prostiranja ultrazvuka ne samo do 48h već i do 28 dana, a razlog za ovo je sastav betonske mešavine tj. količina cementa i agregatno cementni odnos, pošto je poznato da je u opštem slučaju brzina prostiranja ultrazvuka veća kroz agregat nego kroz cementni kamen.



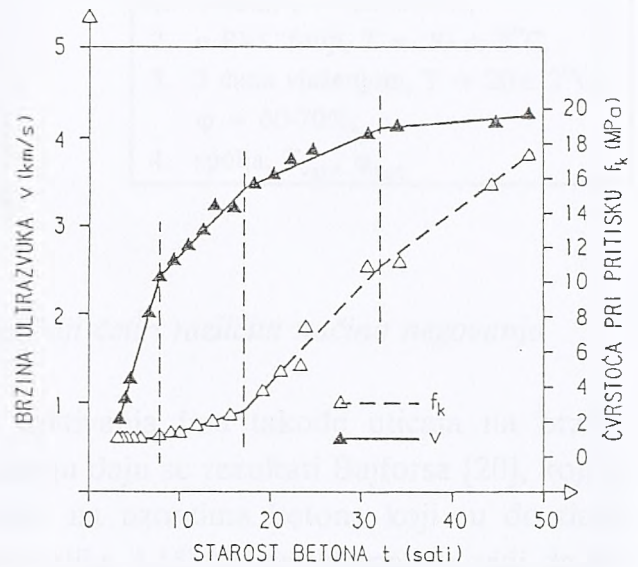
Sl. 4.41 Brzina prostiranja ultrazvuka u funkciji temperature (a), količine cementa (b) i vodocementnog faktora (c)

Nadalje, na slici 4.42, prema [148], prikazuju se rezultati ispitivanja brzine prostiranja ultrazvuka u zavisnosti od temperature, za betone spravljene sa domaćim cementom sa 20% zgre, klase 45, sa sporim prirastom čvrstoće. Pri ovim ispitivanjima količina cementa je bila konstantna i iznosila je 300 kg/m^3 , vodocementni faktor 0,60, a agregatno-cementni odnos 6,50. Nega betonskih uzoraka kod svih prikazanih betonskih mešavina sprovedena je u klima komori pri relativnoj vlažnosti od 95%. Kao što pokazuju ova obimna ispitivanja, uticaj temperature na prirast brzine prostiranja ultrazvuka je veoma veliki u periodu male starosti betona, dok je ovaj uticaj na brzinu ultrazvuka u zrelijem dobu betona skoro beznačajan. Tako, na primer, pri starosti od 16h brzina prostiranja ultrazvuka pri temperaturi 8 i 60°C se razlikuje cca 43%, dok pri starosti od 28 dana ova razlika iznosi svega 4%. Interesantno je uporediti sliku 4.42 sa slikom 4.31, na kojoj je prikazan uticaj temperature na čvrstoću betona pri pritisku, pošto se u ovom slučaju radilo o betonskim mešavinama istog sastava, spravljanim i negovanim pri istim temperaturama (8, 20, 30, 40, 50 i 60°C) i nepromenjenoj relativnoj vlažnosti sredine od 95%. Vidi se da je pri povišenoj temperaturi (60°C) čvrstoća pri pritisku u starosti od, na primer, 28 dana cca 30% niža od one dobijene na umerenoj temperaturi (8°C). Međutim, kod ispitivanja

brzine prostiranja ultrazvuka kroz beton ne zadržava se ovaj trend. Ovaj fenomen se jako dobro može sagledati i sa slike 4.43, na osnovu ispitivanja Ibrahima [54].



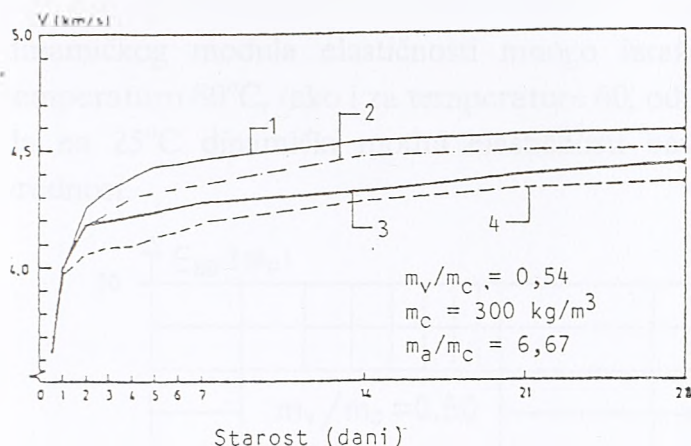
Sl. 4.42 Prirast brzine prostiranja ultrazvuka u toku vremena za različite temperature negovanja betona



Sl. 4.43 Brzina prostiranja ultrazvuka i čvrstoća pri pritisku u ranoj starosti betona

Na osnovu prikazanog može se zaključiti da se karakter prirasta brzine prostiranja ultrazvuka veoma mnogo razlikuje od karaktera prirasta čvrstoće pri pritisku. Naime, brzina prostiranja ultrazvuka je praktično nepromenjena od momenta spravljanja do početka vezivanja cementa, kada počinje naglo da raste i do svršetka vezivanja dostiže 60-80% svoje 28 dnevne vrednosti. Čvrstoća pri pritisku, pak, najveći prirast dostiže tek nakon svršetka vezivanja. Razlog za brži prirast brzine prostiranja ultrazvuka u odnosu na čvrstoću pri pritisku treba tražiti u činjenici da se zgušnjavanjem kristala aluminatne strukture gustina cementne paste u periodu vezivanja naglo povećava.

Uticao različite vrste nege na brzinu prostiranja ultrazvuka prikazan je, prema [148] na slici 4.44. Kao što se vidi, prema navedenoj legendi, najveće brzine prostiranja ultrazvuka pri bilo kojoj starosti betona dobijene su kod uzoraka negovanih u vodi (linija 1), a najniže kod onih negovanih u uslovima promenljive temperature i relativne vlažnosti sredine (linija 4). Uzorci betona negovani u zatvorenim PVC folijama (linija 2), gde je vlažnost održavana konstantnom i vrlo visokom, pokazali su nešto niže vrednosti brzina prostiranja ultrazvuka od uzoraka negovanih isključivo u vodi. Vrednosti brzina prostiranja ultrazvuka dobijene na uzorcima koji su 3 dana vlaženi, a nakon toga čuvani na temperaturi $20 \pm 2^\circ\text{C}$ i pri relativnoj vlažnosti od 60-70% (linija 3) su nešto iznad onih dobijenih na uzorcima negovanim u uslovima promenljive temperature i relativne vlažnosti sredine (linija 4), ali su niže od vrednosti brzina prostiranja ultrazvuka dobijenih na uzorcima neprekidno negovanim u PVC folijama (linija 2).

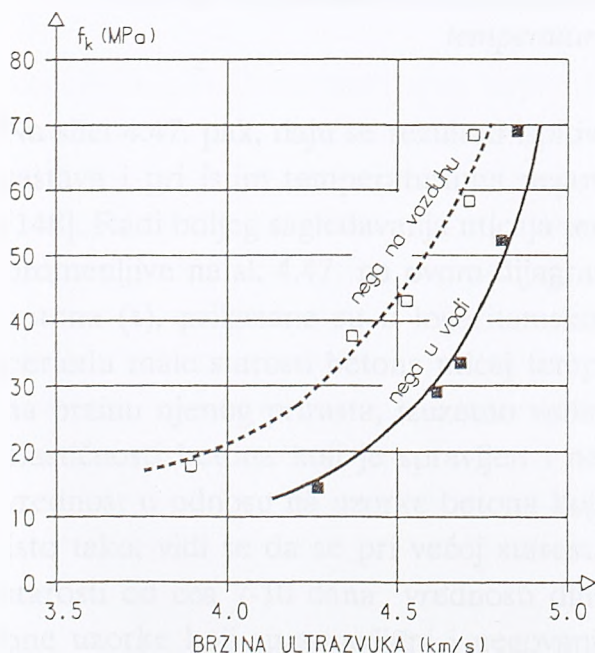


LEGENDA

1. u vodi, $T = 18 \pm 2^\circ\text{C}$,
2. u PVC foliji, $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$,
3. 3 dana vlaženjem, $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$,
 $\varphi = 60-70\%$,
4. spolja, T_{var} , φ_{var} .

Sl. 4.44 Brzina prostiranja ultrazvuka u funkciji četiri različita načina negovanja

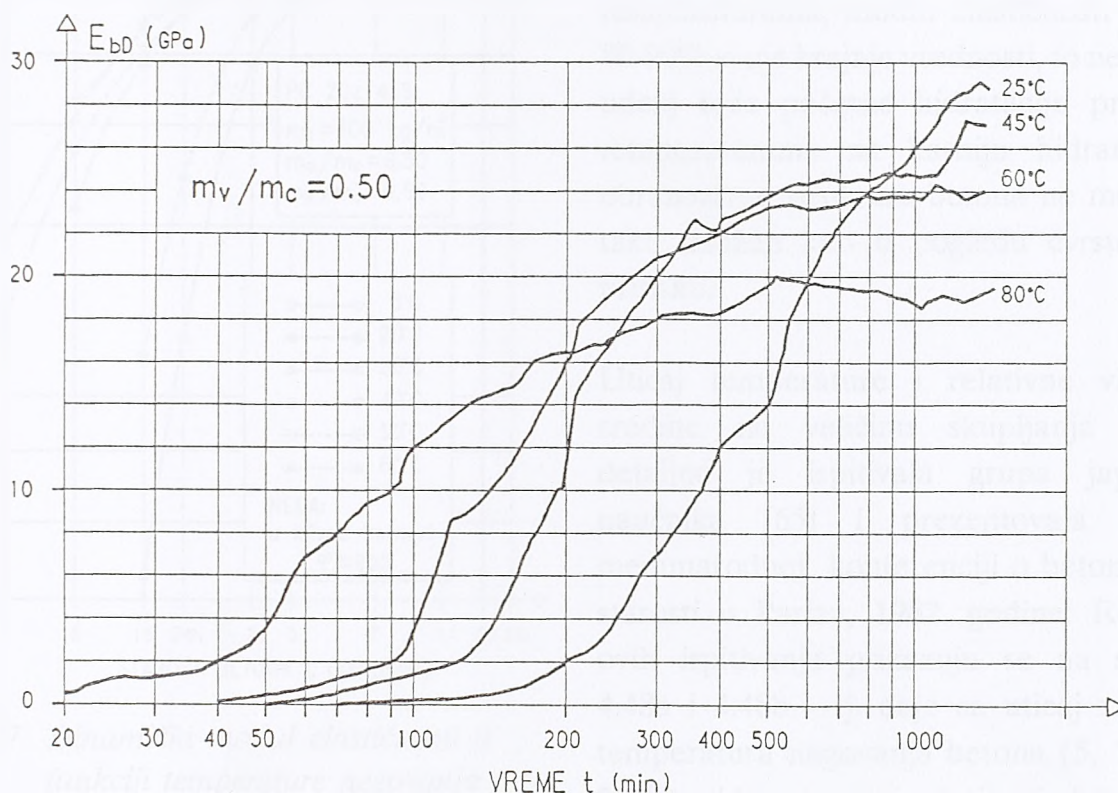
Stanje vlažnosti očvrsllog betona u momentu ispitivanja ima takođe uticaja na brzinu prostiranja ultrazvuka. Kao ilustracija za ovu tvrdnju daju se rezultati Bajforsa [20], koji je ispitivao brzinu ultrazvuka i čvrstoću pri pritisku na uzorcima betona koji su do dana ispitivanja negovani u vodi, odnosno na vazduhu (slika 4.45). Iz prikazanog se vidi da pri određenoj čvrstoći pri pritisku, beton negovan u vodi pokazuje znatno veću brzinu prostiranja ultrazvuka. S druge strane, pak, pri istoj brzini ultrazvuka, uzorci očvrsllog betona negovani do ispitivanja na vazduhu imaju veću čvrstoću pri pritisku. Ovo je iz razloga što su kapilarne pore u betonu kod uzoraka negovanih neprekidno u vodi ispunjene vodom, a poznato je da je čvrstoća vodom zasićenih uzoraka uvek niža u odnosu na čvrstoću suvih uzoraka.



Sl. 4.45 Uticaj vlažnosti očvrsllog betona na zavisnost između brzine ultrazvuka i čvrstoće pri pritisku betona

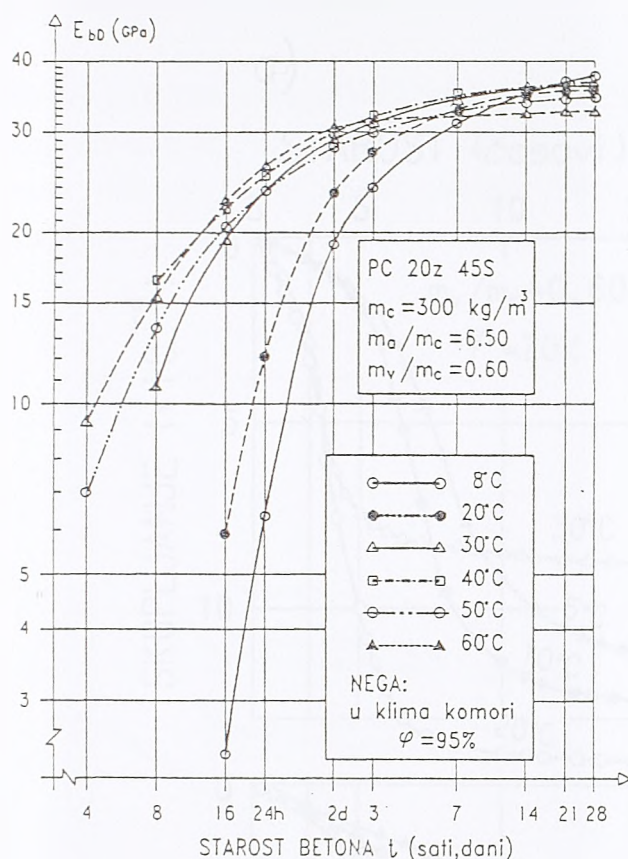
Uticaj temperature negovanja na promenu dinamičkog modula elastičnosti betona prikazaće se u dva naredna primera. Prvo, na slici 4.46 daju se rezultati ispitivanja grupe autora [45], koji su pratili uticaj četiri temperature ($25, 45, 60$ i 80°C) na dinamički modul elastičnosti sitnozrnog betona. Kod ovih ispitivanja dinamički modul elastičnosti je praćen od starosti 20 minuta (svež beton) do starosti 1000 minuta (beton male starosti). Sa slike 4.46 se vidi da dinamički modul elastičnosti betona naglo raste pri povišenim temperaturama, naročito pri 80°C , dok na umerenim temperaturama (25°C) ima mnogo blaži prirast. Ovo je svakako u vezi sa brzinom obrazovanja strukture betona, o čemu je bilo reči u poglavlju 4.3. Isto tako, sa slike 4.46 se vidi da je brzina prirasta

dinamičkog modula elastičnosti mnogo izraženija do cca 400 minuta i to kako za temperaturu 80°C, tako i za temperature 60, odnosno 45°C. Na osnovu ovih ispitivanja sledi da na 25°C dinamički modul elastičnosti betona ima umeren tok i najveću konačnu vrednost.



Sl. 4.46 Dinamički modul elastičnosti u funkciji vremena za različite temperature negovanja betona

Na slici 4.47. pak, daju se rezultati ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti betona istog sastava i pri istim temperaturama negovanja kao i na slikama 4.31 i 4.42, prema [147], [148]. Radi boljeg sagledavanja uticaja temperature i u periodu najniže starosti betona, obe promenljive na sl. 4.47 na ovom dijagramu, i dinamički modul elastičnosti (E_{bD}) i starost betona (t), prikazane su u logaritamskoj razmeri. Sa prikazane slike se uočava da je u periodu male starosti betona uticaj temperature negovanja, kako na vrednost E_{bD} , tako i na brzinu njenog prirasta, izuzetno veliki. Tako, na primer, vrednost dinamičkog modula elastičnosti betona koji je spravljen i negovan na 60°C, posle 16 h dostiže 5 puta veću vrednost u odnosu na uzorke betona koji su spravljeni i negovani na temperaturi od 8°C. Isto tako, vidi se da se pri većoj starosti betona ove razlike sve više smanjuju, da bi pri starosti od cca 7-10 dana vrednosti dinamičkog modula elastičnosti betona bile veće za one uzorke koji su spravljeni i negovani na najnižoj temperaturi (8°C). Razlike krajnjih izmerenih vrednosti dinamičkog modula elastičnosti (starost 28 dana) na 8°C i 60°C nisu, međutim, tako velike kao što je to slučaj kod čvrstoća pri pritisku betona (videti sliku 4.31) dobijenih na betonskim mešavinama istog sastava i pri istim temperaturama negovanja. Kod dinamičkog modula elastičnosti radi se o razlici cca 15%, dok, kod čvrstoća pri pritisku betona ova razlika iznosi preko 30%. Razlog za ovo može se tražiti



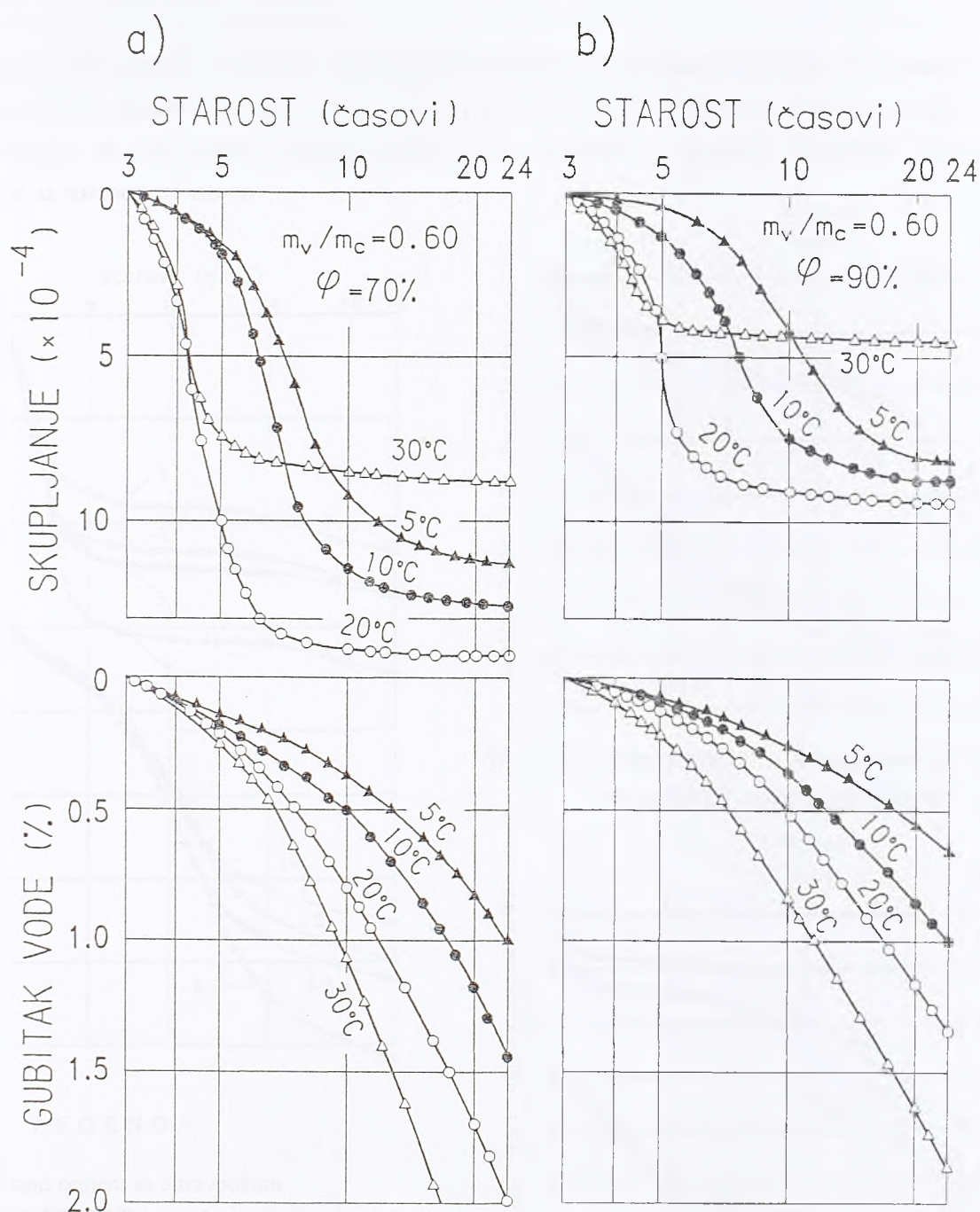
Sl. 4.47 Dinamički modul elastičnosti u funkciji temperature negovanja betona

slučaja skupljanje je praćeno u maloj starosti betona - do 24 h. Sa ovih slika se vidi da skupljanje betona raste sa porastom temperature nege, tako da, na primer, skupljanje na 20°C ima veću vrednost od skupljanja na 5 i 10°C. Međutim, kao što se vidi, na 30°C skupljanje betona pri maloj starosti pokazuje nižu vrednost od one na 20°C, uprkos velikom gubitku vode. Kao razlog za ovo autori navode veću brzinu hidratacije i obrazovanja matrice kao i privremeno odlaganje skupljanja, koje se pri višim temperaturama javlja ranije. S druge strane, pak, pri temperaturi od 5°C brzina hidratacije, vreme vezivanja cementa i obrazovanje matrice tobermorita je odloženo, pri takvim uslovima mali je gubitak vode, a takođe i skupljanje. Sa ovih slika, takođe se vidi, da je uticaj relativne vlažnosti sredine takav da visoka relativna vlažnost (sl. 4.48b) daje manje skupljanje, pošto je tada i isparavanje vode iz betona minimalno, što je potpuno u skladu sa stavovima izrečenim u poglavlju 4.2 (slike 4.4.-4.7).

Na slici 4.49, prema [65] prikazuje se uticaj vrste cementa na skupljanje i gubitak vode, iz čega proizilazi da skupljanje kod betona spravljenog sa cementom sa dodatkom zgure može biti veoma značajno, pa i veće nego kod betona spravljenog na bazi čistog portland cementa. Ovakav zaključak dobili su i istraživači Malhotra i Savasundaram [129], u novije vreme, 1992. godine.

u poznatoj činjenici da modul elastičnosti betona raste znatno brže od njegove čvrstoće pri pritisku. Naime, kako već pri starosti betona od 1-2 dana i pri normalnim temperaturama, modul elastičnosti dostiže 80-90% svoje krajnje vrednosti, to negativan uticaj brže početne hidratacije pri višim temperaturama na kasniju hidrataciju i obrazovanje strukture betona ne može biti tako izražen kao u pogledu čvrstoće pri pritisku.

Uticaj temperature i relativne vlažnosti sredine na veličinu skupljanja veoma detaljno je ispitala grupa japanskih naučnika [65] i prezentovala ih na međunarodnoj konferenciji o betonu male starosti u Parizu, 1982. godine. Rezultati ovih ispitivanja prikazuju se na slikama 4.48a i 4.48b - tj. daje se uticaj različitih temperatura negovanja betona (5, 10, 20 i 30°C) pri konstantnoj relativnoj vlažnosti, $\varphi = 70\%$, odnosno $\varphi = 90\%$, na skupljanje i gubitak vode u funkciji vremena. U oba

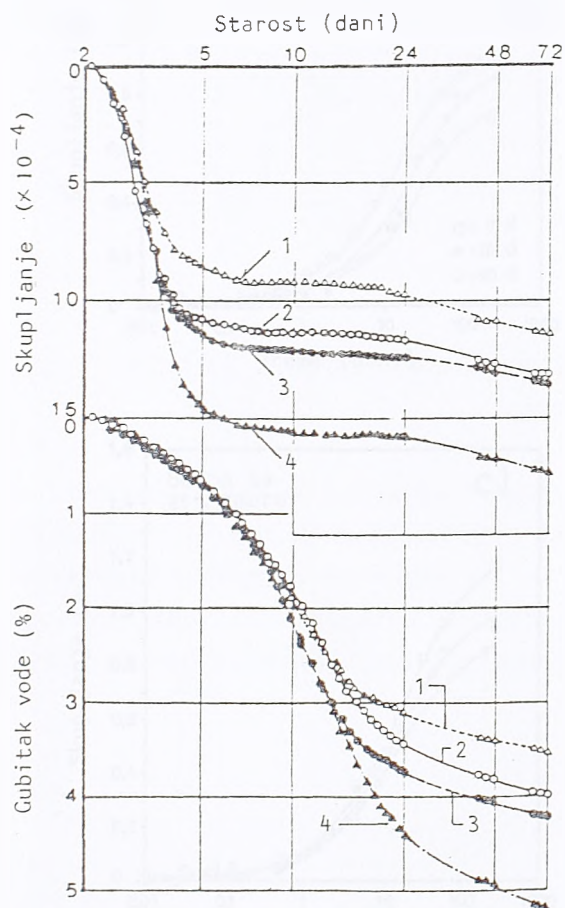


Sl. 4.48 Uticaj temperature i relativne vlažnosti sredine na gubitak vode i skupljanje betona

Nadalje, na slici 4.50, prikazuje se uticaj konzistencije - različitog početnog sleganja betona (8, 15 i 21 cm) na skupljanje i gubitak vode kod betona sa nepromenjenim vodocementnim faktorom 0,65, dok se na slici 4.51 daje zavisnost između vodocementnog faktora i skupljanja tj. gubitka vode, ali za isto početno sleganje betona od 21 cm, prema [65]. Sa prikazanih slika se zaključuje da veće početno sleganje (na primer 21 cm), ukoliko se zadrži isti vodocementni faktor, daje i veće skupljanje. Isto tako, može se zaključiti da beton sa visokim vodocementnim faktorom, pri istom sleganju, pokazuje veće skupljanje od betona sa niskim vodocementnim faktorom. Sa slika 4.50 i 4.51 se takođe zaključuje da

skupljanje ima dugotrajan karakter.

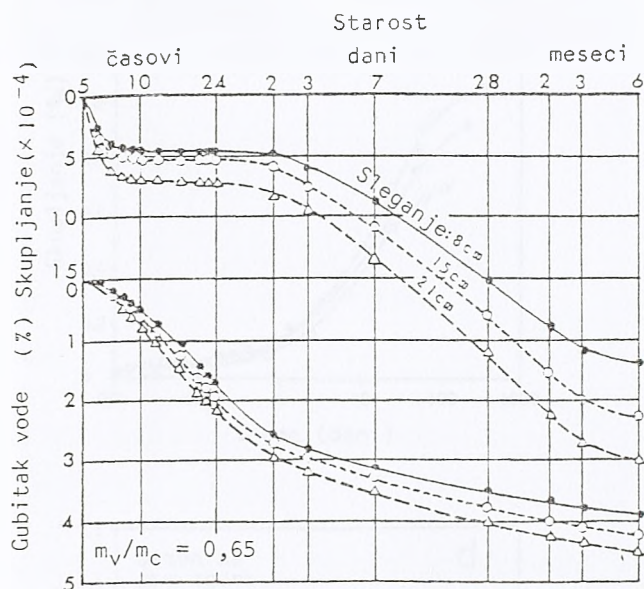
Što se, pak, tiče uticaja različitih dodataka betonu na skupljanje betona, tu postoje brojni eksperimentalni podaci mnogih autora [17], [38], [59], [63]. Međutim, decidan zaključak po ovom pitanju se ne može doneti pošto tip dodatka i njegova količina opredeljuju skupljanje u konačnoj meri.



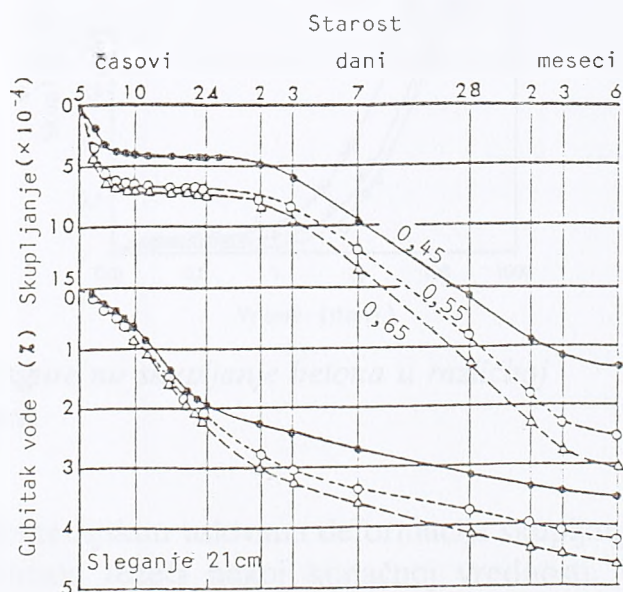
LEGENDA

1. portland cement sa ultravisokom ranom čvrstoćom
2. običan portland cement
3. portland cement sa visokom ranom čvrstoćom
4. portland cement sa dodatkom zgure

Sl. 4.49 Uticaj vrste cementa na gubitak vode i skupljanje betona



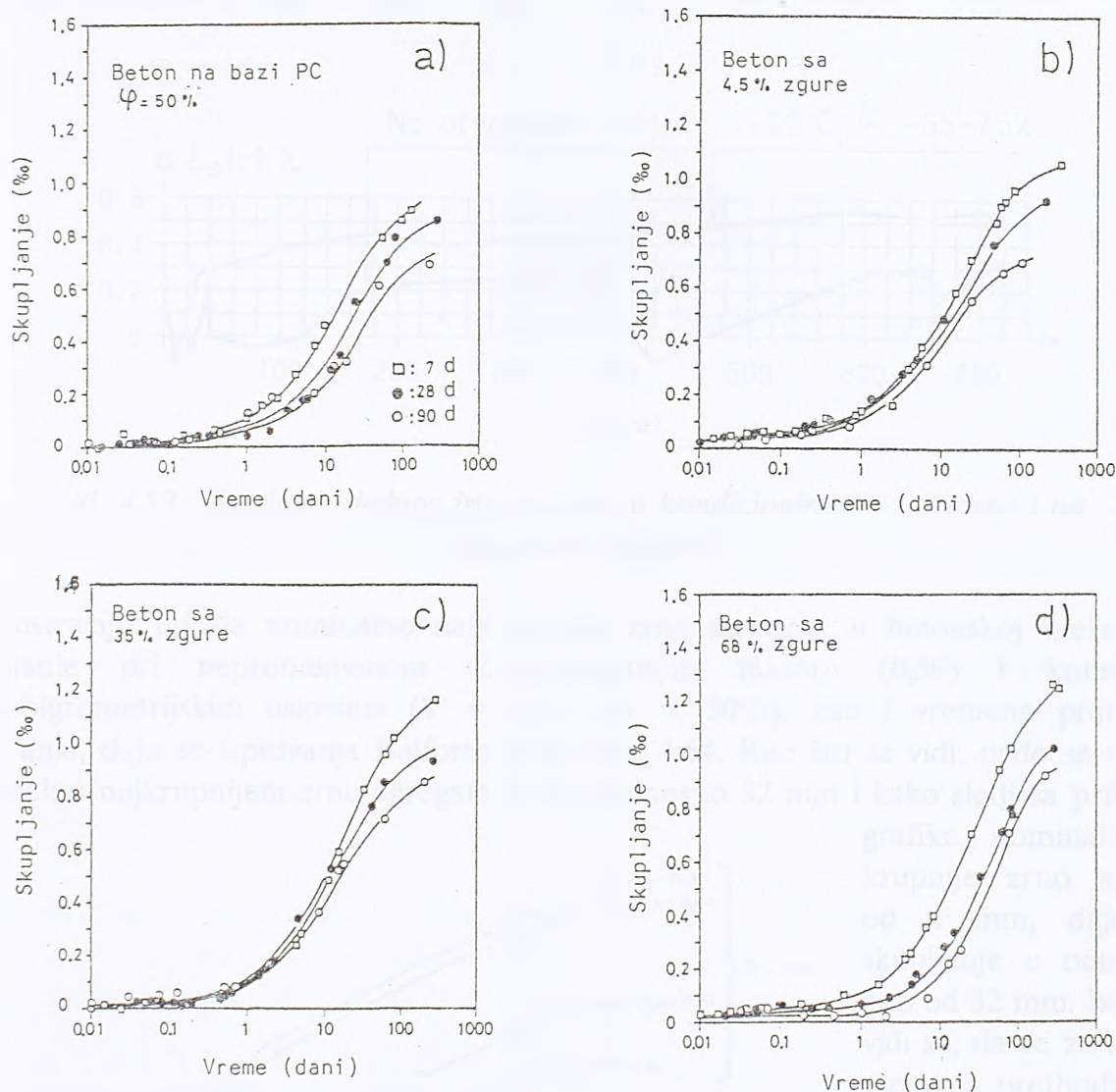
Sl. 4.50 Uticaj početne konzistencije betona na gubitak vode i skupljanje



Sl. 4.51 Uticaj vodocementnog faktora na gubitak vode i skupljanje

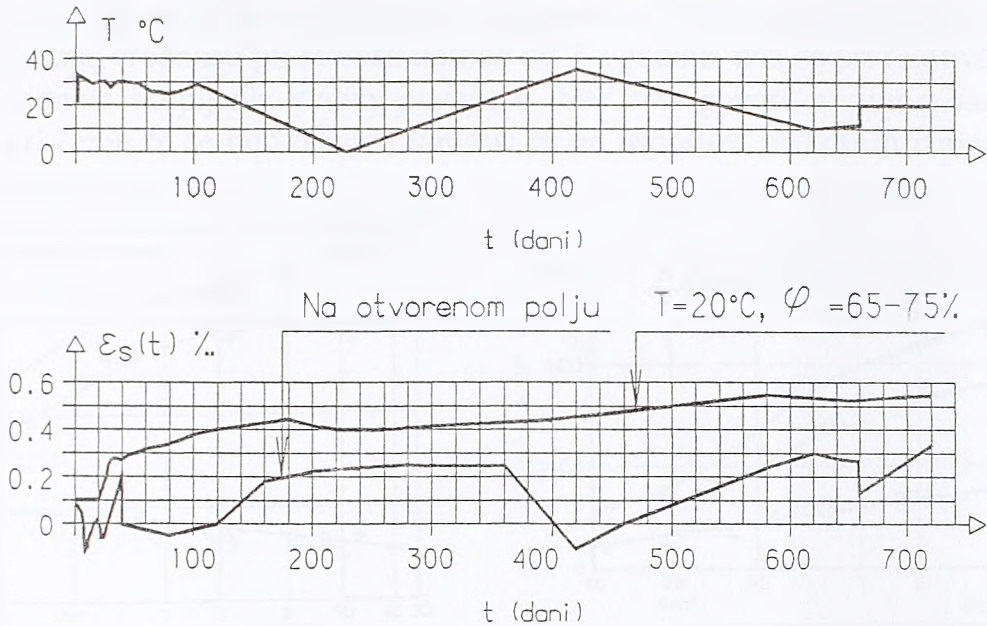
U prilog tvrdnji da je skupljanje povećano kod betona spravljenog sa cementom sa dodatkom zgure prikazuju se rezultati ispitivanja Černa i Čana [27], koji su skupljanje pratili pri nepromenjenoj relativnoj vlažnosti ($\varphi = 50\%$), u intervalu do 1000 dana. Na slikama 4.52a, 4.52b, 4.52c i 4.52d se, naime, prikazuju rezultati ispitivanja betona spravljenog kako

sa čistim portland cementom (4.52a), tako i sa 4,5%, 35% i 68% zgre (b, c i d), respektivno. Za svaku vrstu betona date su po tri krive, koje predstavljaju skupljanje usled sušenja započeto pri različitim starostima betona, u trenutku prekida nege tj. pri starostima od 7, 28 i 90 dana.



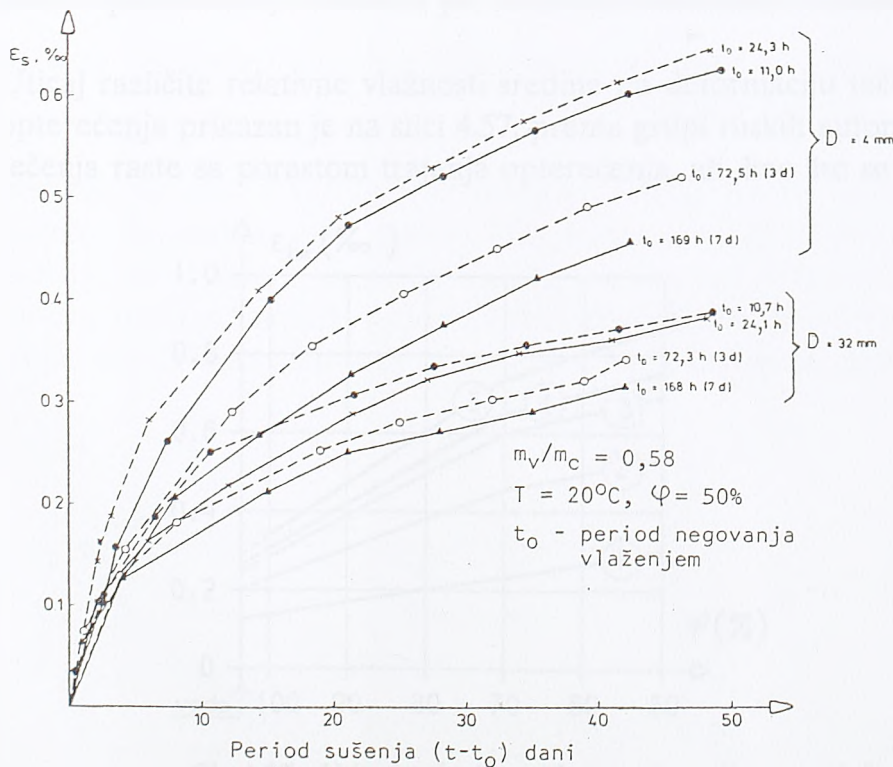
Sl. 4.52 Uticaj vrste cementa i sadržaja zgre na skupljanje betona u različitoj starosti

Poznato je da se u kondicioniranim termohigrometrijskim uslovima deformacija skupljanja u toku vremena monotono povećava asimptotski težeći nekoj konačnoj vrednosti. U nekondicioniranim uslovima, pak, prisutne su i deformacije usled promene temperature i vlažnosti sredine, pa su ukupne deformacije betona, koje se u ovakvim uslovima dobijaju po pravilu uvek manje od deformacija "čistog" skupljanja. To znači da je u ovakvim uslovima zavisnost između skupljanja i vremena poremećena stalnim promenama temperature i vlažnosti. Ovo je potpuno logično, ako se ima u vidu da se i beton podčinjava opštem zakonu deformisanja usled temperaturnih promena, [110]. Na slici 4.53 prikazuju se deformacije skupljanja jednog istog betona izmerene u kondicioniranim uslovima ($T = 20^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 65-75\%$) i u realnim uslovima na otvorenom prostoru, prema datom dijagramu temperature, praćene do starosti od 700 dana, [91].



Sl. 4.53 Skupljanje jednog istog betona u kondicioniranim uslovima i na otvorenom prostoru

Za ilustraciju uticaja nominalno najkrupnijeg zrna agregata u betonskoj mešavini na skupljanje pri nepromenjenom vodocementnom faktoru (0,58) i konstantnim termohigrometrijskim uslovima ($T = 20^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 50\%$), kao i vremena prethodnog negovanja, daju se ispitivanja Bajforsa [20], slika 4.54. Kao što se vidi, ovde se radilo o nominalno najkrupnijem zrnju agregata 4 mm, odnosno 32 mm i kako sledi sa prikazanih grafika,

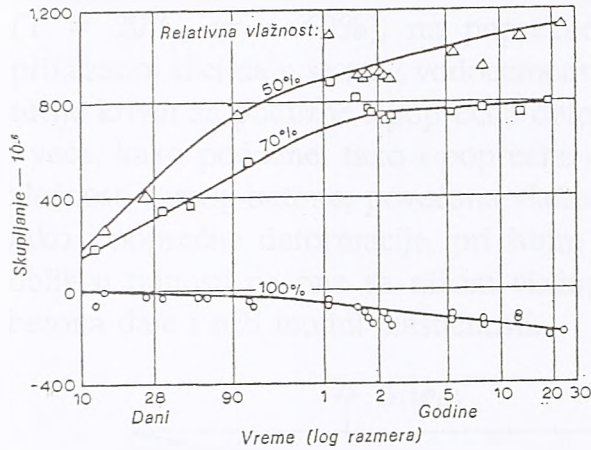


Sl. 4.54 Skupljanje betona u funkciji nominalno najkrupnijeg zrna agregata i vremena vlažnog negovanja

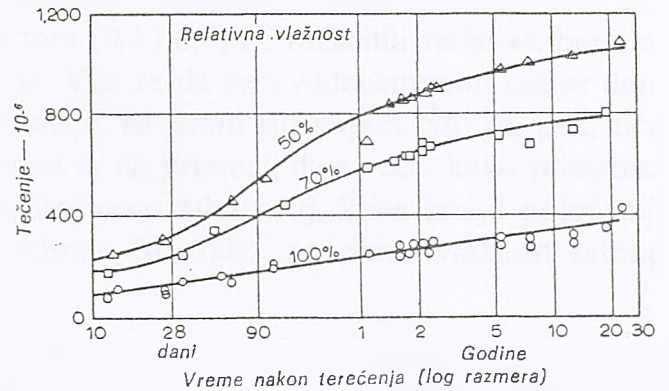
nominalno najkrupnije zrnju agregata od 4 mm, daje veće skupljanje u odnosu na ono od 32 mm. Isto tako, vidi se, da se za različita vremena prethodnog negovanja u vlazi dobijaju i različite vrednosti skupljanja.

Uticaj relativne vlažnosti sredine na skupljanje dat je prema [106], na slici 4.55. Iz ovog, već klasičnog primera (1958. god) se vidi da je bubrenje betona u vodi oko šest puta manje od skupljanja na vazduhu pri relativnoj vlažnosti od 70%, a pri $\varphi = 50\%$ čitavih osam

puta. Isto tako, vidi se da se pri relativnoj vlažnosti od 70% skupljanje betona približava nekoj konstantnoj vrednosti pri starosti betona od 1-2 godine, dok se pri relativnoj vlažnosti od 50% vrednost skupljanja stalno povećava. Sve ovo govori u prilog samoj prirodi skupljanja pri čemu će se ono odvijati sve dok se ne uspostavi ravnoteža između vlažnosti sredine i vlažnosti betona.



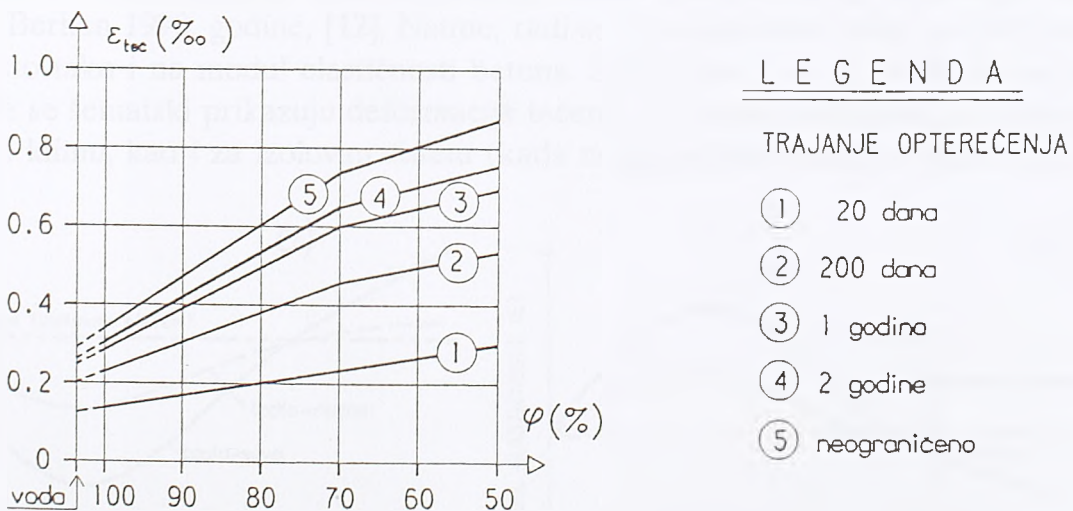
Sl. 4.55 Uticaj relativne vlažnosti sredine na skupljanje betona



Sl. 4.56 Tečenje betona pri različitim relativnim vlažnostima

I tečenje betona zavisi od termohigrometrijskih faktora, tj. od temperature i relativne vlažnosti sredine. Sama relativna vlažnost utiče na tečenje tako, da što je relativna vlažnost veća, tečenje betona je manje i obrnuto. Ovo je, prema Nevilu, [106] prikazano na slici 4.56, na uzorcima čuvanim prvih 28 dana u zasićenoj atmosferi ($\varphi = 100\%$), a zatim opterećenim, i čuvanim pri različitim relativnim vlažnostima.

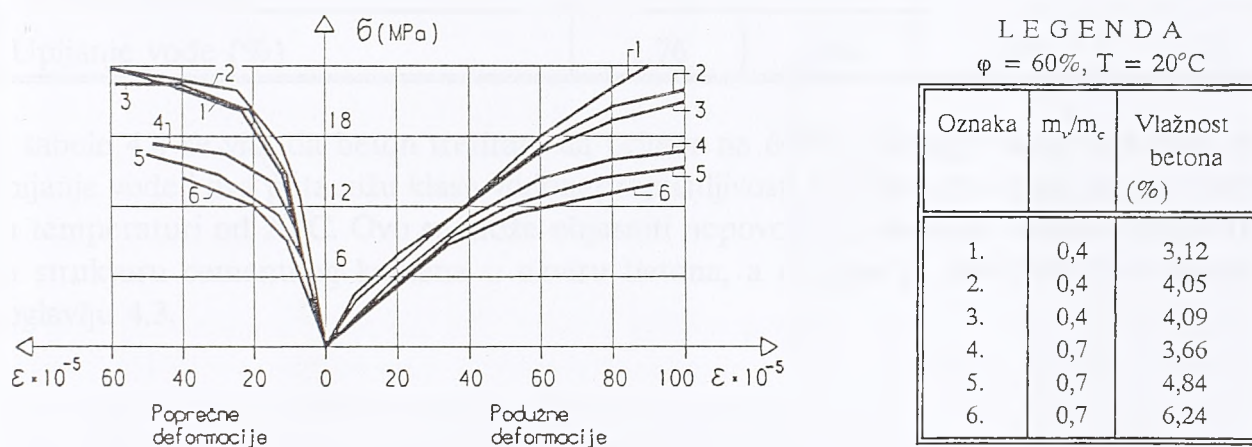
Uticaj različite relativne vlažnosti sredine na deformaciju tečenja u zavisnosti od trajanja opterećenja prikazan je na slici 4.57, prema grupi ruskih autora, [44]. Logično, deformacija tečenja raste sa porastom trajanja opterećenja, ali, kao što se vidi, još drastičnije raste sa



Sl. 4.57 Uticaj relativne vlažnosti sredine na deformacije tečenja u zavisnosti od trajanja opterećenja

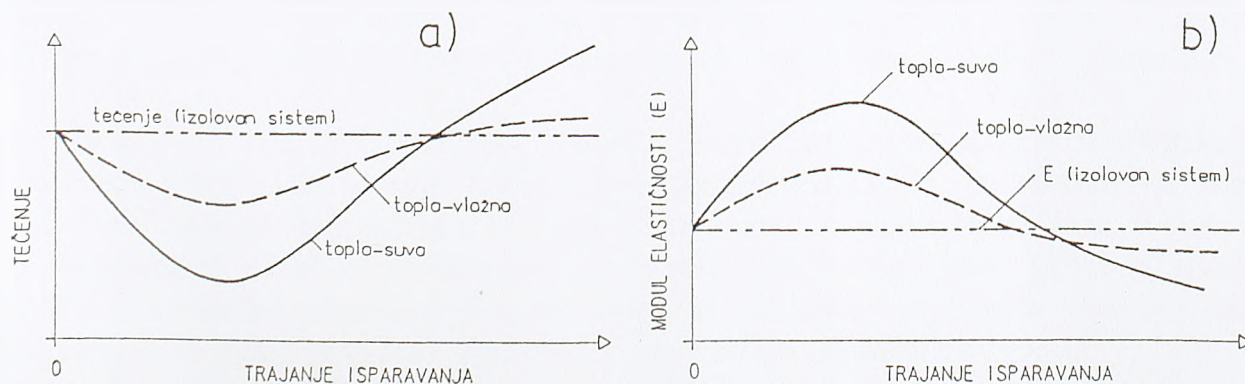
smanjenjem relativne vlažnosti sredine. Sa slike 4.57 se takođe primećuje da čak ima razlike u veličinama tečenja betona za uzorke negovane u vodi i za uzorke negovane u potpunosti zasićenosti pri relativnoj vlažnosti 100%.

Ista grupa autora istraživala je uticaj različite vlažnosti betona u kondicioniranim uslovima ($T = 20^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 60\%$), na poprečne i podužne deformacije betona, slika 4.58. Na prikazanoj slici daju se za 2 vodocementna faktora (0,4 i 0,7) i 6 različitih vlažnosti betona, serije krivih za podužne i poprečne deformacije. Vidi se da veći vodocementni faktor daje i veće, kako podužne, tako i poprečne deformacije, za jedan isti napon. Što se, pak, tiče vlažnosti samog betona, povećana vlažnost (kriva 6, na primer), daje veće, kako podužne, tako i poprečne deformacije, pri istom vodocementnom faktoru tj. krive imaju položeniji oblik u odnosu na one sa nižom vlažnošću betona. Isto tako, povećana vlažnost samog betona daje i niži modul elastičnosti.



Sl. 4.58 Podužne i poprečne deformacije betona u zavisnosti od vlažnosti betona i vodocementnog faktora

Nadalje, na slici 4.59, daju se rezultati jednog veoma interesantnog ispitivanja koje je publikovao Berhan 1990. godine, [12]. Naime, radi se o uticaju vrste klime na deformaciju tečenja, a isto tako i na modul elastičnosti betona. Slično kao i na slici 4.39 prema istom autoru, ovde se šematski prikazuju deformacije tečenja i modula elastičnosti za toplu-suvu, toplu-vlažnu klimu, kao i za izolovan sistem (kada nema gubitka sadržaja vode). Kao što



Sl. 4.59 Uticaj tipa klime na deformaciju tečenja (a) i modul elastičnosti betona (b)

se vidi, deformacija tečenja može imati značajne vrednosti u uslovima tople-suve klime, a modul elastičnosti u ovakvim uslovima pokazuje veće vrednosti nego u uslovima tople-vlažne klime.

Povećana temperatura betona pri kojoj je spravljen, a kasnije i negovan do 28 dana, utiče bitno na vodopropustljivost betona, kao i na upijanje vode. To se može sagledati iz tabele 4.4 prema [149].

Tabela 4.4 Uticaj temperature na upijanje vode i stepen vodonepropustljivosti betona

Početa temperatura i temperatura negovanja betona (°C)	20	30	50	60
Klasa vodonepropustljivosti (JUS U.M1.015)	8	6	4	4
Upijanje vode (%)	1,76	2,46	3,51	3,33

Iz tabele 4.4 se vidi da beton tretiran, na primer na 60°C, pokazuje skoro dva puta veće upijanje vode i dva puta nižu klasu vodonepropustljivosti u odnosu na beton, koji je tretiran na temperaturi od 20°C. Ovo se može objasniti nepovoljnim uticajem visokih temperatura na strukturu cementnog kamena u okviru betona, a o čemu je detaljnije bilo govora u poglavlju 4.3.

5. SOPSTVENA EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

5.1 POSTAVKA RADA

Kao što sam naslov ove doktorske teze govori, u okviru eksperimentalnog programa sprovede se ispitivanje uticaja termohigrometrijskog faktora sredine na neka osnovna svojstva svežeg i očvrslog betona. Pri tome će se tretirati kako beton spravljen na bazi čistog portland cementa, tako i onaj spravljen sa dodatkom zguure. Isto tako, kod pojedinih betona biće prisutan i superplastifikator. Procenat zguure je usvojen u količini od 30% iz razloga da bi se pri ispitivanjima ovakvi betoni jasno izdiferencirali od onih na bazi čistog portland cementa, dok je procenat superplastifikatora bio konstantan i biran je u srednjoj preporučenoj dozi proizvođača od 1%.

Količina cementa po 1 m^3 betona, tj. količina cementa zajedno sa zguurom, bila je kod svih mešavina konstantna i iznosila je 330 kg/m^3 , što predstavlja jednu srednju, uobičajenu količinu cementa u oblasti tehnologije betona. Pored ovoga, ova doza je optimalna i sa gledišta primene superplastifikatora, pošto je poznato da efekti dejstva superplastifikatora zavise i od upotrebljene količine cementa. Količina agregata takođe je predstavljala konstantu.

Kao što je prikazano u poglavlju 4.3, svojstva betona zavise od načina i brzine formiranja strukture, pri čemu temperatura betona i ambijenta, kao i relativna vlažnost sredine, imaju poseban uticaj. Ovo se naročito odnosi na beton u svežem stanju, ali i na skoro očvrsli beton i beton male starosti. U eksperimentalnom programu u prvih 7 dana varirane su tri temperature betona i ambijenta pri nepromenjenoj relativnoj vlažnosti sredine (potpuno zasićenje), a nakon toga uzorci betona su negovani u laboratorijskim uslovima pri relativnoj vlažnosti od cca 55-60%, i na temperaturi $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, do vremena ispitivanja od 28 dana. Temperature betona i ambijenta od 10, 20 i 30°C , predstavljaju uobičajene temperature za naš klimat, bez posebnih mera zaštite, a odabrana variranja relativne vlažnosti sredine najčešće odgovaraju uobičajenoj nezi u gradilišnim uslovima (sedam dana negovanja vlaženjem, uz docnije izlaganje betona normalnim termohigrometrijskim uticajima sredine).

Na ovaj način, ne uzimajući u obzir ekstremne temperature betona i ambijenta pri kojima su potrebne posebne mere obezbeđenja, biće moguće doći do nekih opštijih zaključaka.

Treba istaći da je kod svih betonskih mešavina konzistencija svežeg betona održavana konstantnom i pripadala je klasi tekuće konzistencije. Pri ovome je za različite vrste betona i za različite temperature varirana masa vode, tj. masa tečne faze (voda + superplastifikator), da bi se postigla ista konzistencija. Na ovakav način problem uticaja termohigrometrijskih parametara sredine svodi se na jedan zajednički imenitelj, što omogućava međusobno poređenje rezultata i uopštavanje zaključaka.

Prema napred opisanom, u eksperimentalnom radu tretirana su četiri osnovna tipa betona i to:

- beton spravljen sa čistim portland cementom oznake PC 45B,
- beton spravljen sa čistim portland cementom oznake PC 45B uz dodatak superplastifikatora,
- beton spravljen sa portland cementom oznake PC 45B uz dodatak 30% zgure i
- beton spravljen sa portland cementom oznake PC 45B sa 30% zgure i uz dodatak superplastifikatora.

Pošto će se ova četiri osnovna tipa betona tretirati na tri različite temperature, to će u stvari u eksperimentalnom programu biti prisutno 12 vrsta betona.

Na svežem betonu biće praćena promena konzistencije u toku vremena preko mere sleganja i Vebe-metode, kao i međusobna zavisnost dobijenih rezultata, dok će na očvrslom betonu biti ispitivana čvrstoća pri pritisku, dinamički modul elastičnosti, brzina prostiranja ultrazvuka, zapreminske deformacije - skupljanje, kao i neke karakteristike od značaja za trajnost betona.

5.2 KARAKTERIZACIJA POLAZNIH MATERIJALA

Za eksperimentalna ispitivanja u okviru ovoga rada primenjeni su sledeći cementi:

- PC 45B, fabrike Beočin
- PC 45B + 30% zgure.

Znači, radilo se o jednom čistom portland cementu klase 45 sa brzim prirastom čvrstoće, fabričke proizvodnje, i sa istim takvim cementom kome je dodavano 30% zgure.

Ispitivanjima na osnovu standarda JUS B.C8.023 određen je sledeći hemijski sastav čistog portland cementa:

PC 45B

Hidraulični sastojci:	(%)
SiO ₂	19,79
CaO	61,50
Al ₂ O ₃	4,80
Fe ₂ O ₃	2,10

Primese:

nerastvorni ostatak	0,12
vlaga na 105°C	0,29
gubitak žarenjem bez vlage i CO ₂	0,37
vezani CO ₂ u CaCO ₃	0,25
vezani CaO u CaCO ₃	0,31
vezani CaO u CaSO ₄	0,39
slobodni CaO	0,25
vezani SO ₃ u CaSO ₄	0,63

CaS	0,29
alkalije (Na ₂ O+K ₂ O)	1,60
MgO	3,27
MnO	0,65
P ₂ O ₅	0,09
FeO	0,18.

Proračunat mineraloški sastav
po Bogu:

C ₃ S	= 62,5 %
C ₂ S	= 9,7 %
C ₃ A	= 9,12 %
C ₄ AF	= 6,4 %.

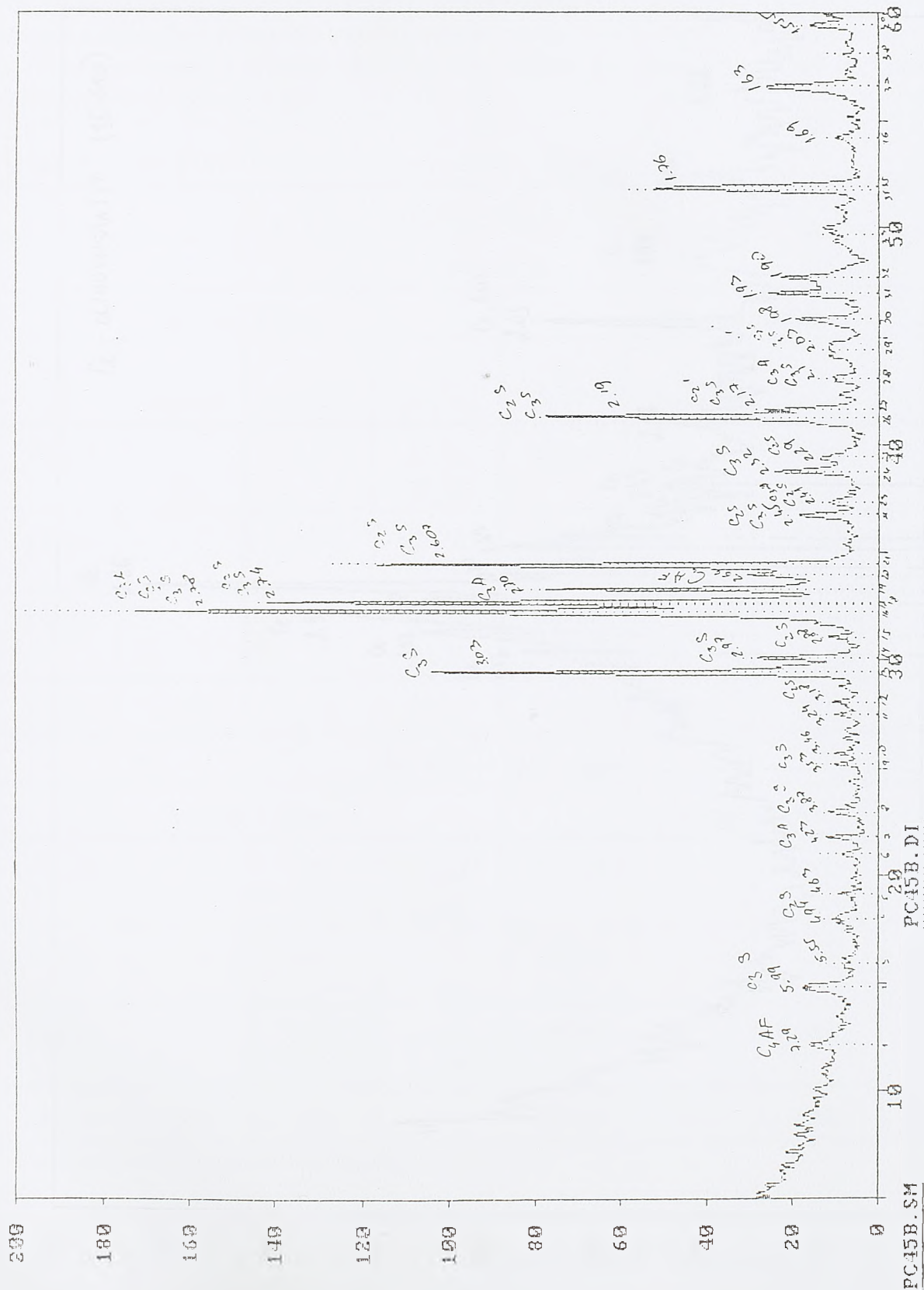
Mineraloški sastav predmetnog cementa dobijen rendgentskom analizom prikazan je na slici 5.1. Snimanje je izvršeno pomoću rendgentskog difraktometra tipa PHILIPS, PW1710, na Rudarsko-geološkom fakultetu u Beogradu.

Ispitivanje mehaničkih karakteristika, izvršeno prema standardu JUS B.C8.022, prikazano je u gornjem delu tabele 5.1. Kao što se vidi, navedeni cement deklarisan oznake PC 45B u svemu zadovoljava navedeni standard.

Primenjena zgura (Zenica) imala je sledeći hemijski sastav:

<u>zgura "Zenica"</u>	(%)
vlaga	0,06
gubitak žarenjem	0,14
nerastvorni ostatak	0,27
SiO ₂	37,18
Al ₂ O ₃	10,55
Fe ₂ O ₃	1,62
CaO	37,90
FeO	0,62
MgO	7,50
SO ₃	1,24
S	0,78
MnO	4,30
P ₂ O ₅	0,12
Na ₂ O	0,80
K ₂ O	1,20
BaO	1,71.

Navedena zgura ispitana je i mineraloški (slika 5.2) rendgentskim difraktometrom, kao i u slučaju napred navedenog čistog portland cementa. Na osnovu slike 5.2 zapaža se nizak kristalinitet zgure.



Sl. 5.1 Mineraloški sastav cementa oznake PC 45B dobijen rendgenskom analizom

Mehaničke karakteristike cementa PC 45B sa dodatkom 30% zgre prikazane su u donjem delu tabele 5.1. Kao što se vidi, ovako pripremljeno vezivo ima usporeniji prirast čvrstoće pri starosti od 3 dana, pa bi se prema tome ono svrstalo u cement oznake 45S, dok su pri starosti od 28 dana razlike u čvrstoćama čistog cementa PC 45B i ovog veziva mnogo manje. Ovo je sasvim logično, ako se uzme u obzir usporenija hidratacija cementa sa dodatkom zgre i potreba da se zgura aktivira na jedan od napred već pomenutih načina (videti poglavlje 2.2.3).

Tabela 5.1 Mehaničke čvrstoće na osnovu JUS-a B.C8.022

VRSTA CEMENTA							
PC 45 B							
Starost 3 dana				Starost 28 dana			
m (g)	γ (kg/m ³)	f_s (MPa)	f_p (MPa)	m (g)	γ (kg/m ³)	f_s (MPa)	f_p (MPa)
552,15		5,8	29,38 29,38	563,90		7,85	51,56 50,00
554,60		6,30	29,38 29,38	560,60		7,30	50,00 45,31
550,00		6,25	29,38 30,94	562,20		7,30	50,00 50,00
552,25	2157	6,12	29,64	562,23	2196	7,48	49,48
PC 45B + 30% zgre							
Starost 3 dana				Starost 28 dana			
564,00		3,93	15,62 14,69	565,70		8,475	46,25 49,06
562,40		4,35	15,12 14,69	562,90		7,725	47,81 45,31
563,30		4,15	14,69 14,69	567,90		7,485	46,88 45,00
563,23	2200	4,14	14,92	565,50	2209	7,895	46,72

* Uokvirene vrednosti predstavljaju srednje vrednosti

Osnovna fizička svojstva navedenog čistog portland cementa, zgre, kao i cementa sa dodatkom 30% zgre, prikazana su u tabeli 5.2.

Kao što se vidi na osnovu tabele 5.2, kod cementa sa dodatkom 30% zgure javlja se potreba za nešto većom količinom vode za postizanje standardne konzistencije u odnosu na čist portland cement PC 45B i nešto produženo vreme vezivanja (kako početak, tako i kraj). I ovo je sasvim u skladu sa stavovima izrečenim u poglavlju 2.2.3 u vezi hidratacije cementa sa dodatkom zgure.

Tabela 5.2 Osnovna fizička svojstva cementa, zgure i cementa sa dodatkom zgure

Svojstvo	Vrsta cementa		Zgura
	PC 45B	PC 45B+30% z	
Specifična masa (g/cm^3) - (JUS B.C8.023)	3,03		2,96
Finoća mliva prosejavanjem			
0,2 mm			1,0%
0,09 mm	2,3%		2,0%
Specifična površina po Blenu (cm^2/g) (JUS B.C8.026)	2964	3256	4150
Normalna konzistencija (%)	27,33	28,33	
Vezivanje - početak	2h 25'	2h 55'	
- kraj	3h 40'	4h 20'	
Stalnost zapremine (JUS B.C8.026)	postojan	postojan	
preko Le Chatellier-ovih prstena posle kuvanja	0,8 mm	1,2 mm	

Zapreminske deformacije - skupljanje ispitano je prema standardu JUS B.C8.029, kako na standardnom cementnom malteru sa cementom PC 45B, tako i na malteru dobijenom sa vezivom na bazi cementa PC 45B + 30% zgure. Ovi uzorci su po sastavu i načinu izrade u svemu odgovarali uzorcima za ispitivanje mehaničkih karakteristika. Za ispitivanje skupljanja korišćeni su prizmatični uzorci dimenzija 4x4x16 cm, u koje se radi merenja deformacija ugrađuju reperi. Samo merenje deformacija vršeno je putem Amsler-ovog uređaja sa mernom skalom opsega 10 mm i podeocima od 0,01 mm. Rezultati ovih ispitivanja prikazani su u tabelama 5.3 i 5.4.

Kao što se vidi iz prikazanih tabela 5.3 i 5.4, skupljanje standardnog cementnog maltera sa dodatkom 30% zgure je u svim starostima veće od izmerenog na uzorcima standardnog cementnog maltera na bazi čistog portland cementa. Tako, na primer, u starosti od 28 dana skupljanje standardnog cementnog maltera spravljenog sa cementom PC 45B uz dodatak 30% zgure je cca 27% veće od skupljanja standardnog cementnog maltera na bazi čistog portland cementa (PC 45B).

Tabela 5.3 Skupljanje standardnog cementnog maltera spravljenog sa čistim portland cementom

Oznaka	Vreme u danima					
	3	4	7	14	21	28
1.1	0,935	0,928 0,007 0,044	0,911 0,024 0,136	0,895 0,040 0,250	0,878 0,057 0,356	0,855 0,080 0,500
1.2	0,870	0,858 0,012 0,075	0,849 0,021 0,131	0,837 0,033 0,206	0,811 0,059 0,369	0,785 0,085 0,531
1.3	4,052	4,043 0,009 0,056	4,021 0,031 0,194	4,004 0,048 0,300	3,991 0,061 0,381	3,957 0,095 0,594
Srednja vrednost	0	0,058	0,154	0,252	0,369	0,542

Tabela 5.4 Skupljanje standardnog cementnog maltera spravljenog sa cementom uz dodatak 30% zgure

Oznaka	Vreme u danima					
	3	4	7	14	21	28
2.1	1,882	1,867 0,015 0,094	1,850 0,032 0,200	1,840 0,042 0,263	1,811 0,071 0,444	1,777 0,105 0,656
2.2	1,574	1,557 0,017 0,106	1,540 0,034 0,213	1,528 0,046 0,288	1,500 0,074 0,463	1,465 0,109 0,681
2.3	0,965	0,949 0,016 0,100	0,929 0,036 0,225	0,921 0,044 0,275	0,878 0,087 0,544	0,849 0,116 0,725
Srednja vrednost	0	0,100	0,213	0,275	0,484	0,687

Za eksperimentalna ispitivanja betona usvojen je rečni agregat "Moravac" pran i separisan u frakcije:

- I 0 - 4 mm,
- II 4 - 8 mm,
- III 8 - 16 mm i
- IV 16 - 31,5 mm.

Nominalno najkrupnije zrno agregata je $D = 31,5$ mm. Rezultati prosejavanja pojedinih frakcija prema JUS B.B8.029 prikazani su u gornjem delu tabele 5.5, a grafički na slici 5.3, dok je na slici 5.4 data usvojena granulometrijska linija.

Kao što se vidi, rezultati prosejavanja zadovoljavaju uslove za nadmerena i podmerena zrna za nazivne frakcije.

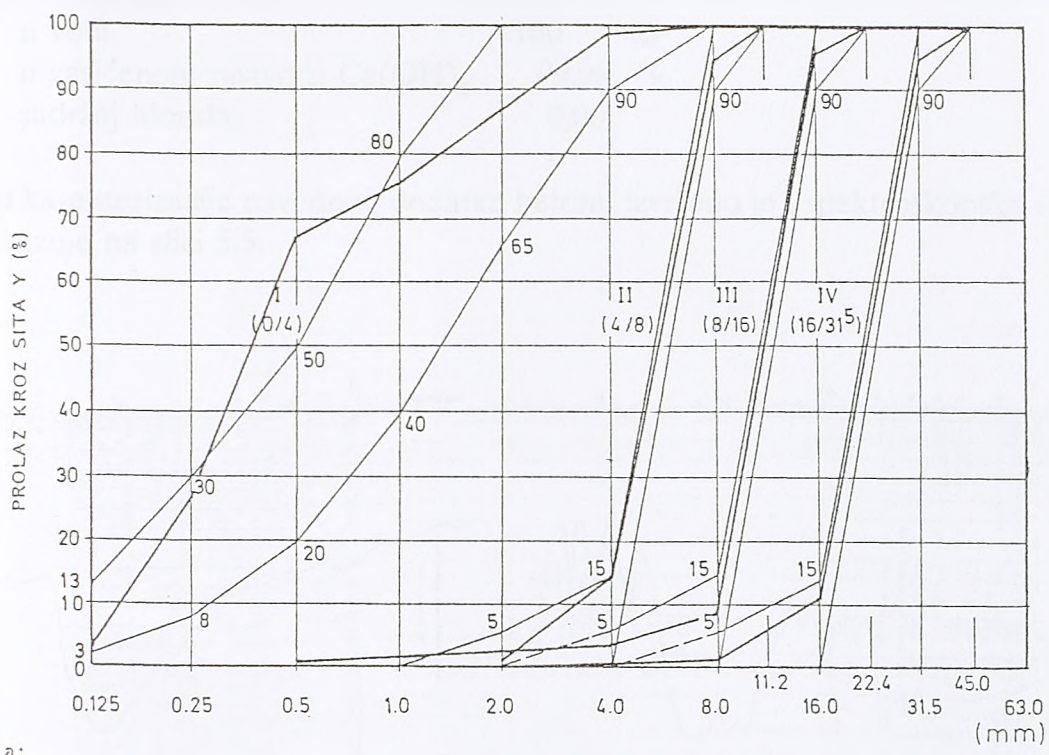
Tabela 5.5 Rezultati prosejavanja pojedinih frakcija i proračun mešavine agregata

Ordinate linija prosejavanja frakcija agregata	Frakcija	Otvori sita (mm)									
		0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	45
I:		3,2	25,5	66,2	75,3	85,6	98,6	100	100	100	100
II:						0,3	12,8	95,7	100	100	100
III:		0,2	0,7	1,2	1,5	1,7	2,9	9,4	97,0	100	100
IV:		0,3	0,5	0,8	0,9	1,0	1,2	2,1	12,0	95	100
Učešće frakcije I: 20%		0,6	5,1	13,2	15,1	17,1	19,7	20,0	20,0	20,0	20,0
Učešće frakcije II: 28%						0,1	3,6	26,8	28,0	28,0	28,0
Učešće frakcije III: 20%			0,1	0,2	0,3	0,3	0,6	1,9	19,4	20,0	20,0
Učešće frakcije IV: 32%		0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,7	3,8	30,4	32
Zbir po frakcijama		0,7	5,4	13,7	15,7	17,8	24,3	49,4	71,2	98,4	100
Usvojena granulometrijska kriva: Y (%)		1	5	14	16	18	24	49	71	98	100

U pogledu ostalih bitnih karakteristika (oblik zrna, sadržaj sitnih čestica i dr.), predmetni agregat u potpunosti ispunjava sve uslove prema pravilniku BAB-87.

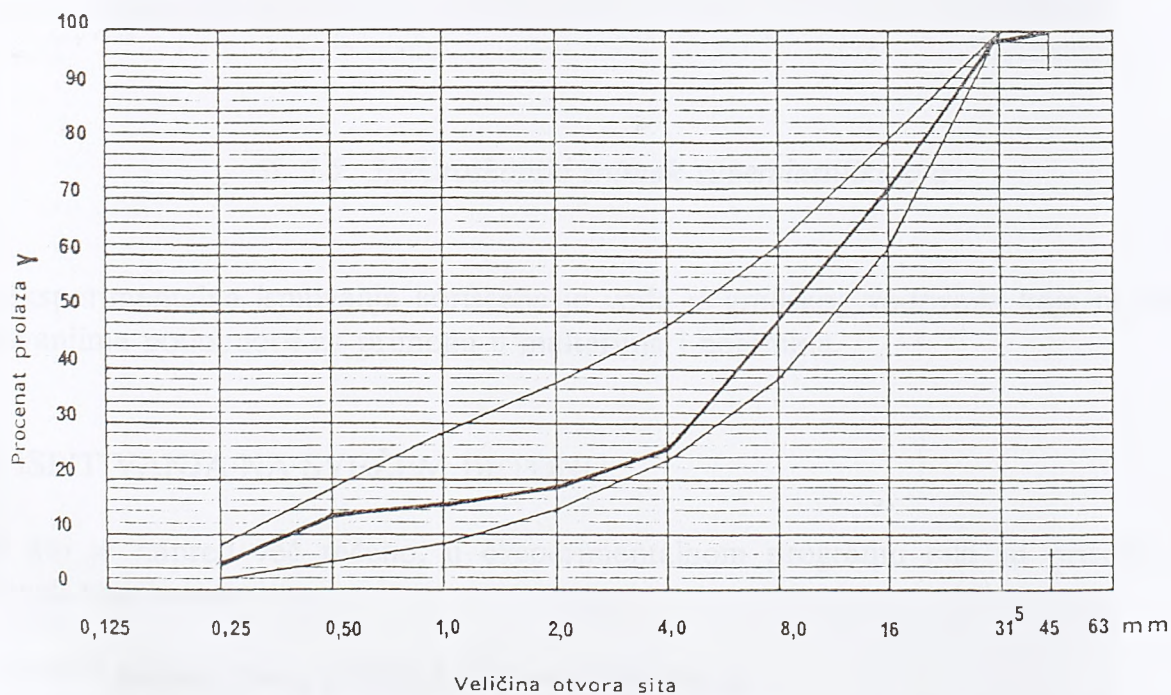
Za predmetna ispitivanja korišćen je dodatak betonu - superplastifikator pod nazivom "Superfluid", proizvođača "Ading", Skoplje, koji je deklarisan prema JUS-u U.M1.034 kao hemijski dodatak betonu sa dejstvom plastificiranja svežeg betona. To je tečnost tamno

braon boje, koja se, prema prospektu proizvođača, dozira u količini od 0,5-2% u odnosu na masu cementa.



a:

Sl. 5.3 Linije prosejavanja agregata po frakcijama (JUS B.B8.029)



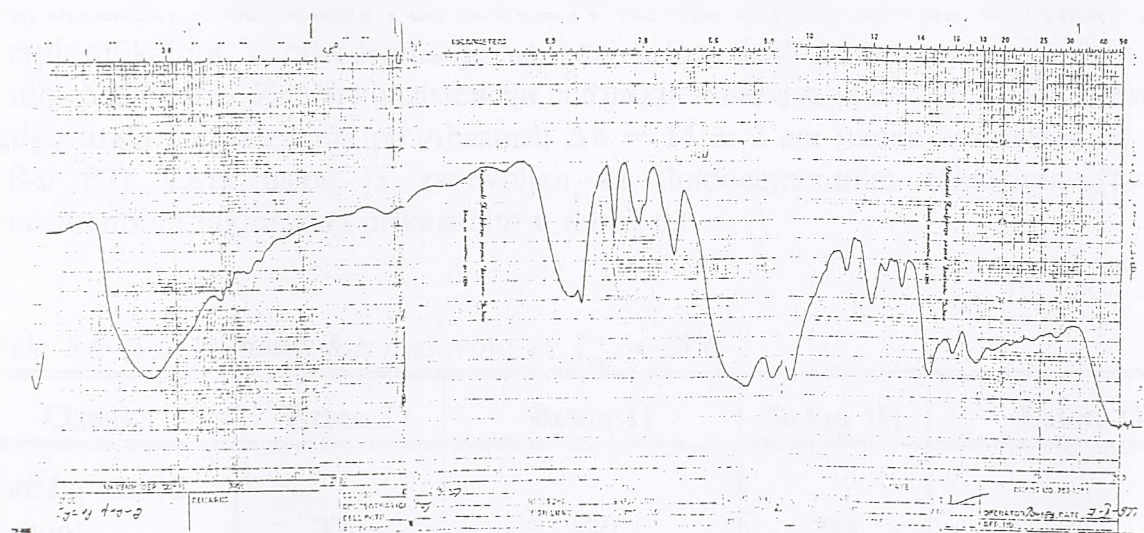
Sl. 5.4 Usvojena granulometrijska kriva mešavine agregata

Osnovne karakteristike ovog dodatka betonu, utvrđene prema standardu JUS U.M1.035, su:

- specifična masa $1,15 \text{ g/cm}^3$
- pH vrednost 7,4

- površinski napon	$0,0731 \cdot 10^{-5}$ N/cm
- sadržaj suve materije	42 %
- rastvorljivost	
- u vodi	100 %
- u zasićenom rastvoru $\text{Ca}(\text{OH})_2$	99,96 %
- sadržaj hlorida	0,00.

U cilju karakterizacije navednog dodatka betonu izvršeno je i spektroskopsko snimanje, što se prikazuje na slici 5.5.



Sl. 5.5 Spektroskopski snimak superplastifikatora

Za eksperimentalna ispitivanja korišćena je voda iz gradskog vodovoda koja ne podleže ispitivanjima podobnosti za primenu u malterima i betonima.

5.3 ISPITIVANJA NA SVEŽEM BETONU

Kao što je napred već rečeno, u eksperimentalnom programu bila su prisutna četiri osnovna tipa betona i to:

- beton I na bazi čistog portland cementa (oznaka ○),
- beton II na bazi čistog portland cementa uz prisustvo 1% superplastifikatora (oznaka ⊗)
- beton III na bazi portland cementa kao kod betona I sa 30% zgure (oznaka ⊕) i
- beton IV na bazi istog portland cementa sa 30% zgure uz prisustvo 1% superplastifikatora (oznaka ⊗).

Kod svih navedenih vrsta betona količina cementa ("čistog". tj. cementa sa zgurom) iznosila je 330 kg/m^3 . Količina agregata bila je takođe nepromenjena i iznosila je 1985 kg/m^3 . Pri ovom je zastupljenost pojedinih frakcija bila:

- 0/4 mm - 20%;
- 4/8 mm - 28%;
- 8/16 mm - 20%;
- 16/31,5 mm - 32%;

tj. u svemu prema granulometrijskoj krivoj mešavine prikazanoj na slici 5.4. Masa tečne faze (voda ili voda zajedno sa superplastifikatorom kod onih mešavina kod kojih je prisutan i ovaj dodatak) je od betona I do betona IV varirala zavisno od vrste cementa i prisustva superplastifikatora, a određivana je na bazi uslova istih konzistencija, tj. istih stepena ugradljivosti betona. Znači, konzistencija betonskih mešavina je usvojena za konstantu i ona je odgovarala meri sleganja po Abramsu $\Delta h = 14 \pm 2 \text{ cm}$ (tečna konzistencija, saglasno BAB-u 87). Ovaj uslov je zadovoljen sa fluidocementnim faktorima (tzv. bruto vodocementnim faktorima) prikazanim u tabeli 5.6.

Tabela 5.6 Sastavi betonskih mešavina za $T_{bo} \approx 20^\circ\text{C}$

Oznaka	Beton I	Beton II	Beton III	Beton IV
Sadržaj veziva cement zgura (kg/m^3)	330	330	231 99	231 99
Sadržaj superplastifikatora	-	1% na masu cementa	-	1% na masu cementa
Sadržaj agregata (kg/m^3)	1985	1985	1985	1985
Masa tečne faze (kg/m^3)	180,0	163,4	188,0	173,0
Fluidocementni faktor	0,545	0,495	0,570	0,525
Zapreminska masa u svežem stanju (kg/m^3)	2495	2480	2503	2490

Prema tome, pri ovim ispitivanjima konzistencija je posmatrana isključivo kao funkcija proteklog vremena i temperature ambijenta, dok su ostali parametri za pojedine vrste betona, uzeti kao konstante. Drugim rečima, ispitivanja su uvek vršena na betonskim

mešavinama istog sastava (tabela 5.6) i iste početne temperature $T_{bo} = 20 \pm 1^\circ\text{C}$. Naravno, ovaj uslov je ostvaren odgovarajućim temperiranjem komponenata betona.

U skladu sa prethodno utvrđenim programom, a u cilju određivanja uticaja isključivo termohigrometrijskog faktora sredine na svež beton, ispitivanja su sprovedena tako što su određene količine (po 50 litara) svežeg betona sa početnom temperaturom $T_{bo} \approx 20^\circ\text{C}$, pri relativnoj vlažnosti od $99 \pm 1\%$, izlagane različitim temperaturama ambijenta u klima komori i to $T_{amb} = 4^\circ\text{C}$, $T_{amb} = 20^\circ\text{C}$ i $T_{amb} = 32^\circ\text{C}$, u vremenskom trajanju od 90 minuta.

Spravljanje betona vršeno je mašinskim putem u laboratorijskoj protivstrujnoj mešalici tipa "Eirich", kapaciteta 120 litara. Mešanje komponenata betona kod svih mešavina iznosilo je 2,5 minuta. Po izlasku iz mešalice beton je raspoređivan u posude određene zapremine pogodne za merenje konzistencije, a temperatura samog betona proveravana je putem digitalnog termometra sa sondom, proizvođača "Iskra", Ljubljana. Ovo se ilustruje putem fotografija na slikama 5.6 i 5.7.



Sl. 5.6 Merenje temperature svežeg betona po izlasku iz mešalice

Nakon spravljanja, betonske mešavine temperature $T_{bo} \approx 20^\circ\text{C}$ izlagane su različitim temperaturama ambijenta (4°C , 20°C i 32°C) u klima komori proizvođača Heraeus-Vötsch, Zapadna Nemačka, kapaciteta 500 litara, koja je prikazana na slici 5.8. Napominje se da je pri ovim ispitivanjima uvek bila obezbeđena stoprocentna relativna vlažnost sredine. Pri svakoj od navedenih temperatura sukcesivno su, svakih 15 minuta, merene konzistencije betona na dva načina: metodom sleganja (JUS U.M8.050) i Vebe-metodom (JUS U.M8.054). Rezultati ovih merenja, kao i rezultati merenja promene temperature svežeg betona u toku vremena, prikazani su u tabelama 5.7 i 5.8.



Sl. 5.7 Izgled klima komore sa digitalnim termometrom sa sondom za merenje temperature



Sl. 5.8 Klima komora sa uzorcima betona i merenjem temperature

Radi lakšeg poređenja rezultata, pak, u tabeli 5.7, kao što se vidi, prikazani su i relativni odnosi izmerenih sleganja dobijeni kao

$$\eta(t) = \frac{\Delta h(t)}{\Delta h(0)} \leq 1. \quad (5.1)$$

Uvođenjem funkcije $\eta(t)$ u suštini je ostvarena mogućnost svođenja rezultata ispitivanja na zajednički imenilac, što je bilo neophodno s obzirom na nemogućnost da se kod svih betonskih mešavina dobije uvek ista - predviđena mera sleganja od 14 cm. Na ovaj način je, dakle, omogućeno da se u okviru jednog istog tipa konzistencije (tečne konzistencije), sa relativno malim dijapazonom varijacije početne mere sleganja ($\Delta h(0) = 14 \pm 2$ cm), objektivno prati promenljivost ove karakteristike svežeg betona, kako u funkciji temperature ambijenta T_{amb} , tako i u funkciji vremena t .

Vrednosti funkcije $\eta(t)$ prema tabeli 5.7, za različite temperature T_{amb} (4°C , 20°C i 32°C), a za vremenski interval $0 \leq t \leq 90$ min, sa merenjima sleganja na svakih 15 minuta, prikazane su za betone I, II, III i IV na slikama 5.9, 5.10, 5.11 i 5.12. Na svakom grafiku za pojedine betone (I, II, III i IV) prikazane su po tri linije, koje predstavljaju relativne mere sleganja zavisno od navedene tri temperature ambijenta. Kao što se vidi, na ovim slikama, prikazane su i temperature svežeg betona u funkciji promenljivih t i T_{amb} .

Na osnovu prikazanog sledi da se konzistencija svežeg betona u osnovi veoma značajno menja tokom vremena, pri čemu je najveća promena izražena u prvih 10-15 minuta [105]. Posle ovog roka promena sleganja je daleko sporija, tako da funkcija $\eta(t)$ za $t \geq 15$ min može sa dovoljnom tačnošću da se aproksimira pravom linijom (na crtežima tanka puna linija koja preseca apscisu); nulte tačke ovih linija na apscisi određuju vremena u kojima se u potpunosti gubi sleganje - $\Delta h = 0$. Isto tako, vidi se da u datom slučaju promenljivost konzistencije betona u funkciji parametra T_{amb} nije naročito izražena.

Ova promenljivost je u opštem slučaju svakako prisutna, ali na osnovu sprovedenih ispitivanja proizilazi da ona, za usvojenu temperaturu betona $T_{bo} \approx 20^{\circ}\text{C}$ koja se tokom vremena ispitivanja nije značajnije menjala, i za posmatrani temperaturni interval $4^{\circ}\text{C} \leq T_{amb} \leq 32^{\circ}\text{C}$, nije od bitnog uticaja. O ovome dovoljno ubedljivo svedoči činjenica da se primenom metode najmanjih kvadrata, aproksimacija svih eksperimentalno dobijenih vrednosti funkcije $\eta(t)$ za jedan isti beton, pravom linijom u području $t \geq 15$ min, ostvaruje sa koeficijentom korelacije r od 0,873 (kod betona II) do 0,938 (kod betona I), što odgovara slučaju "jake" i "vrlo jake" korelacije.

Sprovedena ispitivanja, dakle, potvrđuju već poznatu činjenicu da je konzistencija betona i njena promenljivost u toku vremena najtešnje povezana sa temperaturom mešavine i da do promene konzistencije isključivo dolazi u funkciji promene ove temperature. U slučaju naših ispitivanja svi betoni su startovali sa početnom temperaturom $T_{bo} \approx 20^{\circ}\text{C}$ i ta se temperatura, bez obzira na temperaturu sredine nije značajnije menjala. U prvih 45 minuta promena temperature o kojoj je reč bila je najviše cca $\Delta T_b = 4-5^{\circ}\text{C}$, a ovo vreme je nesumnjivo vreme u kome se konzistencija betona načelno najviše menja.

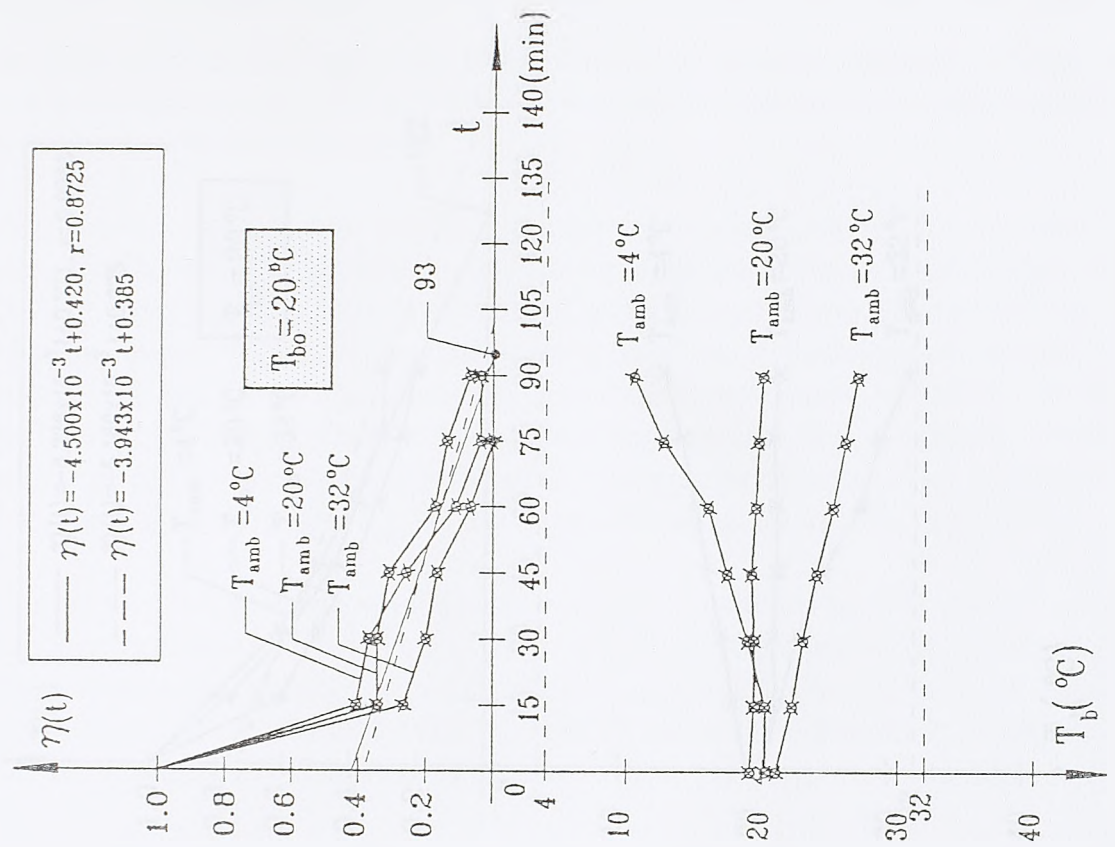
Tabela 5.7 Zavisnost mere sleganja od vremena i temperature ambijenta

Temperatura betona i ambijenta		$T_{bo} = 20^{\circ}\text{C}$								
		$T_{amb} = 4^{\circ}\text{C}$			$T_{amb} = 20^{\circ}\text{C}$			$T_{amb} = 32^{\circ}\text{C}$		
Vrsta betona	t (min)	$\Delta h(t)$ (cm)	η (t)	T_b ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta h(t)$ (cm)	η (t)	T_b ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta h(t)$ (cm)	η (t)	T_b ($^{\circ}\text{C}$)
I	0	15,5	1	20,5	13,5	1	20,2	14,0	1	20,9
	15	8,0	0,516	20,4	8,0	0,592	20,2	7,0	0,500	21,1
	30	7,0	0,452	20,2	5,5	0,407	20,3	4,5	0,321	22,4
	45	6,0	0,387	19,8	4,0	0,296	20,3	3,5	0,250	23,5
	60	4,0	0,258	17,3	3,0	0,222	20,4	2,5	0,178	24,2
	75	3,5	0,226	15,5	2,5	0,185	20,5	2,0	0,143	25,5
	90	2,5	0,161	13,1	1,0	0,074	20,7	1,5	0,107	26,5
II	0	13,5	1	20,2	14,5	1	19,1	15,0	1	21,0
	15	5,5	0,407	20,2	5,0	0,345	19,4	4,0	0,267	22,2
	30	5,0	0,370	18,9	5,0	0,345	19,4	3,0	0,200	23,0
	45	3,5	0,259	17,4	4,5	0,310	19,2	2,5	0,167	24,0
	60	1,5	0,111	16,0	2,5	0,172	19,5	1,0	0,067	25,2
	75	0,5	0,037	12,7	2,0	0,138	19,7	0,0	0,000	26,1
	90	0,5	0,037	10,5	1,0	0,070	20,0	-	-	27,0
III	0	12,5	1	20,1	13,5	1	19,6	15,5	1	20,3
	15	7,5	0,600	19,6	9,0	0,667	19,9	9,0	0,581	23,0
	30	7,0	0,560	18,6	7,0	0,518	19,9	7,0	0,452	24,4
	45	6,0	0,480	17,7	5,5	0,407	19,6	5,0	0,322	25,7
	60	4,5	0,360	17,1	2,5	0,185	19,3	4,5	0,290	26,8
	75	3,5	0,280	15,9	3,0	0,222	19,7	3,0	0,194	28,2
	90	3,0	0,240	14,1	2,5	0,185	20,1	3,0	0,194	29,9
IV	0	13,0	1	19,5	14,5	1	20,5	14,0	1	20,7
	15	10,5	0,808	18,5	11,0	0,759	21,7	8,5	0,607	22,0
	30	8,0	0,615	17,6	8,5	0,586	21,5	7,0	0,500	23,3
	45	6,5	0,500	16,5	6,5	0,448	21,8	5,5	0,392	25,2
	60	5,0	0,385	15,6	5,5	0,379	21,7	4,5	0,321	28,0
	75	4,0	0,308	14,5	4,5	0,310	21,5	3,5	0,250	29,3
	90	4,0	0,308	13,2	3,0	0,207	21,8	3,0	0,214	31,5

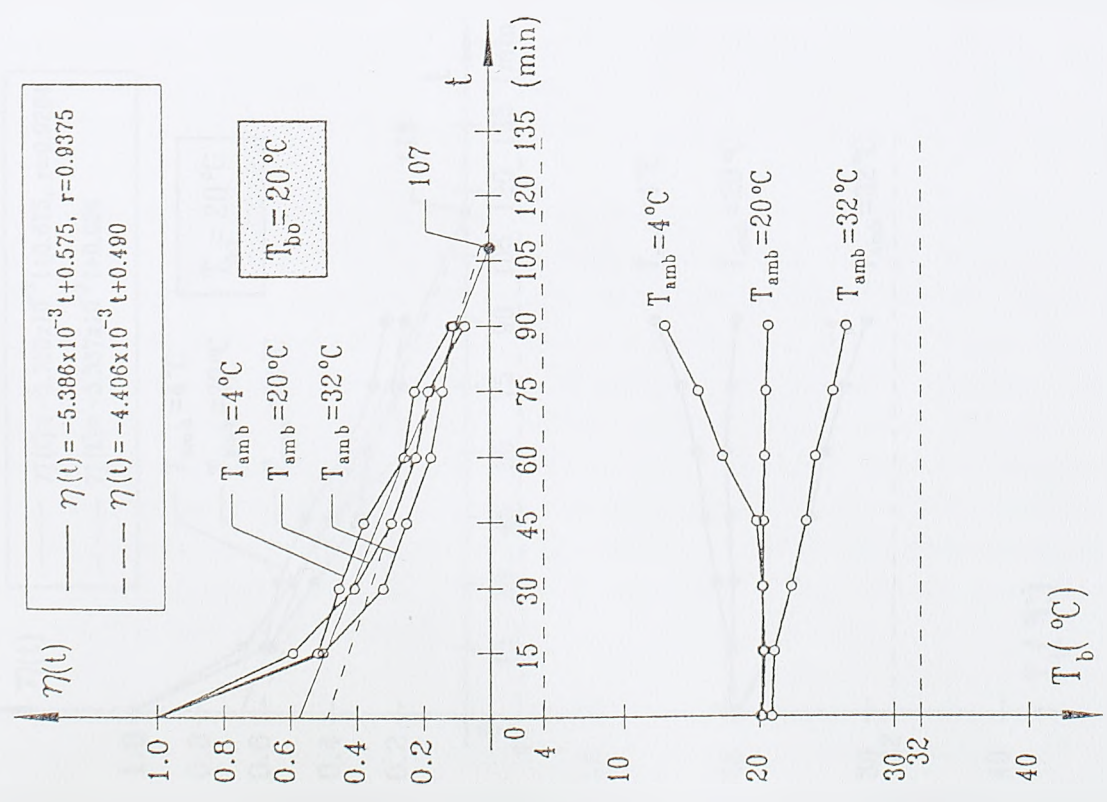
Tabela 5.8 Zavisnost Vebe-stepeni od vremena i temperature ambijenta za $T_{bo} = 20^{\circ}\text{C}$

Temperatura betona i ambijenta		$T_{bo} \approx 20^{\circ}\text{C}$								
		$T_{amb} = 4^{\circ}\text{C}$			$T_{amb} = 20^{\circ}\text{C}$			$T_{amb} = 32^{\circ}\text{C}$		
Vrsta betona	t (min)	Vebe (s)	T_b ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT_b ($^{\circ}\text{C}$)	Vebe (s)	T_b ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT_b ($^{\circ}\text{C}$)	Vebe (s)	T_b ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT_b ($^{\circ}\text{C}$)
I	0	1,9	20,5		2,0	20,2		2,2	20,9	
	15	3,9	20,4		4,0	20,2		4,1	21,1	
	30	4,9	20,2		4,9	20,3		5,1	22,4	
	45	5,8	19,8		5,9	20,3		6,2	23,5	
	60	7,8	17,3		7,9	20,4		8,15	24,2	
	75	8,8	15,5		8,8	20,5		9,1	25,5	
	90	9,9	13,1	-7,4	10,1	20,7	+0,5	10,25	26,5	+5,6
II	0	1,7	20,2		1,8	19,1		2,0	21,0	
	15	5,1	20,2		5,3	19,4		5,4	22,2	
	30	5,8	18,9		5,9	19,4		6,2	23,0	
	45	7,2	17,4		7,4	19,2		7,6	24,0	
	60	9,9	16,0		9,9	19,5		10,3	25,2	
	75	11,9	12,7		12,0	19,7		12,2	26,1	
	90	12,7	10,5	-9,7	12,8	20,0	+0,9	13,0	27,0	+6,0
III	0	1,8	20,1		1,9	19,6		2,0	20,3	
	15	3,1	19,6		3,1	19,9		3,4	23,0	
	30	3,9	18,6		4,0	19,9		4,2	24,4	
	45	4,8	17,7		4,9	19,6		5,1	25,7	
	60	6,8	17,1		7,0	19,3		7,2	26,8	
	75	8,5	15,9		8,6	19,7		8,8	28,2	
	90	9,7	14,1	-6,0	9,8	20,1	+0,5	10	29,9	+9,6
IV	0	1,7	19,5		1,8	20,5		1,9	20,7	
	15	2,5	18,5		2,6	21,7		2,8	22,0	
	30	3,1	17,6		3,3	21,5		3,5	23,3	
	45	4,0	16,5		4,2	21,8		4,5	25,2	
	60	5,2	15,6		5,4	21,7		5,6	28,0	
	75	6,2	14,5		6,3	21,5		6,5	29,3	
	90	7,4	13,2	-6,3	7,5	21,8	+1,3	7,7	31,5	+10,8

BETON II



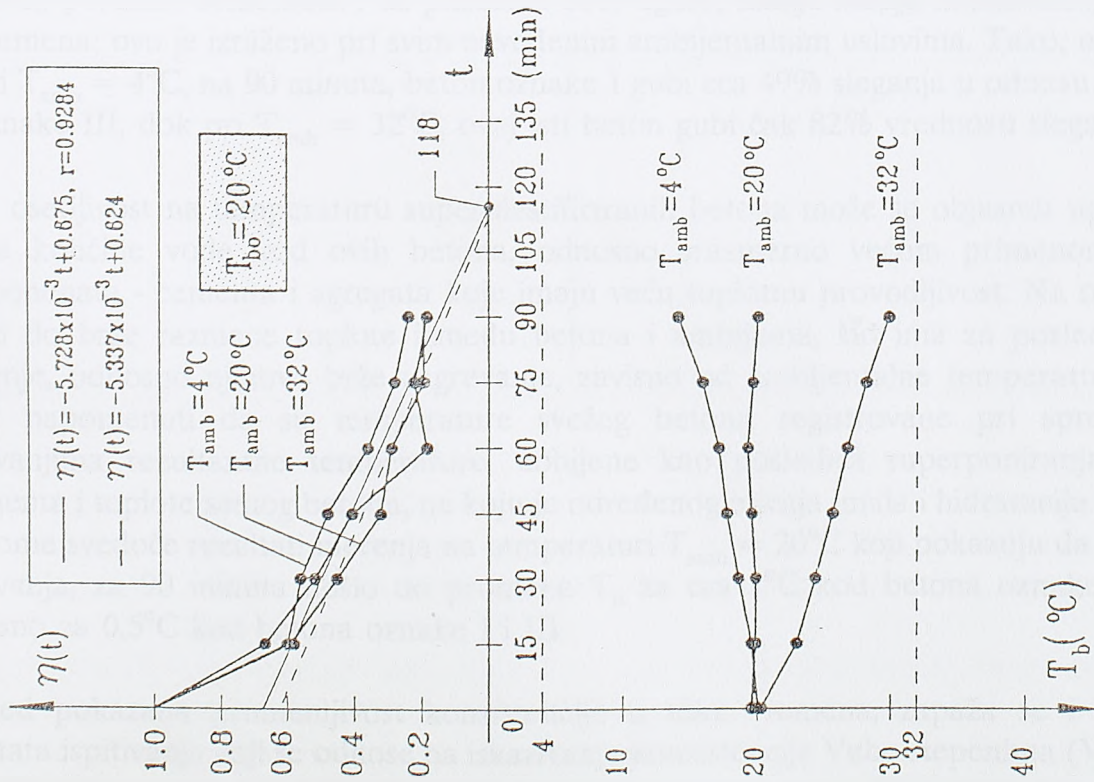
BETON I



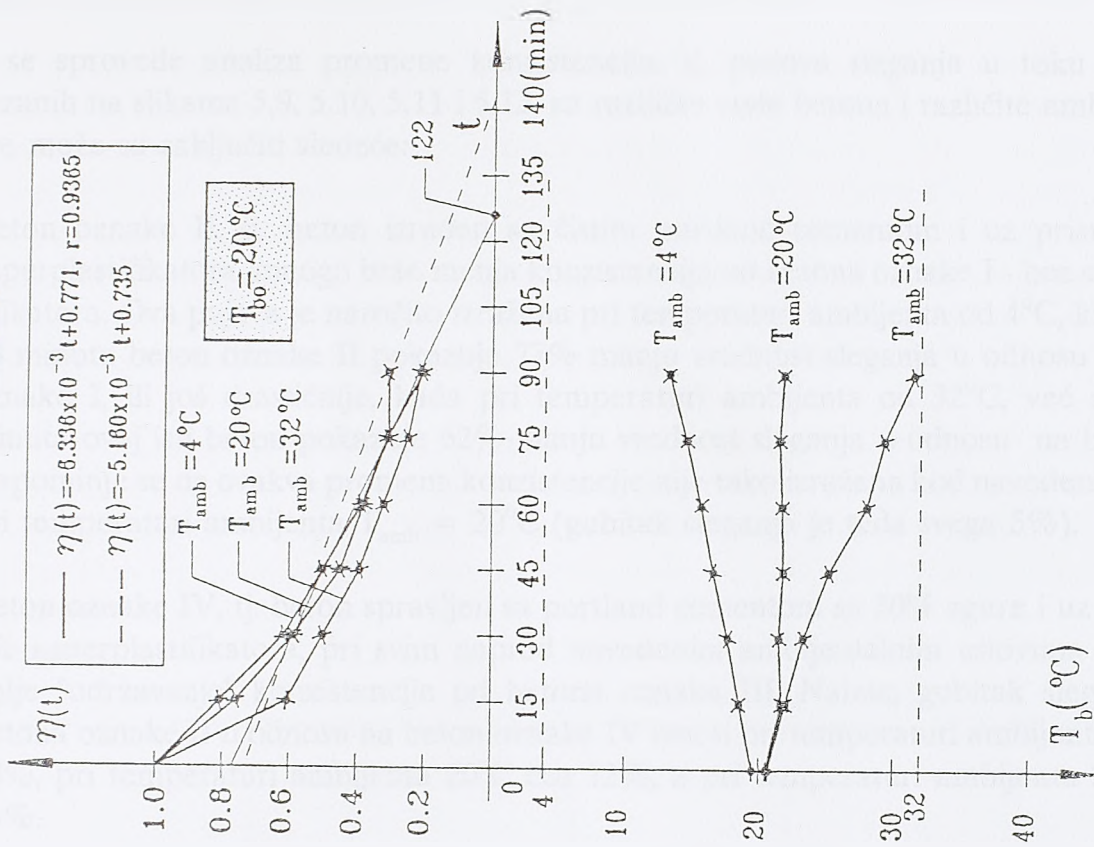
Sl. 5.9 Zavisnost relativne mere sleganja i temperature svežeg betona oznake I od vremena i T_{amb}

Sl. 5.10 Zavisnost relativne mere sleganja i temperature svežeg betona oznake II od vremena i T_{amb}

BETON III



BETON IV



Sl. 5.11 Zavisnost relativne mere sleganja i temperature svežeg betona oznake III od vremena i T_{amb}

Sl. 5.12 Zavisnost relativne mere sleganja i temperature svežeg betona oznake IV od vremena i T_{amb}

Ako se sprovede analiza promene konzistencije, tj. padova sleganja u toku vremena prikazanih na slikama 5.9, 5.10, 5.11 i 5.12, za različite vrste betona i različite ambijentalne uslove može se zaključiti sledeće:

- Beton oznake II, tj. beton izrađen sa čistim portland cementom i uz prisustvo 1% superplastifikatora, mnogo brže menja konzistenciju od betona oznake I - bez superplastifikatora. Ova pojava je naročito izražena pri temperaturi ambijenta od 4°C, kada posle 90 minuta beton oznake II pokazuje 77% manju vrednost sleganja u odnosu na beton oznake I, ili još drastičnije, kada pri temperaturi ambijenta od 32°C, već nakon 60 minuta ovaj isti beton pokazuje 62% manju vrednost sleganja u odnosu na beton I. Napominje se da ovakva promena konzistencije nije tako izražena kod navedenih betona pri temperaturi ambijenta $T_{amb} = 20^{\circ}\text{C}$ (gubitak sleganja je tada svega 5%).
- Beton oznake IV, tj. beton spravljen sa portland cementom sa 30% zgure i uz prisustvo 1% superplastifikatora, pri svim napred navedenim ambijentalnim uslovima pokazuje bolje "održavanje" konzistencije od betona oznake III. Naime, gubitak sleganja kod betona oznake II u odnosu na beton oznake IV iznosi pri temperaturi ambijenta 4°C cca 28%, pri temperaturi ambijenta 20°C cca 12%, a pri temperaturi ambijenta 32°C, cca 24%.
- Osetljivost na temperaturu ambijenta superplastificiranih betona (ΔT_b) je veća od onih bez dodatka (etalona); tako na primer, pri $T_{amb} = 4^{\circ}\text{C}$, $\Delta T_b = -9,7^{\circ}\text{C}$ kod betona oznake II, dok je pri $T_{amb} = 32^{\circ}\text{C}$, $\Delta T_b = +10,8^{\circ}\text{C}$ kod betona oznake IV (videti tabelu 5.8).
- Ako se uporede betoni oznake I i oznake III, tj. oni koji su spravljeni bez superplastifikatora, ali sa različitom vrstom cementa, može se zaključiti da beton oznake III - sa čistim portland cementom i uz prisustvo 30% zgure, manje menja konzistenciju u toku vremena; ovo je izraženo pri svim navedenim ambijentalnim uslovima. Tako, na primer, pri $T_{amb} = 4^{\circ}\text{C}$, na 90 minuta, beton oznake I gubi cca 49% sleganja u odnosu na beton oznake III, dok pri $T_{amb} = 32^{\circ}\text{C}$, ovaj isti beton gubi čak 82% vrednosti sleganja.

Veća osetljivost na temperaturu superplastificiranih betona može se objasniti upotrebom manje količine vode kod ovih betona, odnosno srazmerno većom primenom čvrstih komponenata - cementa i agregata koje imaju veću toplotnu provodljivost. Na ovaj način dolazi do brže razmene toplote između betona i ambijenta, što ima za posledicu brže hlađenje, odnosno njihovo brže zagrevanje, zavisno od ambijentalne temperature. Ovde treba napomenuti da su temperature svežeg betona registrovane pri sprovedenim ispitivanjima rezultantne temperature, dobijene kao posledica superponiranja toplote ambijenta i toplote samog betona, na koju je određenog uticaja imala i hidratacija cementa. O ovome svedoče rezultati merenja na temperaturi $T_{amb} = 20^{\circ}\text{C}$ koji pokazuju da je tokom ispitivanja, za 90 minuta došlo do promene T_b za cca 1°C kod betona oznake II i IV, odnosno za 0,5°C kod betona oznake I i III.

Napred pokazana promenljivost konzistencije u toku vremena, zapaža se i analizom rezultata ispitivanja koji se odnose na iskazivanje konzistencije Vebe-stepenima (V) (tabela 5.8). Međutim, ovde nije prisutna nagla promena stanja u prvih 15 minuta, kao što se to

uočava prilikom merenja sleganja, pa se aproksimacija svih eksperimentalno dobijenih Vebe-stepeni, dakle svih veličina koje se odnose na vreme $t \geq 0$, može izvršiti pravom linijom. U tabeli 5.9, pak, prikazane su vrednosti, kako sleganja po Abramsu (Δh_{SR}), tako i srednje vrednosti Vebe stepeni ($Vebe_{SR}$) za sve četiri vrste betona. Na osnovu navedene tabele proizilaze dva dijagrama promene sleganja i Vebe stepeni u toku vremena za navedene četiri vrste betona. Ovo je prikazano na slikama 5.12 i 5.13. Napominje se da svaka tačka na ovim graficima, bilo da se radi o metodi sleganja ili o Vebe metodi, predstavlja srednju vrednost iz tri merenja, pri $T_{amb} = 4^{\circ}C, 20^{\circ}C$ i $32^{\circ}C$ i $T_{bo} \approx 20^{\circ}C$.

Kao što se vidi sa grafičkih prikaza na sl. 5.13 i sl. 5.14, ovde je prisutan isti trend kao i pri analizi rezultata iz tabele 5.7, što znači, da beton oznake IV najmanje menja konzistenciju tokom vremena. Tako, na primer, kod ovog betona (oznaka IV) vreme u minutima kada bi mera sleganja pala na nulu iznosi 122, dok kod betona oznake II, ovo vreme iznosi svega 93 minuta.

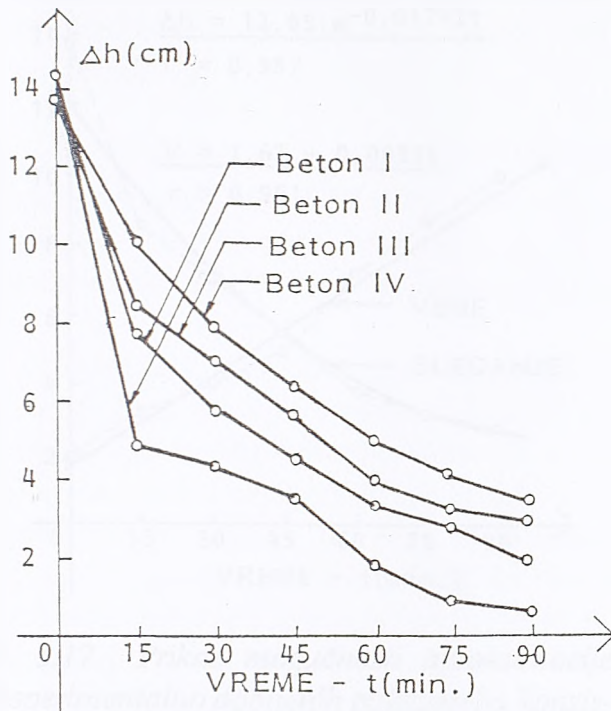
Tabela 5.9 Srednje vrednosti mera sleganja i Vebe-stepeni za $T_{bo} = 20^{\circ}C$

$T_{amb} = 4^{\circ}C, 20^{\circ}C$ i $32^{\circ}C$					
t (min)	Δh_{SR} (cm)	Vebe _{SR} (s)	t (min)	Δh_{SR} (cm)	Vebe _{SR} (s)
BETON I			BETON II		
0	14,3	2,0	0	14,3	1,8
15	7,7	4,0	15	4,8	5,3
30	5,7	5,0	30	4,3	6,0
45	4,5	6,0	45	3,5	7,4
60	3,2	8,0	60	1,67	10,0
75	2,7	9,0	75	0,83	12,0
90	1,7	10,0	90	0,5	12,8
BETON III			BETON IV		
0	13,7	1,9	0	13,8	1,8
15	8,5	3,2	15	10,0	2,6
30	7,0	4,0	30	7,8	3,3
45	5,5	4,9	45	6,17	4,2
60	3,8	7,0	60	5,0	5,4
75	3,17	8,6	75	4,0	6,3
90	2,83	9,8	90	3,33	7,5

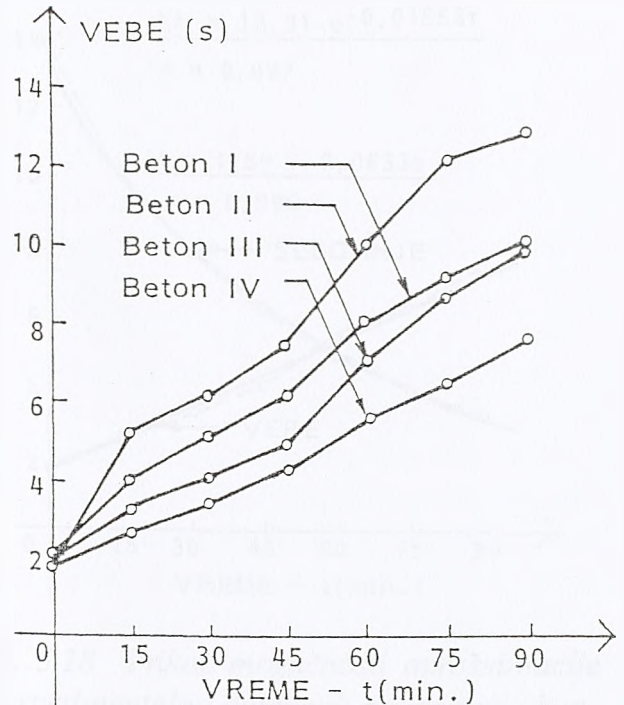
Iz prikazane tabele 5.9 takođe proističu i slike: 5.15, 5.16, 5.17 i 5.18, na kojima se daju grafički prikazi promenljivosti konzistencije betona I, II, III i IV u toku vremena preko mere sleganja i Vebe metode; na istim slikama data je i mogućnost aproksimacije eksperimentalno dobijenih pokazatelja konzistencije analitičkim izrazima.

Slike 5.15-5.18, kao što se vidi, daju i prikaz krivih eksponencijalnog oblika koje predstavljaju pokušaj da se veličine $\Delta h(t) = \Delta h_{SR}$ za sve vrednosti t (uključujući i interval $0 \leq t < 15$ min), primenom metode najmanjih kvadrata, aproksimiraju jedinstvenim analitičkim izrazima. U ovom slučaju, primenom funkcije oblika $\Delta h(t) = A \cdot e^{BT}$, dobijaju

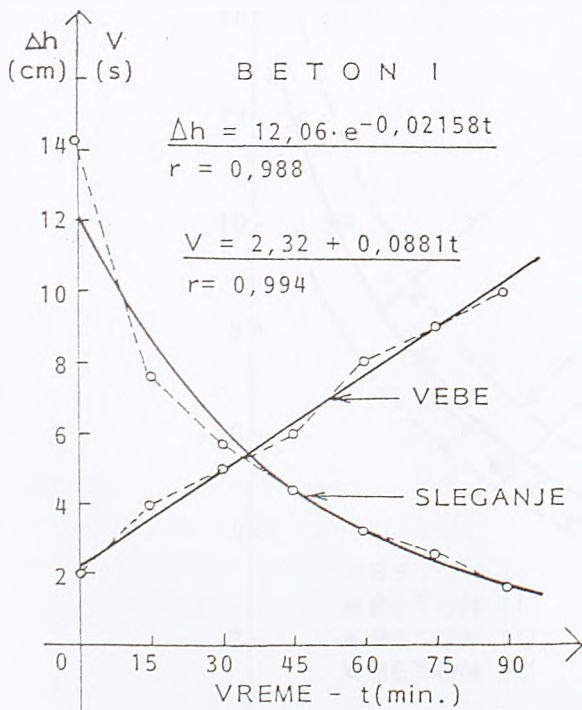
se, generalno posmatrano, veoma visoki koeficijenti korelacije, međutim, ova funkcija dosta slabo "pokriva" područje $0 < t \leq 15$ min.



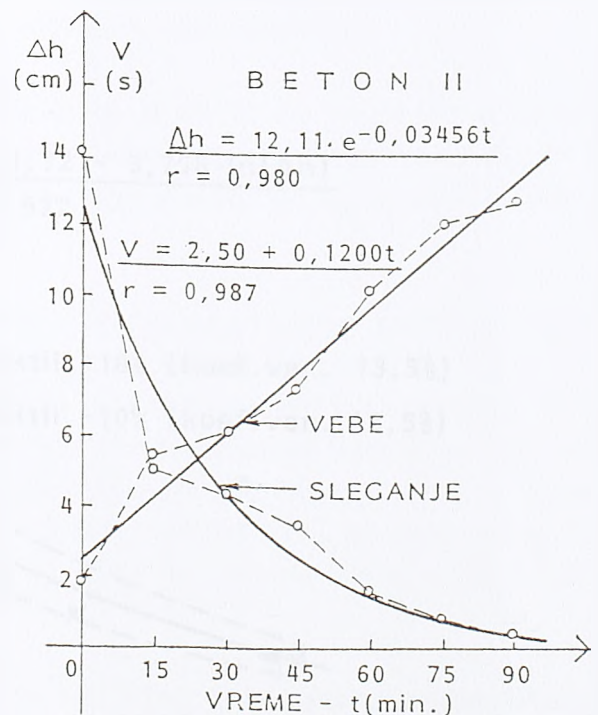
Sl. 5.13 Zavisnost sleganja za betone I, II, III i IV od vremena



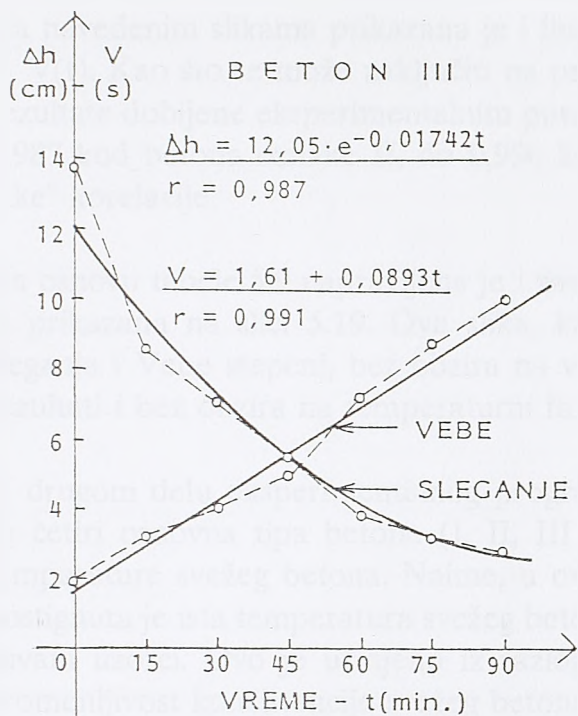
Sl. 5.14 Zavisnost Vebe stepeni za betone I, II, III i IV od vremena



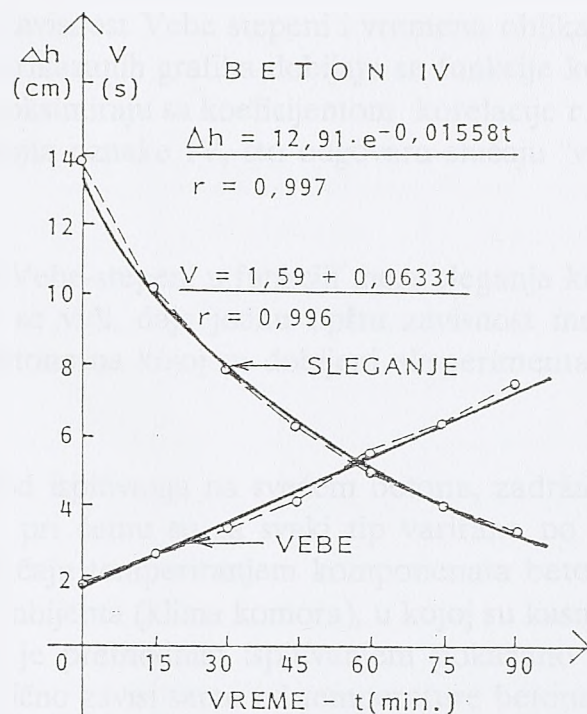
Sl. 5.15 Prikaz mogućnosti aproksimacije eksperimentalno dobijenih pokazatelja konzistencije za beton I analitičkim izrazima



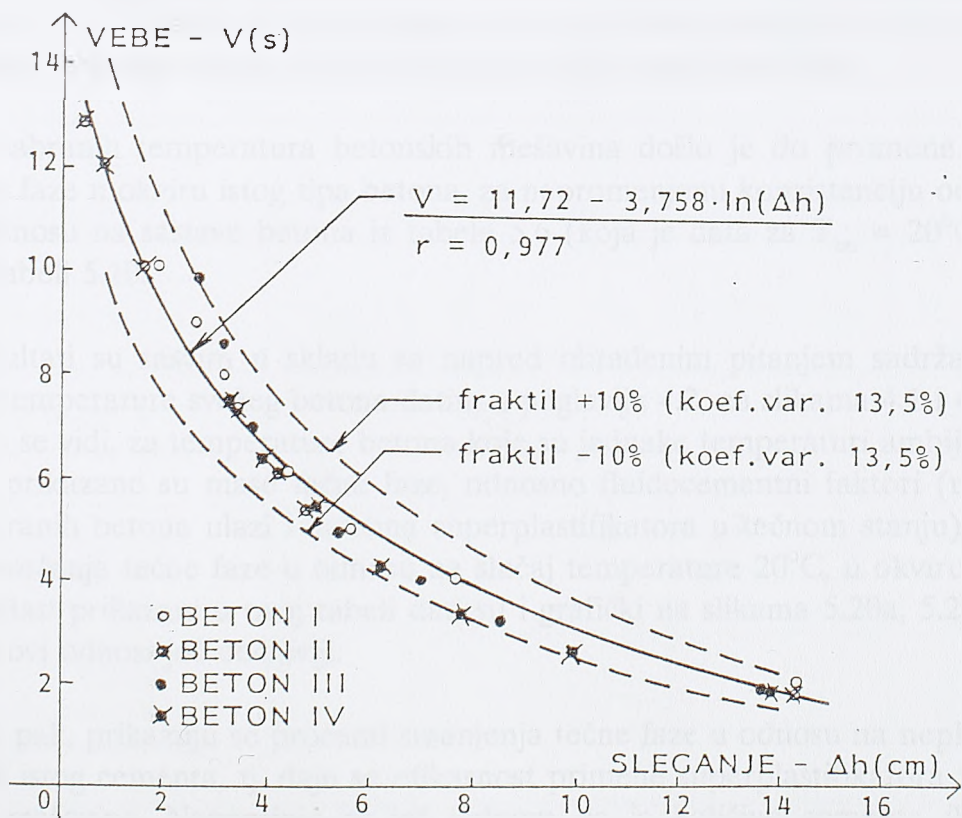
Sl. 5.16 Prikaz mogućnosti aproksimacije eksperimentalno dobijenih pokazatelja konzistencije za beton II analitičkim izrazima



Sl. 5.17 Prikaz mogućnosti aproksimacije eksperimentalno dobijenih pokazatelja konzistencije za beton III analitičkim izrazima



Sl. 5.18 Prikaz mogućnosti aproksimacije eksperimentalno dobijenih pokazatelja konzistencije za beton IV analitičkim izrazima



Sl. 5.19 Zavisnost mere sleganja i Vebe stepeni

Na navedenim slikama prikazana je i linearna zavisnost Vebe stepeni i vremena oblika $V = V(t)$. Kao što se može zaključiti na osnovu prikazanih grafika dobijaju se funkcije koje rezultate dobijene eksperimentalnim putem aproksimiraju sa koeficijentom korelacije r od 0,987 kod betona oznake II, do 0,996 kod betona oznake IV, što odgovara slučaju "vrlo jake" korelacije.

Na osnovu tabele 5.9 napravljena je i zavisnost Vebe-stepeni u funkciji mere sleganja koja je prikazana na slici 5.19. Ova slika, kao što se vidi, daje jednu opštu zavisnost mere sleganja i Vebe stepeni, bez obzira na vrstu betona na kojoj su dobijeni eksperimentalni rezultati i bez obzira na temperaturni faktor.

U drugom delu eksperimentalnog programa kod ispitivanja na svežem betonu, zadržana su četiri osnovna tipa betona (I, II, III i IV), pri čemu su za svaki tip varirane po tri temperature svežeg betona. Naime, u ovom slučaju temperiranjem komponenata betona postignuta je ista temperatura svežeg betona i ambijenta (klima komora), u kojoj su kasnije čuvani uzorci. Ovo je učinjeno iz razloga, što je prethodnim ispitivanjem pokazano da promenljivost konzistencije svežeg betona praktično zavisi samo od temperature betonske mešavine. Izabrane temperature betona, tj. ambijenta, bile su, kako je to u poglavlju 5.1 objašnjeno, 10°C, 20°C i 30°C.

Za proračun temperature svežeg betona na bazi temperatura komponenata poslužila je poznata relacija 4.1, međutim, sopstveni eksperimenti su pokazali da je temperatura svežeg betona uvek za 2,5-3°C viša od proračunate. Ovo se najverovatnije javlja kao posledica mešanja betona, odnosno usled trenja u masi prouzrokovanog mešanjem.

Kod ovako izabranih temperatura betonskih mešavina došlo je do promene u količini vode, tj. tečne faze u okviru istog tipa betona, za nepromenjenu konzistenciju od $\Delta h = 14 \pm 2$ cm, u odnosu na sastave betona iz tabele 5.6 (koja je data za $T_{bo} \approx 20^\circ\text{C}$). Ovo je prikazano u tabeli 5.10.

Prikazani rezultati su sasvim u skladu sa napred obrađenim pitanjem sadržaja vode u zavisnosti od temperature svežeg betona datim u poglavlju 4.2, na slikama 4.1 i 4.2. U ovoj tabeli, kao što se vidi, za temperature betona koje su jednake temperaturi ambijenta 10°C, 20°C i 30°C, prikazane su mase tečne faze, odnosno fluidocementni faktori (u koje kod superplastificiranih betona ulazi i količina superplastifikatora u tečnom stanju), a takođe i procenat povećanja tečne faze u odnosu na slučaj temperature 20°C, u okviru istog tipa betona. Rezultati prikazani u ovoj tabeli dati su i grafički na slikama 5.20a, 5.20b i 5.20c, na kojima su ovi odnosi još uočljiviji.

U tabeli 5.11, pak, prikazuju se procenti smanjenja tečne faze u odnosu na neplastificirani beton na bazi istog cementa, tj. daje se efikasnost primene superplastifikatora zavisno od temperature mešavine. Napominje se još jednom da je količina cementa ili cementa zajedno sa zgurom bila nepromenjena i iznosila 330 kg/m³ kod svih ispitivanih mešavina, tako da je efikasnost superplastifikatora mogla da dođe do punog izražaja. Procenat superplastifikatora kod plastificiranih betona bio je konstantan i iznosio je 1% u odnosu na

masu cementa. Ovo je učinjeno stoga što je poznato da povećani procenat superplastifikatora daje manju relativnu promenu sleganja (videti poglavlje 4.2, sliku 4.13).

Tabela 5.10 Karakteristike svežeg betona u zavisnosti od temperature $T_{amb} = T_{bo}$

Vrsta betona	T_{amb}	Masa tečne faze (kg/m^3)	Fluidocementni faktor	$\gamma_{b,sv}$ (kg/m^3)	% povećanja tečne faze u odnosu na 10°C	% promene tečne faze u odnosu na 20°C
PC 45B I	10°C	176,55	0,535	2492	0	-1,83
	20°C	179,85	0,545	2495	1,87	0
	30°C	183,48	0,556	2500	3,92	2,018
PC 45B+1% superplastifikatora II	10°C	155,43	0,471	2470	0	-4,85
	20°C	163,35	0,495	2480	5,09	0
	30°C	174,9	0,530	2490	12,53	7,07
PC 45B+30z III	10°C	179,52	0,544	2495	0	-4,56
	20°C	188,1	0,570	2503	4,78	0
	30°C	192,72	0,584	2508	7,35	2,45
PC 45B+30z +1% superpl. IV	10°C	160,38	0,486	2476	0	-7,43
	20°C	173,25	0,525	2490	8,02	0
	30°C	181,17	0,549	2496	12,96	4,57

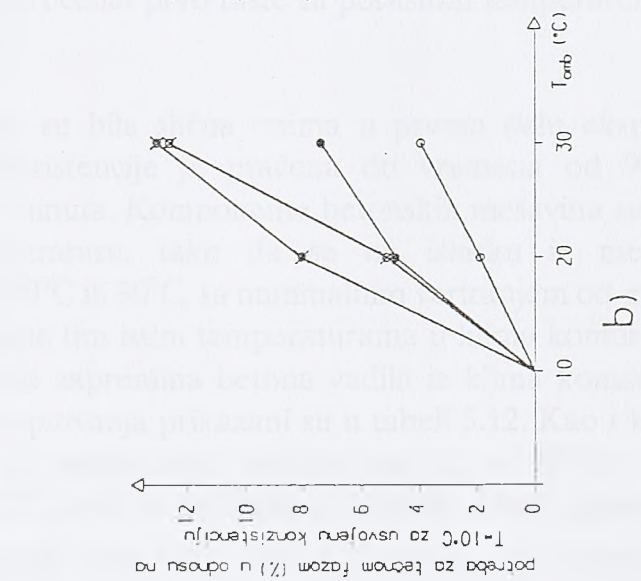
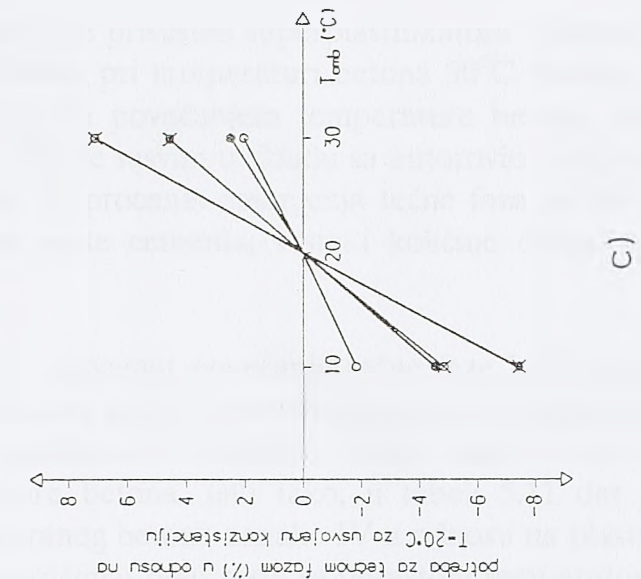
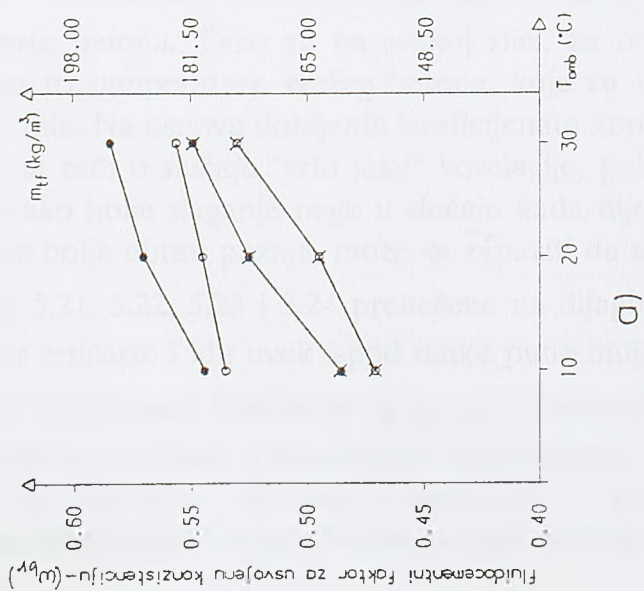
Sl. 5.11 Uticaj vrste betona na masu tečne faze pri različitim temperaturama $T_{bu} = T_{amb}$

Vrsta betona	I PC 45 B	II PC 45B + 1% superplastifikatora	III PC 45B +30z	IV PC 45B+30z+1% superplastifikatora
% smanjenja tečne faze u odnosu na neplastificirani beton na bazi istog cementa		10°C 11,96 20°C 9,17 30°C 4,67		10°C 10,66 20°C 7,89 30°C 5,9
% povećanja tečne faze u odnosu na beton oznake I			10°C 1,68 20°C 4,59 30°C 5,04	
% povećanja tečne faze kod plastificiranog betona oznake IV u odnosu na plastificirani beton oznake II				10°C 3,18 20°C 6,06 30°C 3,6

Napomena: Procenati povećanja, odnosno smanjenja tečne faze odnose se na istu konzistenciju betona.

Kao što se vidi, procenat smanjenja tečne faze uz dejstvo superplastifikatora kod betona izrađenog sa čistim portland cementnom (oznaka II) je nešto veći u odnosu na beton

$\Delta H(0) = 14 \pm 2 \text{ cm}$	○ BETON I	● BETON III
$T_{amb} = T_h$	⊗ BETON II	⊗ BETON IV



Sl. 5.20 Masa tečne faze u funkciji $T_{bo} = T_{amb}$ (a), potreba za tečnom fazom u odnosu na $T = 10^\circ\text{C}$ (b) i na $T = 20^\circ\text{C}$ (c)

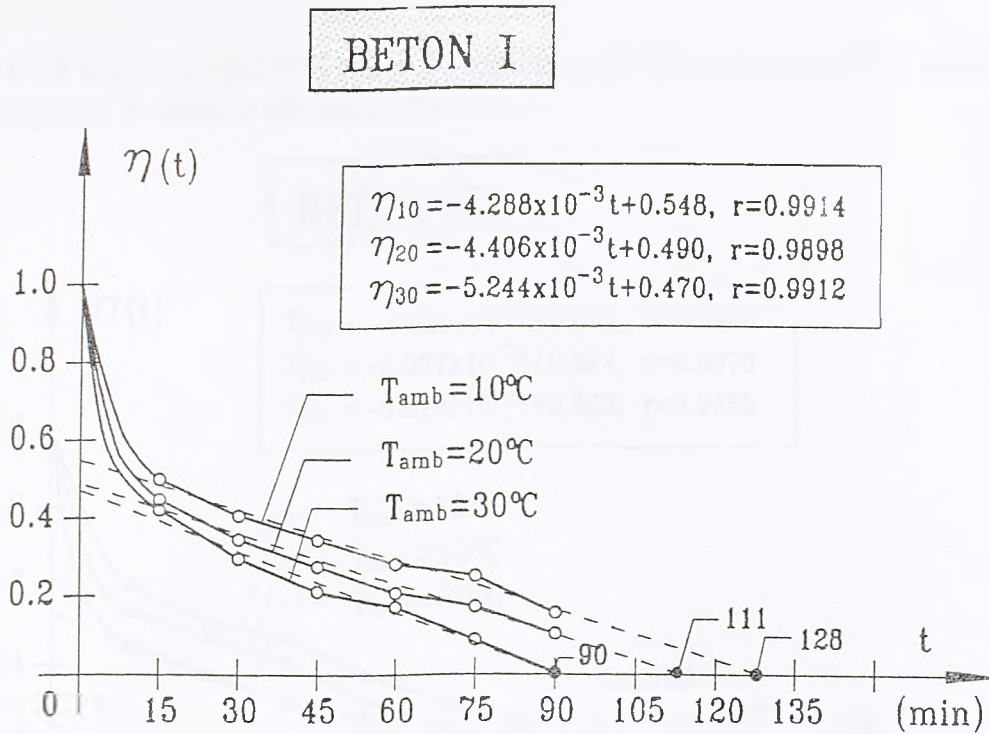
spravljen sa dodatkom 30% zgure i uz prisustvo superplastifikatora (oznaka IV), na 10°C i 20°C, dok se ovaj trend ne zadržava pri temperaturi betona 30°C. Naime, zapaža se da se i efekat plastificiranja smanjuje sa povećanjem temperature betona, što se naročito odnosi na temperaturu od 30°C. Ovo je sasvim u skladu sa autorovim ranijim ispitivanjima [59] i [63], u kojima je pokazano da procenat smanjenja tečne faze za istu konzistenciju svežeg betona zavisi svakako od vrste cementa, vrste i količine dodatka, temperature betona i ambijenta itd.

Pored ovoga, u tabeli 5.11 dat je i procenat povećanja tečne faze kod betona oznake III u odnosu na beton oznake I i kao što se vidi, pri svim navedenim temperaturama beton spravljen sa dodatkom zgure zahteva veću količinu tečne faze, a ovaj procenat se povećava sa porastom temperature betona. Isto tako, u tabeli 5.11 dat je i procenat povećanja tečne faze kod plastificiranog betona oznake IV u odnosu na plastificirani beton oznake II, i kako se zapaža, ovaj procenat prvo raste sa porastom temperature betona (10-20°C), a kasnije opada (na 30°C).

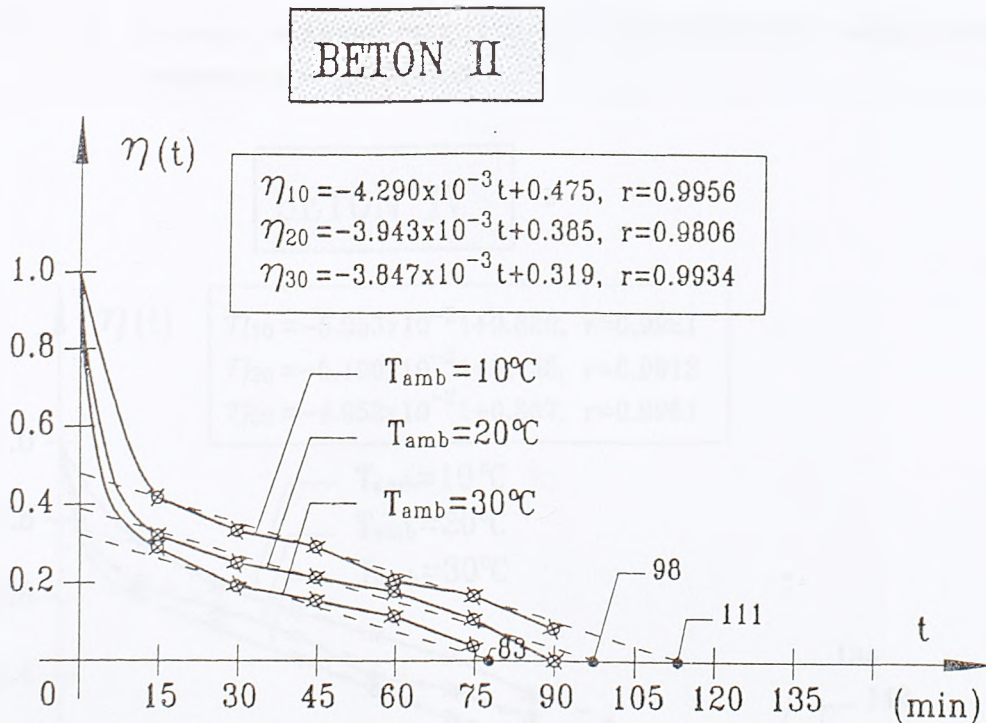
U daljem, sprovedena ispitivanja su bila slična onima u prvom delu eksperimentalnog programa. Naime, promena konzistencije je praćena do vremena od 90 minuta, sa merenjima sleganja na svakih 15 minuta. Komponente betonskih mešavina su u tom smislu temperirane na izabranu temperaturu, tako da se na izlasku iz mešalice dobije programirana temperatura 10°C, 20°C ili 30°C, sa minimalnim variranjem od $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Nakon toga, betonske mešavine su izlagane tim istim temperaturama u klima komori (T_{amb}), s tim što se na svakih 15 min. određena zapremina betona vadila iz klima komore i vršeno je merenje sleganja. Rezultati ovih ispitivanja prikazani su u tabeli 5.12. Kao i kod ispitivanja u prvom delu programa, kada je temperatura betona bila $T_{\text{bo}} \approx 20^\circ\text{C}$, a temperatura ambijenta $T_{\text{amb}} = 4^\circ\text{C}$, 20°C i 32°C, ovde je prikazan i relativan odnos izmerenih sleganja $\eta(t)$. Iz navedene tabele proizilaze slike 5.21, 5.22, 5.23 i 5.24, koje prikazuju zavisnost relativne mere sleganja $\eta(t)$ od vremena za 3 različite temperature svežeg betona (10°C, 20°C i 30°C) i četiri različite vrste betona. Tako su na svakoj slici, za određenu vrstu betona, prikazane po tri linije za tri temperature svežeg betona, koje su aproksimirane pravom linijom u području $t \geq 15$ min. Na osnovu dobijenih koeficijenata korelacije r može se zaključiti da se kod svih betona radi o slučaju "vrlo jake" korelacije, pošto se r kreće od 0,9806 do 0,9961. Ovo je svakako bolje sleganje nego u slučaju kada nije bio ispunjen uslov da $T_{\text{bo}} = T_{\text{amb}}$. Ako se malo bolje obrati pažnja, može se zapaziti da su isprekidane prave linije oznaka η_{20} sa slika 5.21, 5.22, 5.23 i 5.24 prenešene na dijagrame slika 5.9, 5.10, 5.11 i 5.12, gde su prikazane crtičasto i idu uvek ispod tanke pune linije. Na slikama 5.9, 5.10, 5.11 i 5.12, nisu ispisani koeficijenti korelacije η_{20} pored jednačina, međutim, oni su uvek veći od onih dobijenih na betonima u prethodnim ispitivanjima, kada T_{bo} nije bilo jednako T_{amb} . Objašnjenje za ovo može da bude u tome što je kod prethodnih ispitivanja, usled izvesnih promena temperature samog betona, moglo da dođe do kolebanja konzistencije.

Tabela 5.12 Zavisnost mere sleganja od vremena i temperature betona

Vrsta betona	$T_{amb} \approx T_{bo} = 10^{\circ}\text{C}$			$T_{amb} \approx T_{bo} = 20^{\circ}\text{C}$			$T_{amb} \approx T_{bo} = 30^{\circ}\text{C}$		
	t (min)	$\Delta h(t)$ (cm)	η (t)	t (min)	$\Delta h(t)$ (cm)	η (t)	t (min)	$\Delta h(t)$ (cm)	η (t)
I	0	16,0	1	0	14,5	1	0	12,0	1
	15	8,0	0,500	15	6,5	0,448	15	5,0	0,417
	30	6,5	0,406	30	5,0	0,345	30	3,5	0,292
	45	5,5	0,344	45	4,0	0,276	45	2,5	0,208
	60	4,5	0,281	60	3,0	0,207	60	2,0	0,167
	75	4,0	0,250	75	2,5	0,172	75	1,0	0,083
	90	2,5	0,156	90	1,5	0,103	90	0,0	0,00
II	0	12,0	1	0	14,0	1	0	13,0	1
	15	5,0	0,417	15	4,5	0,321	15	3,5	0,289
	30	4,0	0,333	30	3,5	0,250	30	2,5	0,192
	45	3,5	0,292	45	3,0	0,214	45	2,0	0,154
	60	2,5	0,208	60	2,5	0,178	60	1,5	0,115
	75	2,0	0,167	75	1,5	0,107	75	0,5	0,038
	90	1,0	0,083	90	0,0	0,00	90	-	-
III	0	15,0	1	0	15,0	1	0	13,5	1
	15	9,0	0,600	15	8,0	0,533	15	6,0	0,444
	30	7,5	0,500	30	7,0	0,467	30	5,0	0,370
	45	7,0	0,467	45	6,0	0,400	45	4,0	0,296
	60	5,5	0,367	60	4,5	0,300	60	3,5	0,259
	75	4,5	0,300	75	3,5	0,233	75	2,0	0,148
	90	3,5	0,233	90	2,0	0,133	90	0,5	0,037
IV	0	16,0	1	0	14,0	1	0	12,5	1
	15	12,0	0,750	15	9,5	0,628	15	7,5	0,600
	30	10,0	0,625	30	8,0	0,571	30	6,5	0,520
	45	9,0	0,562	45	7,0	0,500	45	5,5	0,440
	60	8,0	0,500	60	5,5	0,393	60	4,5	0,360
	75	7,0	0,438	75	5,0	0,357	75	3,5	0,280
	90	5,5	0,344	90	4,0	0,286	90	3,0	0,240



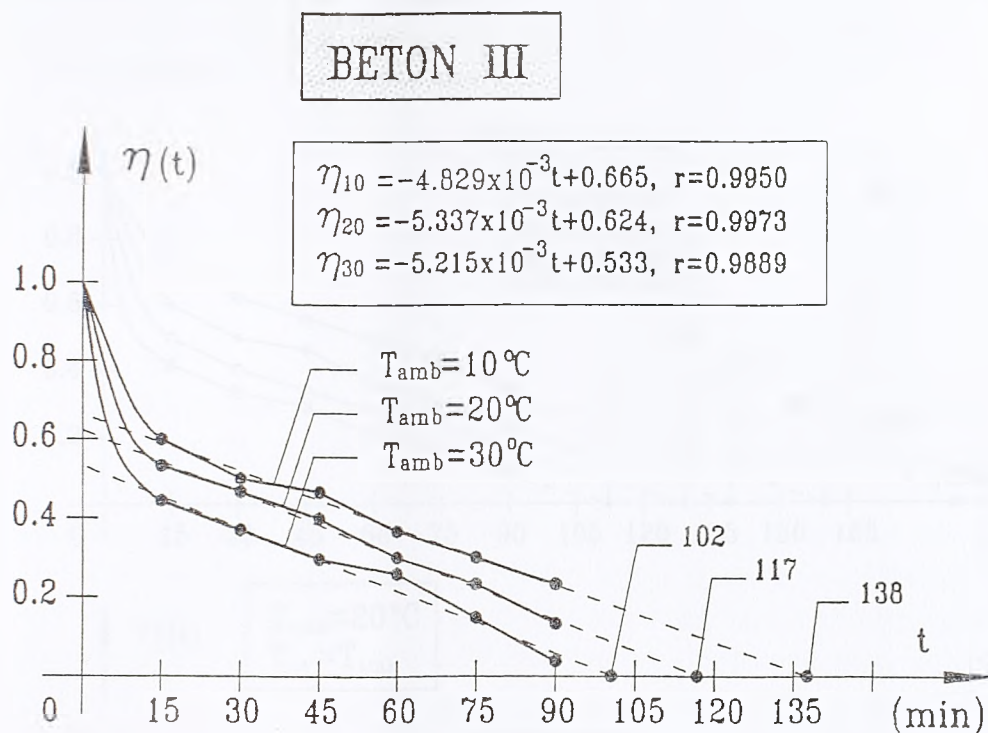
Sl. 5.21 Zavisnost relativne mere sleganja od temperature svežeg betona i vremena za beton oznake I



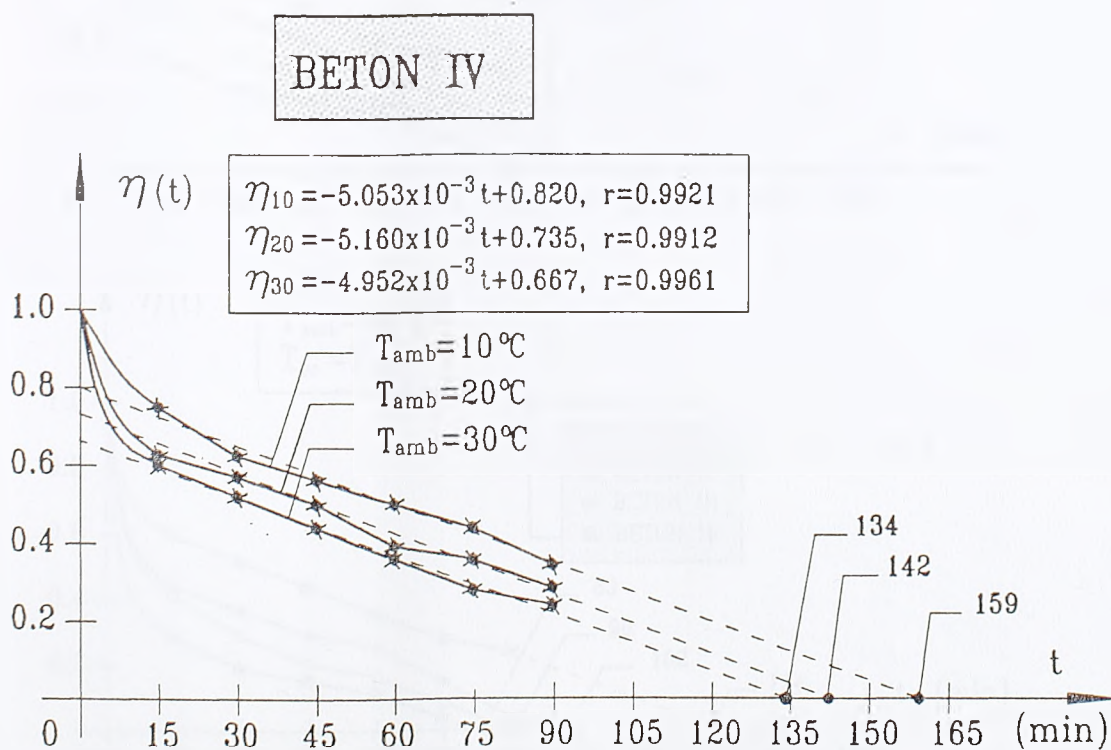
Sl. 5.22 Zavisnost relativne mere sleganja od temperature svežeg betona i vremena za beton oznake II

Ako se posmatra gubitak sleganja zavisno od vrste betona pri istoj temperaturi svežeg betona, tj. ambijenta, može se konstatovati da i ovde dolazi do brže promene sleganja kod betona oznake II, tj. onog izrađenog uz prisustvo superplastifikatora, u odnosu na beton oznake I, na bazi istog cementa. Tako na primer, na 10°C , nakon 90 minuta beton oznake

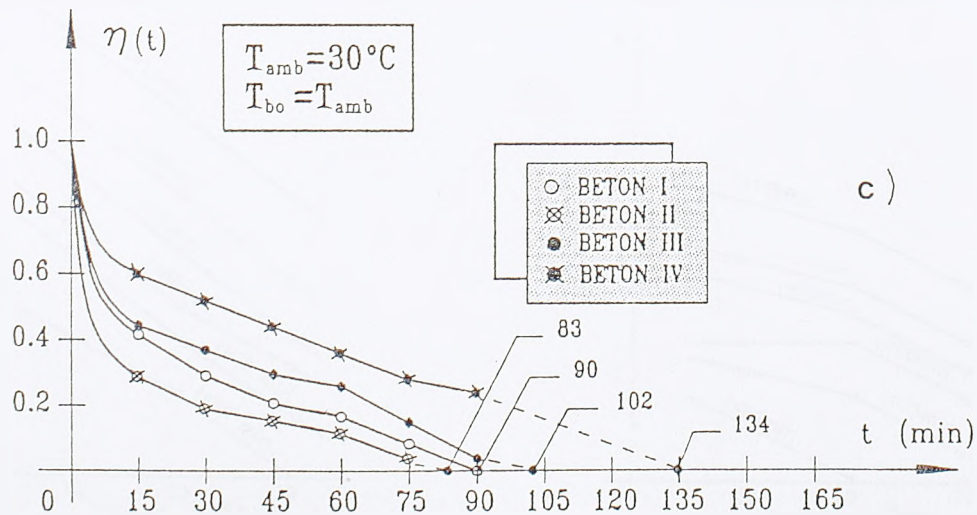
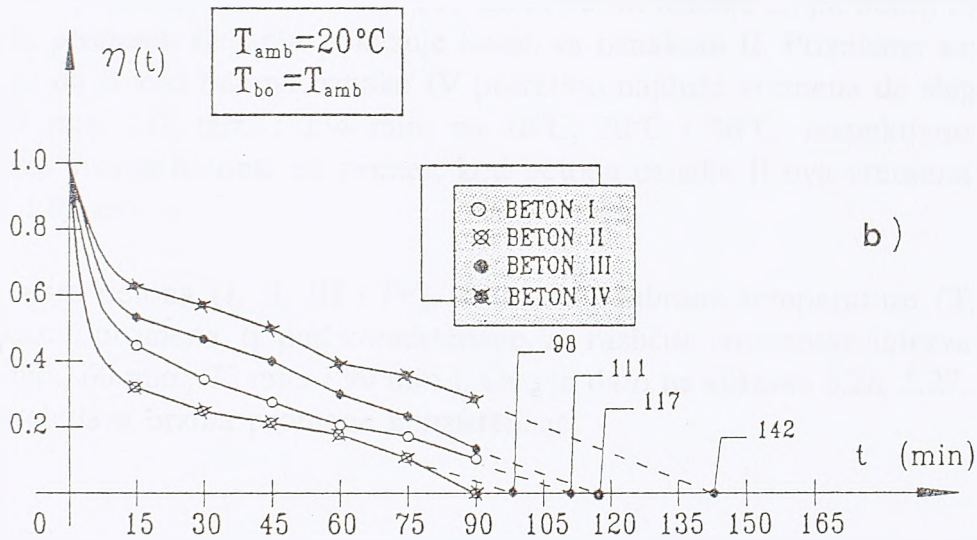
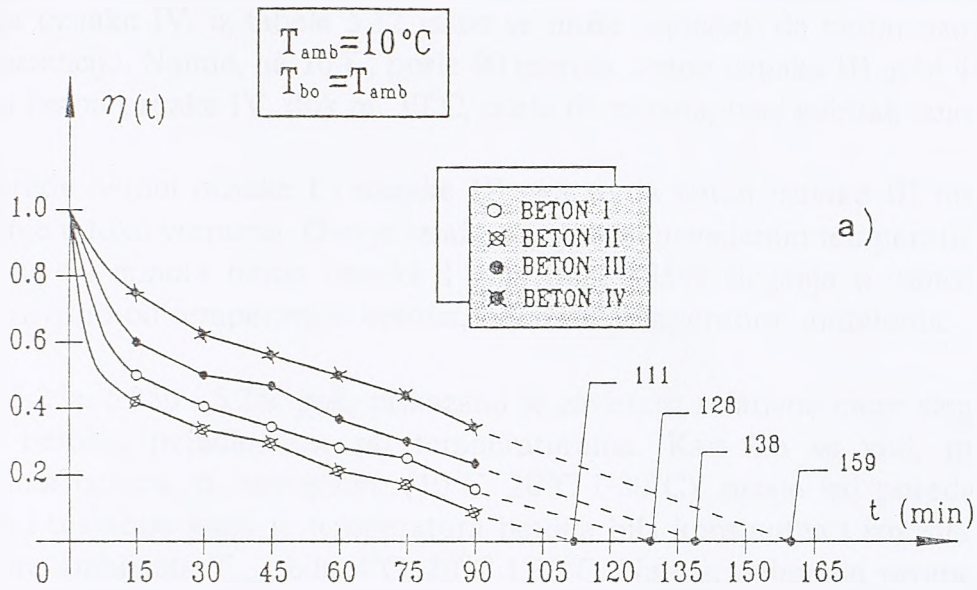
II gubi cca 47% sleganja, na 20°C posle 75 minuta gubi 38%, dok na 30°C, posle 75 minuta gubi 54% sleganja u odnosu na beton oznake I.



Sl. 5.23 Zavisnost relativne mere sleganja od temperature svežeg betona i vremena za beton oznake III



Sl. 5.24 Zavisnost relativne mere sleganja od temperature svežeg betona i vremena za beton oznake IV



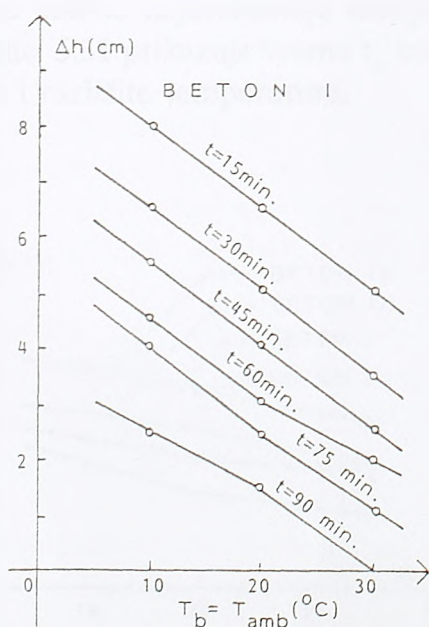
Sl. 5.25 Zavisnost relativne mere sleganja od vrste betona, vremena i temperature betona $10^{\circ}C$ (a), $20^{\circ}C$ (b) i $30^{\circ}C$ (c)

Što se tiče betona spravljenog na bazi čistog portland cementa sa dodatkom zgure (oznaka III) i betona oznake IV, iz tabele 5.12 jasno se može sagledati da beton oznake III brže menja konzistenciju. Naime, na 10°C , posle 90 minuta, beton oznake III gubi 48% sleganja u odnosu na beton oznake IV, dok na 30°C , posle 60 minuta, ovaj gubitak iznosi cca 39%.

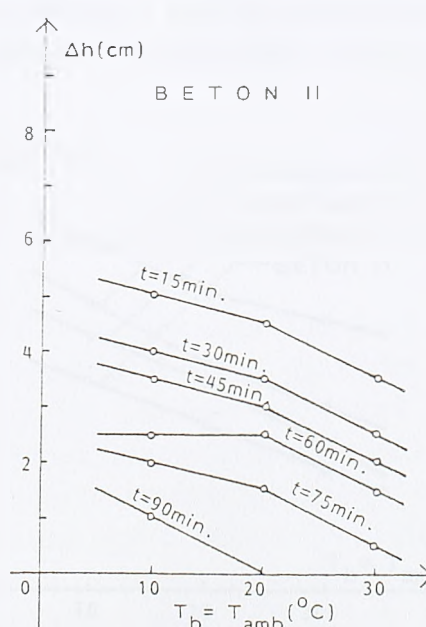
Ako se uporede betoni oznake I i oznake III vidi se da beton oznake III mnogo sporije menja sleganje u toku vremena. Ovo je izraženo na svim navedenim temperaturama. Tako, na primer, na 60 minuta beton oznake I gubi od 30-55% sleganja u odnosu na beton oznake III, zavisno od temperature betona, odnosno temperature ambijenta.

Na slikama 5.25a, 5.25b i 5.25c pak, prikazana je zavisnost relativne mere sleganja, za sve četiri vrste betona, pojedinačno, po temperaturama. Kao što se vidi, pri različitim temperaturama betona, tj. ambijenta, (10°C , 20°C i 30°C), ostaje isti poredak promene sleganja kao i u slučaju kada je temperatura betona bila konstantna i iznosila $T_b \approx 20^{\circ}\text{C}$, a temperatura ambijenta T_{amb} bila 4°C , 20°C i 32°C . Naime, najmanju promenu sleganja u toku vremena pokazuje beton oznake IV, zatim beton oznake II, pa beton oznake I i na kraju, najveću promenu sleganja pokazuje beton sa oznakom II. Prikazane zavisnosti isto tako pokazuju da je kod betona oznake IV potrebno najduže vremena da sleganje padne na nulu (159 min, 142 min. i 134 min. na 10°C , 20°C i 30°C , respektivno). Pri istim temperaturama svežeg betona, na primer, kod betona oznake II ova vremena iznose 111 min, 98 min. i 83 min.

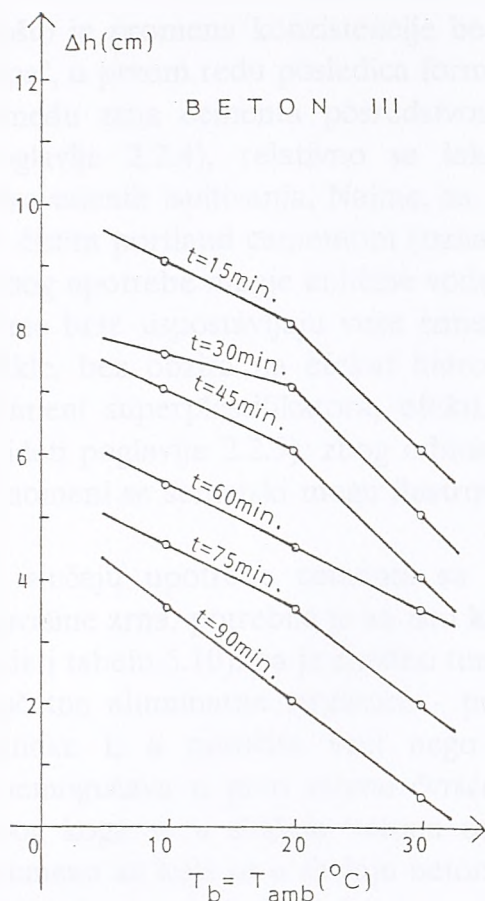
Za različite vrste betona (I, II, III i IV), kao i za odabrane temperature ($T_{bo} = T_{amb}$), može se prikazati promena, tj. pad konzistencije, za različite vremenske intervale (15 min., 30 min., 45 min., 60 min., 75 min. i 90 min.). Ovo je dato na slikama 5.26, 5.27, 5.28 i 5.29, sa kojih se sagledava brzina promene konzistencije.



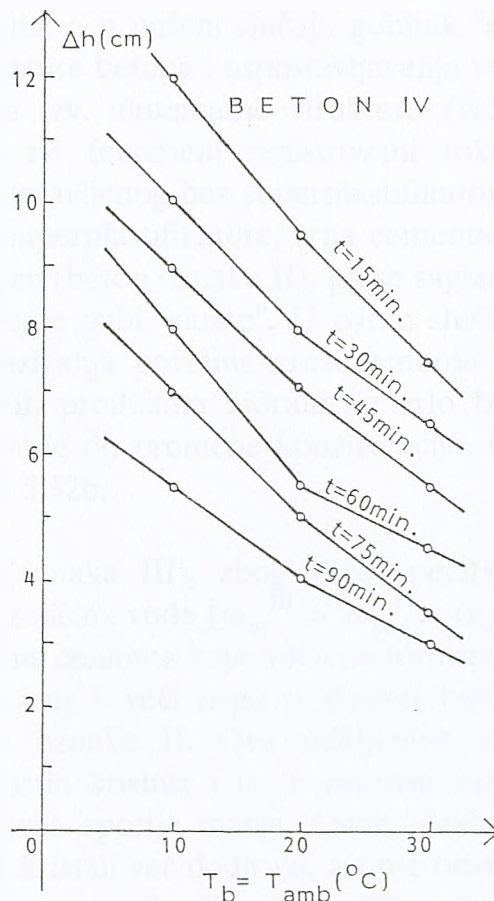
Sl. 5.26 Brzina promene sleganja za beton I u funkciji $T_b = T_{amb}$



Sl. 5.27 Brzina promene sleganja za beton II u funkciji $T_b = T_{amb}$

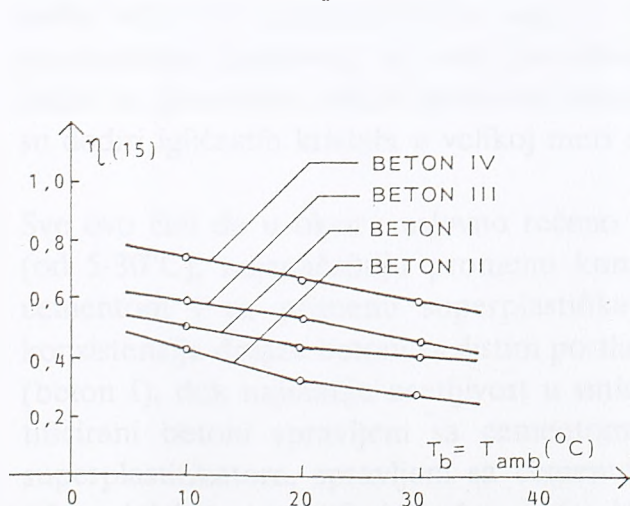


Sl. 5.28 Brzina promene sleganja za beton III u funkciji $T_b = T_{amb}$

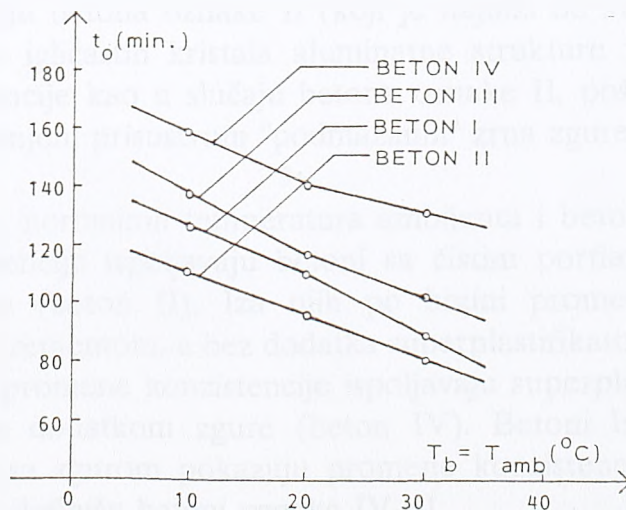


Sl. 5.29 Brzina promene sleganja za beton IV u funkciji $T_b = T_{amb}$

Isto tako, na slici 5.30, prikazuje se relativna mera sleganja nakon 15 minuta (u onom periodu kad se najdrastičnije menja) i to za različite betone i različite temperature, dok se na slici 5.31 prikazuje vreme t_0 kad konzistencija dostigne vrednost nula, opet za različite betone i različite temperature.



Sl. 5.30 Zavisnost relativne mere sleganja $\eta(15)$ od vrste betona i temperature $T_b = T_{amb}$



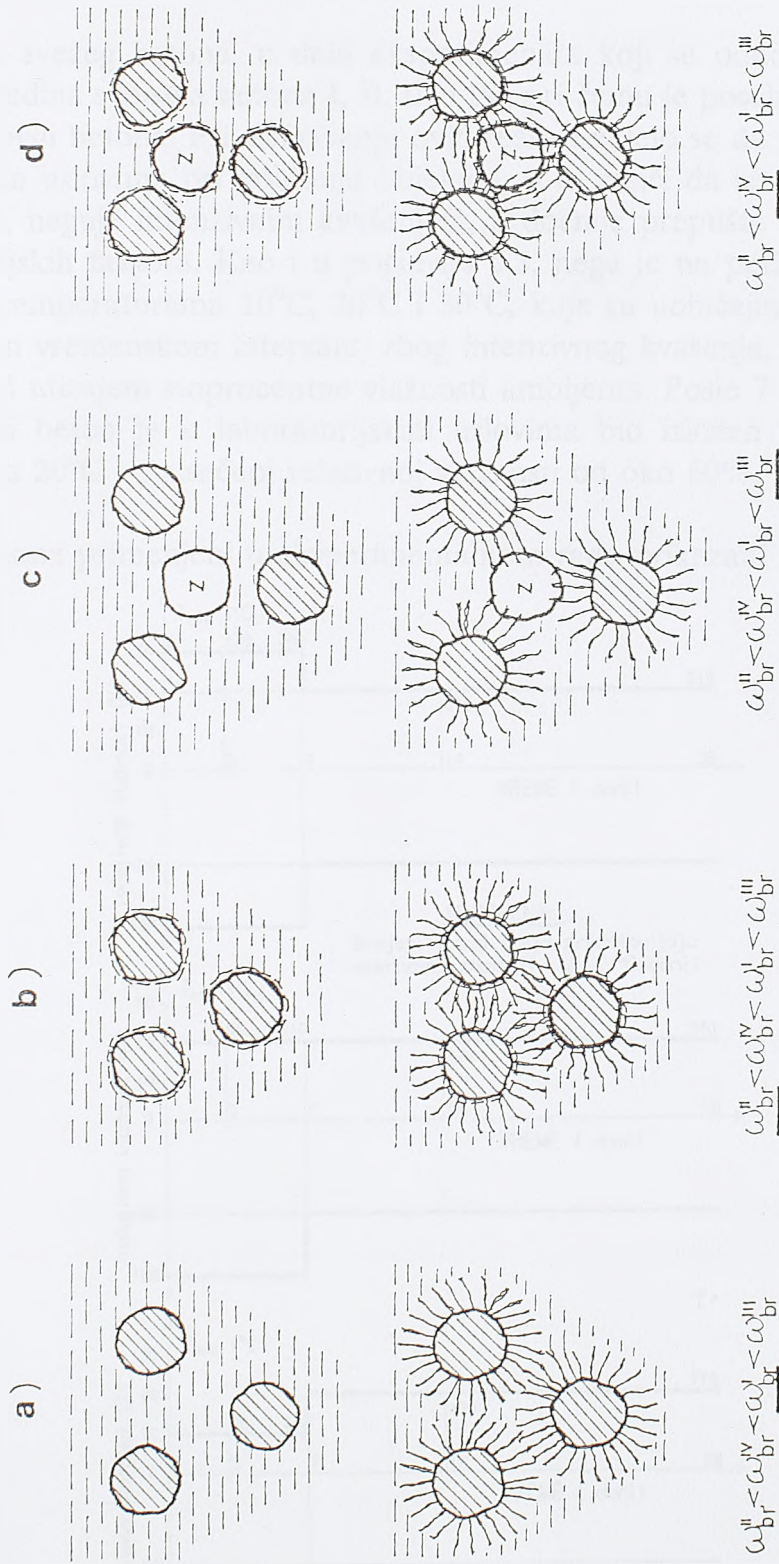
Sl. 5.31 Uticaj vrste betona i $T_b = T_{amb}$ na vreme kada sleganje postaje nula

Pošto je promena konzistencije betona u toku vremena, a u našem slučaju gubitak "slump-a", u prvom redu posledica formiranja početne strukture betona i uspostavljanja veza između zrna cementa posredstvom igličastih kristala tzv. aluminatne strukture (videti poglavlje 2.2.4), relativno se lako mogu objasniti svi fenomeni registrovani tokom sprovedenih ispitivanja. Naime, za razliku od betona spravljenog bez superplastifikatora i sa čistim portland cementom (oznaka I), pri primeni superplastifikatora, zrna cementa su (zbog upotrebe manje količine vode) bliža jedno drugom (beton oznake II), pa se saglasno tome brže uspostavljaju veze između zrna, a time i brže gubi "slump". U ovom slučaju, dakle, bez obzira na efekat hidrodinamičkog podmazivanja površina zrna cementa pri primeni superplastifikatora, efekti formiranja početnih produkata hidratacije vrlo brzo (videti poglavlje 2.2.5), zbog odnosa $\omega_{br}^{II} < \omega_{br}^I$, dovode do promene konzistencije. Ovi fenomeni se šematski mogu ilustrovati slikama 5.32a i 5.32b.

U slučaju upotrebe cementa sa dodatkom zgure (oznaka III), zbog veće specifične površine zrna, potrebna je za istu konzistenciju i veća količina vode ($\omega_{br}^{III} > \omega_{br}^I > \omega_{br}^{II}$ - videti tabelu 5.10), pa je shodno tome i razmak onih zrna cementa koja utiču na formiranje početne aluminatne strukture - portland cementnih zrna - veći nego u slučaju betona oznake I, a naročito veći nego u slučaju betona oznake II. Ova udaljenost zrna onemogućava u prvo vreme čvršće povezivanje igličastih kristala i to je osnovni razlog zbog koga se u slučaju betona oznake III konzistencija sporije menja. Ovde, dakle, u vremenu za koje se u slučaju betona oznake I igličasti kristali već dodiruju, a time dovode i do određene promene konzistencije, a u slučaju betona oznake II već prepliću i čvrsto povezuju, efekat prisustva ovih kristala na konzistenciju nije toliko izražen jer su oni u velikom procentu bez međusobnog dodira i u značajnoj meri samo tangiraju susedna zrna cementa - u velikoj meri zrna zgure. Ovaj slučaj se može ilustrovati slikom 5.32c.

Slučaj betona i promene njegove konzistencije pri primeni cementa sa zgurom i uz prisustvo superplastifikatora predstavljen je na sl. 5.32d, gde je na isti način kao i u prethodnim slučajevima dat šematski prikaz formiranja igličaste strukture koja odgovara jednom istom vremenu računatom od momenta mešanja cementa i vode. Ovde je prisutan nešto veći vodocementni faktor nego u slučaju betona oznake II (koji je najniži od svih razmatranih slučajeva), ali sada povezivanje igličastih kristala aluminatne strukture ne može da proizvede efekat promene konzistencije kao u slučaju betona oznake II, pošto su dodiri igličastih kristala u velikoj meri smanjeni prisustvom "podmazanih" zrna zgure.

Sve ovo čini da u okviru uslovno rečeno tzv. normalnih temperatura ambijenta i betona (od 5-30°C), najznačajniju promenu konzistencije ispoljavaju betoni sa čistim portland cementom i uz primenu superplastifikatora (beton II). Iza njih po brzini promene konzistencije dolaze betoni sa čistim portland cementom, a bez dodatka superplastifikatora (beton I), dok najmanju osetljivost u smislu promene konzistencije ispoljavaju superplastificirani betoni spravljeni sa cementom sa dodatkom zgure (beton IV). Betoni bez superplastifikatora, spravljeni sa cementom sa zgurom pokazuju promene konzistencije (sleganja) koje se kreću između granica koje definišu betoni oznaka IV i I.



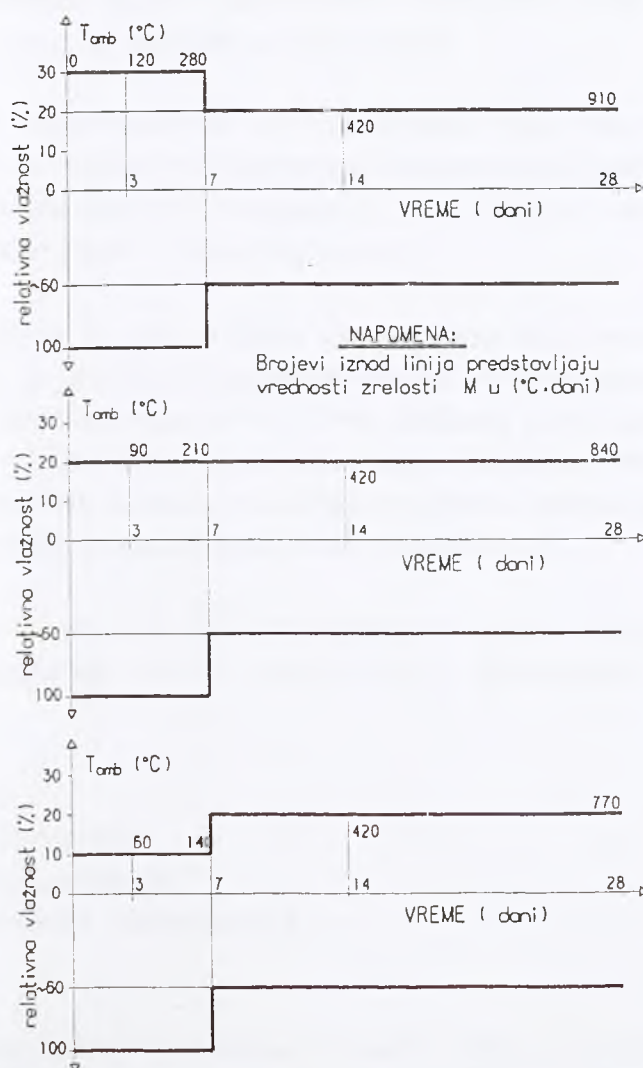
Sl. 5.32 Šematski prikaz formiranja početnih struktura betona I (a), II (b), III (c) i IV (d)

5.4 ISPITIVANJA NA OČVRSLJOM BETONU

5.4.1 Planiranje eksperimenta

Kao i u slučaju svežeg betona, u delu eksperimenata koji se odnose na očvršli beton, ispitivana su pojedina svojstva betona I, II, III i IV, pri čemu je posebna pažnja posvećena režimima nege ovih betona. Pri definisanju ovih režima želelo se da nega u najvećoj meri odgovara realnim uslovima pri građenju objekata, a to znači da se beton u prvo vreme, najčešće 7 dana, neguje intenzivnim kvašenjem, a docnije prepušta delovanju spoljašnjih termohigrometrijskih faktora. Kao i u poglavlju 5.3, nega je na početku, u prvih 7 dana sprovedena na temperaturama 10°C, 20°C i 30°C, koje su uobičajene za naše klimatsko područje i u tom vremenskom intervalu, zbog intenzivnog kvašenja, može se smatrati da je beton bio pod uticajem stoprocentne vlažnosti ambijenta. Posle 7 dana nege o kojoj je napred bilo reči beton je u laboratorijskim uslovima bio izložen srednjoj temperaturi ambijenta od cca 20°C i prosečnoj relativnoj vlažnosti od oko 60%.

Režimi nege betona primenjeni u eksperimentalnom radu prikazani su na sl. 5.33.



Sl. 5.33 Termohigrometrijski režimi nege betona

Kao što se vidi, temperaturni faktor je variran samo u prvih 7 dana, dok je u narednom periodu on bio konstanta za sve betone. Ovakav koncept eksperimentalnog rada je u skladu sa velikim brojem eksperimentalnih radova u svetu, o kojima je već bilo reči u poglavlju 4.4, na osnovu kojih sledi da u fazi očvršćavanja betona, odnosno tokom hidratacije, presudnu ulogu na svojstva očvrstlog betona imaju uslovi kojima je on bio izložen u prvih 7 dana.

Kao što se može zaključiti iz napred rečenog, sve karakteristike očvrstlih betona I, II, III i IV na ovaj način su svedene na sledeće uticajne parametre:

- na količinu zgure u okviru primenjenog cementa (koja je usvojena u iznosima $z = 0\%$ i $z = 30\%$);
- na sadržaj superplastifikatora u betonu (koji je iznosio $sp = 0\%$ i $sp = 1\%$);
- na temperaturu kojoj je beton bio izložen u prvih 7 dana, a koja je iznosila $T = 10^{\circ}\text{C}$, $T = 20^{\circ}\text{C}$ i $T = 30^{\circ}\text{C}$ (ostali termohigrometrijski parametri - relativne vlažnosti sredine tokom i posle završetka nege i temperatura ambijenta posle 7 dana nege -u posmatranom slučaju mogu se smatrati za konstante).

Ovde se još jednom napominje da cilj istraživanja nije bio razmatranje pojedinih karakteristika betona u uslovima tzv. ekstremnih temperatura, već temperatura koje se u našim klimatskim uslovima smatraju normalnim, pa su stoga i usvojeni napred navedeni temperaturni nivoi tokom prvih 7 dana negovanja.

Na ovaj način koncipiran je tzv. aktivni eksperiment koji podrazumeva istovremeno variranje nekoliko faktora (kod pasivnog eksperimenta varira se samo jedan uticajni faktor, dok se ostali drže na konstantnom nivou). Ova okolnost je od značaja stoga što se time na osnovu dovoljno velikog broja podataka mogu formirati matematički modeli koji adekvatno opisuju zavisnosti između pojedinih svojstava betona i posmatranih uticajnih faktora. Ovaj problem biće posebno analiziran u poglavlju 6.

Na očvrstim betonima oznaka I, II, III i IV negovanim prema uslovima prikazanim na slici 5.33 (četiri betona negovana na tri temperature), sprovedeno je ispitivanje sledećih karakteristika:

- čvrstoća pri pritisku,
- brzina prostiranja ultrazvuka,
- dinamičkih modula elastičnosti,
- zapreminskih deformacija - skupljanja i
- upijanja vode.

Treba istaći da je osim napred navedena tri načina nege, na određenom broju uzoraka betona sprovedeno i neprekidno negovanje u vodi (do 28 dana), pa su takvi uzorci poslužili kao etaloni pri poređenju rezultata ispitivanja.

5.4.2 Rezultati ispitivanja čvrstoće betona

Na spravljenim uzrocima betona (12 vrsta) praćen je prirast čvrstoće pri pritisku u starostima od 3, 7 i 28 dana.

Za ova ispitivanja upotrebljena su opitna tela - kocke sa ivicama 15 cm.

Čvrstoća pri pritisku ispitivana je pomoću hidrauličke prese tipa Amsler kapaciteta 3000 kN.

U tabeli 5.13 prikazane su dobijene čvrstoće pri pritisku u starostima od 3, 7 i 28 dana za uzorke betona oznaka I, II, III i IV negovane prvih 7 dana u komori na 10°C, 20°C ili 30°C i pri relativnoj vlažnosti $\varphi = 99 \pm 1\%$, a nakon toga do 28 dana u laboratorijskim uslovima. Svaka vrednost prikazana u tabeli predstavlja srednju vrednost od 3 rezultata merenja.

U datoj tabeli prikazane su i vrednosti čvrstoća pri pritisku istih betona ali negovanih neprekidno u vodi 28 dana.

Tabela 5.13 Čvrstoće pri pritisku betona I, II, III i IV u zavisnosti od načina nege

T_{amb} (°C)	Vrsta betona	Fluidocementni faktor	Čvrstoća pri pritisku (MPa) Starost uzoraka (dani)			Razlika čvrstoća $f_{k, H_2O}^{28} - f_k^{28}$ (MPa)	Povećanje čvrstoća betona negovanih u vodi (%)
			3	7	28		
10	I	0,535	20,4	25,9	36,4	4,3	11,81
	II	0,471	22,2	30,4	40,4	5,6	13,86
	III	0,544	15,0	19,6	30,6	6,2	20,26
	IV	0,486	17,4	23,6	37,2	7,3	19,62
20	I	0,545	23,3	28,9	37,8	2,9	7,70
	II	0,495	26,7	32,7	43,5	2,9	6,66
	III	0,570	16,2	22,2	31,4	4,2	13,40
	IV	0,525	19,2	25,5	38,2	5,0	13,09
30	I	0,556	24,1	30,3	37,4	2,6	6,95
	II	0,530	27,7	34,8	42,3	2,3	5,44
	III	0,584	18,9	25,2	30,8	3,3	10,70
	IV	0,549	22,8	30,2	36,4	5,8	15,93

U tabeli 5.13 je takođe prikazano i povećanje čvrstoća pri pritisku uzoraka negovanih u vodi u odnosu na čvrstoće uzoraka negovanih prema sl. 5.33. Kao što se vidi, betoni oznake III i IV, tj. oni spravljeni na bazi portland cementa sa dodatkom zgure, pokazuju veću razliku u čvrstoći zavisno od načina negovanja. Naime, povećanje čvrstoće pri pritisku uzoraka negovanih u vodi u odnosu na one negovane prema sl. 5.33 se kod betona III i betona IV kreće od 10,7-20,26% i od 13,09-19,62%, respektivno. U istoj starosti (28

dana), pri negovanju u vodi, kod betona II povećanje čvrstoće pri pritisku u odnosu na beton negovan na napred opisan način iznosi od 5,44-13,86%, a kod betona I od 6,95-11,81%. Na osnovu prikazanih rezultata sledi da su betoni spravljeni sa dodatkom zgre osetljiviji na način negovanja.

Rezultati ispitivanja čvrstoća pri pritisku dati su i grafički na slici 5.34, i to kako za različite starosti (3, 7 i 28 dana), tako i za različite temperature ($10^{\circ}\text{C}-\omega_{10}$, $20^{\circ}\text{C}-\omega_{20}$, $30^{\circ}\text{C}-\omega_{30}$) ambijenta. Na istoj slici, kao što se vidi, prikazane su i vrednosti čvrstoća pri pritisku dobijene na uzorcima koji su do 28 dana negovani u vodi. Iz navedenog se zapaža da su vrednosti čvrstoća pri pritisku uzoraka betona negovanih u vodi u istoj starosti (28 dana) u svim slučajevima veće od onih negovanih u konkretnim ambijentalnim uslovima.

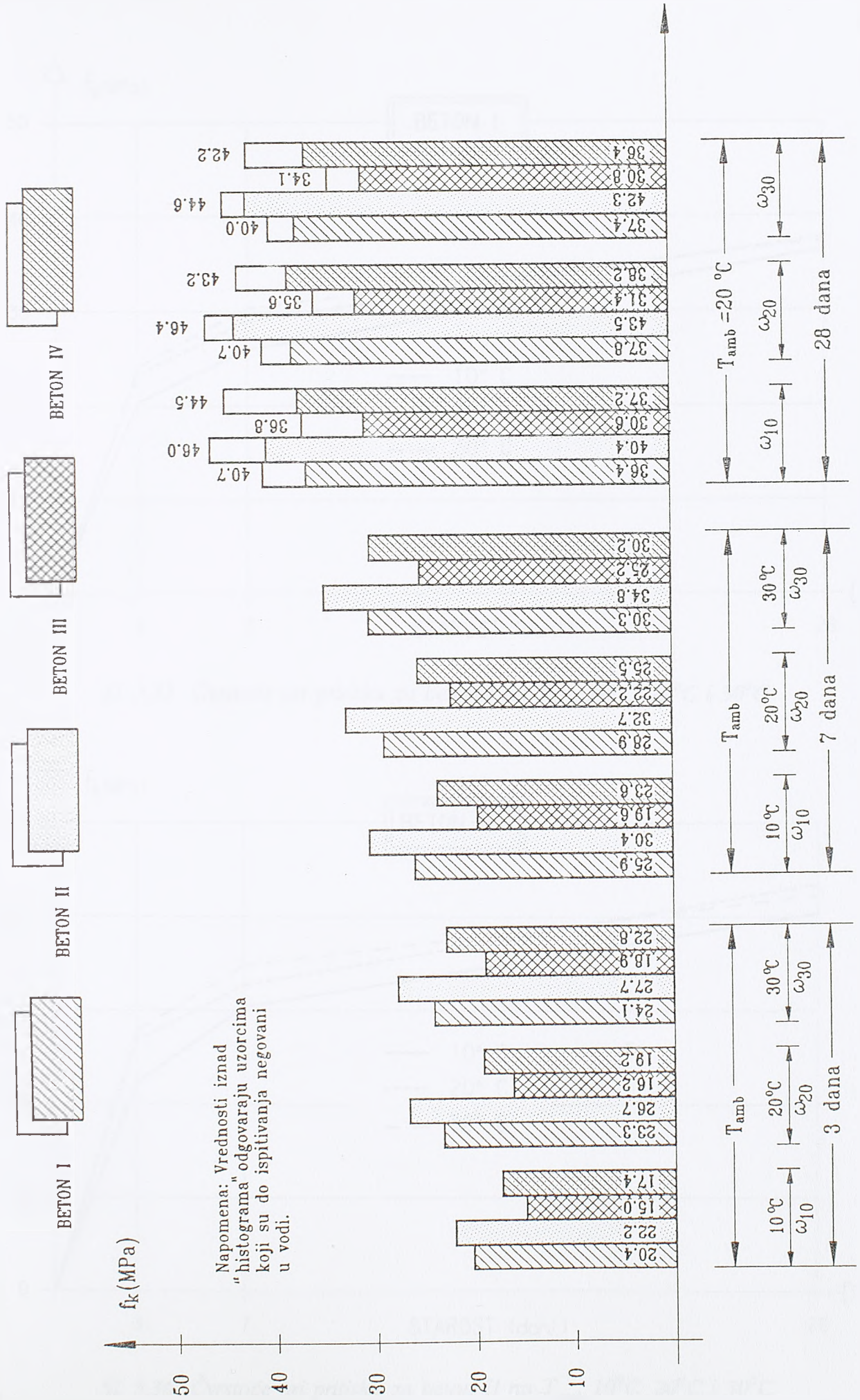
Prirast čvrstoća pri pritisku za betone I, II, III i IV negovane pri različitim temperaturnim uslovima prikazan je na slikama 5.35, 5.36, 5.37 i 5.38. Kao što se vidi, čvrstoće betona negovanih prvih 7 dana na 10°C , a kasnije u laboratorijskim uslovima, imaju po pravilu najniže vrednosti, što je svakako posledica usporene hidratacije cementa na nižim temperaturama. Čvrstoće istih ovih betona negovanih prvo 7 dana na 20°C , a posle u laboratorijskim uslovima, premašuju ili se veoma mnogo približavaju betonima negovanim na 30°C . Čvrstoće betona, pak, koji su prvo negovani na 30°C a kasnije u laboratorijskim uslovima, u prvo vreme (do 7 dana), kod svih betona premašuju one dobijene na 10°C ili na 20°C , da bi kasnije blago opale (28 dana).

Prirast čvrstoća pri pritisku u toku vremena može da se sagleda i sa slika 5.39, 5.40 i 5.41, na kojima se vrednosti čvrstoća daju za određenu vrstu betona, a za starosti od 3, 7 i 28 dana i temperature prvobitne nege od 10°C , 20°C i 30°C . Na navedenim slikama, za svaku vrstu betona prikazane su i vrednosti čvrstoća pri pritisku uzoraka betona koji su do 28 dana negovani u vodi. Kao što se vidi, čvrstoća pri pritisku, koja se veoma brzo razvija na 30°C i kod svih vrsta betona u starostima od 3 i 7 dana premašuje vrednosti dobijene na uzorcima negovanim prvobitno na 10°C i 20°C , u starosti od 28 dana kod svih mešavina pokazuje pad. Ovo je u neposrednoj vezi sa formiranjem strukture betona pri povišenoj temperaturi, o čemu je detaljno bilo govora u poglavlju 4.4. Ovaj trend se veoma jasno uočava i na slici 5.42 na kojoj su, za iste starosti betona (3, 7 i 28 dana) i temperature ambijenta 10°C , 20°C i 30°C , prikazane čvrstoće pri pritisku za sve vrste betona.

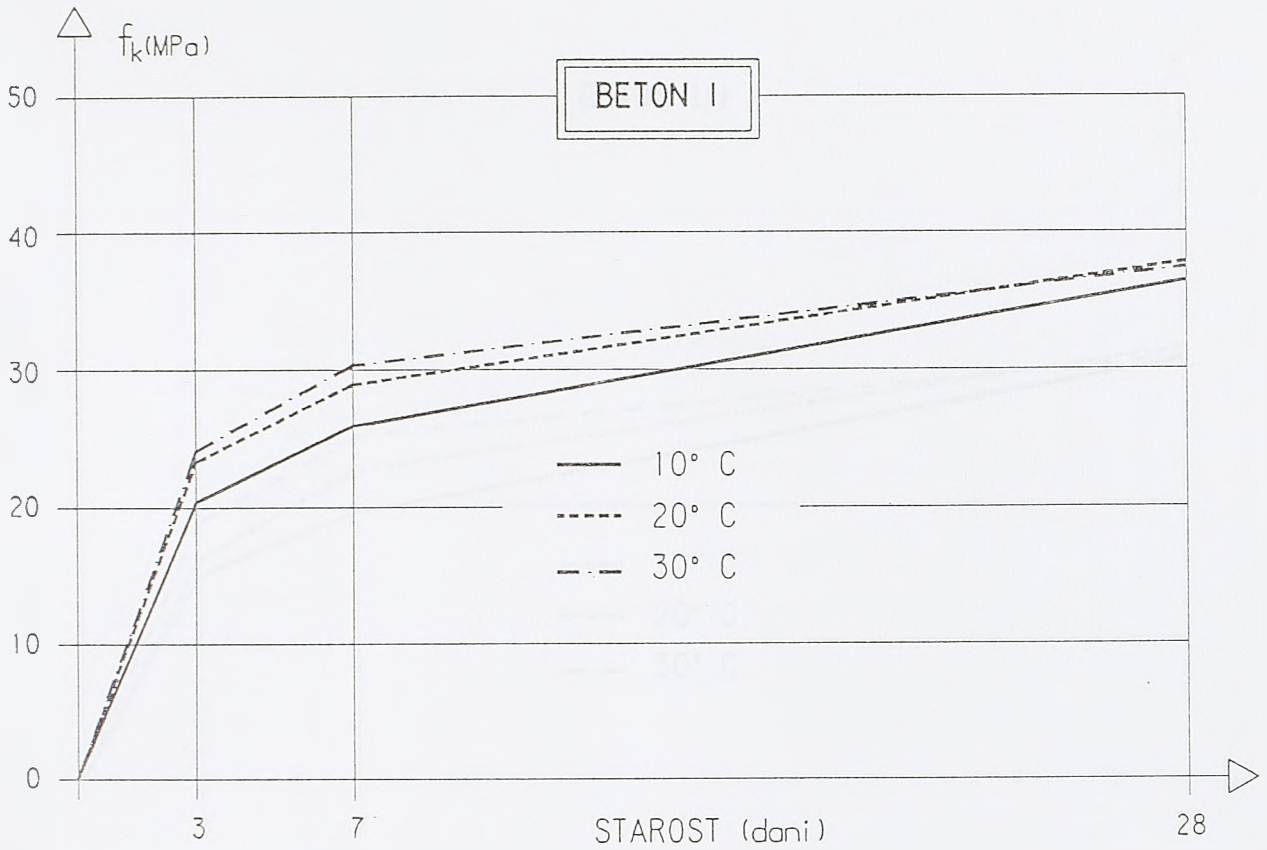
Na slici 5.43, pak, prikazane su vrednosti čvrstoća pri pritisku kako za različite starosti (3, 7 i 28 dana) betona, tako i za različite temperature negovanja.

Iz svega napred izloženog može se zaključiti sledeće:

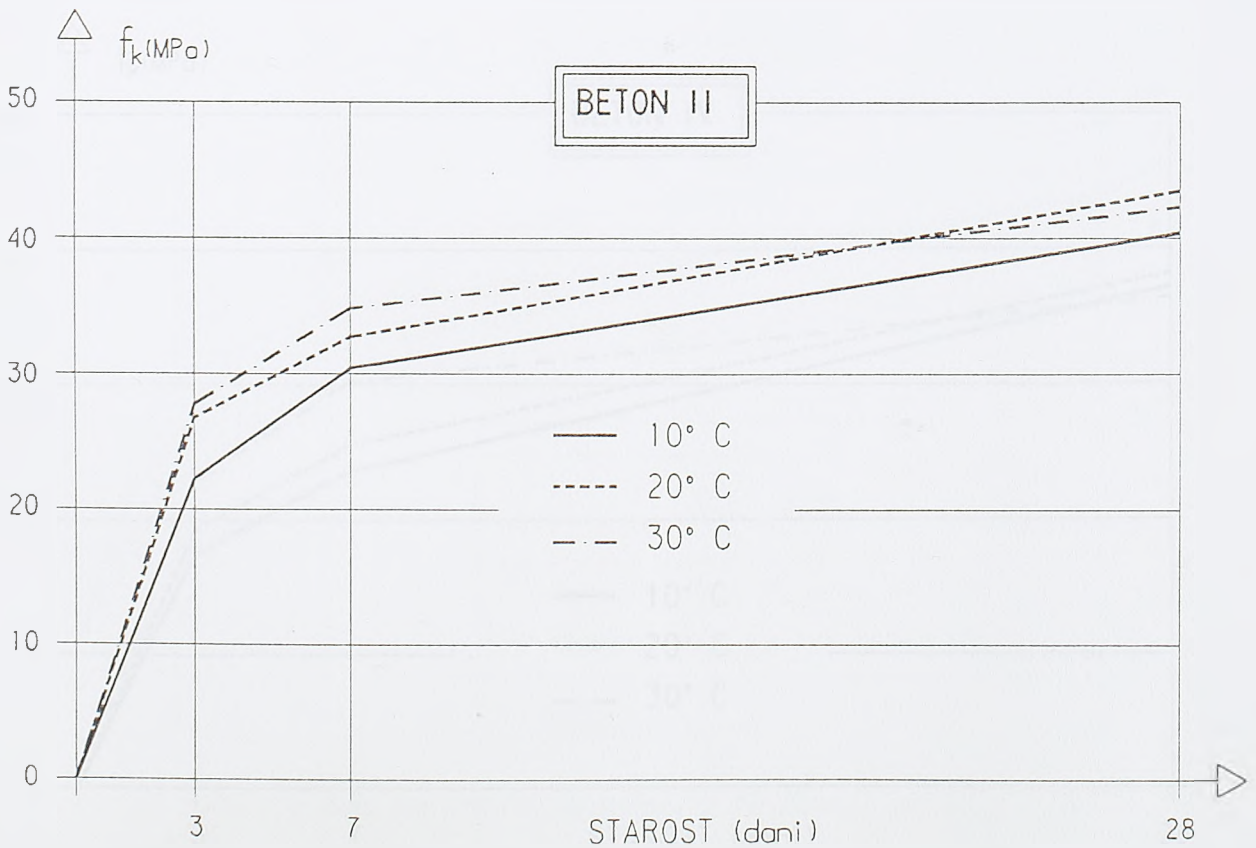
- Najbrži prirast čvrstoće, kako na temperaturi 10°C , tako i na temperaturama 20°C i 30°C , kao i najviše brojne vrednosti, ima beton oznake II (spravljen sa čistim portland cementom i uz prisustvo superplastifikatora). Iza njega, po brzini prirasta čvrstoće, dolazi beton oznake I (na bazi čistog portland cementa), pa beton IV (sa dodatkom zgre i uz prisustvo superplastifikatora), i na kraju beton oznake III.



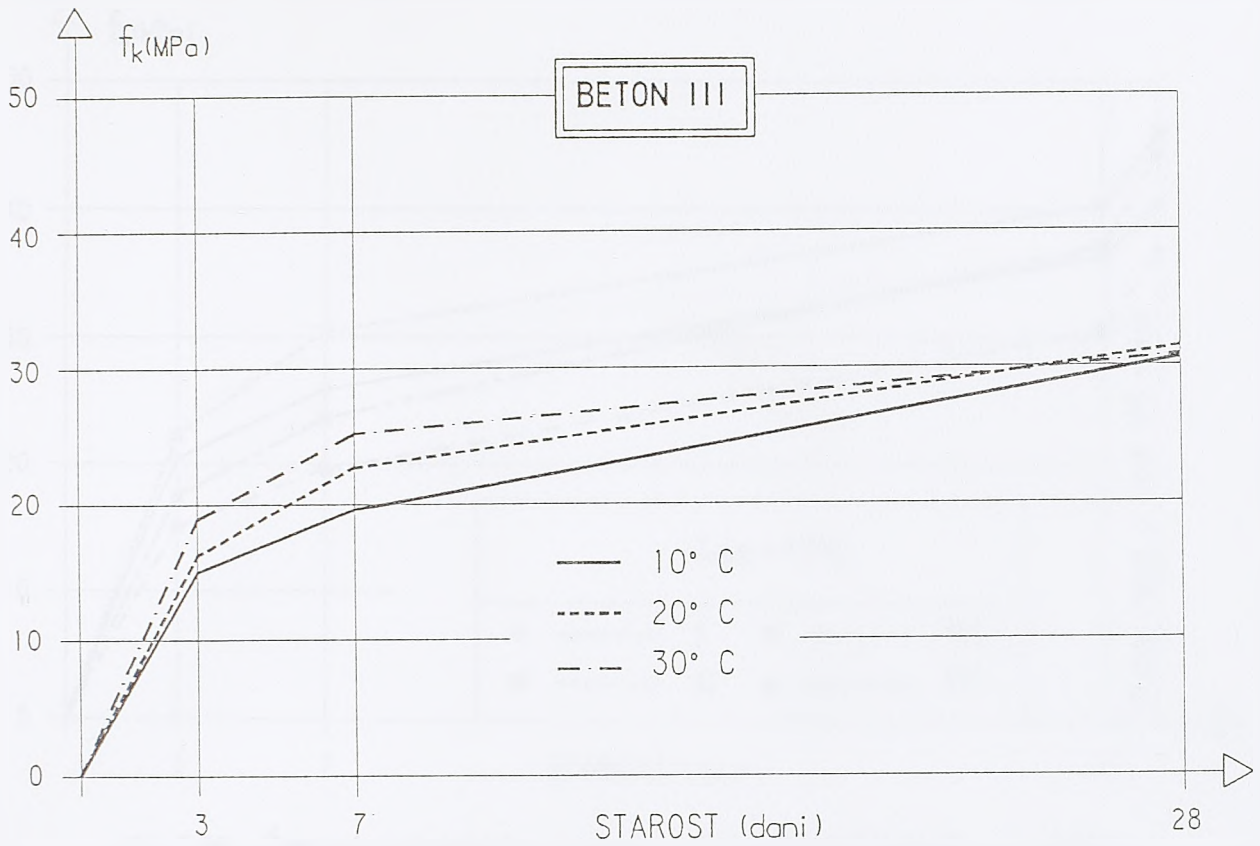
Sl. 5.34 Grafički prikaz čvrstoća pri pritisku za betone I, II, III i IV u različitim starostima i pri različitim T_{amb}



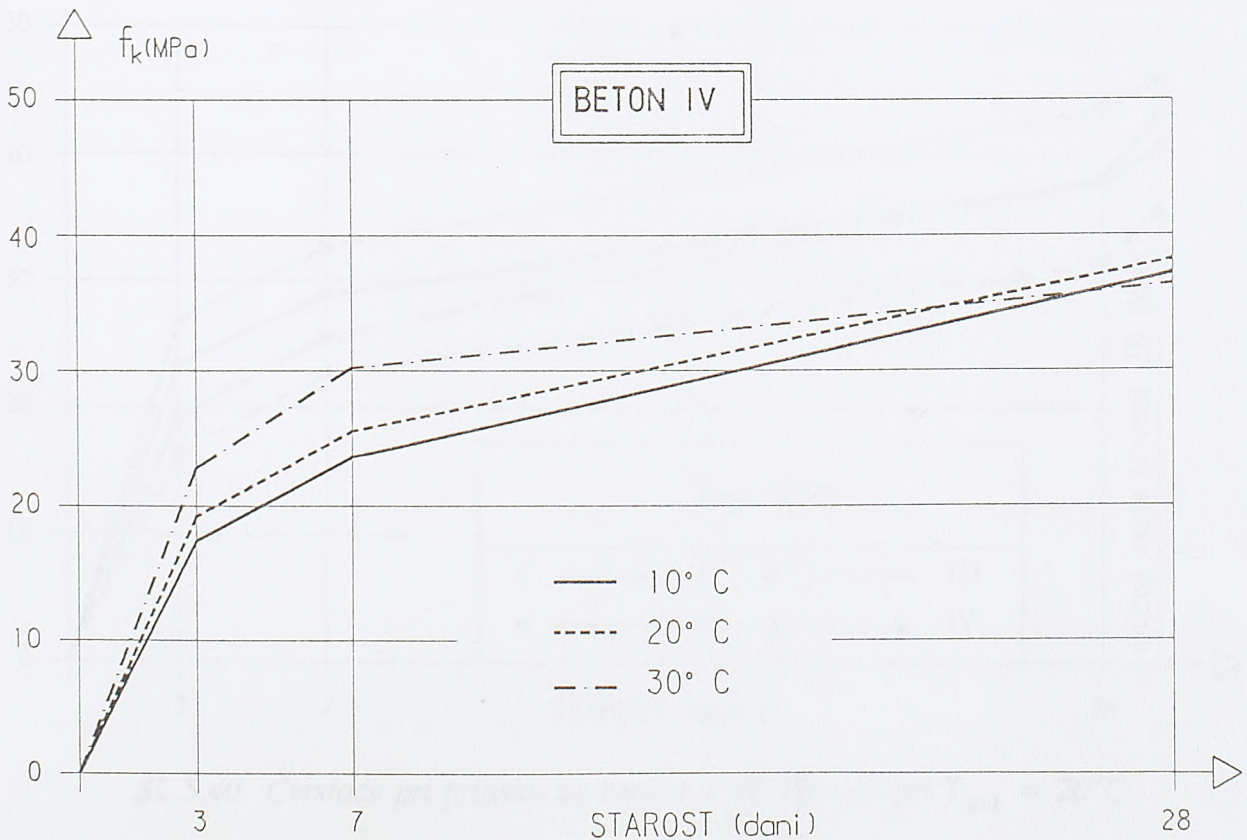
Sl. 5.35 Čvrstoće pri pritisku za beton I na T_{amb} 10°C, 20°C i 30°C



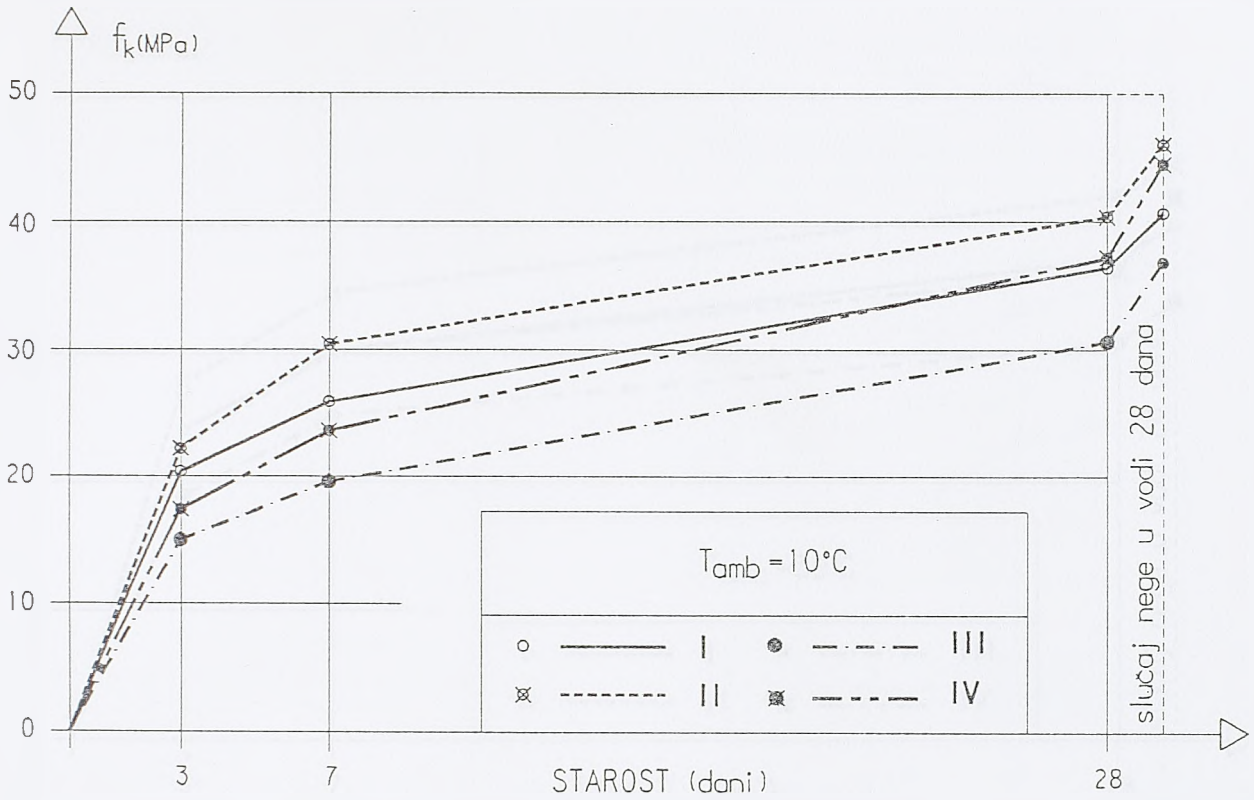
Sl. 5.36 Čvrstoće pri pritisku za beton II na T_{amb} 10°C, 20°C i 30°C



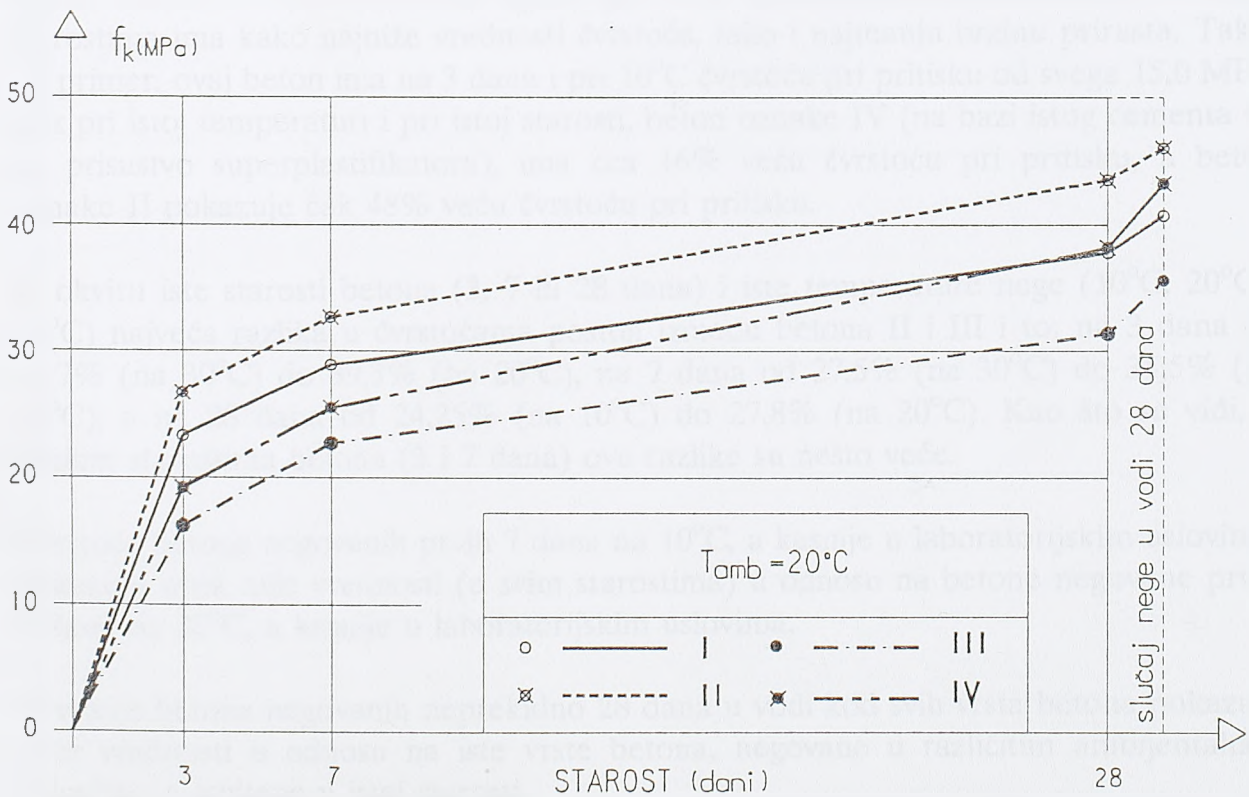
Sl. 5.37 Čvrstoće pri pritisku za beton III na T_{amb} 10°C, 20°C i 30°C



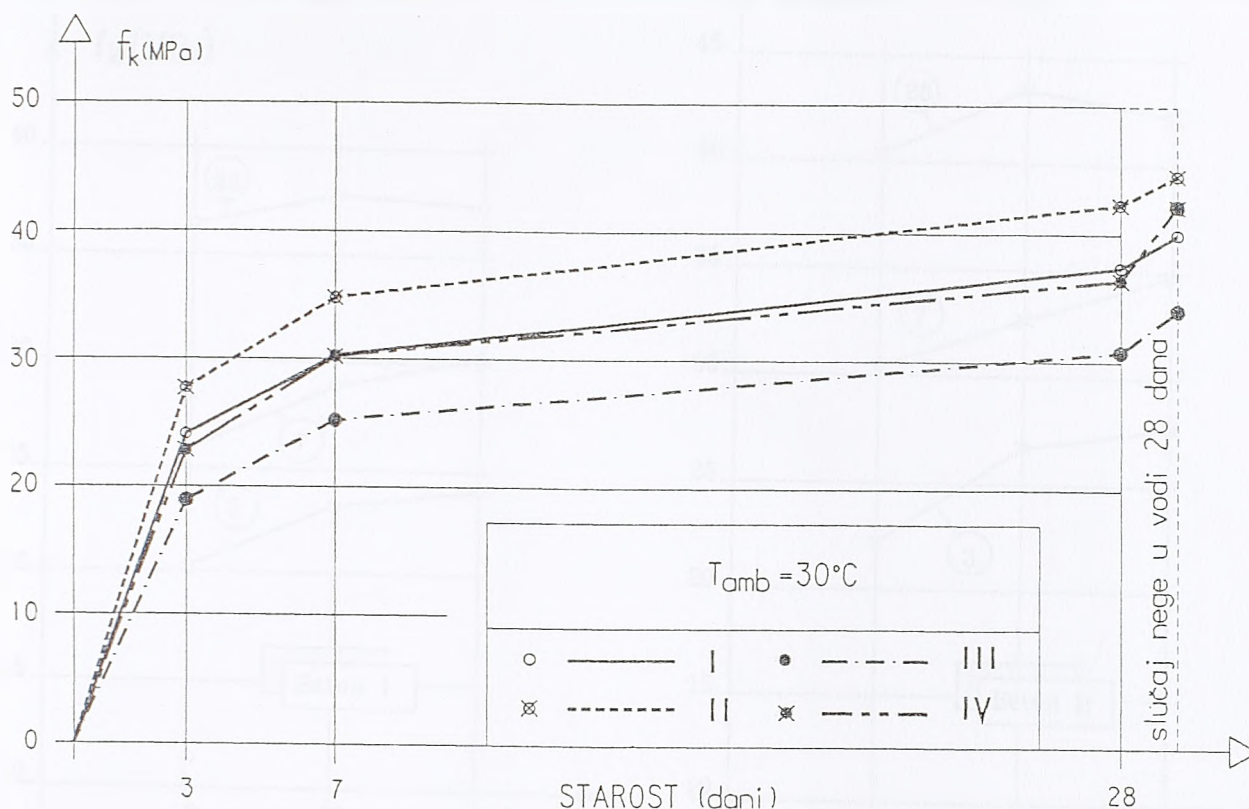
Sl. 5.38 Čvrstoće pri pritisku za beton IV na T_{amb} 10°C, 20°C i 30°C



Sl. 5.39 Čvrstoće pri pritisku za betone I, II, III i IV pri $T_{amb} = 10^\circ\text{C}$

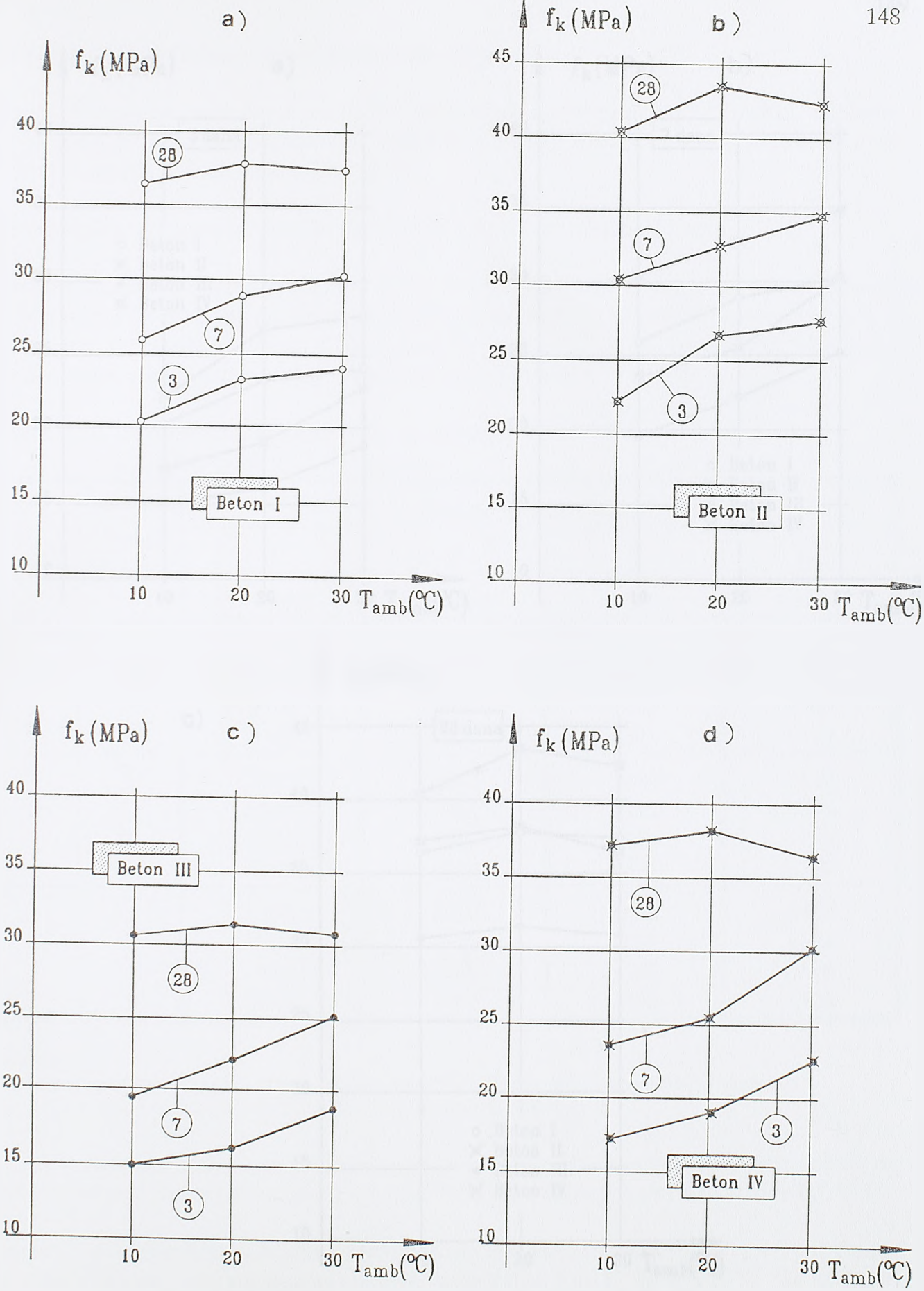


Sl. 5.40 Čvrstoće pri pritisku za betone I, II, III i IV pri $T_{amb} = 20^\circ\text{C}$

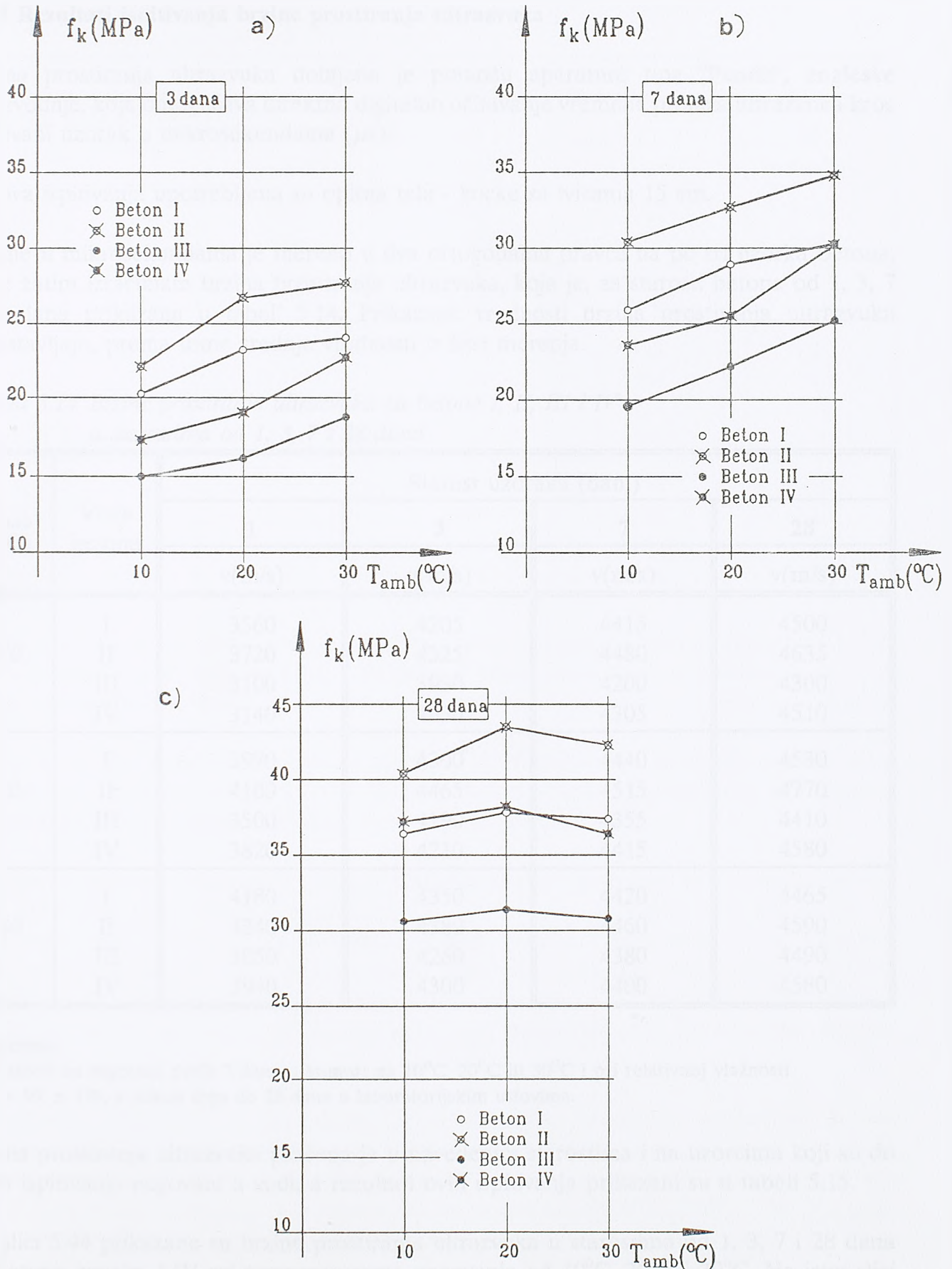


Sl. 5.41 Čvrstoće pri pritisku za betone I, II, III i IV pri $T_{amb} = 30^\circ\text{C}$

- Beton oznake III (sa dodatkom zgre) pri svim navedenim temperaturama i u svim starostima ima kako najniže vrednosti čvrstoće, tako i najmanju brzinu prirasta. Tako, na primer, ovaj beton ima na 3 dana i pri 10°C čvrstoću pri pritisku od svega 15,0 MPa, dok pri istoj temperaturi i pri istoj starosti, beton oznake IV (na bazi istog cementa ali uz prisustvo superplastifikatora), ima cca 16% veću čvrstoću pri pritisku, a beton oznake II pokazuje čak 48% veću čvrstoću pri pritisku.
- U okviru iste starosti betona (3, 7 ili 28 dana) i iste temperature nege (10°C , 20°C i 30°C) najveća razlika u čvrstoćama postoji između betona II i III i to: na 3 dana od 31,7% (na 30°C) do 39,3% (na 20°C), na 7 dana od 27,5% (na 30°C) do 35,5% (na 10°C), a na 28 dana od 24,25% (na 10°C) do 27,8% (na 20°C). Kao što se vidi, u ranijim starostima betona (3 i 7 dana) ove razlike su nešto veće.
- Čvrstoće betona negovanih prvih 7 dana na 10°C , a kasnije u laboratorijskim uslovima, pokazuju uvek niže vrednosti (u svim starostima) u odnosu na betone negovane prvih 7 dana na 20°C , a kasnije u laboratorijskim uslovima.
- Čvrstoće betona negovanih neprekidno 28 dana u vodi kod svih vrsta betona pokazuju veće vrednosti u odnosu na iste vrste betona, negovane u različitim ambijentalnim uslovima, a ispitane u istoj starosti.



Sl. 5.42 Prirast čvrstoća pri pritisku u starostima od 3, 7 i 28 dana za beton I (a), beton II (b), beton III (c) i beton IV (d)



Sl. 5.43 Prirast čvrstoće pri pritisku za betone I, II, III i IV u starostima od 3 dana (a), 7 dana (b) i 28 dana (c)

5.4.3 Rezultati ispitivanja brzine prostiranja ultrazvuka

Brzina prostiranja ultrazvuka dobijena je pomoću aparature tipa "Pundit", engleske proizvodnje, koja omogućava direktno digitalno očitavanje vremena prolaza ultrazvuka kroz ispitivani uzorak u mikrosekundama (μs).

Za ova ispitivanja upotrebljena su opitna tela - kocke sa ivicama 15 cm.

Vreme u mikrosekundama je mereno u dva ortogonalna pravca na po tri uzorka betona, pa je zatim izračunata brzina prostiranja ultrazvuka, koja je, za starosti betona od 1, 3, 7 i 28 dana prikazana u tabeli 5.14. Prikazane vrednosti brzina prostiranja ultrazvuka predstavljaju, prema tome srednje vrednosti iz šest merenja.

Tabela 5.14 Brzine prostiranja ultrazvuka za betone I, II, III i IV u starostima od 1, 3, 7 i 28 dana

T_{amb} ($^{\circ}\text{C}$)	Vrsta betona	Starost uzoraka (dani)			
		1	3	7	28
		v(m/s)	v(m/s)	v(m/s)	v(m/s)
10	I	3560	4205	4415	4500
	II	3720	4325	4480	4635
	III	3100	3930	4200	4300
	IV	3140	4030	4305	4510
20	I	3970	4300	4440	4530
	II	4100	4465	4515	4770
	III	3500	4190	4355	4410
	IV	3820	4210	4415	4580
30	I	4180	4350	4420	4465
	II	4240	4380	4460	4590
	III	3850	4260	4380	4490
	IV	3940	4300	4400	4580

Napomena:

Svi uzorci su negovani prvih 7 dana u komori na 10°C , 20°C ili 30°C i pri relativnoj vlažnosti $\varphi = 99 \pm 1\%$, a nakon toga do 28 dana u laboratorijskim uslovima.

Brzina prostiranja ultrazvuka praćena je u navedenim starostima i na uzorcima koji su do dana ispitivanja negovani u vodi, a rezultati ovih ispitivanja prikazani su u tabeli 5.15.

Na slici 5.44 prikazane su brzine prostiranja ultrazvuka u starostima od 1, 3, 7 i 28 dana za betone oznaka I-IV pri temperaturama negovanja od 10°C , 20°C i 30°C . Na istoj slici date su i brzine prostiranja ultrazvuka dobijene na uzorcima betona koji su do ispitivanja negovani u vodi. Kao što se vidi sa prikazane slike, brzine prostiranja ultrazvuka betona negovanih u vodi su po pravilu uvek veće od onih negovanih na napred pomenut način

Tabela 5.15 Brzine prostiranja ultrazvuka za betone I, II, III i IV negovane u vodi u starostima od 1, 3, 7 i 28 dana

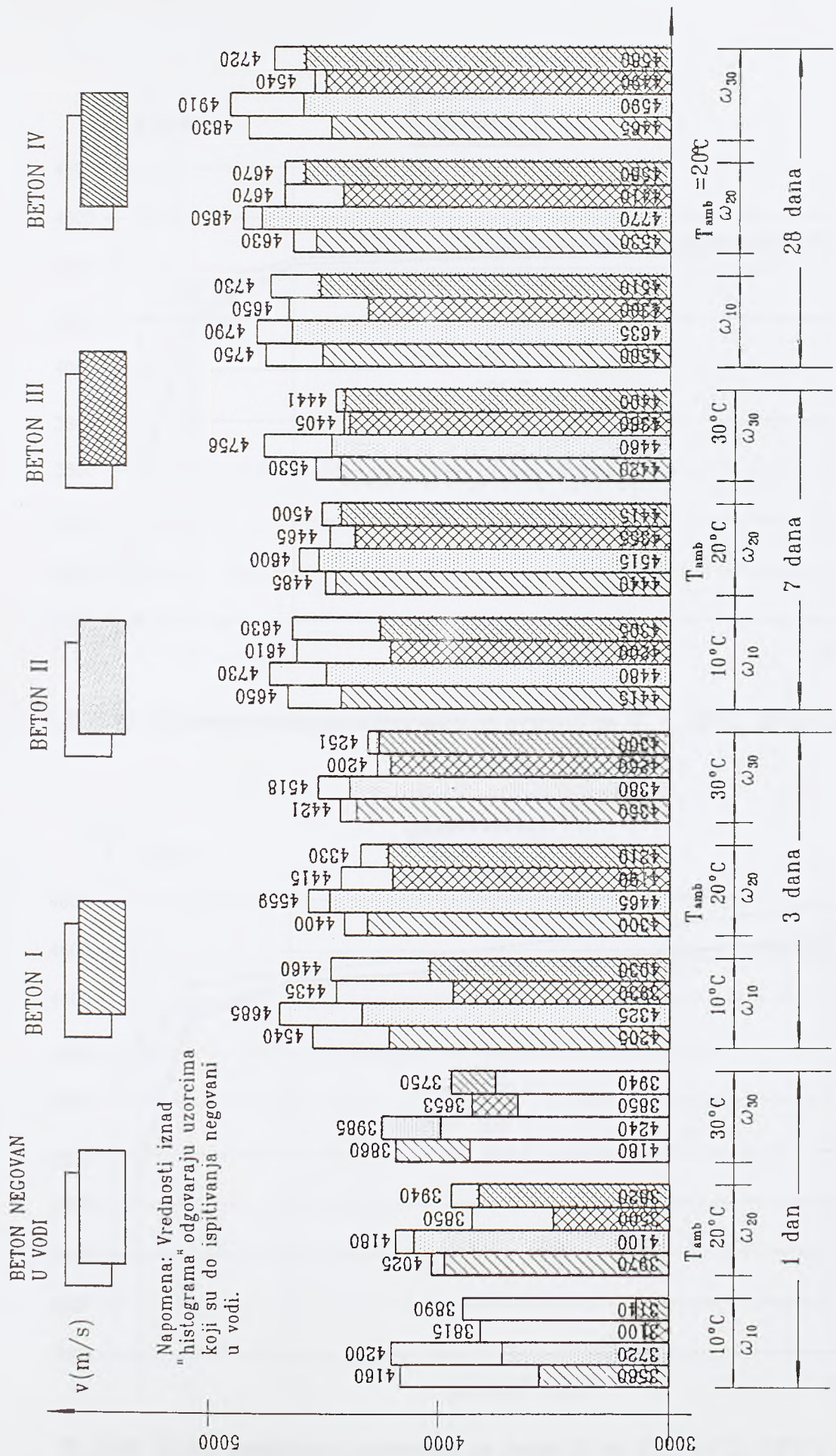
Vrsta betona	Fluidocementni faktor	Starost uzoraka (dani)			
		1 v (m/s)	3 v (m/s)	7 v (m/s)	28 v (m/s)
I	0,535	4160	4540	4650	4750
II	0,471	4200	4685	4730	4790
III	0,544	3815	4435	4610	4650
IV	0,486	3890	4460	4630	4730
I	0,545	4025	4400	4485	4630
II	0,495	4180	4559	4600	4850
III	0,570	3850	4415	4465	4670
IV	0,525	3940	4330	4500	4670
I	0,556	3860	4421	4530	4830
II	0,530	3985	4518	4756	4910
III	0,584	3653	4200	4405	4540
IV	0,549	3750	4251	4441	4720

u istoj starosti i za istu vrstu betona. Međutim, izuzeci postoje, pa tako za starost od 1 dan, na temperaturi 30°C, kod sve četiri vrste betona brzina prostiranja ultrazvuka je veća od brzine prostiranja ultrazvuka na betonima istog sastava, ali negovanog u vodi. Isto tako, pri starosti od 3 dana na 30°C, kod betona III i IV javlja se povećanje brzine prostiranja ultrazvuka u odnosu na iste betone negovane u vodi. Naravno, ovaj fenomen se javlja samo pri malim starostima betona. Ovo se može objasniti ubrzanom početnom hidratacijom cementa na 30°C, u odnosu na onu koja se lagano obavlja u vodi.

Nadalje, na slikama 5.45, 5.46, 5.47 i 5.48, vrednosti brzina prostiranja ultrazvuka za betone I, II, III i IV u toku vremena, zavisno od T_{amb} , prikazane su grafički. Kao što se vidi sa navedenih slika, beton II (spravljen sa čistim portland cementom i uz prisustvo superplastifikatora) pri svim ambijentalnim uslovima pokazuje veće vrednosti brzine prostiranja ultrazvuka u odnosu na beton I. Isto tako, beton IV pokazuje veće vrednosti brzina prostiranja ultrazvuka od betona II, u istim starostima i pri istim temperaturama ambijenta.

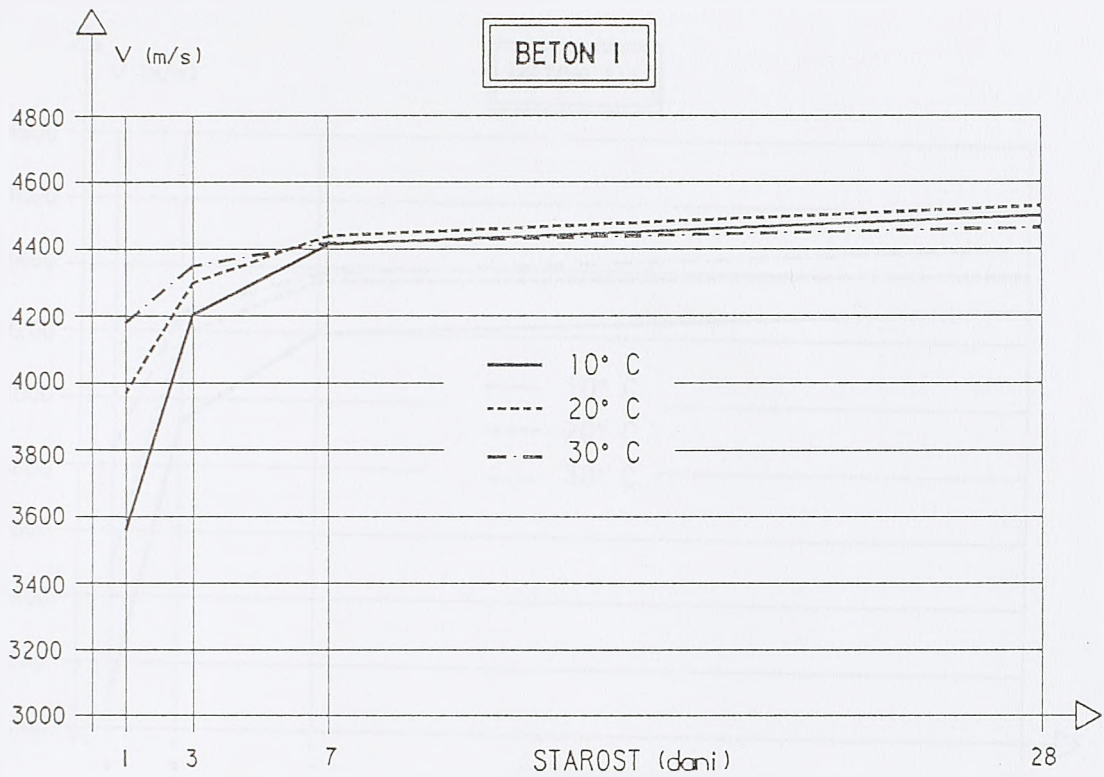
Na slikama 5.49, 5.50 i 5.51, pak, prikazane su brzine prostiranja ultrazvuka u toku vremena, kako za betone negovane na raznim ambijentalnim temperaturama, tako i za betone negovane u vodi. Na svakoj slici prikazano je po osam krivih - pri tome punije linije označavaju brzine prostiranja ultrazvuka betona negovanih na 10°C, 20°C i 30°C, a tanje linije označavaju brzine prostiranja ultrazvuka betona koji su negovani u vodi.

Napominje se da se dobijeni rezultati ispitivanja, prikazani na navedenim slikama, mogu porediti za istu vrstu betona i pri istoj starosti.

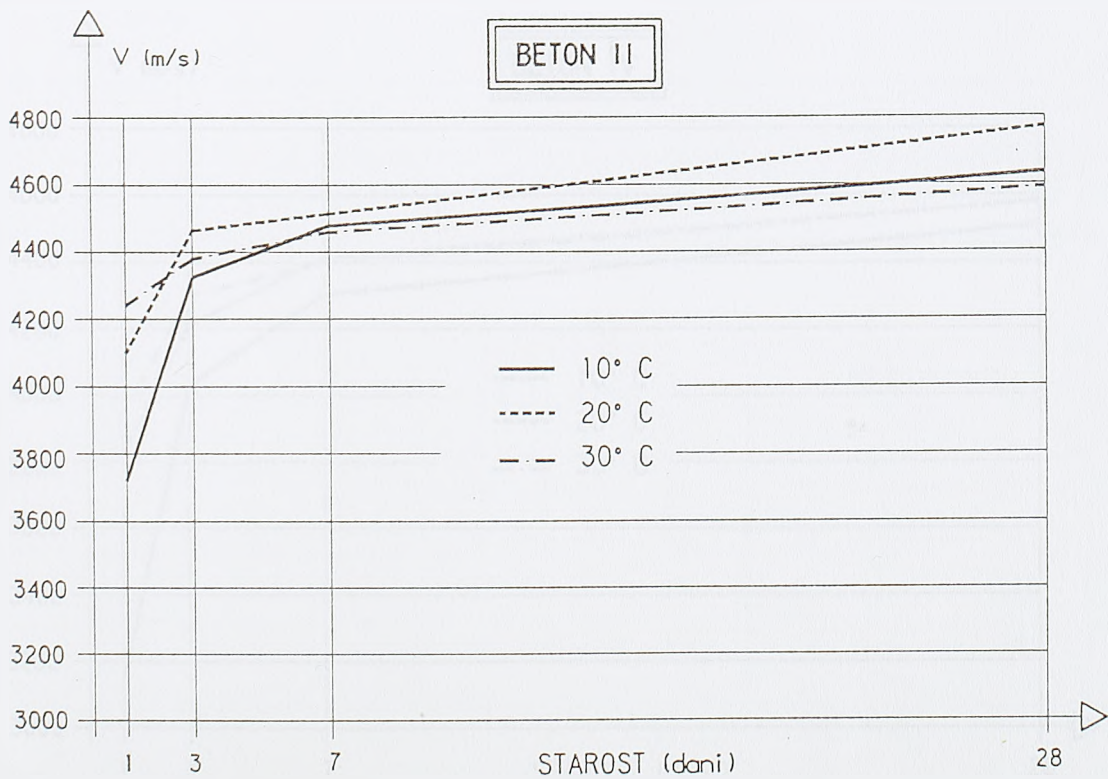


Napomena: Vrednosti iznad "histograma" odgovaraju uzorcima koji su do ispitivanja negovani u vodi.

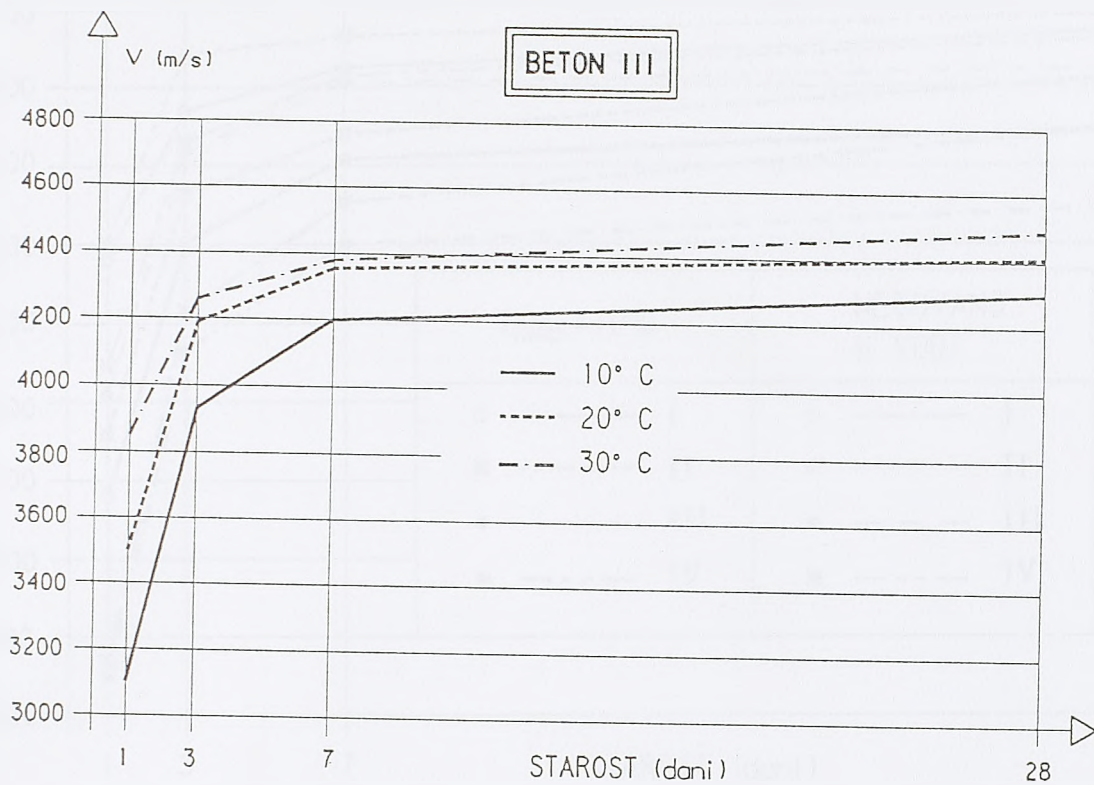
Sl. 5.44 Grafički prikaz brzine prostriranja ultrazvuka za betone I, II, III i IV u starosima od 1, 3, 7 i 28 dana pri različitim T_{amb}



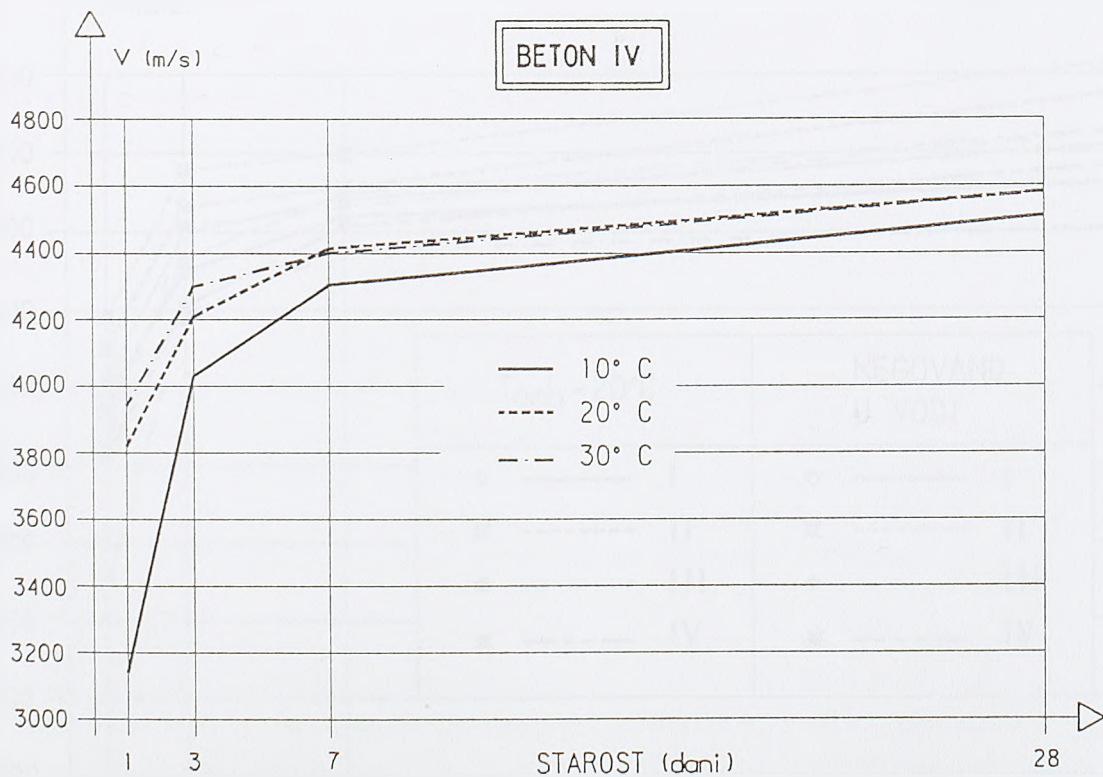
Sl. 5.45 Brzine prostiranja ultrazvuka za beton I na T_{amb} 10°C, 20°C i 30°C



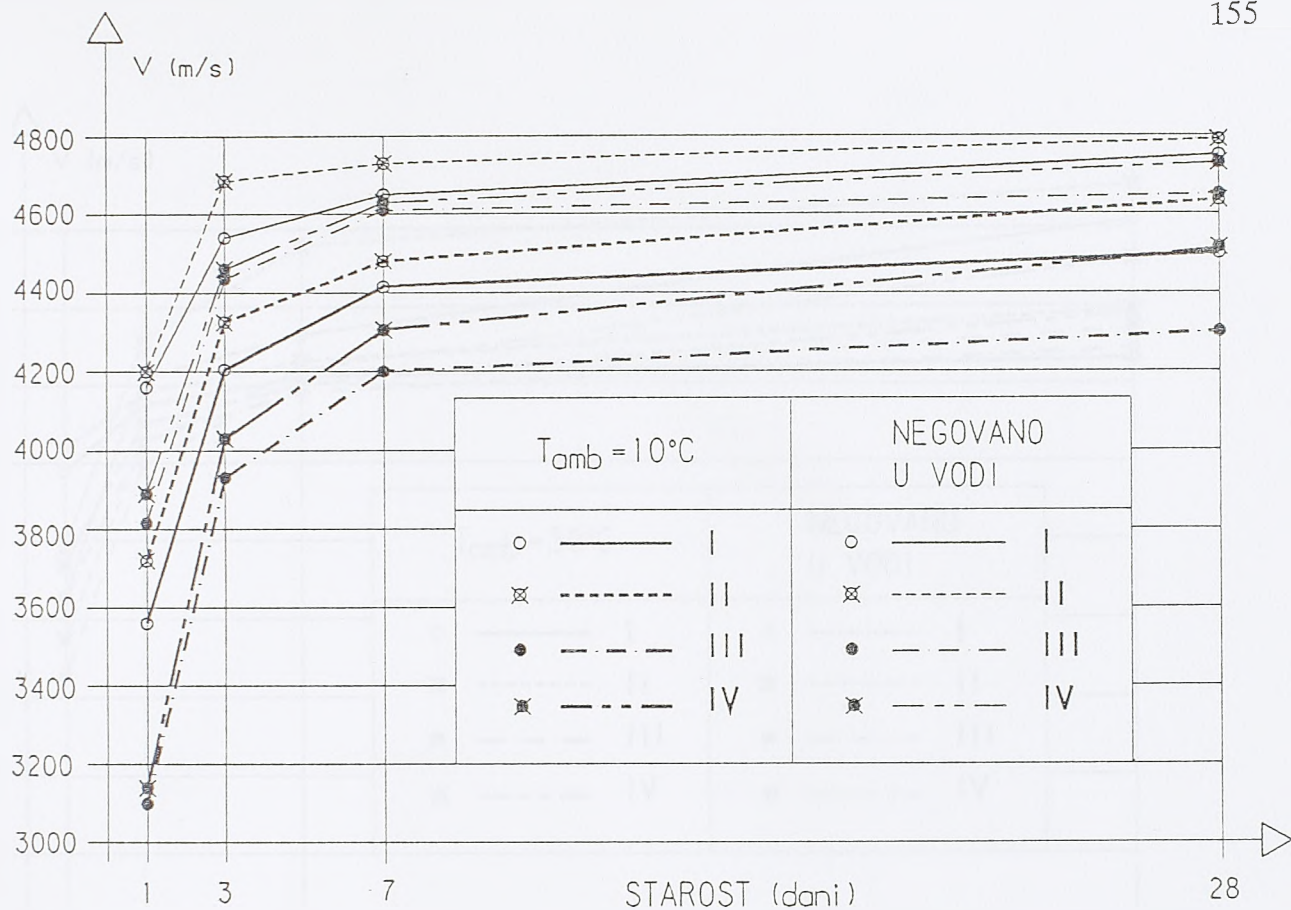
Sl. 5.46 Brzine prostiranja ultrazvuka za beton II na T_{amb} 10°C, 20°C i 30°C



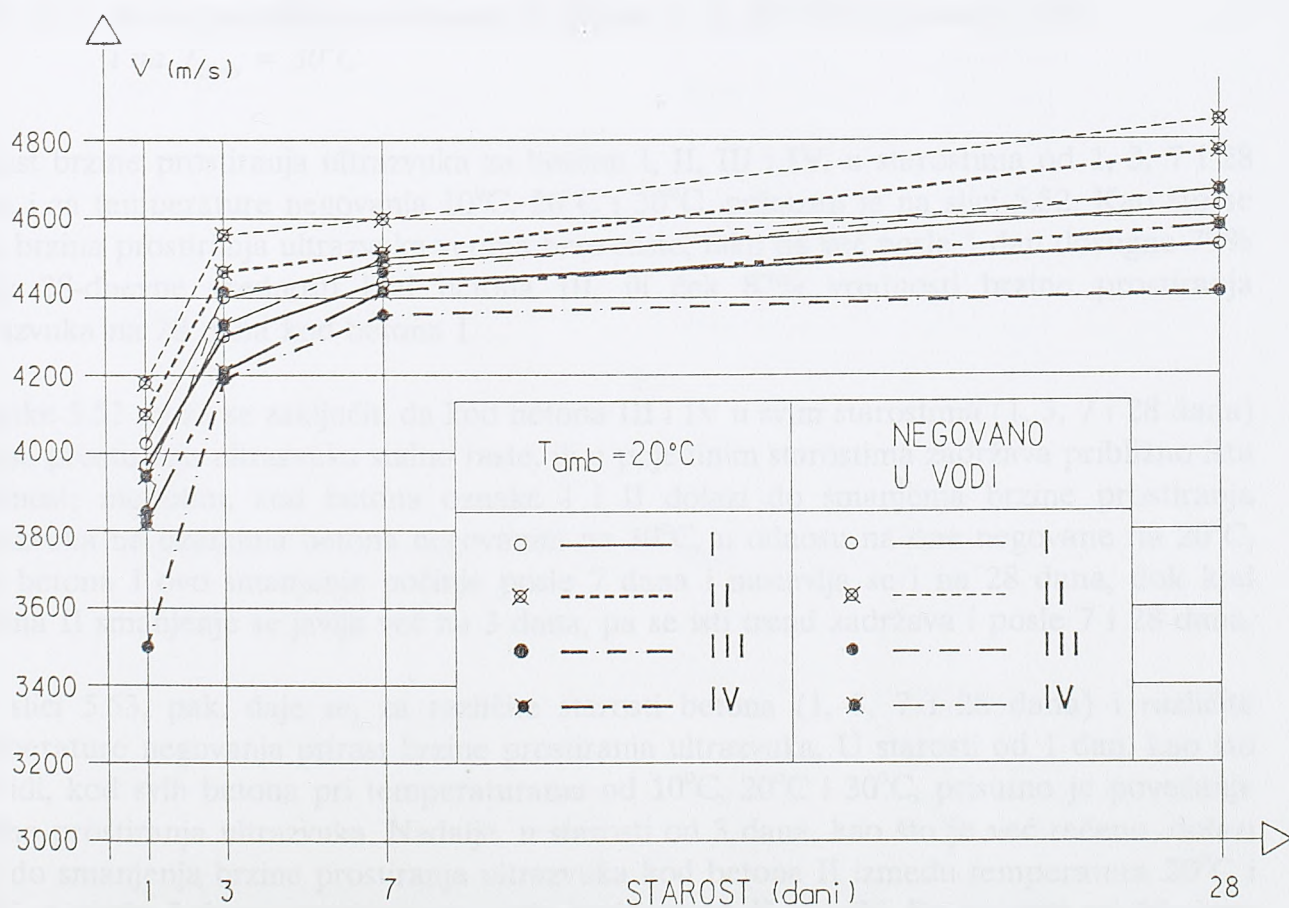
Sl. 5.47 Brzine prostiranja ultrazvuka za beton III na T_{amb} 10°C, 20°C i 30°C



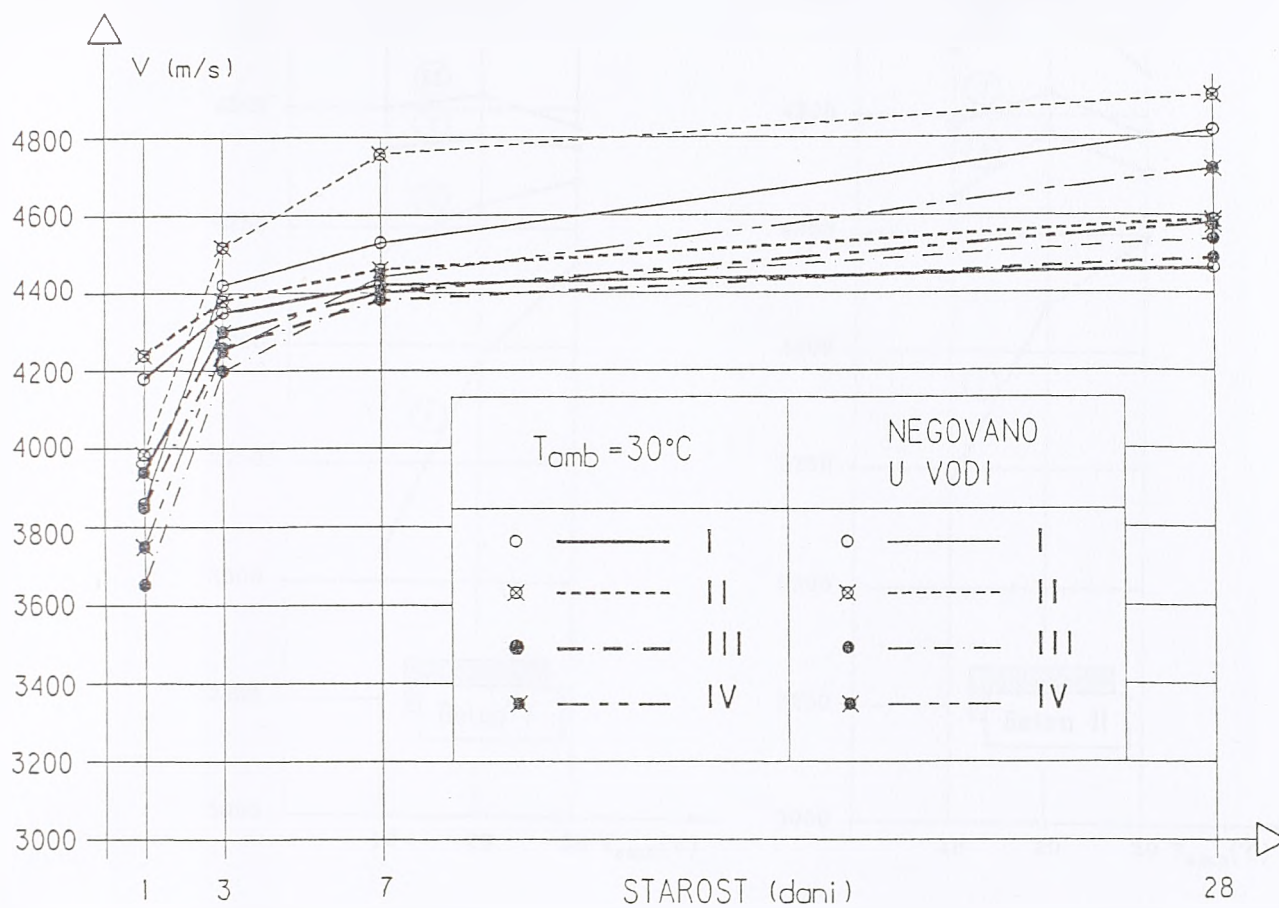
Sl. 5.48 Brzine prostiranja ultrazvuka za beton IV na T_{amb} 10°C, 20°C i 30°C



Sl. 5.49 Brzine prostiranja ultrazvuka za betone I, II, III i IV negovane u vodi i na $T_{amb} = 10^{\circ}\text{C}$



Sl. 5.50 Brzine prostiranja ultrazvuka za betone I, II, III i IV negovane u vodi i na $T_{amb} = 20^{\circ}\text{C}$

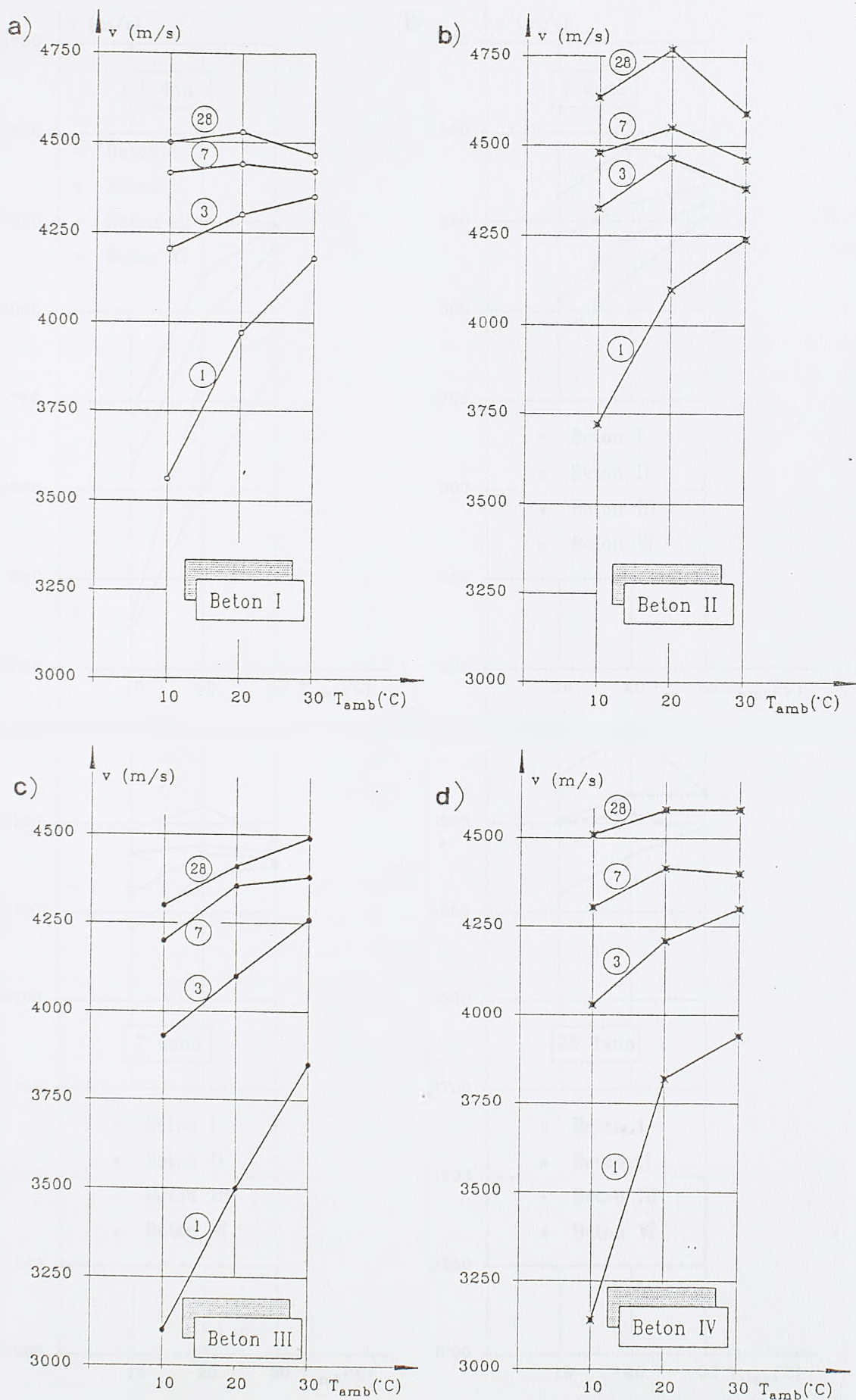


Sl. 5.51 Brzine prostiranja ultrazvuka za betone I, II, III i IV negovane u vodi i na $T_{amb} = 30^{\circ}\text{C}$

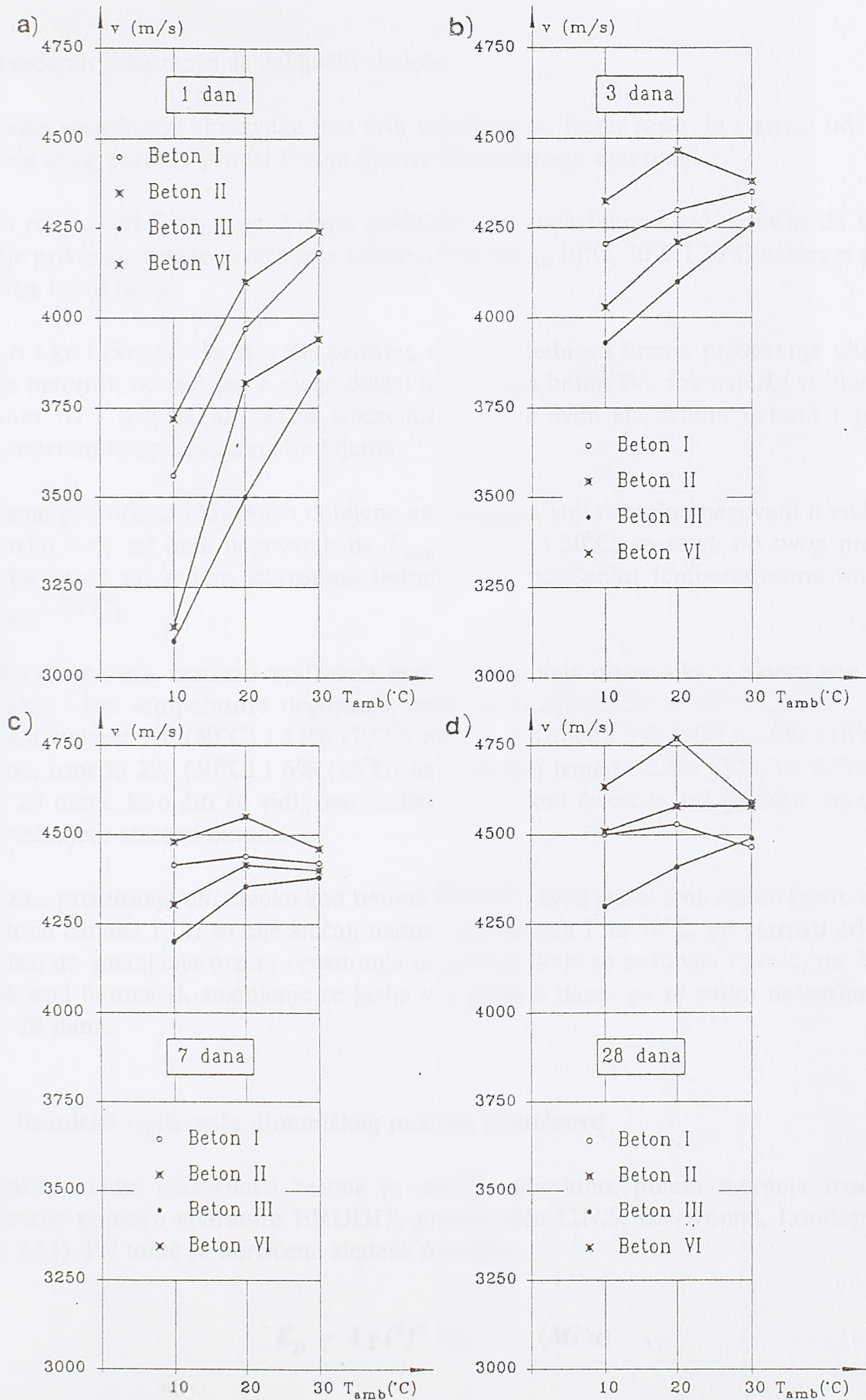
Prirast brzine prostiranja ultrazvuka za betone I, II, III i IV, u starostima od 1, 3, 7 i 28 dana i za temperature negovanja 10°C , 20°C i 30°C , prikazan je na slici 5.52. Kao što se vidi, brzina prostiranja ultrazvuka veoma brzo raste, tako da već posle 1 dan dostigne 79% svoje 28-dnevne vrednosti kod betona III, ili čak 87% vrednosti brzine prostiranja ultrazvuka na 28 dana kod betona I.

Sa slike 5.52 može se zaključiti da kod betona III i IV u svim starostima (1, 3, 7 i 28 dana) brzina prostiranja ultrazvuka stalno raste, ili u pojedinim starostima zadržava približno istu vrednost; međutim, kod betona oznake I i II dolazi do smanjenja brzine prostiranja ultrazvuka na uzorcima betona negovanim na 30°C , u odnosu na one negovane na 20°C , kod betona I ovo smanjenje počinje posle 7 dana i nastavlja se i na 28 dana, dok kod betona II smanjenje se javlja već na 3 dana, pa se isti trend zadržava i posle 7 i 28 dana.

Na slici 5.53, pak, daje se, za različite starosti betona (1, 3, 7 i 28 dana) i različite temperature negovanja prirast brzine prostiranja ultrazvuka. U starosti od 1 dan, kao što se vidi, kod svih betona pri temperaturama od 10°C , 20°C i 30°C , prisutno je povećanje brzine prostiranja ultrazvuka. Nadalje, u starosti od 3 dana, kao što je već rečeno, dolazi već do smanjenja brzine prostiranja ultrazvuka kod betona II između temperatura 20°C i 30°C , a posle 7 dana smanjenje se javlja kod betona II, I i IV. Pri starosti od 28 dana smanjenje brzine prostiranja ultrazvuka konstatovano je kod betona I i II.



Sl. 5.52 Prirast brzina prostiranja ultrazvuka u starostima od 1, 3, 7 i 28 dana za beton I (a), beton II (b), beton III (c) i beton IV (d)



Sl. 5.53 Prirast brzina prostiranja ultrazvuka za betone I, II, III i IV u starostima od 1 dan (a), 3 dana (b), 7 dana (c) i 28 dana (d)

Sa navedenih slika može se zaključiti sledeće:

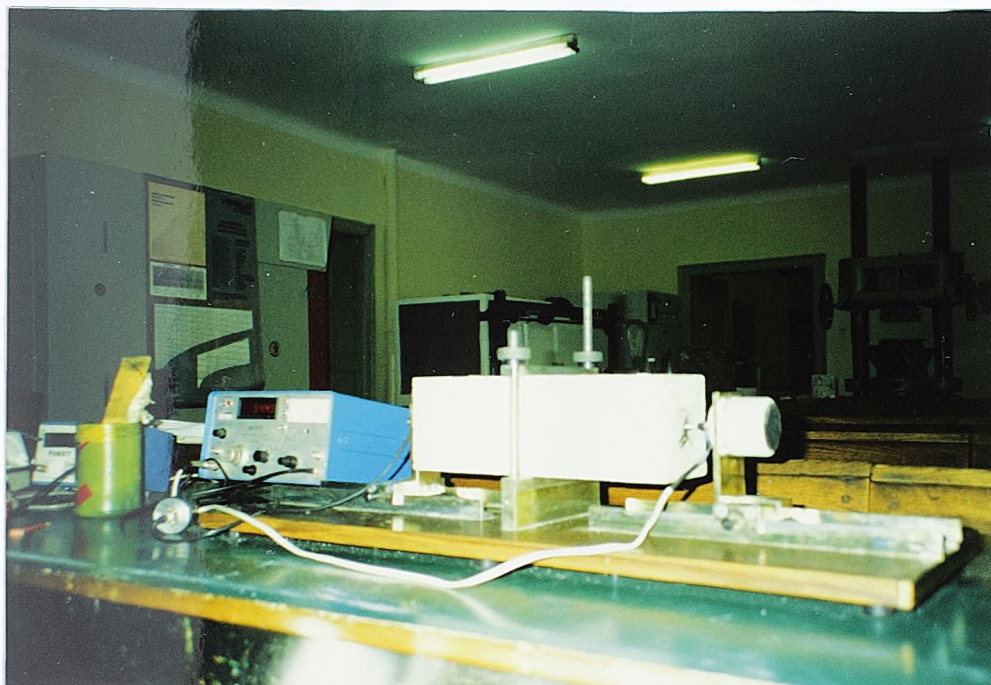
- Brzina prostiranja ultrazvuka kod svih vrsta betona naglo raste do starosti od 7 dana; posle ovog perioda prirast brzine ultrazvuka je mnogo umereniji.
- Do roka očvršćavanja od 7 dana praktično kod svih betona važi pravilo da se krive koje prikazuju brzine prostiranja ultrazvuka na T_{amb} 10°C, 20°C i 30°C nalaze u poretku jedna iznad druge.
- Kao i kod čvrstoća betona pri pritisku, najviše vrednosti brzina prostiranja ultrazvuka ima beton II; odmah posle njega dolazi beton I, pa beton IV, dok najniže vrednosti ima beton III - ovo se, sa nekim izuzecima javlja u svim starostima betona i pri svim navedenim temperaturama ambijenta.
- Brzine prostiranja ultrazvuka dobijene na uzorcima koji su stalno negovani u vodi, su po pravilu veće od onih negovanih na $T_{amb} = 10^{\circ}\text{C}$ i 20°C ; izuzetak od ovog pravila se javlja samo pri malim starostima betona i pri povišenim temperaturama ambijenta ($T_{amb} = 30^{\circ}\text{C}$).
- Ako se uporede rezultati ispitivanja brzina prostiranja ultrazvuka u okviru iste starosti betona i iste temperature negovanja, može se zaključiti da se za betone II i III one kreću između 9% (30°C) i 17% (10°C) na 1 dan, između 3% (30°C) i 9% (10°C) na 3 dana, između 2% (30°C) i 6% (10°C) na 7 dana, i između 2,2% (30°C) i 7,5% (20°C) na 28 dana. Kao što se vidi, ove razlike, kao i kod čvrstoća pri pritisku, opadaju sa povećanjem starosti betona.
- Brzine prostiranja ultrazvuka kod betona III i IV u svim starostima stalno rastu, dok kod betona oznake I i II to nije slučaj; naime, kod betona I na 30°C, pri starosti od 7 dana dolazi do smanjenja brzine prostiranja ultrazvuka koje se nastavlja i posle, na 28 dana, dok kod betona II, smanjenje se javlja već posle 3 dana, pa se zatim nastavlja i posle 7 i 28 dana.

5.4.4 Rezultati ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti

Dinamički modul elastičnosti betona je meren indirektno, putem merenja rezonantne frekvencije pomoću aparature ERUDIT, proizvođača C.N.S. Electronics, London, LTD., (slika 5.54). Pri tome je korišćena sledeća formula:

$$E_D = 4 \gamma l^2 f^2 \cdot 10^{-6} \quad (\text{MPa}) \quad , \quad (5.2)$$

(gde su E_D - dinamički modul elastičnosti, γ - zapreminska masa, l - dužina uzorka, f - rezonantna frekvencija).



Sl. 5.54 Aparatura za merenje dinamičkog modula elastičnosti

Za ova ispitivanja upotrebljena su opitna tela - prizme, dimenzija 12x12x36 cm. Rezultati ispitivanja betona I, II, III i IV sprovedenih u starostima od 1, 3, 7 i 28 dana pri navedenim ambijentalnim uslovima prikazani su u tabeli 5.16. Napominje se da svaka vrednost prikazana u navedenoj tabeli predstavlja srednju vrednost od tri rezultata merenja.

Tabela 5.16 Dinamički modul elastičnosti za betone I, II, III i IV u starostima od 1, 3, 7 i 28 dana zavisno od T_{amb}

Vrsta betona	T_{amb} (°C)	Starost uzoraka (dani)			
		1 dan	3 dana	7 dana	28 dana
		E_{bD} (GPa)	E_{bD} (GPa)	E_{bD} (GPa)	E_{bD} (GPa)
I	10	23,63	33,72	36,49	38,74
	20	27,60	34,67	37,28	38,00
	30	31,50	36,05	37,98	38,98
II	10	20,50	32,76	37,11	39,24
	20	23,50	33,80	36,90	38,00
	30	33,20	39,0	42,12	41,74
III	10	14,50	27,26	30,74	34,50
	20	22,65	32,13	35,87	37,20
	30	26,60	35,25	38,11	38,37
IV	10	13,75	28,0	33,83	38,84
	20	20,50	33,0	37,47	39,10
	30	26,80	35,45	38,78	40,52

Na slici 5.55 prikazani su grafički rezultati ispitivanja iz tabele 5.16. Kao što se vidi, temperatura ima značajnog uticaja na dinamički modul elastičnosti. Ovo se posebno odnosi na betone III i IV (spravljene sa zgurom) u maloj starosti. Tako, na primer, dinamički modul elastičnosti betona III na 10°C , za starost od 1 dan ima cca 45% nižu vrednost od one dobijene na 30°C , za isti beton i u istoj starosti, dok kod betona IV na istoj temperaturi i u istoj starosti dinamički modul ima čak 49% nižu vrednost od one na 30°C . Ako se uporede vrednosti dinamičkog modula elastičnosti na 10°C i 30°C kod betona I u starosti od 1 dan one iznose cca 25%, dok kod betona II ova razlika iznosi 38%, u istoj starosti i pri istim ambijentalnim uslovima.

Nadalje, na slikama 5.56, 5.57, 5.58 i 5.59 prikazan je dinamički modul elastičnosti u funkciji vremena za betone I, II, III i IV, pri temperaturama ambijenta 10°C , 20°C i 30°C . Naime, na svakoj od ovih slika prikazane su po tri krive za 3 različite temperature negovanja. Kao što se vidi, dinamički modul elastičnosti veoma brzo raste do starosti od 7 dana, nakon čega, prirasta takoreći i nema kod betona I i II, dok kod betona III i IV prirast postoji. Interesantno je takođe uočiti da kod betona III i IV prirast dinamičkog modula elastičnosti zavisno od temperature ima takav trend da su linije za 10°C , 20°C i 30°C poređane jedna iznad druge. Kod betona I i II ovo se ne javlja kao pravilo.

Rezultati ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti za betone I, II, III i IV pri temperaturama ambijenta 10°C , 20°C i 30°C , prikazani su na slikama 5.60, 5.61 i 5.62. Na svakoj slici prikazane su po četiri linije i kao što se vidi, beton III na svim temperaturama ima najnižu vrednost.

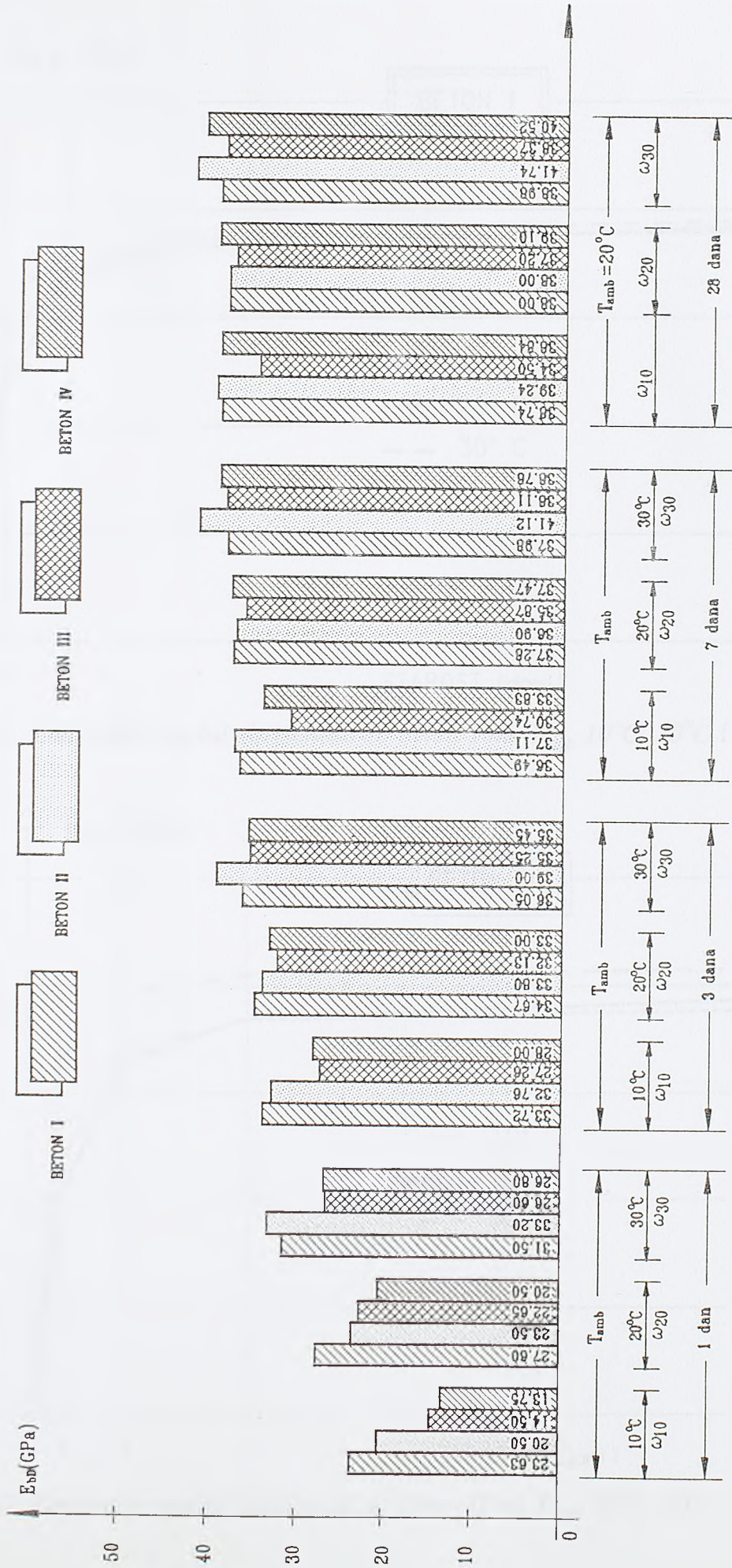
S druge strane, pak, beton oznake II ima najviše vrednosti dinamičkog modula, dok se betoni I i IV nalaze negde na sredini između ova dva. Treba istaći da u starosti od 28 dana, na 20°C , dinamički modul elastičnosti pokazuje veoma ujednačene vrednosti kod svih vrsta betona, tako da se najveće razlike dinamičkog modula kreću u veoma uskom intervalu i iznose cca 5%.

Na slici 5.63 dat je prirast dinamičkog modula elastičnosti za beton I (a), beton II (b), beton III (c) i beton IV za različite starosti i temperature ambijenta.

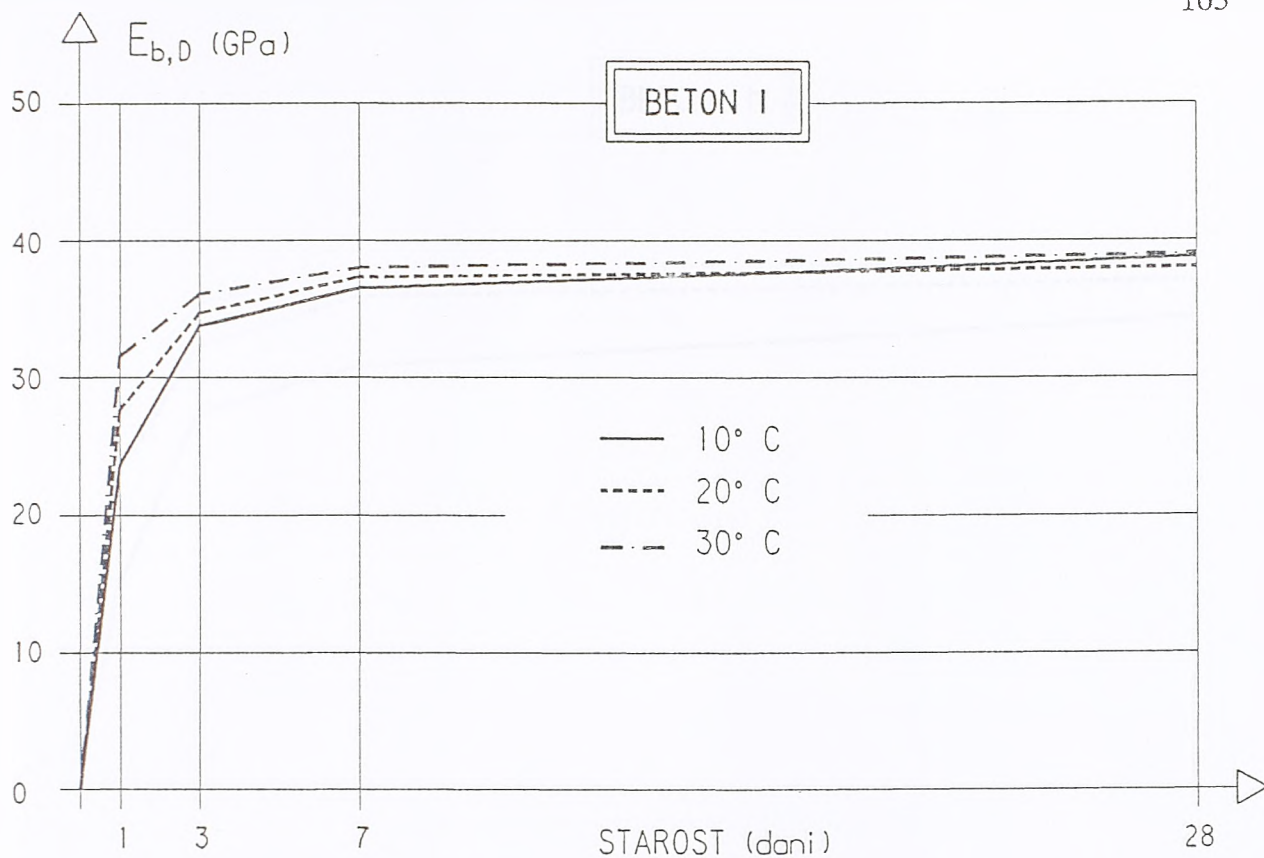
Na slici 5.64, pak, dat je prirast dinamičkog modula elastičnosti za različite starosti (1, 3, 7 i 28 dana) betona I, II, III i IV pri navedenim ambijentalnim uslovima.

Kao što se vidi, ovde ne dolazi do pada dinamičkog modula elastičnosti pri porastu temperature ambijenta, za isti beton, i pri istoj starosti. Naime, kod svih betona, sa minimalnim oscilovanjem kod betona II na 7 i 28 dana pri, $T_{\text{amb}} = 10^{\circ}\text{C}$ i $T_{\text{amb}} = 20^{\circ}\text{C}$, prisutan je prirast modula elastičnosti, ili pak održavanje postignutih vrednosti.

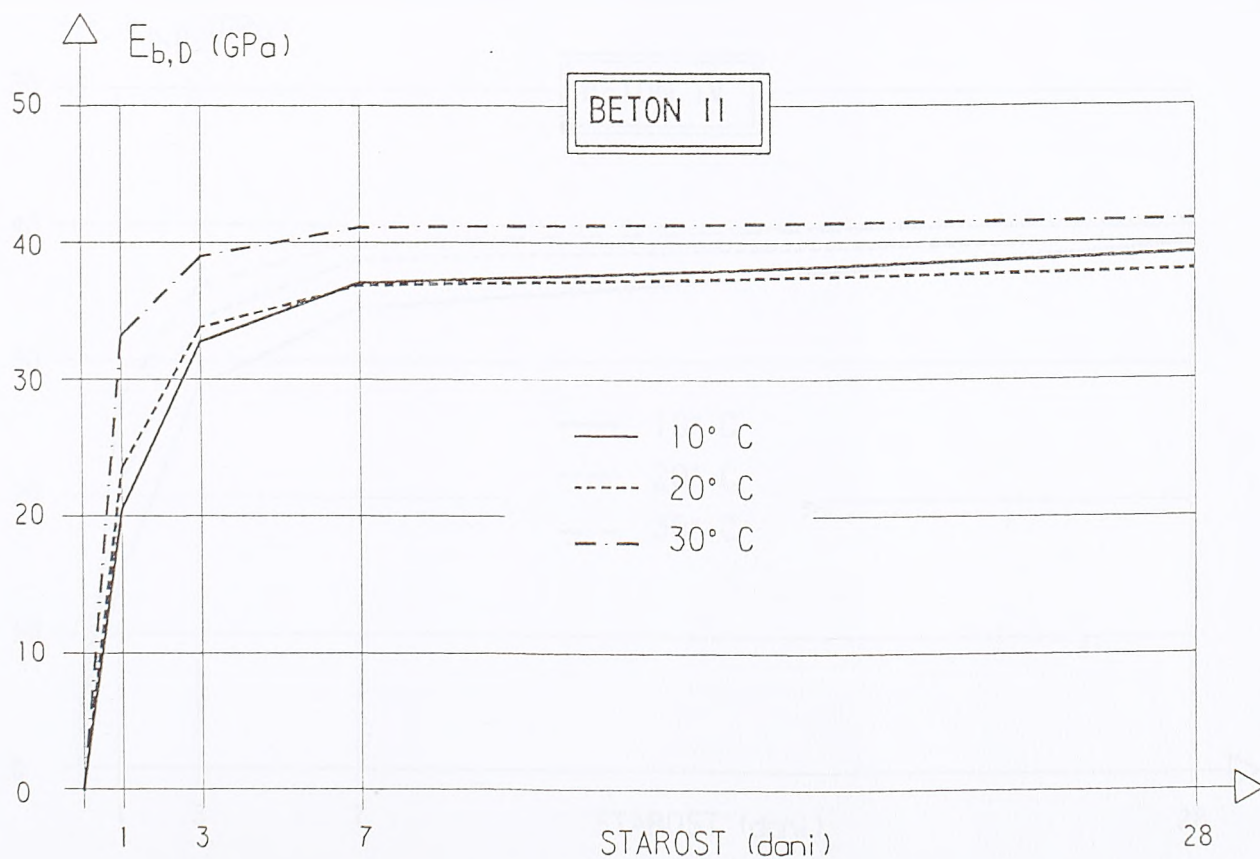
Sa prikazanih slika sledi da je najveća razlika u vrednostima dinamičkog modula elastičnosti u okviru iste starosti betona i iste temperature ambijenta između betona I i IV - za starost od 1 dan, na $T_{\text{amb}} = 10^{\circ}\text{C}$ ona iznosi cca 42%, dok se ova razlika sa porastom starosti betona smanjuje, pa na 28 dana pri istoj temperaturi ambijenta iznosi svega 12%. Pri $T_{\text{amb}} = 20^{\circ}\text{C}$ razlike u vrednostima dinamičkog modula elastičnosti iznose: na 1 dan 25,7%, na 3 dana 7,3%, dok na 7 i 28 dana iznose između 4-5%.



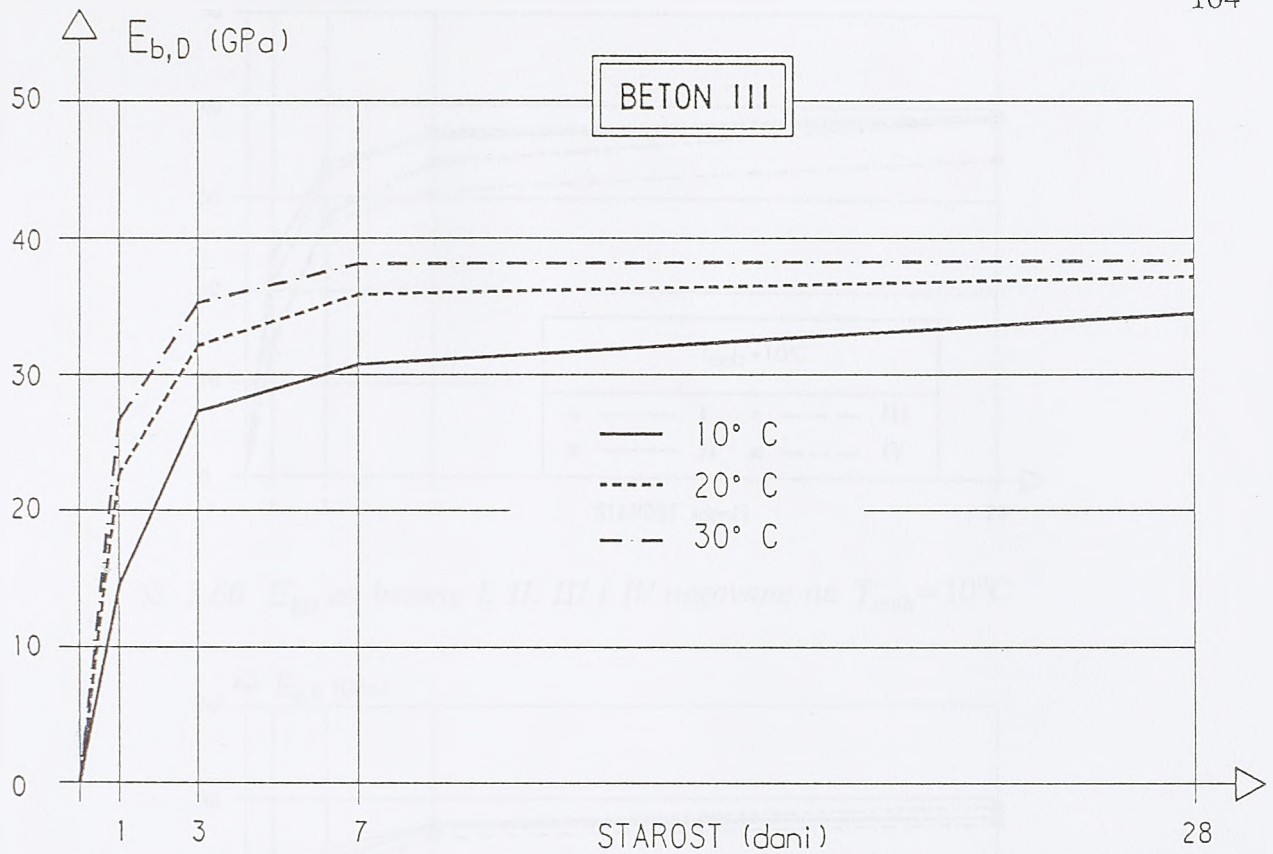
Sl. 5.55 Grafički prikaz dinamičkog modula elastičnosti za betone I, II, III i IV u starostima od 1, 3, 7 i 28 dana pri različitim T_{amb}



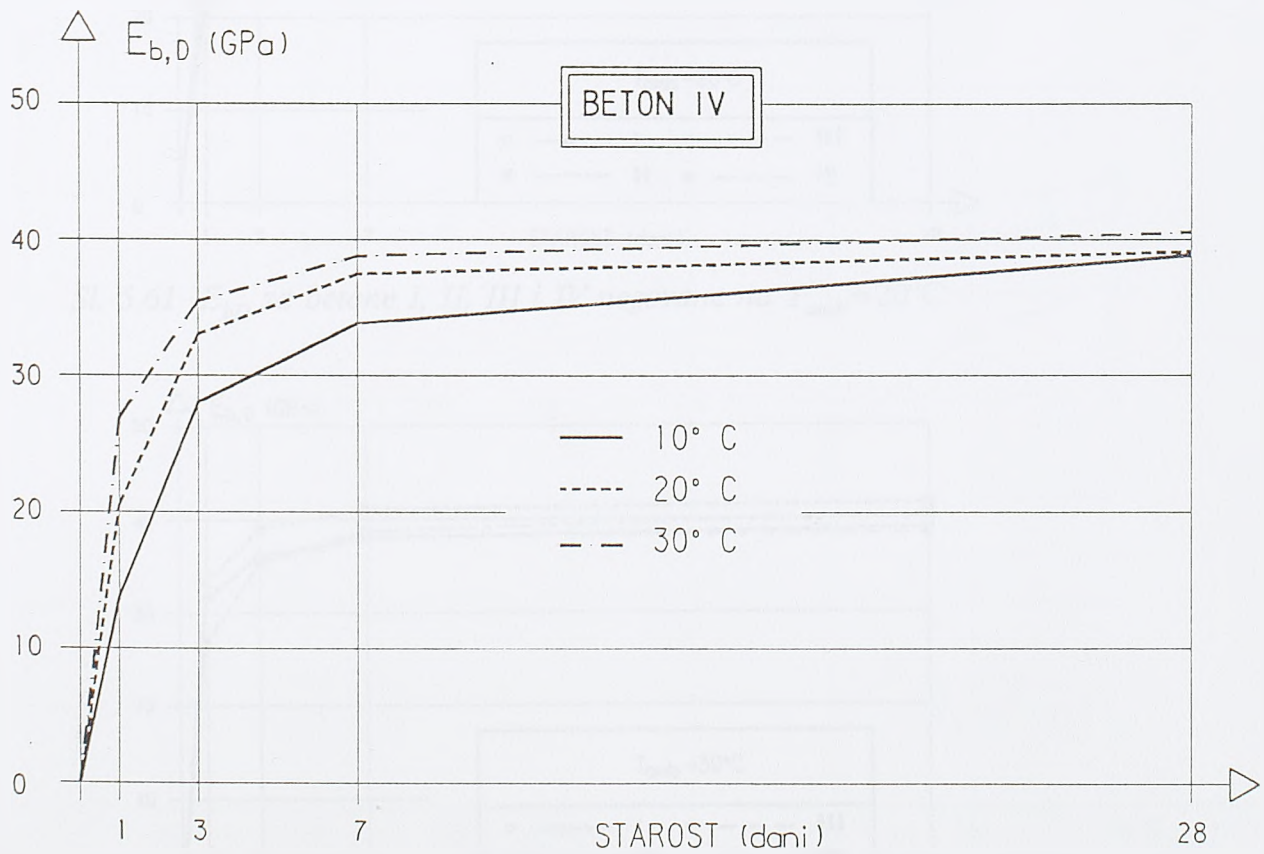
Sl. 5.56 Dinamički modul elastičnosti za beton I na T_{amb} 10°C, 20°C i 30°C



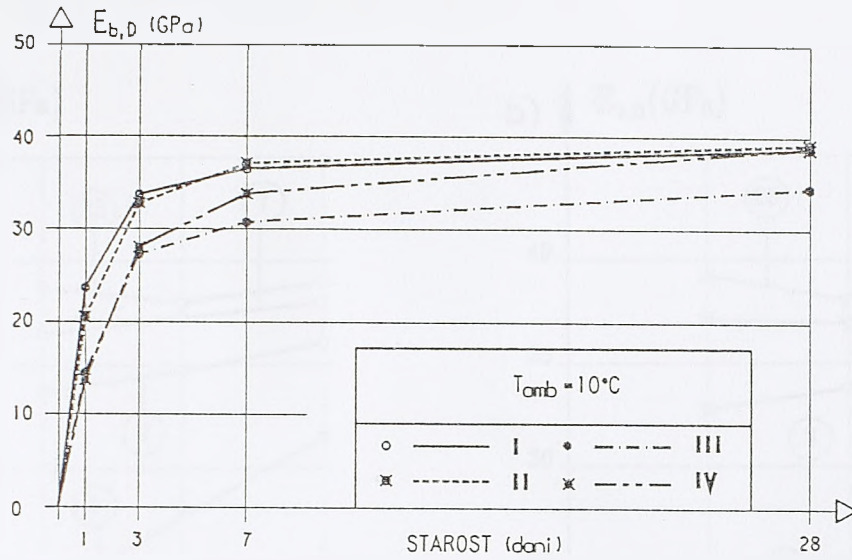
Sl. 5.57 Dinamički modul elastičnosti za beton II na T_{amb} 10°C, 20°C i 30°C



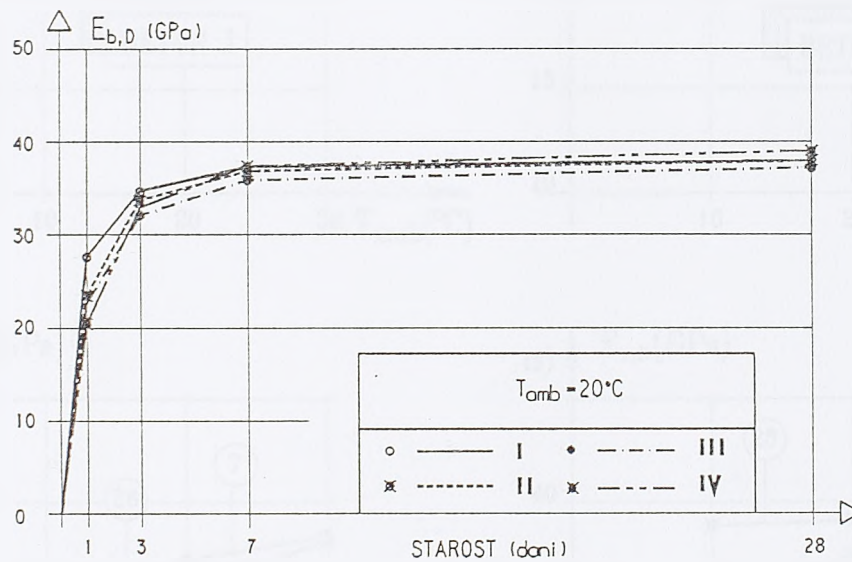
Sl. 5.58 Dinamički modul elastičnosti za beton III na T_{amb} 10°C, 20°C i 30°C



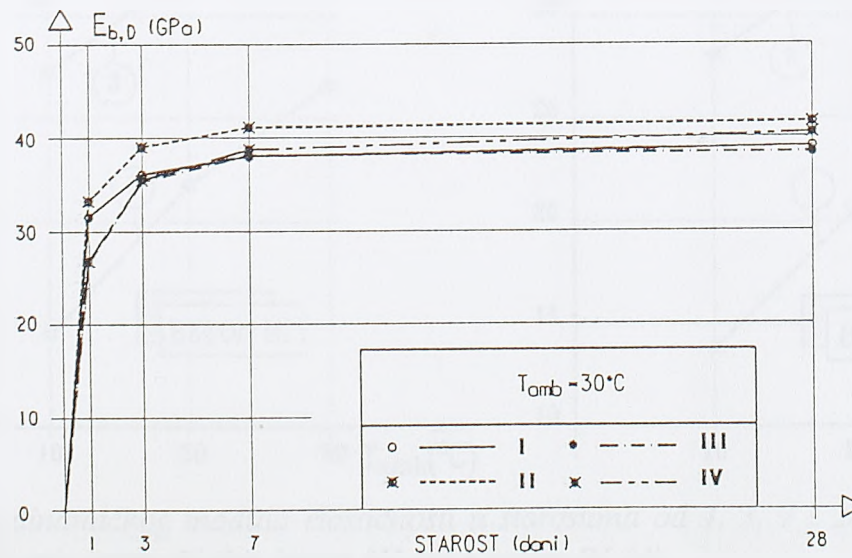
Sl. 5.59 Dinamički modul elastičnosti za beton IV na T_{amb} 10°C, 20°C i 30°C



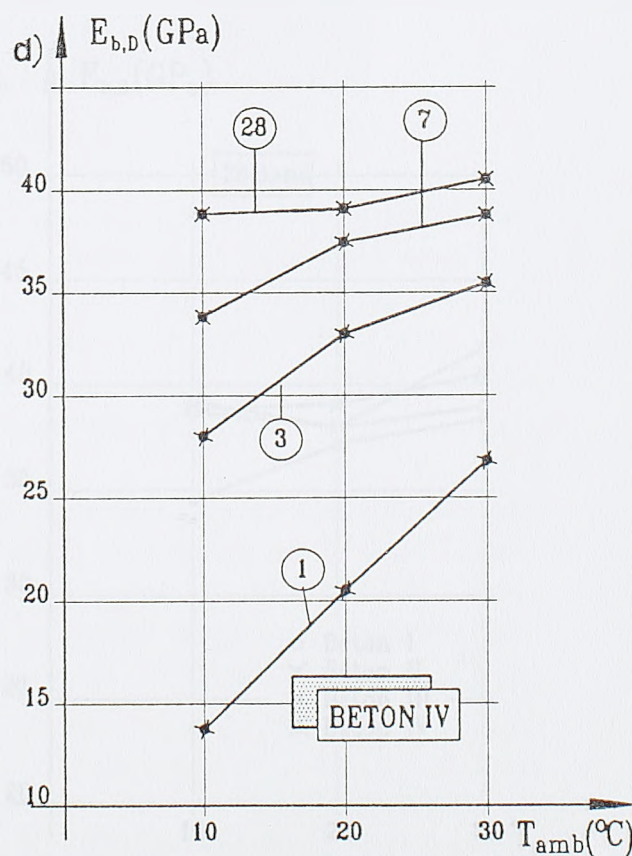
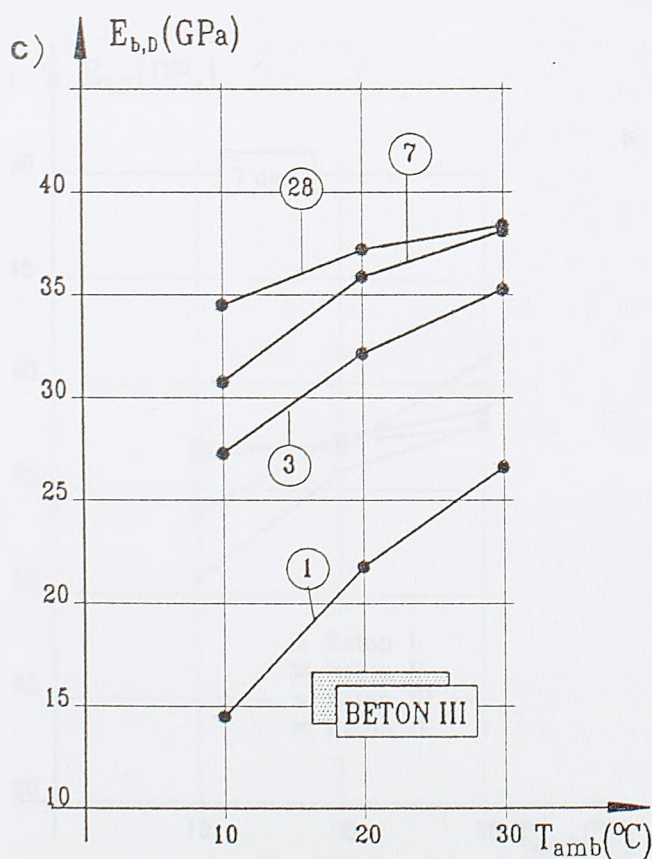
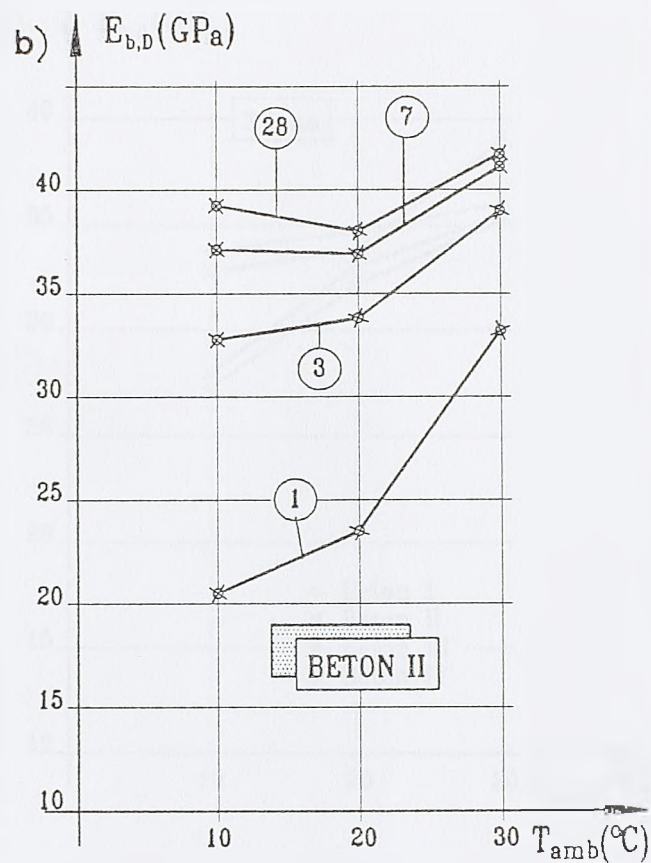
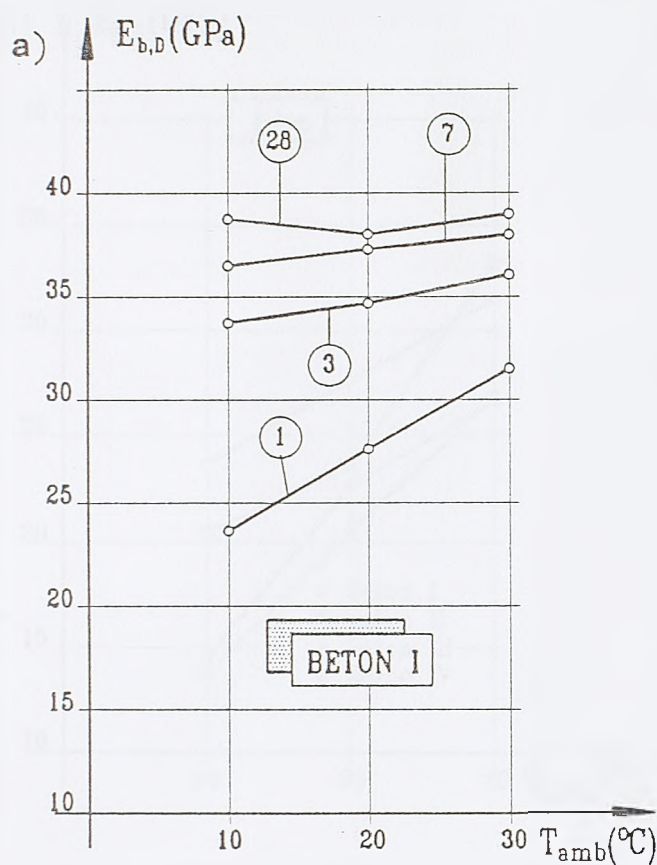
Sl. 5.60 $E_{b,D}$ za betone I, II, III i IV negovane na $T_{amb}=10^{\circ}\text{C}$



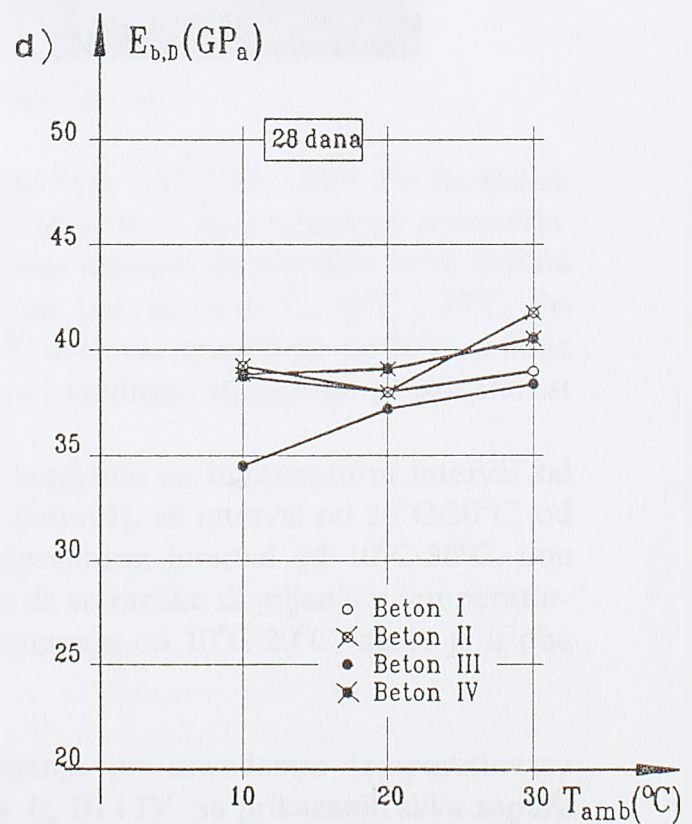
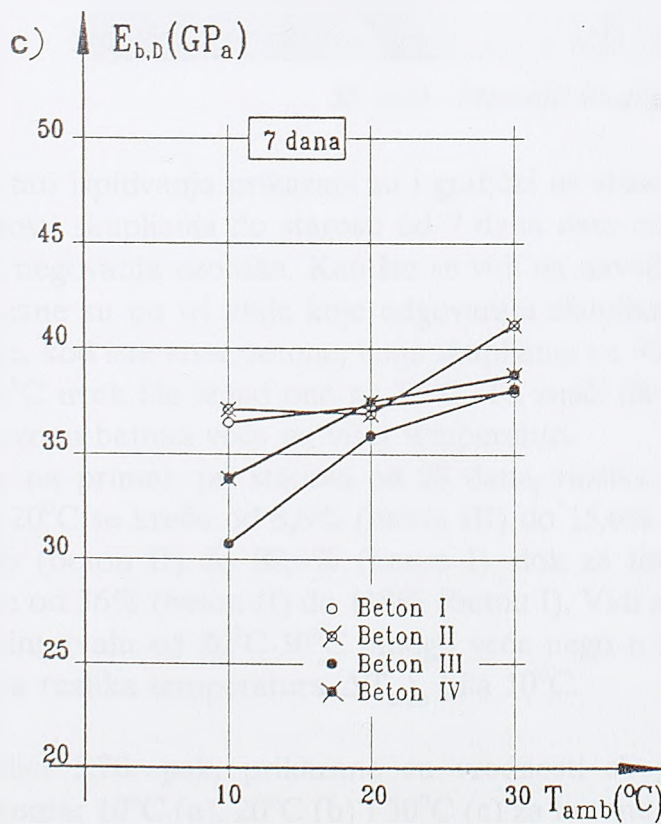
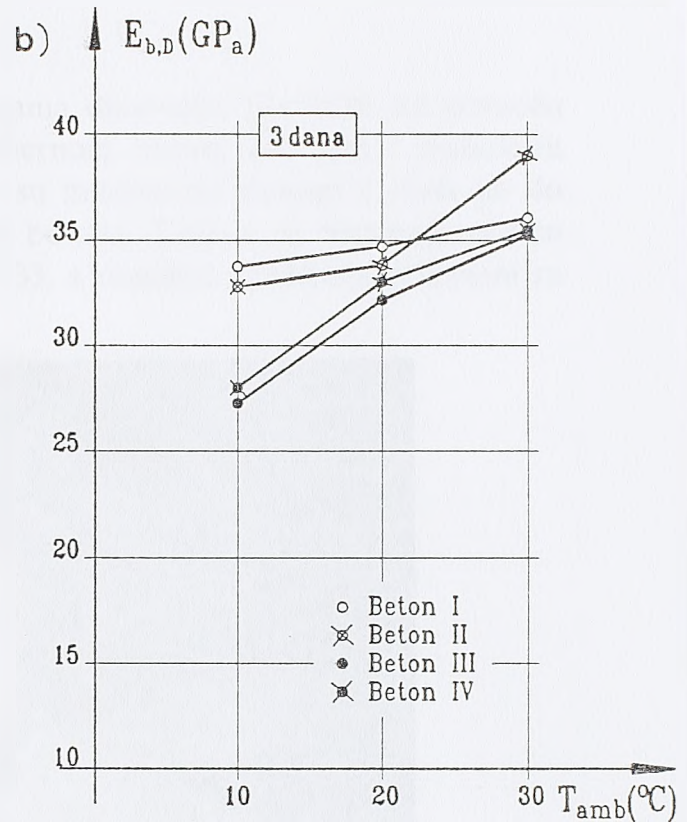
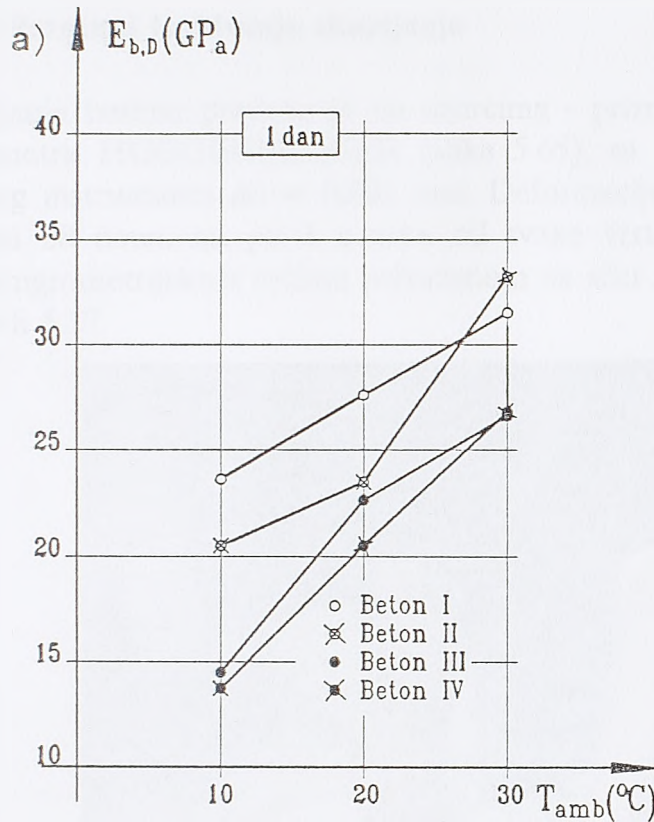
Sl. 5.61 $E_{b,D}$ za betone I, II, III i IV negovane na $T_{amb}=20^{\circ}\text{C}$



Sl. 5.62 $E_{b,D}$ za betone I, II, III i IV negovane na $T_{amb}=30^{\circ}\text{C}$



Sl. 5.63 Prirast dinamičkog modula elastičnosti u starostima od 1, 3, 7 i 28 dana za beton I (a), beton II (b), beton III (c) i beton IV (d)



Sl. 5.64 Prirast dinamičkog modula elastičnosti za beton I, II, III i IV u starostima od 1 dan (a), 3 dana (b), 7 dana (c) i 28 dana (d)

5.4.5. Rezultati ispitivanja skupljanja

Skupljanje betona praćeno je na uzorcima - prizmama dimenzija 12x12x36 cm pomoću deformetra HUGGENBERGER (slika 5.65), sa mernom bazom 250 mm i podatkom mernog instrumenta $\Delta l = 0,001$ mm. Deformacije su merene od starosti 2 dana pa do starosti 28 dana, na po 3 uzorka od svake vrste betona. Uzorci su negovani prema termohigrometrijskom režimu prikazanom na slici 5.33, a rezultati ispitivanja prikazani su u tabeli 5.17.



Sl. 5.65 Merenje skupljanja betona

Rezultati ispitivanja prikazani su i grafički na slikama 5.66, 5.67, 5.68 i 5.69. Pri ovome su vrednosti skupljanja do starosti od 7 dana date crtičasto, da bi se još jednom potencirao način negovanja uzoraka. Kao što se vidi na navedenim slikama, za pojedine vrste betona prikazane su po tri linije koje odgovaraju skupljanjima betona na 10°C, 20°C i 30°C. Pri ovome, kod iste vrste betona, linija skupljanja na 30°C uvek ide iznad linije na 20°C, a linija na 20°C uvek ide iznad one na 10°C. To znači da su i vrednosti skupljanja za istu starost i istu vrstu betona veće na višoj temperaturi.

Tako, na primer, pri starosti od 28 dana, razlike skupljanja za temperaturni interval od 10°C-20°C se kreću od 8,8% (beton III) do 15,6% (beton I), za interval od 20°C-30°C, od 23,6% (beton II) do 88,6% (beton I), dok za temperaturni interval od 10°C-30°C, one iznose od 36% (beton II) do 118% (beton I). Vidi se da su razlike skupljanja u temperaturnom intervalu od 20°C-30°C mnogo veće nego u intervalu od 10°C-20°C, mada je u oba slučaja razlika temperatura ΔT_{amb} bila 10°C.

Na slici 5.70, pak, prikazane su vrednosti skupljanja pri navedenim temperaturama ambijenta: 10°C (a), 20°C (b) i 30°C (c) za betone I, II, III i IV. Sa prikazanih slika zapaža se da je na 10°C i 20°C skupljanje superplastificiranih betona (oznaka II i IV) veće od betona - etalona na bazi istog cementa (I i III). Pri ambijentalnim uslovima od 30°C ovaj

trend se ne zadržava u potpunosti. Tako na primer, pri starosti od 28 dana skupljanje betona II je veće cca 56% u odnosu na beton oznake I na 10°C, dok na 20°C ovo povećanje iznosi 49%.

Ako se, pak, porede betoni oznaka III i IV dolazi se do zaključka da je skupljanje betona IV na 10°C, na 28 dana veće cca 12% u odnosu na beton III, dok na 20°C, ovo povećanje iznosi cca 16%.

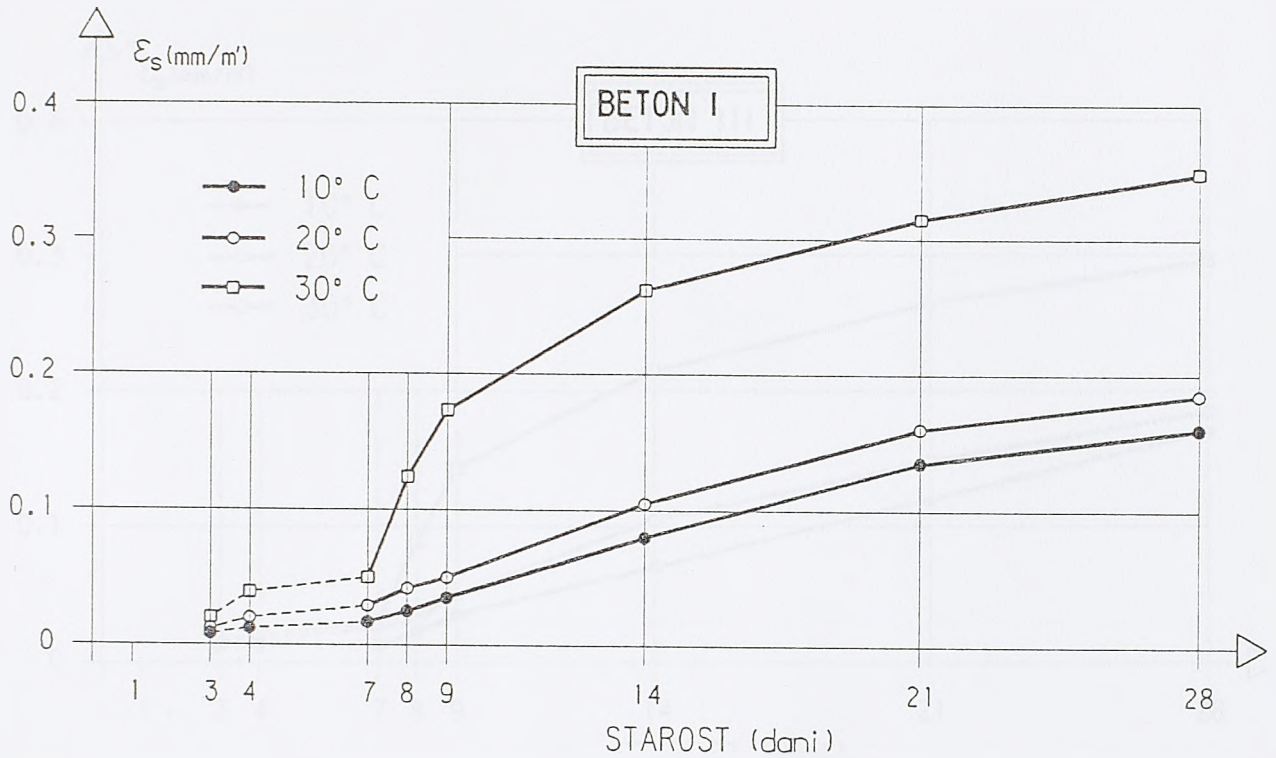
Tabela 5.17 Vrednosti skupljanja ϵ_s (mm/m') za betone I, II, III i IV negovane na različitim T_{amb}

T_{amb} (°C)	Vreme u danima							
	3	4	7	8	9	14	21	28
Beton I								
10	0,008	0,012	0,017	0,025	0,035	0,080	0,135	0,160
20	0,012	0,020	0,029	0,042	0,050	0,105	0,160	0,185
30	0,020	0,039	0,050	0,124	0,173	0,262	0,315	0,349
Beton II								
10	0,013	0,015	0,020	0,040	0,060	0,160	0,213	0,250
20	0,025	0,026	0,045	0,067	0,089	0,177	0,234	0,275
30	0,030	0,031	0,060	0,083	0,120	0,238	0,310	0,340
Beton III								
10	0,012	0,012	0,013	0,022	0,035	0,070	0,120	0,170
20	0,016	0,017	0,025	0,031	0,050	0,105	0,148	0,185
30	0,018	0,020	0,029	0,089	0,143	0,215	0,265	0,296
Beton IV								
10	0,012	0,012	0,018	0,037	0,049	0,110	0,155	0,190
20	0,018	0,023	0,025	0,041	0,051	0,132	0,182	0,215
30	0,025	0,026	0,028	0,112	0,127	0,215	0,265	0,295

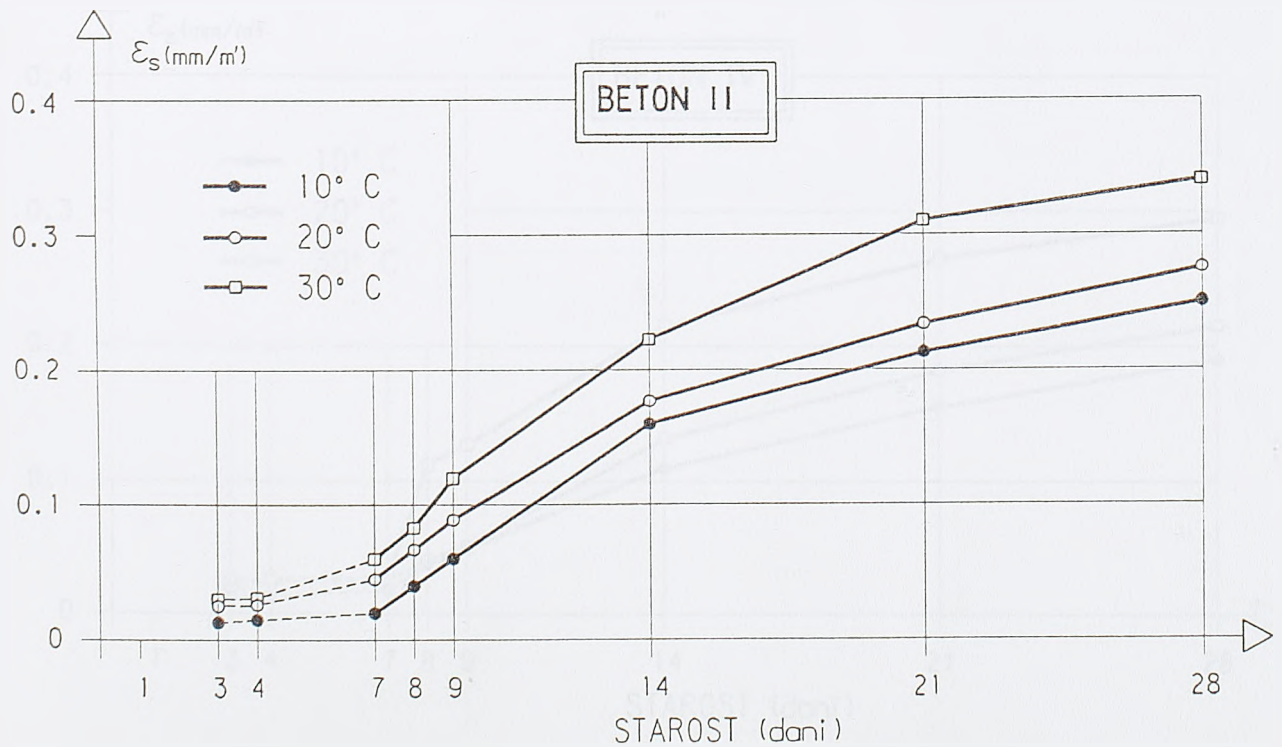
Napomena:

Naznačene vrednosti predstavljaju izračunate srednje vrednosti iz 6 merenja.

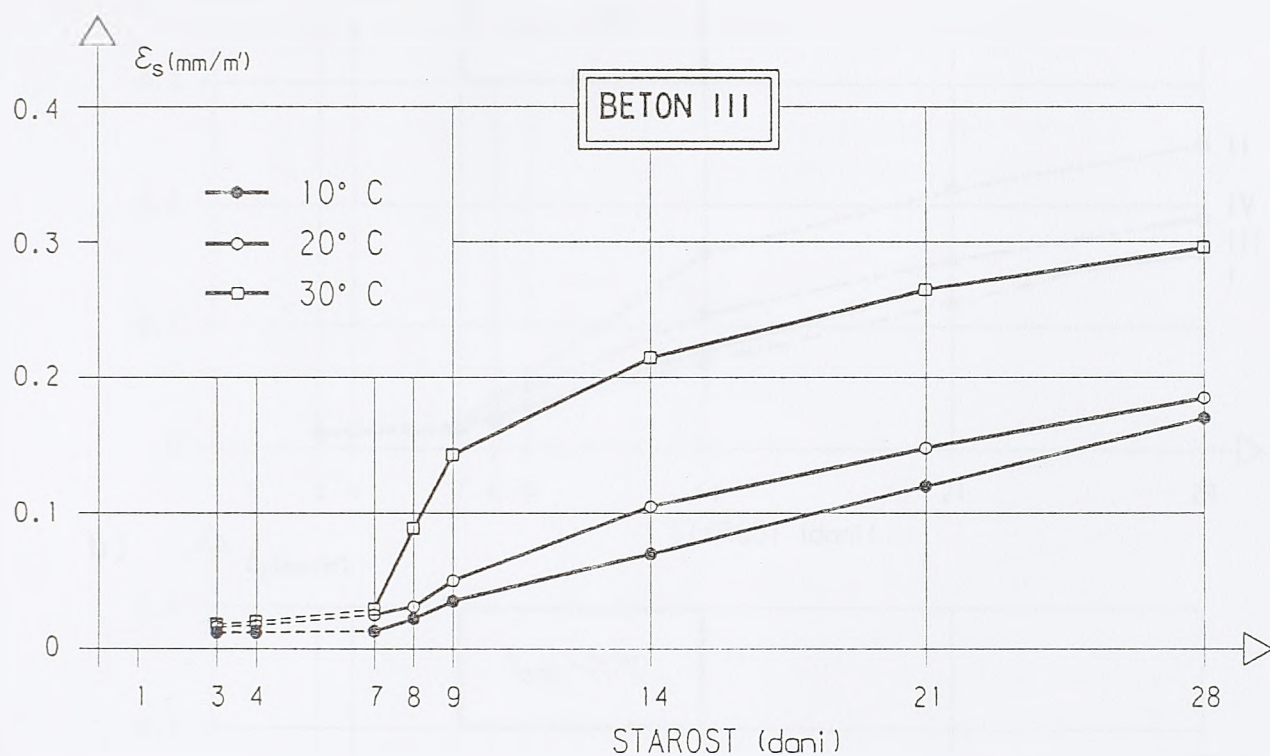
Iz svega napred prikazanog može se zaključiti da skupljanje betona raste sa porastom temperature ambijenta i to ne toliko drastično između temperatura 10°C i 20°C, koliko između 20°C - 30°C. Isto tako zapaža se da je skupljanje superplastificiranih betona veće u odnosu na betone-etalone pri temperaturama 10°C i 20°C. Pri 30°C ovo pravilo se ne održava u potpunosti.



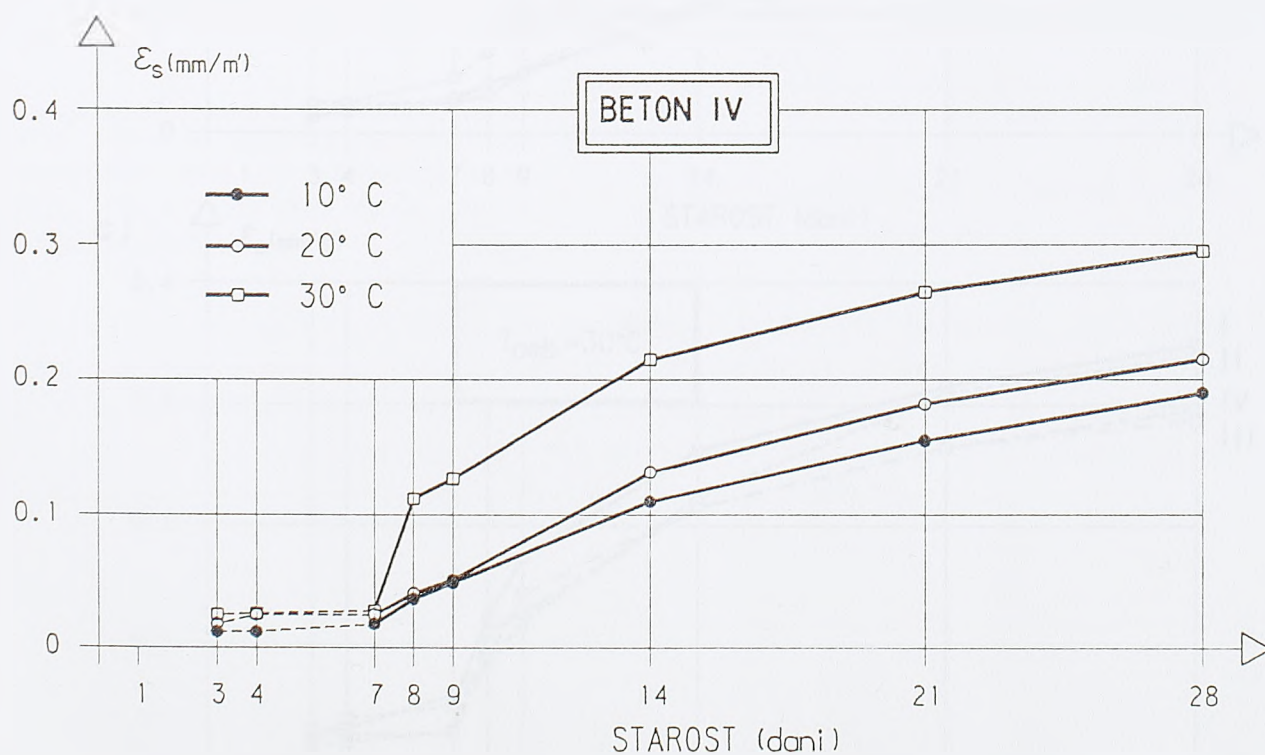
Sl. 5.66 Skupljanje betona I na $T_{amb} = 10^{\circ}\text{C}$, 20°C i 30°C



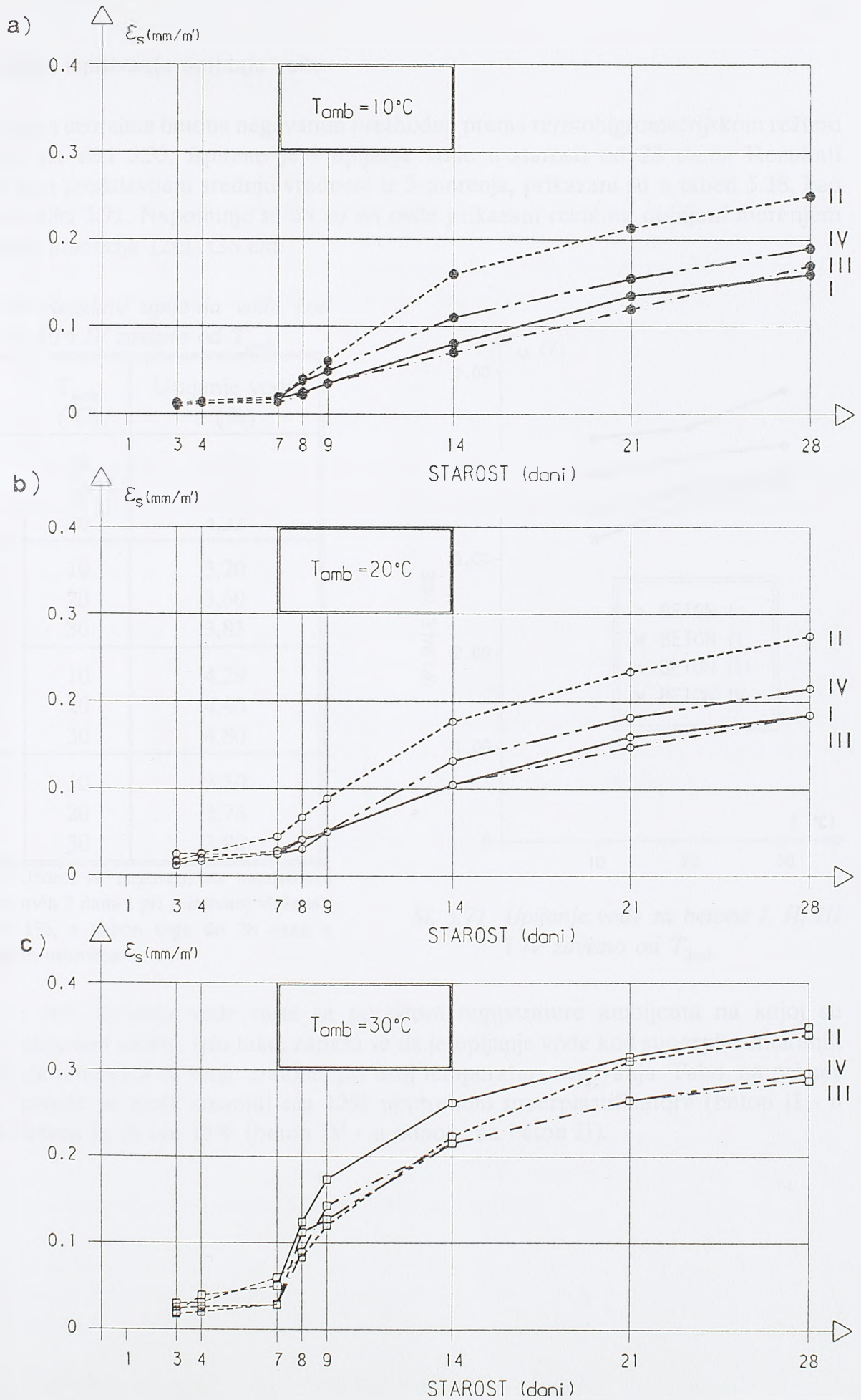
Sl. 5.67 Skupljanje betona II na $T_{amb} = 10^{\circ}\text{C}$, 20°C i 30°C



Sl. 5.68 Skupljanje betona III na $T_{amb} = 10^{\circ}\text{C}$, 20°C i 30°C



Sl. 5.69 Skupljanje betona IV na $T_{amb} = 10^{\circ}\text{C}$, 20°C i 30°C



Sl. 5.70 Skupljanje betona I, II, III i IV pri različitim T_{amb} - $10^\circ C$ (a), $20^\circ C$ (b) i $30^\circ C$ (c)

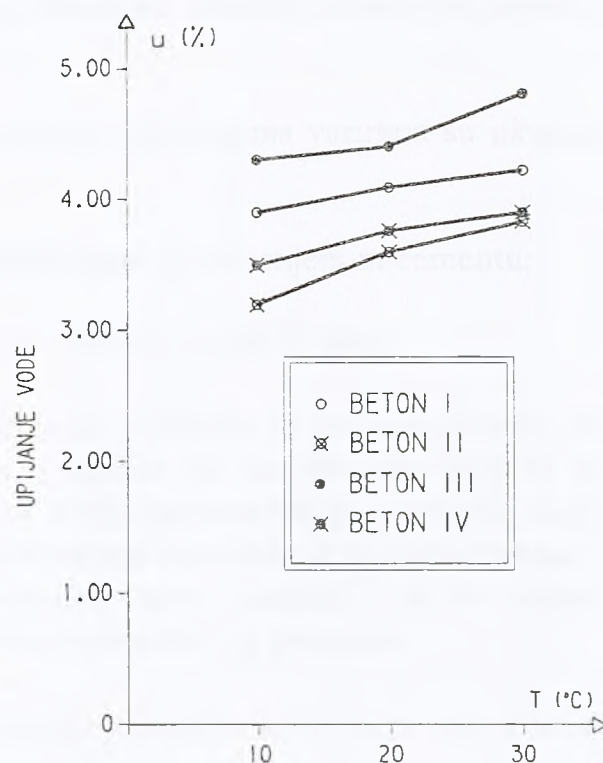
5.4.6 Rezultati ispitivanja upijanja vode

Na spravljenim uzorcima betona negovanim prethodno prema termohigrometrijskom režimu prikazanom na slici 5.33, ispitano je i upijanje vode u starosti od 28 dana. Rezultati ispitivanja koji predstavljaju srednju vrednost iz 3 merenja, prikazani su u tabeli 5.18, kao i grafički na slici 5.71. Napominje se da su svi ovde prikazani rezultati dobijeni merenjem na uzorcima dimenzija 12x12x36 cm.

Tabela 5.18 Rezultati upijanja vode kod betona I, II, III i IV zavisno od T_{amb}

Vrsta betona	T_{amb} (°C)	Upijanje vode u (%)
I	10	3,90
	20	4,09
	30	4,22
II	10	3,20
	20	3,60
	30	3,83
III	10	4,29
	20	4,40
	30	4,80
IV	10	3,50
	20	3,76
	30	3,90

Napomena: Uzorci su negovani na naznačenoj temperaturi prvih 7 dana i pri relativnoj vlažnosti $\phi = 99 \pm 1\%$, a nakon toga do 28 dana u laboratorijskim uslovima



Sl. 5.71 Upijanje vode za betone I, II, III i IV zavisno od T_{amb}

Kao što se vidi, upijanje vode raste sa porastom temperature ambijenta na kojoj su prethodno negovani uzorci. Isto tako, zapaža se da je upijanje vode kod superplastificiranih betona manje u odnosu na svoje etalone, pri istoj temperaturi negovanja. Tako, na primer na 20°C, upijanje se može smanjiti cca 12% upotrebom superplastifikatora (beton II - u odnosu na beton I), ili cca 15% (beton IV - u odnosu na beton II).

6. INTERPRETACIJA REZULTATA ISPITIVANJA MATEMATIČKOM METODOM FAKTORIJALNOG EKSPERIMENTA

6.1 UVOD

Planiran i realizovan program eksperimentalnih ispitivanja na svežem i očvrslom betonu omogućava da se na bazi optimalnog broja opita dobije maksimalna količina informacija potrebnih za izvođenje zaključaka u vezi uticaja pojedinih faktora na svojstva betona. U ovom delu rada prezentiraće se analiza koja se zasniva na matematičkom aparatu tzv. punog faktorijalnog eksperimenta radi definisanja zavisnosti čvrstoće betona pri pritisku u funkciji variranih uticajnih faktora.

Kao što je već napred pokazano, pri eksperimentalnim ispitivanjima varirana su ukupno 3 faktora i to:

- vrsta cementa, koja je iskazivana u vidu sadržaja zgure u primenjenom cementu;
- količina superplastifikatora u betonu i
- temperatura betona, odnosno temperatura nege betona u prvih 7 dana.

Uticaj ovih parametara u daljem će biti analiziran samo u odnosu na čvrstoće betona pri pritisku na 7 ($f_{k,7}$) i na 28 dana ($f_{k,28}$), tj. samo u odnosu na one čvrstoće koje su sa gledišta prakse najznačajnije ($f_{k,7}$ - čvrstoća koja se dobija neposredno po završetku nege betona i $f_{k,28}$ - čvrstoća koja služi za definisanje nominalnog-standardnog kvaliteta betona). Napominje se, međutim, da se isti analitički postupak može primeniti i na sve ostale karakteristike betona koje su ispitivane u okviru eksperimentalnog programa.

U ovom radu, s obzirom na parametre koji se smatraju uticajnim, koristiće se tzv. aktivan faktorijalni eksperiment oblika

$$N = p^k = 2^3 = 8, \quad (6.1)$$

(N - broj opita, p - broj nivoa, k - broj faktora), što znači da će se čvrstoće pri pritisku $f_{k,7}$ i $f_{k,28}$ razmatrati kao funkcije 3 parametra varirana na dva nivoa. U vezi sa ovim za svaku od čvrstoća $f_{k,7}$ i $f_{k,28}$, koje se sada mogu definisati i kao funkcije odziva, biće sprovedena analiza za dva temperaturna intervala - za interval $T = 10-20^\circ\text{C}$ i za interval $T = 20-30^\circ\text{C}$. Prema tome, za svaku od navedenih čvrstoća, ako predmetne uticajne faktore označimo sa x_1 (količina zgure - z), x_2 (količina superplastifikatora - sp) i x_3 (temperatura nege - T), planovi eksperimenata bi bili sledeći:

- | | | | |
|--------------------------------|---|-------|-----------|
| a) - količina zgure | $0 \leq z \leq 30$ | | (x_1) , |
| - količine superplastifikatora | $0 \leq sp \leq 1$ | | (x_2) , |
| - temperatura ambijenta | $10^\circ\text{C} \leq T \leq 20^\circ\text{C}$ | | (x_3) ; |
| | | | |
| b) - količina zgure | $0 \leq z \leq 30$ | | (x_1) , |
| - količine superplastifikatora | $0 \leq sp \leq 1$ | | (x_2) , |

- temperatura ambijenta $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 30^{\circ}\text{C}$ (x_3).

Polazeći od opšteg izraza za funkciju odziva u okviru matematičkog aparata punog faktorijalnog eksperimenta, za konkretne slučajeve eksperimenata, funkcija odziva (čvrstoća pri pritisku) može se aproksimirati polinomom

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3. \quad (6.2)$$

S obzirom da će se u daljem razmatrati linearni planovi variranja uticajnih faktora na dva nivoa, veličine x_1 , x_2 i x_3 se mogu normirati i razmatrati u bezdimenzionalnim oblicima X_1 , X_2 i X_3 na nivoima -1 i +1. Na ovaj način matrice planiranja za sve eksperimente tipa a) i tipa b) biće svedene na oblik saglasan tabeli 6.1.

Tabela 6.1 Matrica planiranja za eksperiment (2^3)

N	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	f-ja odziva
1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	y_1
2	1	-1	-1	-1	-1	1	1	y_2
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1	y_3
4	1	1	-1	1	-1	-1	-1	y_4
5	-1	-1	1	1	-1	-1	1	y_5
6	1	-1	1	-1	1	-1	-1	y_6
7	-1	1	1	-1	-1	1	-1	y_7
8	1	1	1	1	1	1	1	y_8

Koeficijenti polinoma (6.2) određuju se na sledeći način:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j, \quad b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ji} \cdot y_j, \quad b_{km} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{kj} \cdot X_{jm} \cdot y_j. \quad (6.3)$$

6.2 ANALITIČKI IZRAZI ZA FUNKCIJE ODZIVA - ČVRSTOĆE BETONA

Saglasno izlaganjima u uvodu (6.1), na bazi eksperimentalno dobijenih čvrstoća $f_{k,7}$ i $f_{k,28}$, u tabelama 6.2, 6.3, 6.4 i 6.5 prikazani su svi ulazni podaci neophodni za analizu punog faktorijalnog eksperimenta. Kao što se vidi, u navedenim tabelama su prikazane pojedinačne vrednosti predmetnih čvrstoća, kao i odgovarajuće srednje vrednosti u funkciji uticajnih parametara $z = x_1$, $sp = x_2$ i $T = x_3$. Pored toga, u ovim tabelama su prikazane i disperzije rezultata ispitivanja određene preko izraza:

$$S_n^2 = \frac{\sum_{i=1}^3 (f_{ki} - \bar{f}_k)^2}{n - 1} \quad (6.4)$$

Primenom matematičkog aparata objašnjenog u uvodu, dobijaju se funkcije odziva - čvrstoće pri pritisku - definisane izrazima (6.5), (6.6), (6.7) i (6.8).

Tabela 6.2 Čvrstoće $f_{k,7}$ u zavisnosti od parametara z , sp i $T = 10^\circ C$, $T = 20^\circ C$

N	z (%)	sp (%)	T (°C)	Pojedinačne vrednosti čvrstoća (MPa)			$f_{k,7}$ (MPa)	S_n^2
1	0	0	10	25,3	26,4	26,0	25,9	0,310
2	30	0	10	20,1	20,9	17,8	19,6	2,590
3	0	1	10	30,1	31,3	29,8	30,4	0,630
4	30	1	10	23,0	23,6	24,2	23,6	0,360
5	0	0	20	29,3	28,0	29,4	28,9	0,610
6	30	0	20	22,0	23,0	21,6	22,2	0,520
7	0	1	20	32,9	33,3	31,9	32,7	0,520
8	30	1	20	25,5	26,5	24,5	25,5	1,000
Σ								6,540

Tabela 6.3 Čvrstoće $f_{k,7}$ u zavisnosti od parametara z , sp i $T = 20^\circ C$, $T = 30^\circ C$

N	z (%)	sp (%)	T (°C)	Pojedinačne vrednosti čvrstoća (MPa)			$f_{k,7}$ (MPa)	S_n^2
1	0	0	20	29,9	28,7	28,1	28,9	0,840
2	30	0	20	21,9	22,6	22,1	22,2	0,130
3	0	1	20	32,0	33,0	33,1	32,7	0,370
4	30	1	20	25,0	26,0	25,5	25,5	0,250
5	0	0	30	31,2	29,8	29,9	30,3	0,610
6	30	0	30	24,9	24,8	25,9	25,2	0,370
7	0	1	30	34,7	35,0	34,7	34,8	0,030
8	30	1	30	30,0	29,0	31,6	30,2	1,720
Σ								4,320

Tabela 6.4 Čvrstoće $f_{k,28}$ u zavisnosti od parametara z , sp i $T = 10^{\circ}\text{C}$, $T = 20^{\circ}\text{C}$

N	z (%)	sp (%)	T ($^{\circ}\text{C}$)	Pojedinačne vrednosti čvrstoća (MPa)			$f_{k,7}$ (MPa)	S_n^2
1	0	0	10	36,7	37,5	35,0	36,4	1,630
2	30	0	10	30,0	31,0	30,8	30,6	0,280
3	0	1	10	39,4	41,1	40,7	40,4	1,390
4	30	1	10	36,8	37,6	37,2	37,2	0,160
5	0	0	20	37,3	38,1	38,0	37,8	0,190
6	30	0	20	32,2	31,1	30,9	31,4	0,490
7	0	1	20	45,2	41,9	43,4	43,5	2,730
8	30	1	20	37,7	37,9	39,0	38,2	0,490
							Σ	7,360

Tabela 6.5 Čvrstoće $f_{k,28}$ u zavisnosti od parametara z , sp i $T = 20^{\circ}\text{C}$, $T = 30^{\circ}\text{C}$

N	z (%)	sp (%)	T ($^{\circ}\text{C}$)	Pojedinačne vrednosti čvrstoća (MPa)			$f_{k,28}$ (MPa)	S_n^2
1	0	0	20	39,4	37,1	36,9	37,8	1,930
2	30	0	20	30,9	31,3	32,0	31,4	0,310
3	0	1	20	43,3	43,2	44,9	43,5	1,190
4	30	1	20	38,0	37,7	38,9	38,2	0,390
5	0	0	30	36,7	37,6	37,9	37,4	0,390
6	30	0	30	30,0	29,8	32,6	30,8	2,440
7	0	1	30	41,3	42,6	43,0	42,3	0,790
8	30	1	30	35,9	36,2	37,1	36,4	0,390
							Σ	6,540

za $10^{\circ}\text{C} \leq T \leq 20^{\circ}\text{C}$

$$f_{k,7} = 26,100 - 3,375X_1 + 1,950X_2 + 1,225X_3 - 0,125X_1X_2 - 0,100X_1X_3 - 0,175X_2X_3, \quad (6.5)$$

$$f_{k,28} = 36,9375 - 2,5875X_1 + 2,8875X_2 + 0,7875X_3 + 0,4625X_1X_2 - 0,3375X_1X_3 + 0,2375X_2X_3 - 0,1875X_1X_2X_3, \quad (6.6)$$

za $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 30^{\circ}\text{C}$

$$f_{k,7} = 28,725 - 2,950X_1 + 2,075X_2 + 1,400X_3 + 0,525X_1X_3 + 0,300X_2X_3 + 0,125X_1X_2X_3, \quad (6.7)$$

$$f_{k,28} = 37,225 - 3,025X_1 + 2,875X_2 - 0,500X_3 + 0,225X_1X_2 - 0,100X_1X_3 - 0,250X_2X_3 - 0,050X_1X_2X_3 \quad (6.8)$$

Može se pokazati da se za sve vrednosti uticajnih parametara koje odgovaraju usvojenim nivoima variranja (-1 i +1), a korišćenjem relacija (6.5), (6.6), (6.7) i (6.8), dobijaju računске vrednosti funkcija odziva koje su potpuno identične eksperimentalnim veličinama - izmerenim čvrstoćama $f_{k,7}$ i $f_{k,28}$ datim u tabelama 6.2-6.5.

6.3 ANALIZA FAKTORIJALNOG EKSPERIMENTA

6.3.1. Jednorodnost disperzije

Kako su ispitivanja čvrstoća betona uvek vršena na istom broju uzoraka ($n = 3$), za ocenu jednorodnosti disperzije biće primenjen poznati Kohrenov kriterijum koji se prema [145] može prikazati u obliku

$$G = \frac{(S_{yij}^2)_{\max}}{\sum_{j=1}^N S_{yij}^2} \quad (6.9)$$

Ovde je $(S_{yij}^2)_{\max}$ - maksimalna disperzija rezultata u okviru jednog faktorijalnog eksperimenta (naglašene vrednosti u tabelama 6.2-6.5), dok je $\sum_{j=1}^N S_{yij}^2$ zbir svih disperzija u okviru jednog faktorijalnog eksperimenta (sume iskazane na krajevima tabela 6.2-6.5).

Vrednosti G za pojedine faktorijalne eksperimente prikazane su u tabeli 6.6, zajedno sa veličinama S_{rep}^2 koje će biti potrebne za analizu adekvatnosti modela, a što će biti predmet razmatranja u tački 6.3.2.

Tabela 6.6 Vrednosti G i S_{rep}^2

Faktorijalni eksperiment	Starost (dani)	G	S_{rep}^2
$10^{\circ}\text{C} \leq T \leq 20^{\circ}\text{C}$	7	0,3960	0,8175
	28	0,3709	0,9200
$20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 30^{\circ}\text{C}$	7	0,3981	0,5400
	28	0,3572	0,8538

Za ocenu jednorodnosti disperzije potrebno je izvršiti poređenje računskih vrednosti G sa tabličnim vrednostima G_p . Za nivo pouzdanosti $p = 0,05$, $f_1 = 3-1 = 2$ i $k = 8$, prema Zazimku [145], dobija se da je $G_p = 0,5157$. Kako je u svim razmatranim slučajevima $G < G_p$, proizilazi da su sve disperzije homogene (jednorodne) za izabrani nivo pouzdanosti.

6.3.2. Adekvatnost modela

Adekvatnost modela sa proverava primenom Fišerovog kriterijuma

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_{rep}^2} < F_p, \quad (6.10)$$

gde je sada S_{ad}^2 disperzija adekvatnosti, a

$$S_{rep}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N S_{yij}^2}{N}. \quad (6.11)$$

Kako je u našem slučaju $S_{ad}^2 = 0$, što proizilazi iz činjenice da su razlike između računskih vrednosti čvrstoća koje se dobijaju iz (6.5), (6.6), (6.7) i (6.8) identične eksperimentalnim veličinama funkcija odziva, što je već napomenuto u tački 6.2, proizilazi da je $S_{ad}^2 = 0$, pa je prema tome i $F = 0$.

Tablična vrednost Fišerovog kriterijuma za $p = 0,05$, $f_1 = 8-1 = 7$ i $f_2 = 8(3-1) = 16$ iznosi $F_p = F_{(7,16)} = 2,65$. S obzirom na ovo, jasno je da je $\frac{S_{ad}^2}{S_{rep}^2} = 0 < 2,65$, pa proizilazi da dobijeni modeli na adekvatan način opisuju ispitivani proces.

6.3.3. Analiza značajnosti uticajnih faktora

Za analizu značajnosti uticajnih faktora mogu da posluže tabele 6.7 i 6.8 u kojima se koeficijenti polinoma (6.2) prikazuju na dva načina; u prvom slučaju (tabela 6.7) kao zavisnosti temperature negovanja i čvrstoće betona pri pritisku, a u drugom slučaju (tabela 6.8) kao zavisnosti čvrstoća pri pritisku betona od temperature negovanja.

Tabela 6.7 Koeficijenti polinoma za slučaj zavisnosti T , $f_{k,7}$ ($f_{k,28}$)

Faktorijalni eksperiment	Koeficijenti polinoma								
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}	
$10^\circ\text{C} \leq T \leq 20^\circ\text{C}$	$f_{k,7}$	26,100	-3,375	1,950	1,225	-0,125	-0,100	-0,175	0
	$f_{k,28}$	36,938	-2,588	2,888	0,788	0,462	-0,338	0,238	0,188
$20^\circ\text{C} \leq T \leq 30^\circ\text{C}$	$f_{k,7}$	28,725	-2,950	2,075	1,400	0	0,525	0,300	0,125
	$f_{k,28}$	37,225	-3,025	2,875	-0,500	0,225	-0,100	-0,250	-0,050

Tabela 6.7 pokazuje da su koeficijenti b_1 i b_2 za oba temperaturna područja nepromenljivi po znaku, u prvom slučaju negativni, a u drugom slučaju pozitivni. To znači da se sa povećanjem sadržaja zgre u cementu čvrstoće $f_{k,7}$ i $f_{k,28}$ u oba temperaturna područja smanjuju. S druge strane, pak, pošto su koeficijenti b_2 prikazani u tabeli 6.7. uvek pozitivni, proizilazi da se predmetne čvrstoće sa povećanjem sadržaja superplastifikatora na odgovarajući način povećavaju. Koeficijenti b_3 , međutim, s obzirom da su po znaku i pozitivni i negativni, ukazuju da se sa povećanjem temperature negovanja čvrstoće betona na 7 dana povećavaju, dok se čvrstoće betona na 28 dana, za temperature negovanja, od 20°C do 30°C srazmerno smanjuju.

Potpuno identični zaključci slede i u slučaju analize koeficijenata polinoma prikazanih u tabeli 6.8. Koeficijenti b_1 , pošto su uvek negativnog znaka, ukazuju da će čvrstoće betona $f_{k,7}$ i $f_{k,28}$, bez obzira na temperaturu negovanja, uvek opadati u funkciji povećanja sadržaja zgre u primenjenom cementu. Iste čvrstoće će se, pak, nezavisno od temperaturnog intervala nege, povećavati u funkciji povećane upotrebe superplastifikatora. Međutim, čvrstoća $f_{k,7}$ će biti veća zavisno od povećanja temperature nege, dok će se čvrstoća $f_{k,28}$ relativno smanjivati u funkciji povećanja temperature nege.

Tabela 6.8 Koeficijenti polinoma za slučaj zavisnosti $f_{k,7}$ ($f_{k,28}$), T

Faktorijalni eksperiment	Koeficijenti polinoma								
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}	
$f_{k,7}$	$10^\circ\text{C} \leq T \leq 20^\circ\text{C}$	26,100	-3,375	1,950	1,225	-0,125	-0,100	-0,175	0
	$20^\circ\text{C} \leq T \leq 30^\circ\text{C}$	28,725	-2,950	2,075	1,400	0	0,525	0,300	0,125
$f_{k,28}$	$10^\circ\text{C} \leq T \leq 20^\circ\text{C}$	36,938	-2,588	2,888	0,788	0,462	-0,338	0,238	0,188
	$20^\circ\text{C} \leq T \leq 30^\circ\text{C}$	37,225	-3,025	2,875	-0,500	0,225	-0,100	-0,250	-0,050

Svi zaključci koji proističu na osnovu analize matematičkih zavisnosti datih relacijama (6.5), (6.6), (6.7) i (6.8) u potpunosti se poklapaju sa zaključcima koji su već izloženi na osnovu analize eksperimentalnih rezultata, koji se odnose na čvrstoće betona pri pritisku, a koji su prezentirani u poglavlju 5.4.1.

6.3.4. Testiranje značajnosti koeficijenata

Značajnost koeficijenata polinoma (6.5), (6.6), (6.7) i (6.8) može se testirati korišćenjem poznate "t" raspodele. U vezi sa ovim potrebno je formirati veličine

$$t_i = \left| \frac{b_i}{S_{bi}} \right|, \quad (6.12)$$

gde je

$$S_{bi}^2 = \frac{S_{rep}^2}{N \cdot n}, \quad (6.13)$$

pri čemu je u našem slučaju $N = 8$, $n = 3$.

Ako je $t_i < t_{kr}$ (t_{kr} - kritična-tablična vrednost za nivo značajnosti p i vrednost $f=N(n-1)$), tada se koeficijent b_i ne uzima u obzir.

Polazeći od navedenih uslova, dobija se sledeće:

za $10^\circ\text{C} \leq T \leq 20^\circ\text{C}$

$t_{kr} = 2,120$, $S_{b_i} = 0,18456$, odbacuje se svako $b < 0,391$, pa je:

$$f_{k,7}^* = 26,100 - 3,375 X_1 + 1,950 X_2 + 1,225 X_3, \quad (6.14)$$

za $20^\circ\text{C} \leq T \leq 30^\circ\text{C}$

$t_{kr} = 2,120$, $S_{b_i} = 0,150$, odbacuje se svako $b < 0,318$, pa je:

$$f_{k,7}^* = 28,725 - 2,950 X_1 + 2,075 X_2 + 1,400 X_3 + 0,525 X_1 X_3, \quad (6.15)$$

za $10^\circ\text{C} \leq T \leq 20^\circ\text{C}$

$t_{kr} = 2,120$, $S_{b_i} = 0,19579$, odbacuje se svako $b < 0,415$, pa je:

$$f_{k,28}^* = 36,938 - 2,588 X_1 + 2,888 X_2 + 0,788 X_3 + 0,462 X_1 X_2, \quad (6.16)$$

za $20^\circ\text{C} \leq T \leq 30^\circ\text{C}$

$t_{kr} = 2,120$, $S_{b_i} = 0,18861$, odbacuje se svako $b < 0,400$, pa je:

$$f_{k,28}^* = 37,225 - 3,025 X_1 + 2,875 X_2 - 0,500 X_3. \quad (6.17)$$

U tabelama 6.9 i 6.10 prikazane su računске vrednosti čvrstoća $f_{k,7}$ i $f_{k,28}$ dobijene preko tačnih izraza (6.5), (6.6), (6.7) i (6.8), kao i čvrstoće $f_{k,7}^*$ i $f_{k,28}^*$ dobijene preko izraza (6.14), (6.15), (6.16) i (6.17) u kojima je izvršeno zanemarivanje pojedinih koeficijenata polinoma na bazi testiranja njihove značajnosti. U ovim tabelama je izvršeno i upoređenje tačnih ($f_{k,7}$ i $f_{k,28}$) i približnih ($f_{k,7}^*$ i $f_{k,28}^*$) vrednosti čvrstoća za temperaturne intervale $10^\circ\text{C} \leq T \leq 20^\circ\text{C}$ i $20^\circ\text{C} \leq T \leq 30^\circ\text{C}$ koji su razmatrani u okviru faktorijalnog eksperimenta. Veličine g koje se pojavljuju u navedenim tabelama predstavljaju relativna odstupanja u procentima tačnih i približnih vrednosti. Vrlo lako se može zapaziti da ova odstupanja ne prelaze granicu $\pm 2\%$.

Tabela 6.9 Upoređenje tačnih i približnih vrednosti čvrstoća za $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 10^{\circ}\text{C}$

N	z (%)	sp (%)	T (°C)	$\frac{f_{k,7}}{f_{k,7}^*}$ (MPa)	g (%)	$\frac{f_{k,28}}{f_{k,28}^*}$ (MPa)	g (%)
1	0	0	10	$\frac{25,90}{26,30}$	1,54	$\frac{36,40}{36,312}$	-0,24
2	30	0	10	$\frac{19,60}{19,55}$	-0,26	$\frac{30,60}{30,212}$	-1,27
3	0	1	10	$\frac{30,40}{30,20}$	-0,66	$\frac{40,40}{41,162}$	1,89
4	30	1	10	$\frac{23,60}{23,45}$	-0,64	$\frac{37,20}{36,912}$	-0,77
5	0	0	20	$\frac{28,90}{28,75}$	-0,52	$\frac{37,80}{37,888}$	0,23
6	30	0	20	$\frac{22,20}{22,00}$	-0,90	$\frac{31,40}{31,788}$	1,24
7	0	1	20	$\frac{32,70}{32,65}$	-0,15	$\frac{43,50}{42,738}$	-1,75
8	30	1	20	$\frac{25,50}{25,90}$	1,57	$\frac{38,20}{38,488}$	0,75

$$g = \frac{f_k^* - f_k}{f_k} \cdot 100 (\%)$$

Tabela 6.10 Upoređenje tačnih i približnih vrednosti čvrstoća za $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 30^{\circ}\text{C}$

N	z (%)	sp (%)	T (°C)	$\frac{f_{k,7}}{f_{k,7}^*}$ (MPa)	g (%)	$\frac{f_{k,28}}{f_{k,28}^*}$ (MPa)	g (%)
1	0	0	20	$\frac{28,90}{28,725}$	-0,60	$\frac{37,80}{37,875}$	0,20
2	30	0	20	$\frac{22,20}{21,775}$	-1,91	$\frac{31,40}{31,825}$	1,35
3	0	1	20	$\frac{32,70}{32,875}$	0,54	$\frac{43,50}{43,625}$	0,29
4	30	1	20	$\frac{25,50}{25,925}$	1,67	$\frac{38,20}{37,525}$	-1,64
5	0	0	30	$\frac{30,30}{30,475}$	0,58	$\frac{37,40}{36,875}$	-1,40
6	30	0	30	$\frac{25,20}{25,625}$	1,69	$\frac{30,80}{30,825}$	0,08
7	0	1	30	$\frac{34,80}{34,625}$	-0,50	$\frac{42,30}{42,625}$	0,77
8	30	1	30	$\frac{30,20}{29,775}$	-1,41	$\frac{36,40}{36,575}$	0,48

7. ANALIZA I DISKUSIJA REZULTATA ISPITIVANJA

7.1 ISPITIVANJA NA SVEŽEM BETONU

Na osnovu sprovedenih ispitivanja na svežem betonu može se konstatovati:

1. Konzistencija, koja je praćena isključivo kao funkcija proteklog vremena i temperature svežeg betona, odnosno ambijenta, dok su ostali parametri za pojedine vrste betona uzeti kao konstante, u osnovi se veoma značajno menja tokom vremena, pri čemu je najveća promena prisutna u prvih 15 minuta. Ovo je konstatovano merenjem sleganja i kasnijim razmatranjem funkcije relativnih odnosa izmerenih sleganja η prema relaciji (5.1), kako bi se našao način da se početna mera sleganja, koja je varirala u granicama od $\Delta h(0)=14\pm 2$ cm, svede na zajednički imenilac.

Promena konzistencije je utvrđena kako na betonskim mešavinama sa početnom $T_{bo}\approx 20^{\circ}\text{C}$ i $T_{amb}=4^{\circ}\text{C}$, 20°C i 32°C , tako i na mešavinama koje su imale istu temperaturu kao i ambijent ($T_{bo} = T_{amb} = 10^{\circ}\text{C}$, 20°C i 30°C). Pri ovome je pokazano da isključivo temperatura betona preko temperature ambijenta opredeljuje vrednost relativnog odnosa sleganja, tako da viša temperatura u funkciji vremena po pravilu daje manje vrednosti η . Naime, kod svih betona kod kojih je bilo $T_{bo} \approx T_{amb}$, vrednost relativnog odnosa sleganja opada sa porastom temperature, pa tako, na primer, kod betona II, posle 15 minuta iznosi 0,417, 0,321 i 0,289 na 10°C , 20°C i 30°C , respektivno. Kod betona kod kojih nije bio ispunjen uslov da $T_{bo} \approx T_{amb}$, ovaj trend je takođe prisutan, ali uz izvesna kolebanja. Naime, i u ovom slučaju se kroz vreme zapaža smanjivanje relativnog odnosa η , ali je to smanjivanje nešto izmenjeno u odnosu na konstantne ambijentalne temperature, pošto je pri ovim ispitivanjima konstatovana i promena temperature u samom betonu. Ovo je, logično, nastupilo kao posledica razmene toplote na relaciji beton-sredina, kao i usled uticaja oslobođene toplote hidratacije cementa, što je sve zajedno posmatrano takođe dovodilo do odgovarajućeg smanjivanja odnosa η kroz vreme.

Nezavisno od vrste i temperatura betona, ispitivanja su pokazala da posle nagle promene sleganja u prvih 15 minuta, dalja promena parametra η može da se prikaže u vidu linearne funkcije vremena, tako da se na bazi dobijenih analitičkih izraza uvek može dovoljno tačno odrediti vreme t_0 za koje se dobija nulta vrednost sleganja. Tako, na primer, kod betona oznake IV (sa 30% zgure i sa 1% superplastifikatora), vreme u minutima kada bi mera sleganja pala na nulu iznosi 122, dok kod betona oznake II (sa čistim portland cementom i uz prisustvo 1% superplastifikatora), ovo vreme iznosi svega 93 minuta (videti sl. 5.10 i sl. 5.12).

Konzistencija praćena preko Vebe-metode ne pokazuje tako naglu promenu u prvih 15 minuta; rezultati koji povezuju Vebe stepene i vreme mogu se u celokupnom vremenskom intervalu od $t = 0-90$ min. aproksimirati jedinstvenom funkcijom - pravom linijom.

Na bazi svega rečenog sledi da je u području plastičnih konzistencija betona metoda sleganja osetljivija od Vebe metode.

2. Nakon nagle promene u prvih 15 minuta, konzistencija betona se, kao što je napred već rečeno, menja tako da se za posmatrani temperaturni interval $4^{\circ}\text{C} \leq T \leq 32^{\circ}\text{C}$ i za usvojenu temperaturu betona $T_{bo} \approx 20^{\circ}\text{C}$, može, primenom metode najmanjih kvadrata, izvršiti aproksimacija svih eksperimentalno dobijenih vrednosti funkcije $\eta(t)$ za jedan isti beton pravom linijom. Pri ovome, za $t \geq 15$ min., dobijaju se koeficijenti korelacije r od 0,873 do 0,938, što odgovara slučaju "jake" i "vrlo jake" korelacije.

U slučaju kada je $T_{bo} = T_{amb}$, aproksimacijom pravom linijom na sličan način dobijaju se koeficijenti korelacije od 0,9806 do 0,9961 - što predstavlja bolje slaganje nego u slučaju kada nije bio ispunjen uslov da je $T_{bo} = T_{amb}$. I ovo takođe potvrđuje napred izneto zapažanje da se u slučajevima $T_{bo} \neq T_{amb}$ primećuje značajnije kolebanje eksperimentalnih vrednosti.

3. Ako se, pak, uzmu u obzir svi rezultati ispitivanja sleganja, pa i oni za interval $0 \leq t < 15$ min., može se primeniti funkcija oblika $\Delta h(t) = A \cdot e^{BT}$. Pri ovome se, takođe generalno posmatrano, dobijaju visoki koeficijenti korelacije, međutim, ova funkcija slabije "pokriva" područje $0 \leq t < 15$ min.
4. Promena konzistencije merena Vebe-metodom može se aproksimirati za vreme $t \geq 0$ pravom linijom, tj. uzimanjem u obzir svih izmerenih veličina. U ovom slučaju, na osnovu grafika prikazanih na slikama 5.15, 5.16, 5.17 i 5.18, dobijaju se funkcije koje rezultate dobijene eksperimentalnim putem aproksimiraju sa koeficijentom korelacije r od 0,987 do 0,996, što opet odgovara slučaju "vrlo jake" korelacije.
5. Na osnovu svih eksperimentalnih rezultata definisana je zavisnost Vebe-stepeni u funkciji mere sleganja (slika 5.19), koja fenomenološki predstavlja jednu opštu zavisnost ne vodeći računa o vrsti betona niti o temperaturnom faktoru. Naime, na ovoj slici prikazane su sve vrednosti konzistencije merene na dva načina i pri tom je formulisana odgovarajuća logaritamska zavisnost nezavisno od toga da li se radilo o betonu spravljenom sa čistim portland cementom ili sa onim uz dodatak zgure, da li je bio prisutan superplatifikator ili ne, kao i bez obzira na temperaturu T_{amb} , odnosno T_b , pri kojoj je određeno merenje izvršeno. Znači, predmetna zavisnost ima najopštiji karakter i ona isključivo definiše zavisnost Vebe-sleganje, bez obzira da li su konkretne veličine Vebe stepeni ili sleganja posledica sastava betona, karakteristika konstituenata, temperature mešavine ili vremena.
6. Ispitivanja su pokazala veću osetljivost na temperaturu ambijenta betona temperiranih na 20°C , a spravljenih sa superplastifikatorom, u odnosu na one bez dodatka (videti ΔT_b - tabela 5.8); ova veća osetljivost na temperaturu se može objasniti upotrebom manje količine vode kod superplastificiranih betona, što ima za posledicu bržu razmenu toplote između betona i ambijenta, kao i intenzivnije formiranje i preplitanje početnih produkata hidratacije cementa u vidu igličastih kristala tzv. aluminatne strukture. Pri ovome je taj fenomen znatno izraženiji kod betona sa čistim portland

cementom, što je i logično s obzirom na okolnost da se aluminatna struktura formira samo kao posledica hidratacije portland cementa.

7. Ako se analizira promena konzistencije u toku vremena zavisno od vrste betona može se zaključiti da beton oznake II (sa čistim portland cementom i uz prisustvo 1% superplastifikatora), pri uslovima kada $T_{bo} \neq T_{amb}$, mnogo brže menja konzistenciju od betona oznake I. S druge strane, pak, beton oznake IV, tj. beton spravljen sa portland cementom sa 30% zgure i uz prisustvo 1% superplastifikatora, pokazuje bolje "održavanje" konzistencije od betona oznake III u svim navedenim ambijentalnim uslovima (4°C, 20°C i 32°C). Ako se, pak, uporede betoni I i III, tj. oni bez prisustva superplastifikatora, može se zaključiti da beton oznake III - sa čistim portland cementom i uz prisustvo 30% zgure, manje menja konzistenciju u toku vremena; ovo je izraženo pri svim navedenim ambijentalnim uslovima. Znači, prisustvo zgure u cementu uvek produžava "radno vreme" betona, odnosno doprinosi sporijoj promeni konzistencije. Prisustvo superplastifikatora, pak, zavisno od prisustva ili neprisustva zgure u cementu, bolje održava konzistenciju (beton oznake IV), ili dovodi do bržeg pada sleganja (beton oznake II).

Na osnovu ispitivanja može se zaključiti da je prema promeni konzistencije u toku vremena poredak ispitivanih betona sledeći: najmanja promena konzistencije zapaža se kod betona oznake IV, zatim sledi beton oznake III, pa onaj oznake I i na kraju, najbrže menja konzistenciju beton oznake II.

Treba istaći da se ovakav poredak promene konzistencije zavisno od vrste betona zadržao kako u slučajevima $T_{bo} \neq T_{amb}$, tako i pri uslovima kada je $T_{bo} = T_{amb}$ i kada je temperatura iznosila 10°C, 20°C i 30°C; u svim slučajevima linije relativne promene sleganja na višim temperaturama išle su ispod onih na nižim temperaturama (videti slike 5.9 - 5.12 i 5.21 - 5.24).

8. U drugom delu eksperimentalnih ispitivanja na svežem betonu, kada je temperatura betona bila jednaka temperaturi ambijenta i iznosila 10°C, 20°C i 30°C, za usvojenu konzistenciju konstatovana je promena sadržaja vode, tj. mase tečne faze (voda zajedno sa superplastifikatorom), odnosno faktora ω_{br} , zavisno od temperature.

Na osnovu tabele 5.10 može se sagledati da postoji povećana potreba za tečnom fazom pri temperaturama od 20°C i 30°C u odnosu na tečnu fazu na 10°C; ovo povećanje je najmanje kod betona oznake I i iznosi 1,87% i 3,92% za 20°C i 30°C, respektivno, dok je procenat ovog povećanja izraženiji kod plastificiranih betona (oznaka II i oznaka IV) i iznosi 5,09-8,02% i 12,53-12,96%, za temperature 20°C i 30°C, respektivno. Ako se, pak, uporede vrednosti promene tečne faze u odnosu na uobičajenu temperaturu od 20°C (tabela 5.2 i slika 5.20), vidi se da betoni na 10°C iziskuju manju količinu vode, tj. tečne faze, dok oni na 30°C iziskuju povećanu količinu tečne faze, za istu konzistenciju svežeg betona. Za različite vrste betona, ovaj procenat promene tečne faze se kreće od -1,83% kod betona I, do -7,43% kod betona oznake IV, dok se za betone oznake III i II kreće u granicama od -4,56 do -4,85%, respektivno. Procenat promene tečne faze na 30°C kreće se od 2,018% (beton oznake

I) do 7,07% (beton oznake II). Kao što se vidi, procenat povećanja tečne faze betona spravljenih na 20°C, u odnosu na one na 10°C, veoma mnogo zavisi od vrste betona, tj. od vrste cementa upotrebljenog za spravljanje betona, kao i od prisustva superplastifikatora.

Naime, u svim slučajevima beton oznake III (spravljen sa portland cementom uz dodatak 30% zgre) pokazuje veću osetljivost na promenu temperature, pa pokazuje i veći procenat promene tečne faze u odnosu na beton oznake I (spravljen sa čistim portland cementom), pri istoj temperaturi. Isto tako, upotreba superplastifikatora u konstantnoj količini (1% od mase cementa kod betona II i IV) pokazuje značajno povećanje, odnosno smanjenje tečne faze zavisno od temperature betona, u odnosu na betone etalone. Znači, pošto je procenat primenjenog superplastifikatora kod svih superplastificiranih betona bio konstantan, problem se sveo samo na vrstu primenjenog cementa.

Sve ovo govori o tome da zavisnost "masa tečne faze - T_b " nije izrazito linearna funkcija, kako se to često u literaturi interpretira, i da čak za betone istog sastava i iste početne konzistencije značajno zavisi od vrste cementa koji je upotrebljen za spravljanje betona i od prisustva ili neprisustva superplastifikatora.

9. Što se, pak, tiče upotrebe samog superplastifikatora kod betona sa različitim vrstama cementa, može se zaključiti da je efikasnost superplastifikatora (pri istoj količini od 1%), tj. njegov uticaj na procenat smanjenja tečne faze u odnosu na neplastificirani beton, na temperaturama 10°C i 20°C nešto veći kod betona oznake I u odnosu na beton oznake III, dok se na 30°C ovaj trend ne održava. Isto tako, zapaža se da se pri svim navedenim temperaturama (10°C, 20°C i 30°C), na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 5.11, kod betona oznaka III i IV, tj. kod onih spravljenih uz prisustvo zgre, javlja povećana potreba za tečnom fazom, što je sasvim logično ako se poznaju pojedine fizičke karakteristike navedenih cemenata (na primer, specifična površina i dr.).

7.2 ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA OČVRSLOG BETONA

7.2.1 Čvrstoće pri pritisku

Rezultati ispitivanja bitnih za ocenu uticaja sastava i termohigrometrijskih parametara na osnovna svojstva betona prikazani su već u prethodnim poglavljima ovog rada, koja se odnose na eksperimentalna ispitivanja sprovedena na očvrsnom betonu. Na osnovu tamo prikazanih rezultata (slika 5.34) jasno se uočava da čvrstoće betona pri pritisku negovanih prvih 7 dana na 10°C, a kasnije u laboratorijskim uslovima, imaju po pravilu najniže vrednosti; ovo je svakako posledica usporene hidratacije cementa na nižim temperaturama. Čvrstoće istih ovih betona negovanih prvo 7 dana na 20°C, a posle u laboratorijskim uslovima, premašuju, ili su veoma bliske čvrstoćama betona negovanim na 30°C. Čvrstoće betona, pak, koji su negovani na 30°C, a kasnije u laboratorijskim uslovima, u prvo vreme (do 7 dana), kod svih betona premašuju one dobijene na 10°C ili na 20°C. Međutim, nakon

ovog vremena, u starosti od 28 dana, čvrstoće pri pritisku ovakvih betona opadaju (videti sl. 5.42). Ovo je u neposrednoj vezi sa formiranjem strukture betona pri povišenoj temperaturi, pri čemu se stvaraju proizvodi slabije fizičke strukture.

Na osnovu rezultata ispitivanja prikazanih na slikama 5.39, 5.40, 5.41 i 5.43, može se zaključiti da najviše brojne vrednosti čvrstoća pri pritisku, kako za temperature 10°C tako i za temperature 20°C i 30°C, ima beton II. Iza njega, dolazi beton I, pa beton IV i na kraju beton III. Ovo se odnosi na starost od 3 i 7 dana. Međutim, pri starosti od 28 dana čvrstoće pri pritisku betona I i betona IV su veoma bliske, a negde se čak i poklapaju (na 20°C).

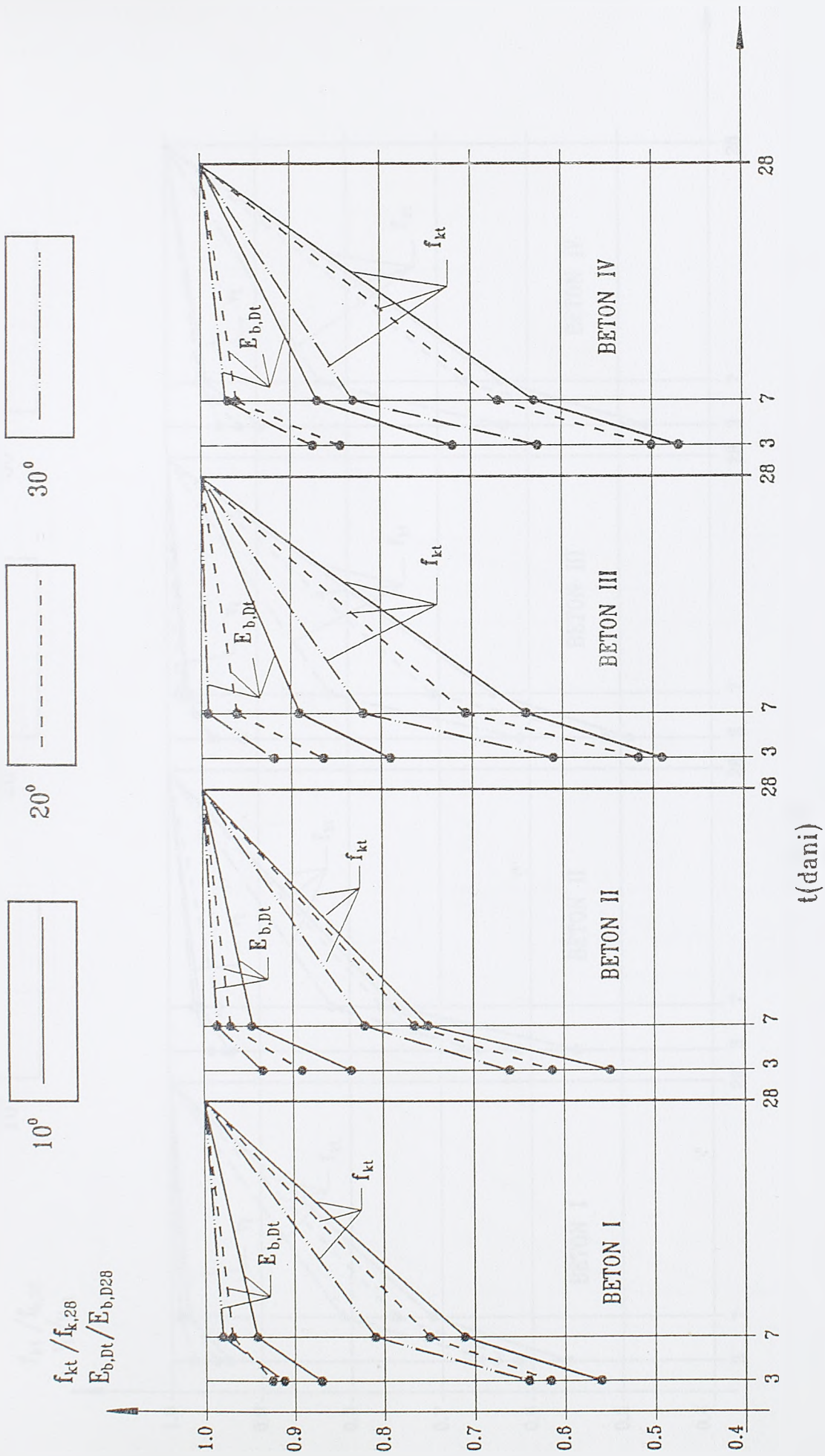
7.2.2 Promene i odnosi eksperimentalno utvrđenih svojstava betona kroz vreme

Na osnovu rezultata ispitivanja prikazanih u prethodnim tačkama određeni su odnosi izmerenih čvrstoća pri pritisku, dinamičkih modula elastičnosti i brzina prostiranja ultrazvuka za pojedine starosti betona u odnosu na odgovarajuće veličine koje se odnose na starost od 28 dana. Ovi odnosi su prikazani u tabeli 7.1, koja obuhvata sve navedene odnose za pojedine vrste betona i za različite temperature $T_{amb} \approx T_{bo}$.

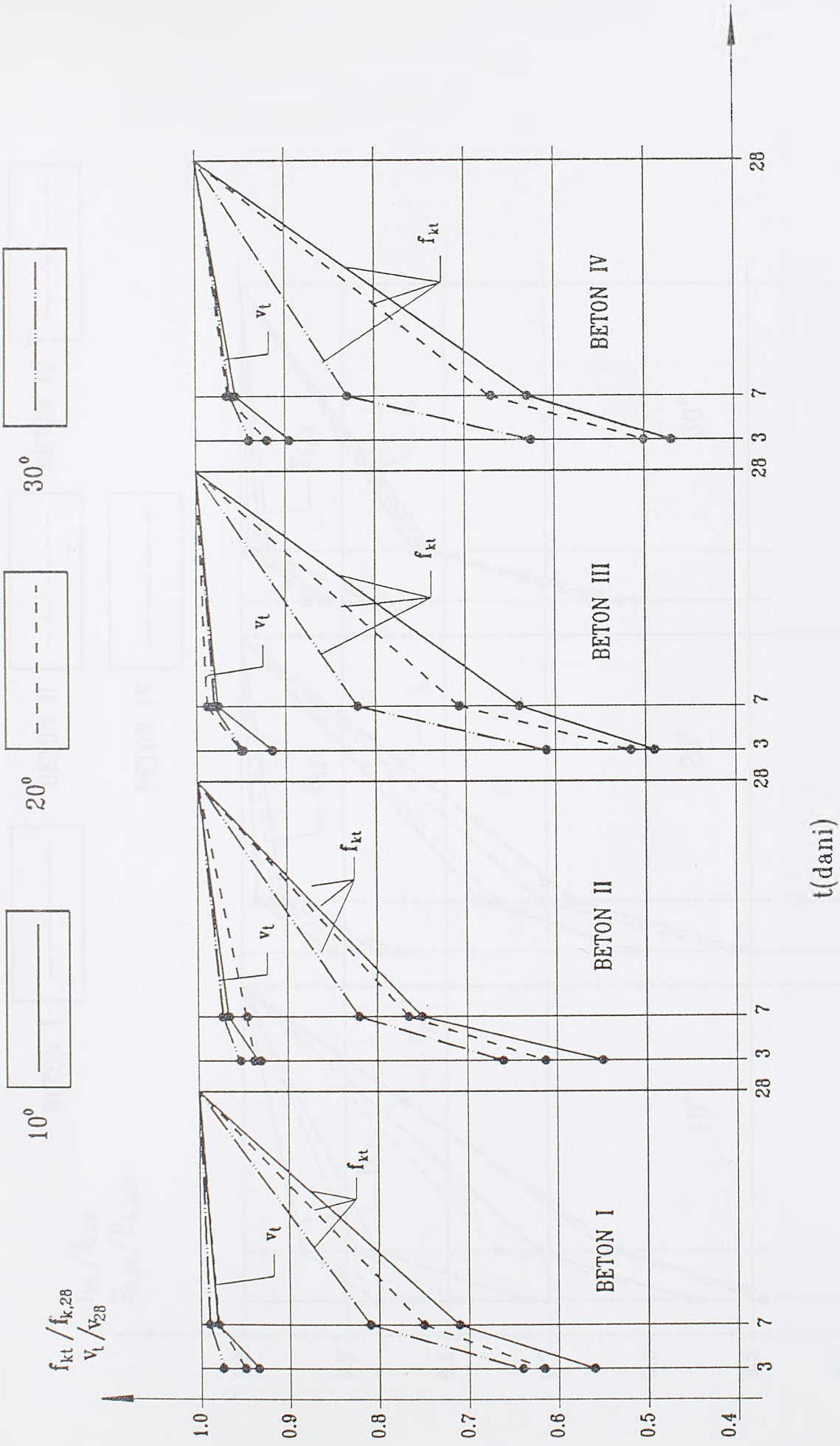
Tabela 7.1 Odnosi v_t/v_{28} , $E_{b,D,t}/E_{b,D,28}$ i $f_{kt}/f_{k,28}$ za betone I, II, III i IV zavisno od $T_{bo} \approx T_{amb} = 10^\circ\text{C}$, 20°C i 30°C

T_{amb} (°C)	Vrsta betona	$\frac{v_1}{v_{28}}$	$\frac{E_{b,D,1}}{E_{b,D,28}}$	$\frac{f_{k,3}}{f_{k,28}}$	$\frac{E_{bD,3}}{E_{bD,28}}$	$\frac{v_3}{v_{28}}$	$\frac{f_{k,7}}{f_{k,28}}$	$\frac{E_{bD,7}}{E_{bD,28}}$	$\frac{v_7}{v_{28}}$
10	I	0,791	0,609	0,560	0,870	0,934	0,711	0,942	0,981
	II	0,802	0,522	0,549	0,835	0,933	0,750	0,946	0,966
	III	0,721	0,420	0,490	0,790	0,914	0,640	0,891	0,976
	IV	0,696	0,354	0,470	0,720	0,894	0,630	0,870	0,955
20	I	0,876	0,726	0,616	0,912	0,950	0,760	0,981	0,980
	II	0,860	0,618	0,613	0,890	0,936	0,750	0,970	0,946
	III	0,794	0,609	0,516	0,864	0,950	0,707	0,960	0,988
	IV	0,838	0,524	0,503	0,844	0,920	0,670	0,960	0,964
30	I	0,936	0,808	0,640	0,925	0,974	0,810	0,970	0,990
	II	0,924	0,795	0,660	0,934	0,954	0,820	0,985	0,972
	III	0,857	0,693	0,610	0,919	0,949	0,820	0,993	0,976
	IV	0,860	0,661	0,626	0,875	0,939	0,830	0,960	0,961

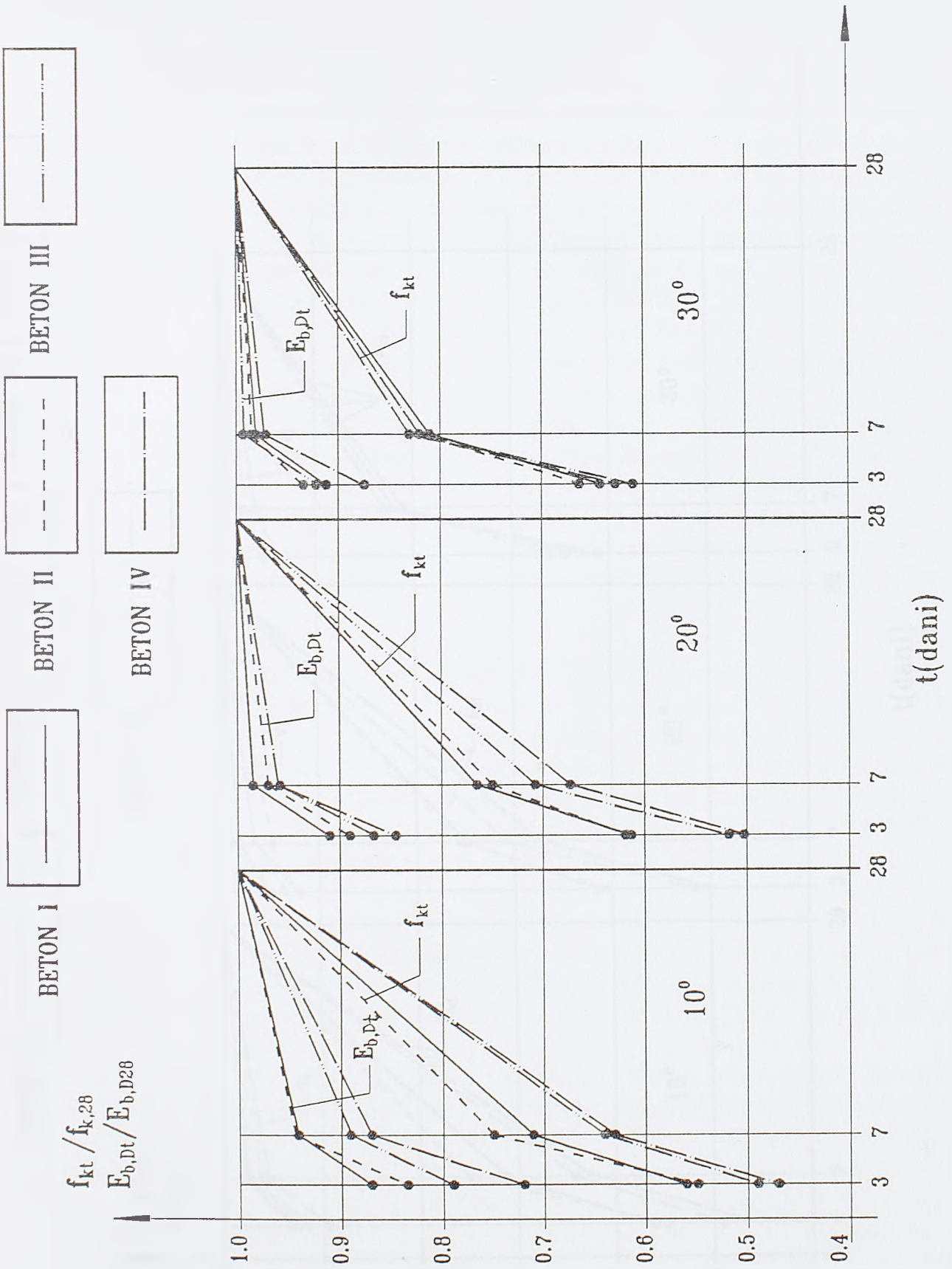
Grafička interpretacija ovih odnosa, pak, prikazana je na slikama 7.1 - 7.4. Na sl. 7.1 i 7.2 predmetni odnosi su za betone I, II, III i IV prikazani u zavisnosti od vremena, dok su na slikama 7.3 i 7.4 isti ti odnosi, ali za različite temperature ambijenta, takođe dati kao funkcije vremena. Na osnovu navedene tabele i datih grafičkih prikaza vrlo jasno se mogu



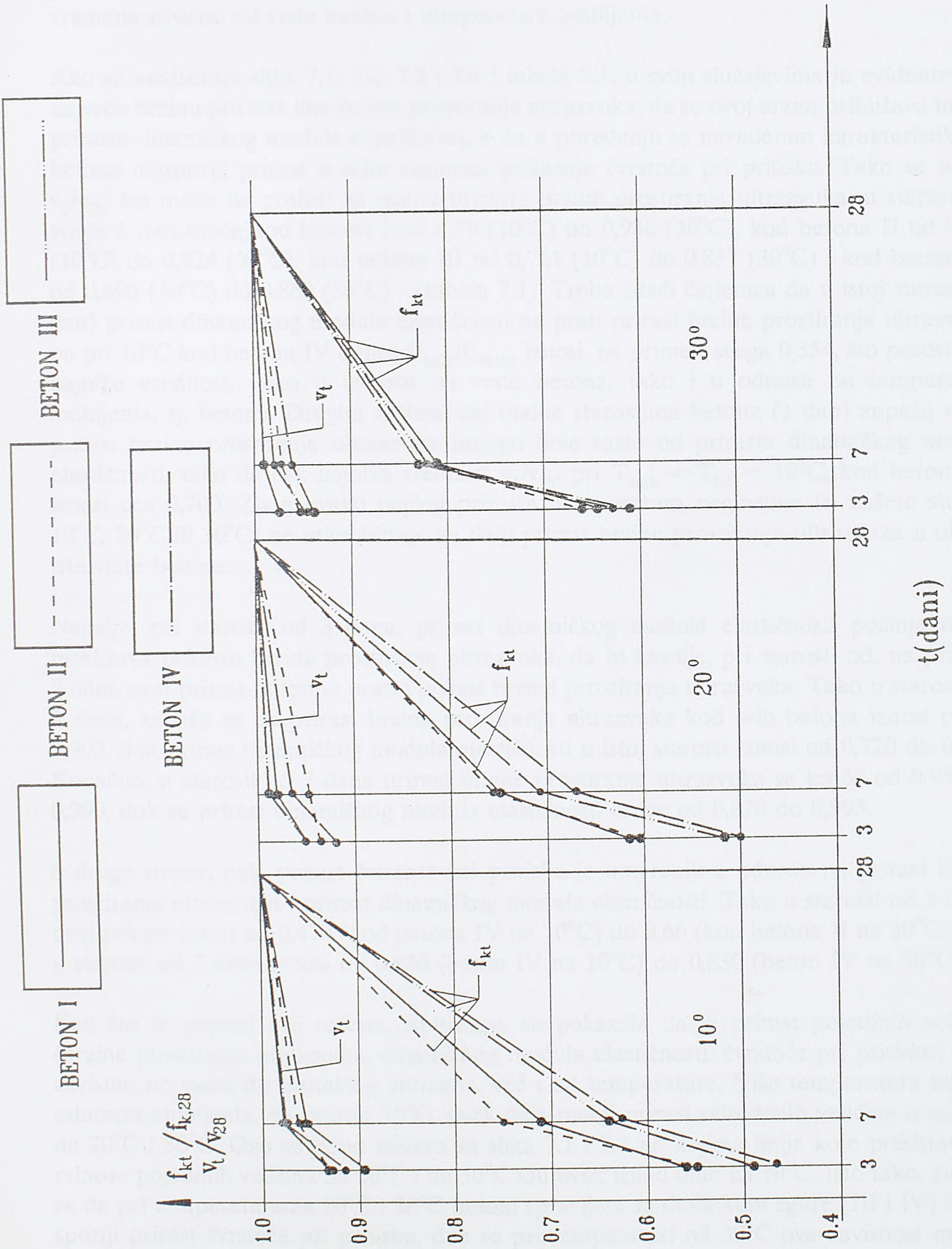
Sl. 7.1 Odnosi $f_{kt}/f_{k,28}$ i $E_{b,Dt}/E_{b,D28}$ u funkciji vremena i T_{amb} za različite vrste betona



Sl. 7.2 Odnosi $f_{kt}/f_{k,28}$ i v_t/v_{28} u funkciji vremena i T_{amb} za različite vrste betona



Sl. 7.3 Odnosi $f_{kt}/f_{k,28}$ i $E_{b,Dt}/E_{b,D28}$ u funkciji vremena i vrste betona za različite T_{amb}



Sl. 7.4 Odnosi $f_{kt}/f_{k,28}$ i v_t/v_{28} u funkciji vremena i vrste betona za različite T_{amb}

sagledati veličine čvrstoća, dinamičkih modula elastičnosti i brzina ultrazvuka, kao i brzine prirasta čvrstoće, dinamičkog modula elastičnosti i brzine prostiranja ultrazvuka u toku vremena zavisno od vrste betona i temperature ambijenta.

Ako se analiziraju slike 7.1, 7.2, 7.3 i 7.4 i tabela 7.1, u svim slučajevima je evidentno da najveću brzinu prirasta ima brzina prostiranja ultrazvuka, da se ovoj brzini približava brzina prirasta dinamičkog modula elastičnosti, a da u poređenju sa navedenim karakteristikama betona najsporiji prirast u toku vremena pokazuje čvrstoća pri pritisku. Tako se odnos v_1/v_{28} , što može da posluži za ocenu prirasta brzine prostiranja ultrazvuka, u starosti od svega 1 dan kreće kod betona I od 0,79 (10°C) do 0,936 (30°C), kod betona II od 0,802 (10°C) do 0,924 (30°C), kod betona III od 0,721 (10°C) do 0,857 (30°C) i kod betona IV od 0,696 (10°C) do 0,860 (30°C) - (tabela 7.1). Treba istaći činjenicu da u istoj starosti (1 dan) prirast dinamičkog modula elastičnosti ne prati prirast brzine prostiranja ultrazvuka, pa pri 10°C kod betona IV odnos E_{bD1}/E_{bD28} iznosi, na primer, svega 0,354, što predstavlja najnižu vrednost, kako u odnosu na vrste betona, tako i u odnosu na temperature ambijenta, tj. betona. Drugim rečima, pri malim starostima betona (1 dan) zapaža se da prirast brzine prostiranja ultrazvuka mnogo brže raste od prirasta dinamičkog modula elastičnosti, tako da čak najniža vrednost v_1/v_{28} , pri $T_{amb} = T_{bo} = 10^\circ\text{C}$, kod betona IV iznosi cca 0,700. Zbog ovako naglog prirasta, temperatura negovanja (u našem slučaju 10°C, 20°C ili 30°C) ne utiče bitnije na dalji prirast brzine prostiranja ultrazvuka u okviru iste vrste betona.

Nadalje, pri starosti od 3 dana, prirast dinamičkog modula elastičnosti počinje da se približava prirastu brzine prostiranja ultrazvuka, da bi kasnije, pri starosti od, na primer, 7 dana ovaj prirast potpuno pratio prirast brzine prostiranja ultrazvuka. Tako u starosti od 3 dana, zapaža se da prirast brzine prostiranja ultrazvuka kod svih betona iznosi preko 0,902, dok prirast dinamičkog modula elastičnosti u istoj starosti iznosi od 0,720 do 0,934. Konačno, u starosti od 7 dana prirast brzine prostiranja ultrazvuka se kreće od 0,955 do 0,990, dok se prirast dinamičkog modula elastičnosti kreće od 0,870 do 0,993.

S druge strane, pak, prirast čvrstoće pri pritisku je umereniji u odnosu na prirast brzine prostiranja ultrazvuka i prirast dinamičkog modula elastičnosti. Tako u starosti od 3 dana, ovaj prirast iznosi od 0,470 (kod betona IV na 10°C) do 0,66 (kod betona II na 30°C), dok u starosti od 7 dana iznosi od 0,630 (beton IV na 10°C) do 0,830 (beton IV na 30°C).

Kao što je napred već rečeno, ispitivanja su pokazala da je prirast pojedinih veličina (brzine prostiranja ultrazvuka, dinamičkog modula elastičnosti, čvrstoće pri pritisku) uvek zavistan ne samo do proteklog vremena, već i od temperature. Niža temperatura betona odnosno ambijenta, na primer 10°C, uvek daje manji prirast određenih veličina u odnosu na 20°C i 30°C. Ovo se jasno uočava sa slika 7.1 i 7.2 na kojima linije koje predstavljaju odnose pojedinih veličina na 20°C i na 30°C idu uvek iznad onih na 10°C. Isto tako, zapaža se da pri temperaturama 10°C i 20°C betoni spravljeni sa dodatkom zgure (III i IV) imaju sporiji prirast čvrstoća pri pritisku, dok se pri temperaturi od 30°C ova zavisnost menja; naime, betoni spravljeni sa dodatkom zgure pokazuju čak veći prirast (beton IV).

Ako se, pak, porede različite vrste betona pri određenoj temperaturi, može se zaključiti da pri $T_{bo} = T_{amb} = 10^{\circ}\text{C}$ najveći prirast čvrstoće pri pritisku ima beton II, zatim beton I, pa beton III i na kraju beton IV. Pri temperaturi 20°C , situacija je malo promenjena, pa najveći prirast čvrstoće pri pritisku pokazuje beton I, zatim beton II, beton III, pa beton IV. Pri temperaturi 30°C prirast čvrstoća pri pritisku, mada se veoma malo razlikuje od betona do betona, ima sledeći redosled: beton II, beton IV, beton III i beton I.

Sa slika 7.3 i 7.4 može se uočiti da pri istim temperaturama i za iste starosti betona prirast dinamičkog modula elastičnosti ne prati u potpunosti prirast čvrstoće pri pritisku; kod prirasta brzine prostiranja ultrazvuka ovaj trend je još uočljiviji.

7.2.3 Analiza čvrstoća betona pri pritisku na bazi parametra zrelosti

S obzirom na poznatu činjenicu da se čvrstoća betona pri pritisku, osim posebnog izražavanja u obliku zavisnosti od vremena i u obliku zavisnosti od temperature negovanja, može definisati i preko parametra zrelosti M koji jednovremeno obuhvata oba navedena uticajna faktora, u daljem će se prikazati interpretacija rezultata naših ispitivanja na bazi tzv. koncepta zrelosti betona.

Kao što pokazuje slika 5.33, za svaki od primenjenih režima nege betona, primenom poznate relacije

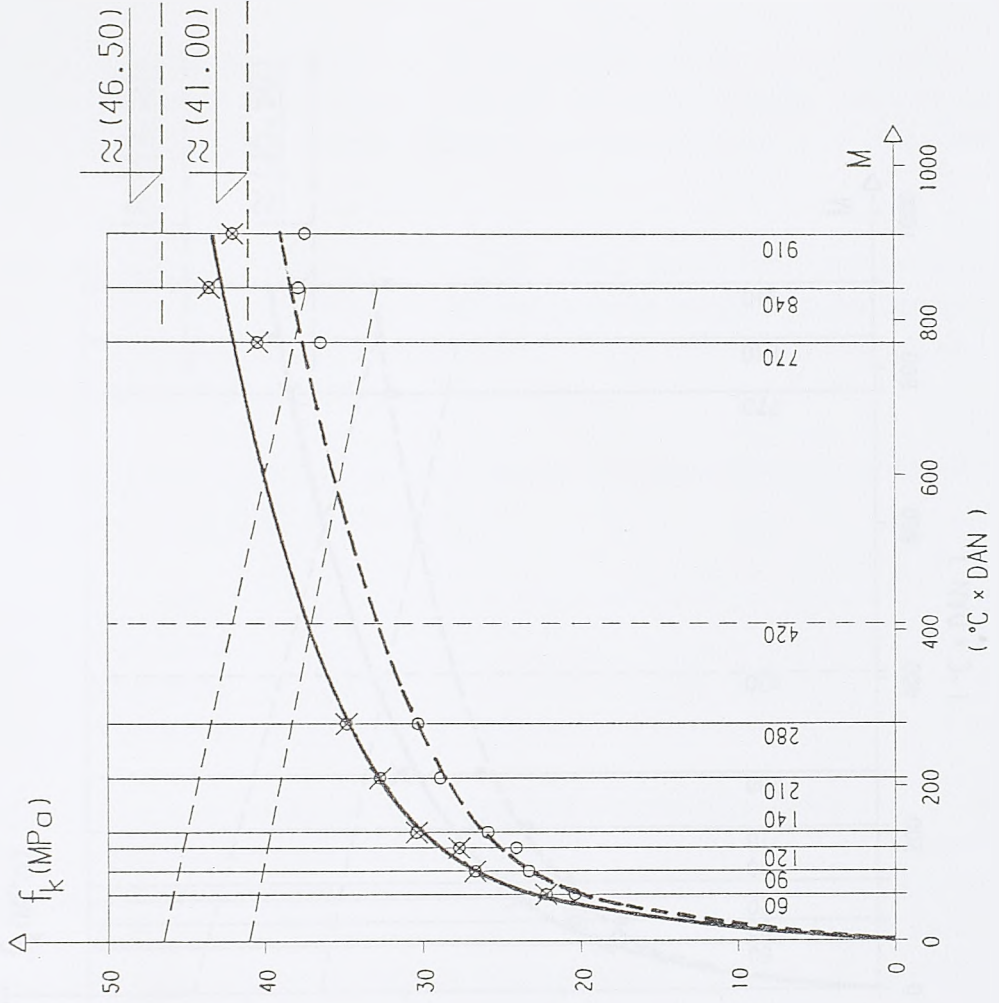
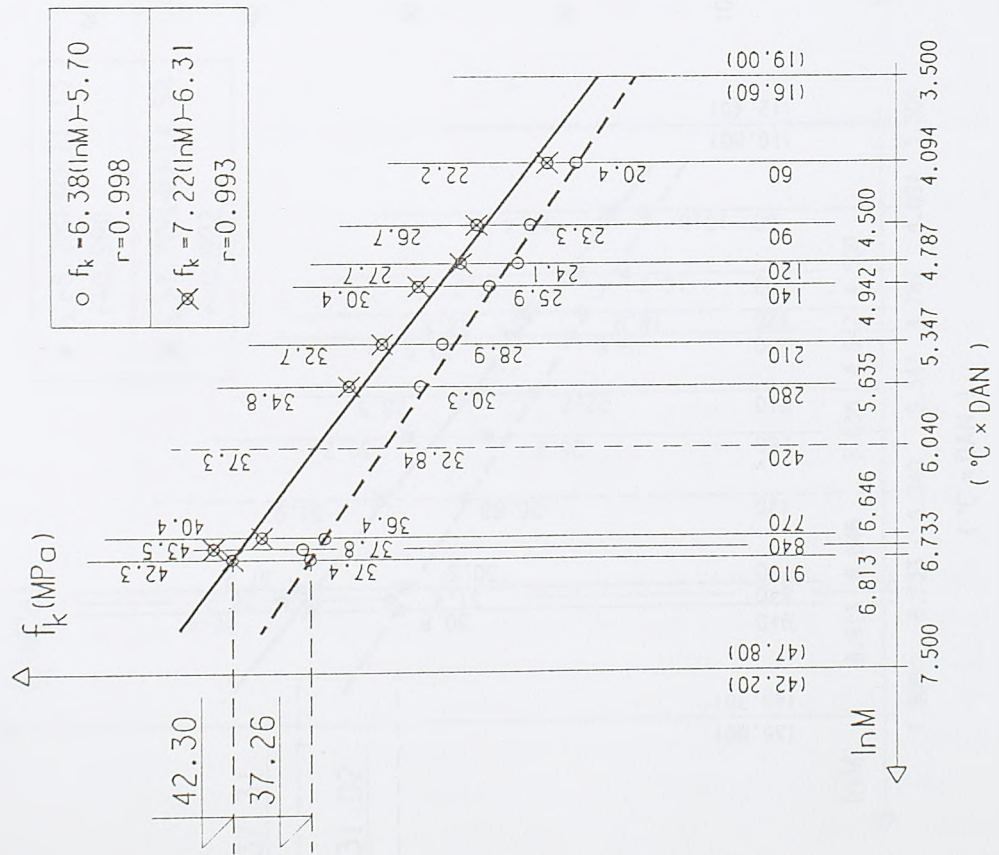
$$M = (T + 10) \cdot t_r$$

(videti, na primer [91]), izračunate su odgovarajuće veličine parametra M ($^{\circ}\text{C} \times \text{dan}$), pri čemu su dobijene vrednosti poslužile za definisanje zavisnosti $f_k = f_k(M)$. Ove zavisnosti, koje se odnose na sve ispitivane betone, prikazane su na slikama 7.5 i 7.6. Na navedenim slikama, osim prikaza predmetnih funkcija u koordinatnom sistemu $M - f_k$, dat je i prikaz istih funkcija u koordinatnom sistemu $\ln M - f_k$, čime je pokazano da se za slučaj predstavljanja veličine M u logaritamskoj razmeri, funkcija čvrstoće betona menja približno pravolinijski.

Slike 7.5 i 7.6 nedvosmisleno pokazuju da se u odnosu na čvrstoću betona pri pritisku, putem parametra M , doista može iskazati zbirni uticaj vremena i temperature negovanja. Dokaz za ovo su dobro uklapanje u skup eksperimentalno dobijenih vrednosti čvrstoća, monotono rastući trend funkcije $f_k(M)$ i njen asimptotski karakter za slučaj $M \rightarrow \infty$ (a to znači i za $t \rightarrow \infty$), kao i visoke vrednosti koeficijenata korelacije r pri linearizaciji predmetne funkcije u koordinatnom sistemu $\ln M - f_k$.

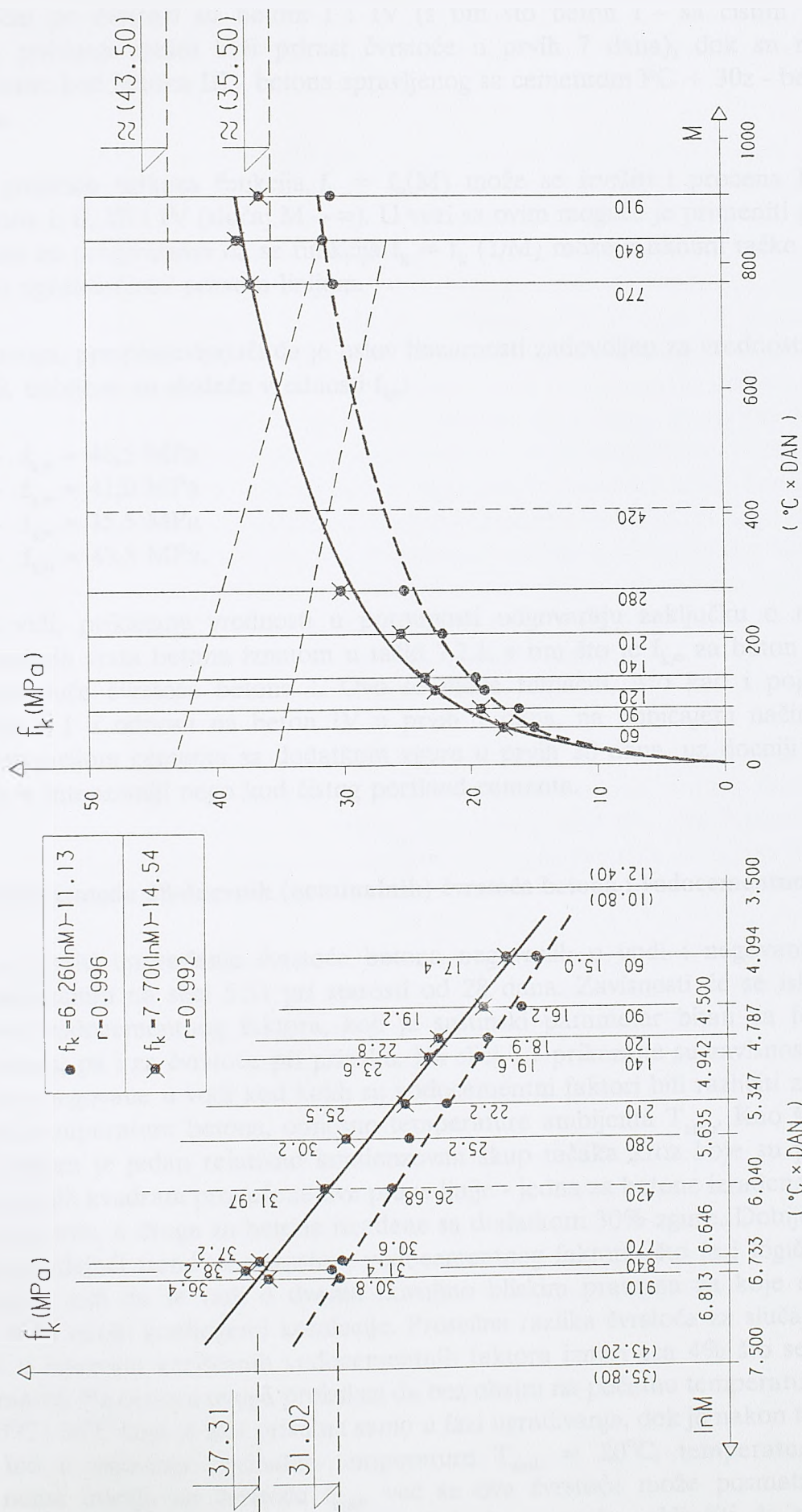
Na osnovu analize rezultata prikazanih na slikama 7.5 i 7.6 takođe sledi da superplastificirani betoni, bez obzira da li su spravljani sa čistim portland cementnom ili sa cementom sa dodatkom zgure, pri istoj početnoj konzistenciji, u funkciji parametra M , uvek pokazuju veće čvrstoće pri pritisku od odgovarajućih neplastificiranih betona. S druge strane, pak, pod istim uslovima u toku vremena najviše čvrstoće ima beton II, iza njega

ČIST PC



Sl. 7.5 Zavisnost čvrstoće betona na bazi čistog portland cementa od zrelosti

PC +30z



Sl. 7.6 Zavisnost čvrstoće betona spravljenog uz dodatak zgre od zrelosti

skoro identični po čvrstoći su betoni I i IV (s tim što beton I - sa čistim portland cementom - pokazuje nešto brži prirast čvrstoće u prvih 7 dana), dok su najmanje čvrstoće prisutne kod betona III - betona spravljenog sa cementom PC + 30z - bez superplastifikatora.

Na osnovu grafičkih prikaza funkcija $f_k = f_k(M)$ može se izvršiti i procena konačnih čvrstoća betona I, II, III i IV (slučaj $M \rightarrow \infty$). U vezi sa ovim moguće je primeniti postupak koji se zasniva na pretpostavci da se funkcija $f_k = f_k(1/M)$ može u okolini tačke 0 (slučaj kada $M \rightarrow \infty$) aproksimirati pravom linijom.

Na osnovu ovoga, pretpostavljajući da je uslov linearnosti zadovoljen za vrednosti $1/M=0$, $1/420$ i $1/840$, dobijene su sledeće vrednosti $f_{k,\infty}$:

beton I	-	$f_{k,\infty} \approx 46,5$ MPa
beton II	-	$f_{k,\infty} \approx 41,0$ MPa
beton III	-	$f_{k,\infty} \approx 35,5$ MPa
beton IV	-	$f_{k,\infty} \approx 43,5$ MPa.

Kao što se vidi, prikazane vrednosti u potpunosti odgovaraju zaključku o redosledu čvrstoća pojedinih vrsta betona iznetom u tački 7.2.1, s tim što je $f_{k,\infty}$ za beton IV malo iznad odgovarajuće čvrstoće betona I. Ovo se može tumačiti, isto kao i pojava veće čvrstoće betona I u odnosu na beton IV u prvih 7 dana, na uobičajeni način - nešto sporijom hidratacijom cementa sa dodatkom zgure u prvih 28 dana, uz docniji nastavak procesa koji je intenzivniji nego kod čistog portland cementa.

7.2.4 Zavisnosti između 28-dnevnih (nominalnih) čvrstoća betona i vodocementnog faktora

Ovde će se izvršiti upoređenje čvrstoća betona negovanih u vodi i negovanih prema režimima prikazanim na slici 5.33 pri starosti od 28 dana. Zavisnosti će se iskazivati u funkciji bruto vodocementnog faktora, koji je suštinski parametar bitan za formiranje strukture betona, pa i za čvrstoće pri pritisku. Na slici 7.7 prikazane su zavisnosti $\omega_{bruto} - f_{k,28}$ za betone negovane u vodi kod kojih su vodocementni faktori bili različiti zavisno od odgovarajuće temperature betona, odnosno temperature ambijenta T_{amb} . Kao što se vidi sa sl. 7.7, dobijen je jedan relativno kondenzovan skup tačaka kroz koje su primenom metode najmanjih kvadrata provučene dve prave linije - jedna za betone izrađene sa čistim portland cementom, a druga za betone izrađene sa dodatkom 30% zgure. Dobijene prave linije imaju opadajući trend sa porastom vodocementnog faktora, što je i logično, ali se sa sl. 7.7 jasno vidi da se radi o dvema dovoljno bliskim pravama za koje su takođe zadovoljeni vrlo visoki koeficijenti korelacije. Prosečna razlika čvrstoća za slučaj primene ovih pravih u intervalu korišćenih vodocementnih faktora iznosi cca 4% što se potpuno može zanemariti. Na osnovu ovoga proizilazi da bez obzira na početnu temperaturu betona od 10°C , 20°C i 30°C koja je bila prisutna samo u fazi ugrađivanja, dok je nakon toga beton uglavnom bio u uslovima normalne temperature $T_{amb} = 20^\circ\text{C}$, temperaturni faktor uglavnom nema uticaja na čvrstoću $f_{k,28}$, već se ova čvrstoća može posmatrati skoro isključivo u funkciji vodocementnog faktora. Takođe se može zaključiti da pod datim

uslovima na čvrstoću nema uticaja ni vrsta cementa, kao ni upotreba superplastifikatora, pošto bi sve dobijene rezultate sigurno bilo moguće aproksimirati jednom jedinstvenom pravom, sa vrlo visokim koeficijentom korelacije.

Na slici 7.8, pak, prikazane su zavisnosti $\omega_{br} - f_{k,28}$ za betone koji su prvih 7 dana negovani prema režimima datim na slici 5.33, a nakon toga do 28 dana na vazduhu temperature cca 20°C i relativne vlažnosti 55-60%. Kao što se vidi sa slike 7.8 (upoređujući je sa sl. 7.7), režim nege ima uticaja na 28-dnevne čvrstoće pri pritisku. Naime, i ovde su na apscisi prikazani bruto vodocementni faktori koji su bili isti kao i na slici 7.7; međutim, režim nege je uticao kako na same vrednosti čvrstoća pri pritisku, koje su sada u poređenju sa odgovarajućim betonima na koje se odnosi sl. 7.7 smanjene, tako i na položaj pravih koje su primenom metode najmanjih kvadrata provučene kroz odgovarajuće skupove tačaka. Vidi se, naime, da se i u ovom slučaju prave odnose na betone spravljene sa čistim portland cementom (puna linija) i na betone spravljene uz dodatak 30% zgure (crtičasta linija). U ovom slučaju dobijene prave linije su razmaknute, sa nešto nižim koeficijentom korelacije, a odgovarajući skupovi tačaka su udaljeniji u odnosu na skupove koji odgovaraju tačkama prikazanim na sl. 7.7. Ako se, pak, posmatraju razlike u okviru jednog istog skupa tačaka, vidi se da dodatak zgure (vrsta cementa) u kombinaciji sa temperaturnim faktorom suštinski utiče na čvrstoću betona pri pritisku, pošto je potpuno jasno da za čist portland cement i za cement PC + 30z postoje dve potpuno različite zavisnosti $f_k = f_k(\omega_{br})$, a da je u datom slučaju uticaj superplastifikatora izražen samo kroz redukciju količine vode.

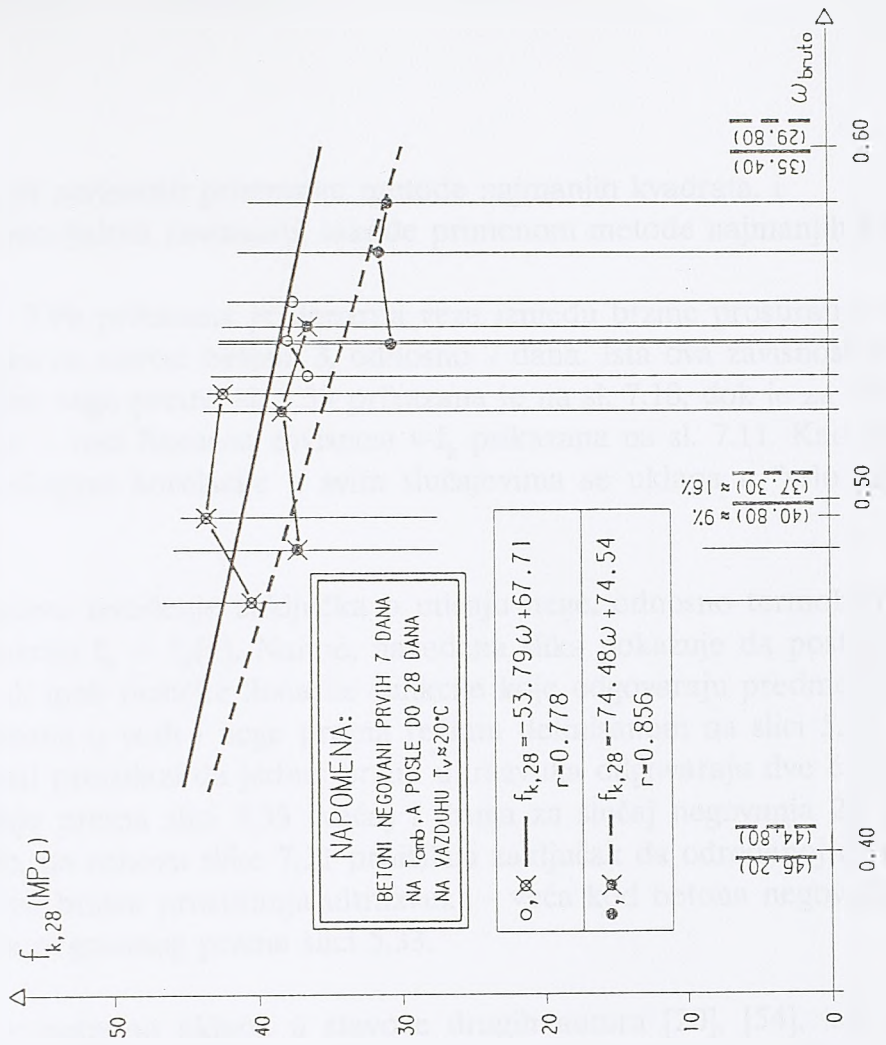
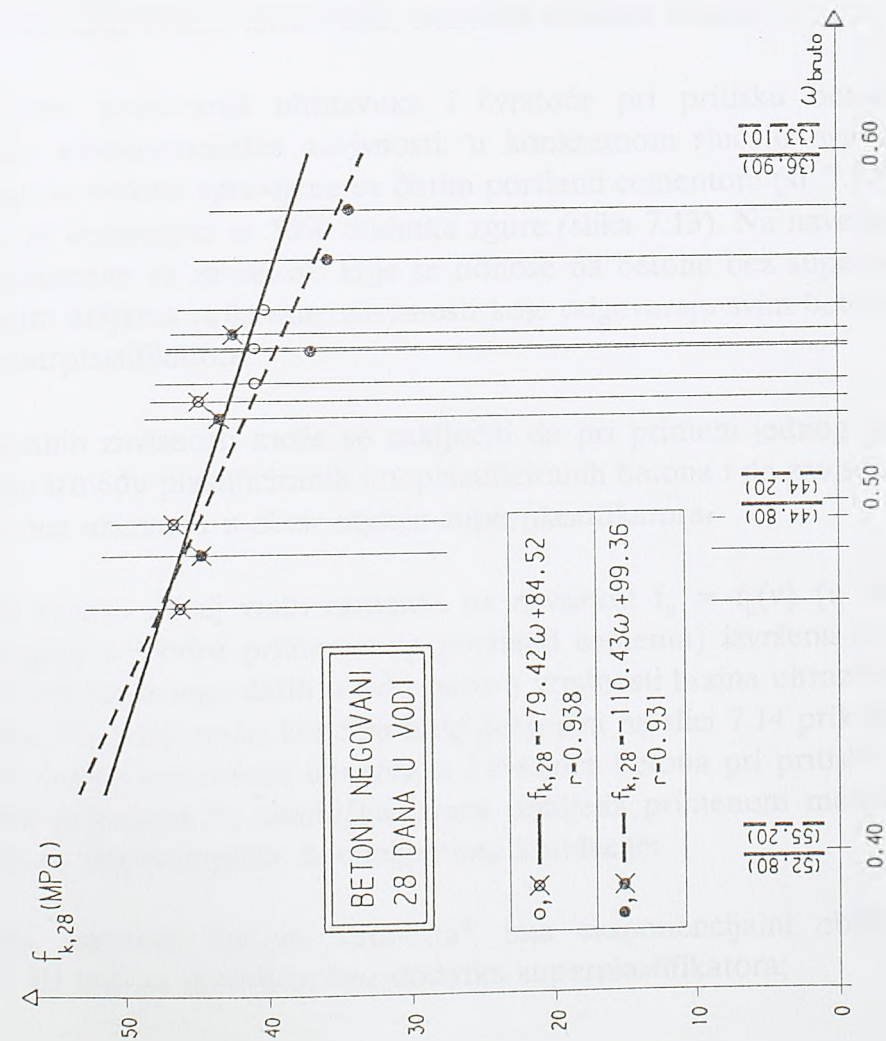
O uticaju režima nege, odnosno različitih temperatura na $f_{k,28}$ dosta ubedljivo govore razlike u procentima za slučaj usvojene prosečne vrednosti vodocementnog faktora 0,50. Za ovaj slučaj dobijaju se u odnosu na režim nege u vodi oko 9% niže čvrstoće betona spravljenog sa čistim portland cementom, odnosno 16% niže čvrstoće u odnosu na betone spravljene sa cementom uz dodatak 30% zgure.

Na slici 7.8, vide se i čvrstoće betona I, II, III i IV pri starostima od 28 dana koje su u drugom obliku već ranije prikazane na slici 5.43c. Ovde su predmetne zavisnosti izražene u funkciji ω_{br} , što implicitno iskazuje i uticaj temperaturnog faktora tako da se i u ovom slučaju jasno sagledava da već temperatura od 30°C negativno utiče na $f_{k,28}$, pošto je $f_{k,28}$ za slučaj temperature od 30°C uvek manje od $f_{k,28}$ za temperaturu od 20°C.

Slika 7.8 pokazuje i uticaj temperature, odnosno uticaj superplastifikatora na promenu vodocementnog faktora pri primeni superplastifikatora. Naime, parcijalne krive koje odgovaraju betonima sa superplastifikatorom, bez obzira da li se radi o betonima spravljenim sa čistim portland cementom ili sa cementom uz dodatak 30% zgure, uvek imaju određeno fazno pomeranje ka području nižih vodocementnih faktora.

7.2.5 Veze između brzina prostiranja ultrazvuka i čvrstoća betona

Veze između brzina prostiranja ultrazvuka i čvrstoća pri pritisku betona prikazane su na dva načina:



Sl. 7.7 Zavisnost ω_{br} - $f_{k,28}$ za betone negovane 28 dana u vodi

Sl. 7.8 Zavisnost ω_{br} - $f_{k,28}$ za betone negovane prema slici 5.33

- u vidu linearnih zavisnosti primenom metode najmanjih kvadrata, i
- u vidu eksponencijalnih zavisnosti, takođe primenom metode najmanjih kvadrata.

Na slikama 7.9a i 7.9b prikazana je linearna veza između brzine prostiranja ultrazvuka i čvrstoće pri pritisku za starost betona 3, odnosno 7 dana. Ista ova zavisnost za starost od 28 dana, a za režim nege prema sl. 5.33 prikazana je na sl. 7.10, dok je za uzorke koji su do 28 dana čuvani u vodi linearna zavisnost $v-f_k$ prikazana na sl. 7.11. Kao što se vidi sa datih grafika, koeficijent korelacije u svim slučajevima se uklapa u "vrlo jaku" i "jaku" korelaciju.

Slika 7.11 omogućava izvođenje zaključka o uticaju nege, odnosno termohigrometrijskog parametra na funkciju $f_k = f_k(v)$. Naime, navedena slika pokazuje da postoje dve, mada relativno bliske, ali ipak različite linearne funkcije koje odgovaraju predmetnoj zavisnosti za slučaj nege betona u vodi i nege prema režimu definisanom na slici 5.33. Na osnovu dobijenih zavisnosti proizilazi da jednoj brzini ultrazvuka odgovaraju dve čvrstoće - jedna za slučaj negovanja prema slici 5.33 (veća) i druga za slučaj negovanja 28 dana u vodi (manja). Isto tako, na osnovu slike 7.11 proizilazi zaključak da određenoj čvrstoći betona $f_{k,28}$ odgovaraju dve brzine prostiranja ultrazvuka - veća kod betona negovanog u vodi, a manja kod betona negovanog prema slici 5.33.

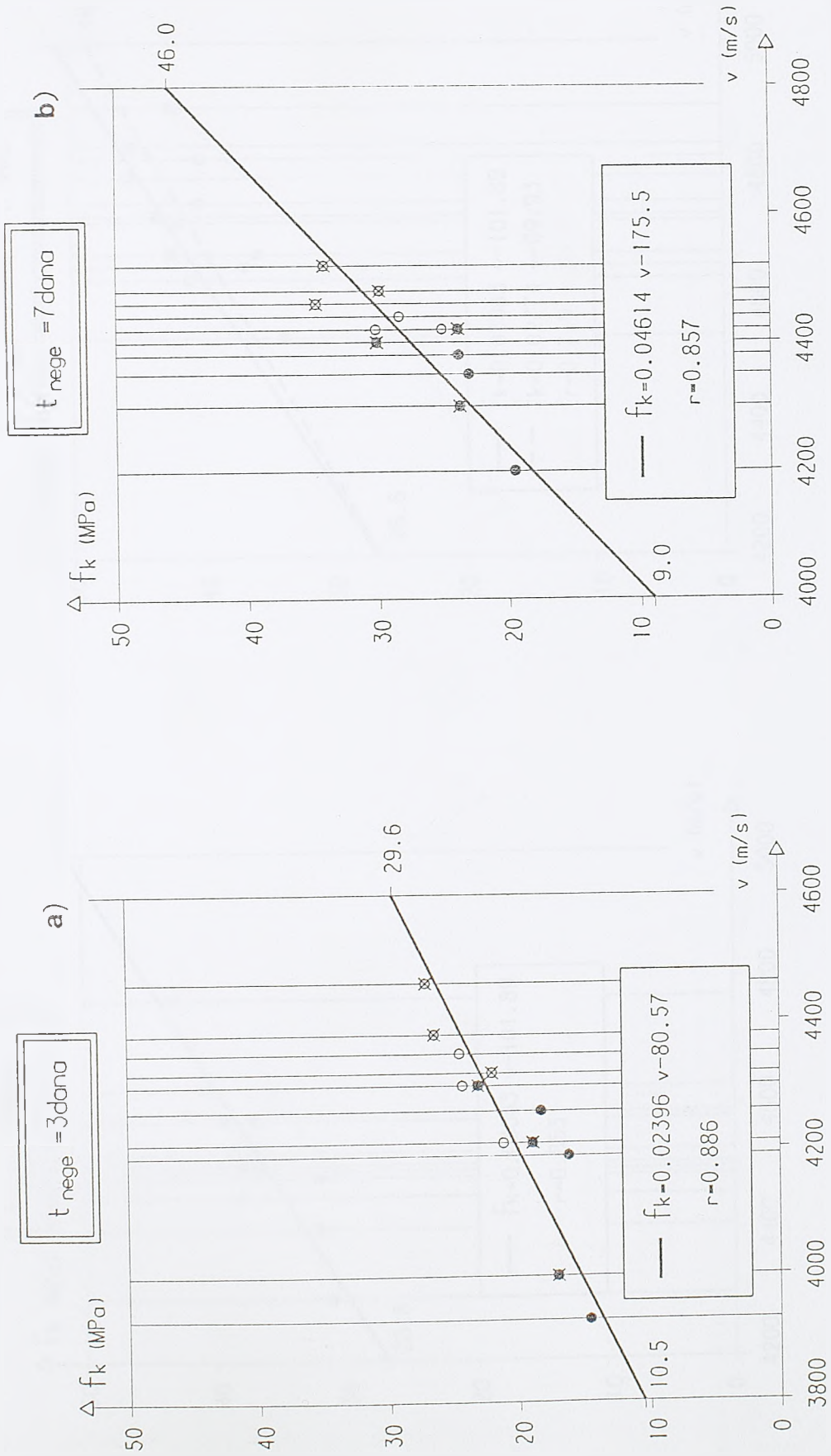
Ovaj zaključak se potpuno uklapa u stavove drugih autora [20], [54], koji su došli do znatno većih razlika nego što je pokazano u našem slučaju, ali se to može objasniti širim dijapazonom razmatranih brzina ultrazvuka, odnosno čvrstoće betona.

Veza između brzine prostiranja ultrazvuka i čvrstoće pri pritisku betona može se uspostaviti i preko eksponencijalne zavisnosti; u konkretnom slučaju ove zavisnosti su definisane posebno za betone spravljene sa čistim portland cementom (sl. 7.12), a posebno za one spravljene sa cementom sa 30% dodatka zgure (slika 7.13). Na navedenim slikama punim linijama prikazane su zavisnosti koje se odnose na betone bez superplastifikatora, dok su isprekidanim linijama prikazane zavisnosti koje odgovaraju svim betonima - i onim sa, i onim bez superplastifikatora.

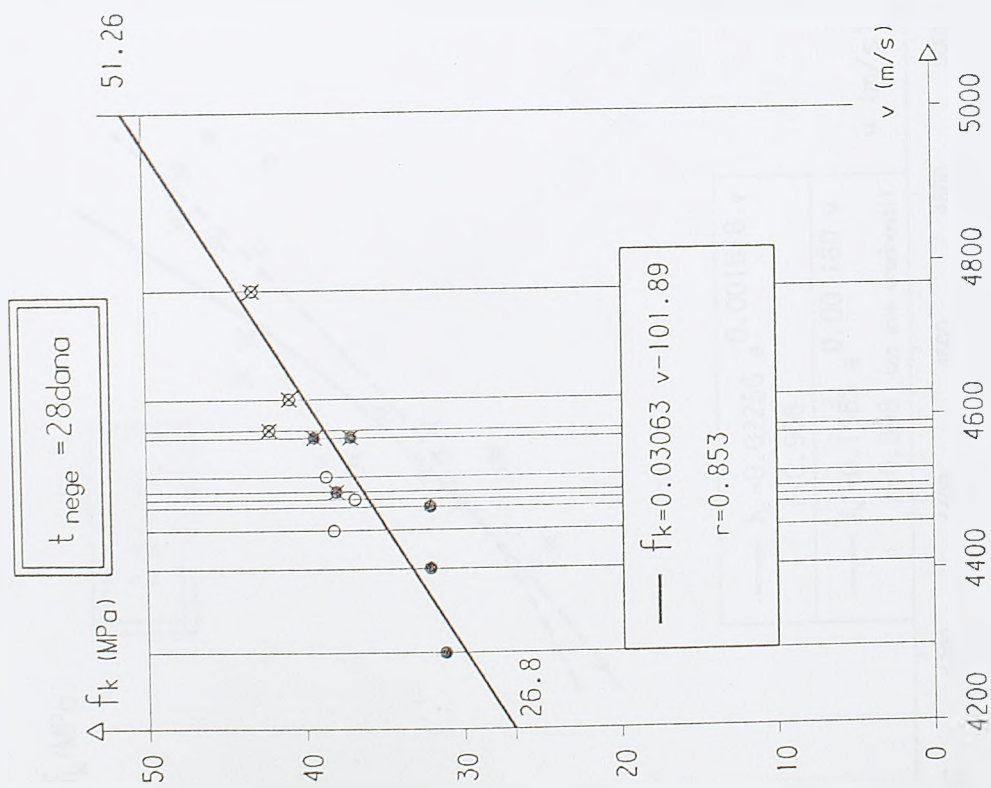
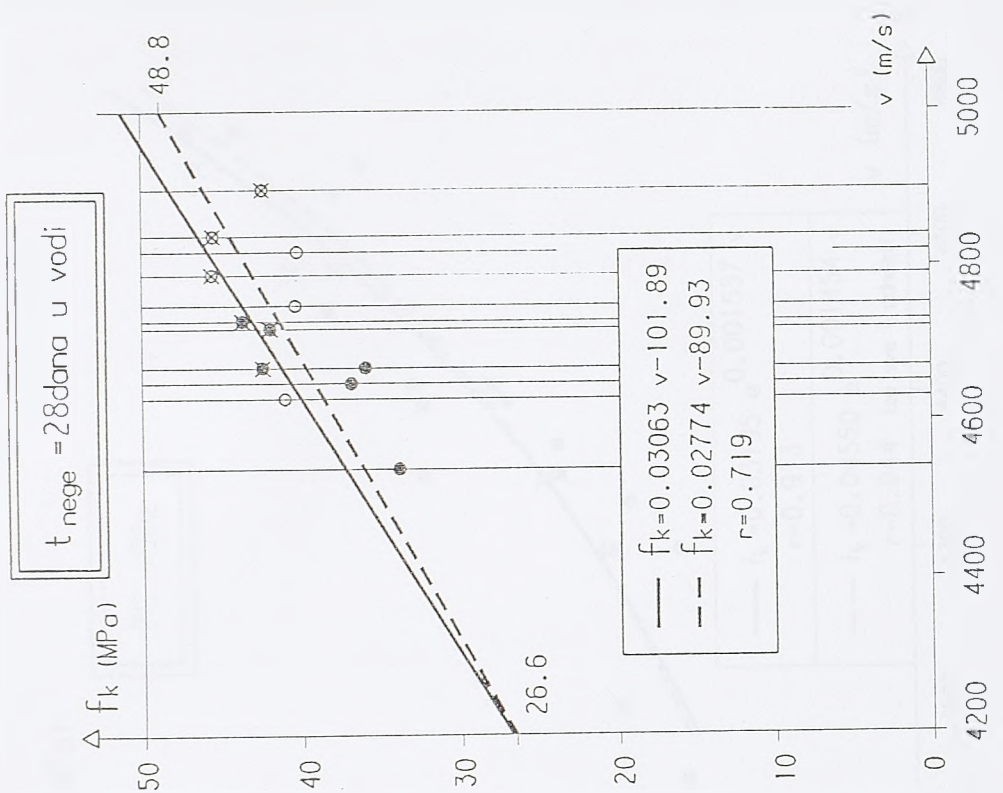
Na osnovu prikazanih zavisnosti može se zaključiti da pri primeni jednog istog cementa nema većih razlika između plastificiranih i neplastificiranih betona i da zavisnosti $f_k = f_k(v)$ treba posmatrati bez uzimanja u obzir uticaja superplastifikatora.

Da bi se utvrdio stvarni uticaj vrste cementa na zavisnost $f_k = f_k(v)$ (u našem slučaju uticaja količine zgure u okviru primenjenog portland cementa) izvršena je analiza svih raspoloživih rezultata ispitivanja datih u vidu parova vrednosti brzina ultrazvuka - čvrstoća betona pri pritisku. Na bazi ovako koncipiranog postupka na slici 7.14 prikazane su opšte zavisnosti između brzine prostiranja ultrazvuka i čvrstoće betona pri pritisku pri čemu su na navedenoj slici prikazana tri analitička izraza dobijena primenom metode najmanjih kvadrata, zajedno sa odgovarajućim koeficijentima korelacije:

- prva funkcija, nacrtana linijom "crta-crta", ima eksponencijalni oblik i odgovara betonima I i III koji su spravljani bez dodatka superplastifikatora;

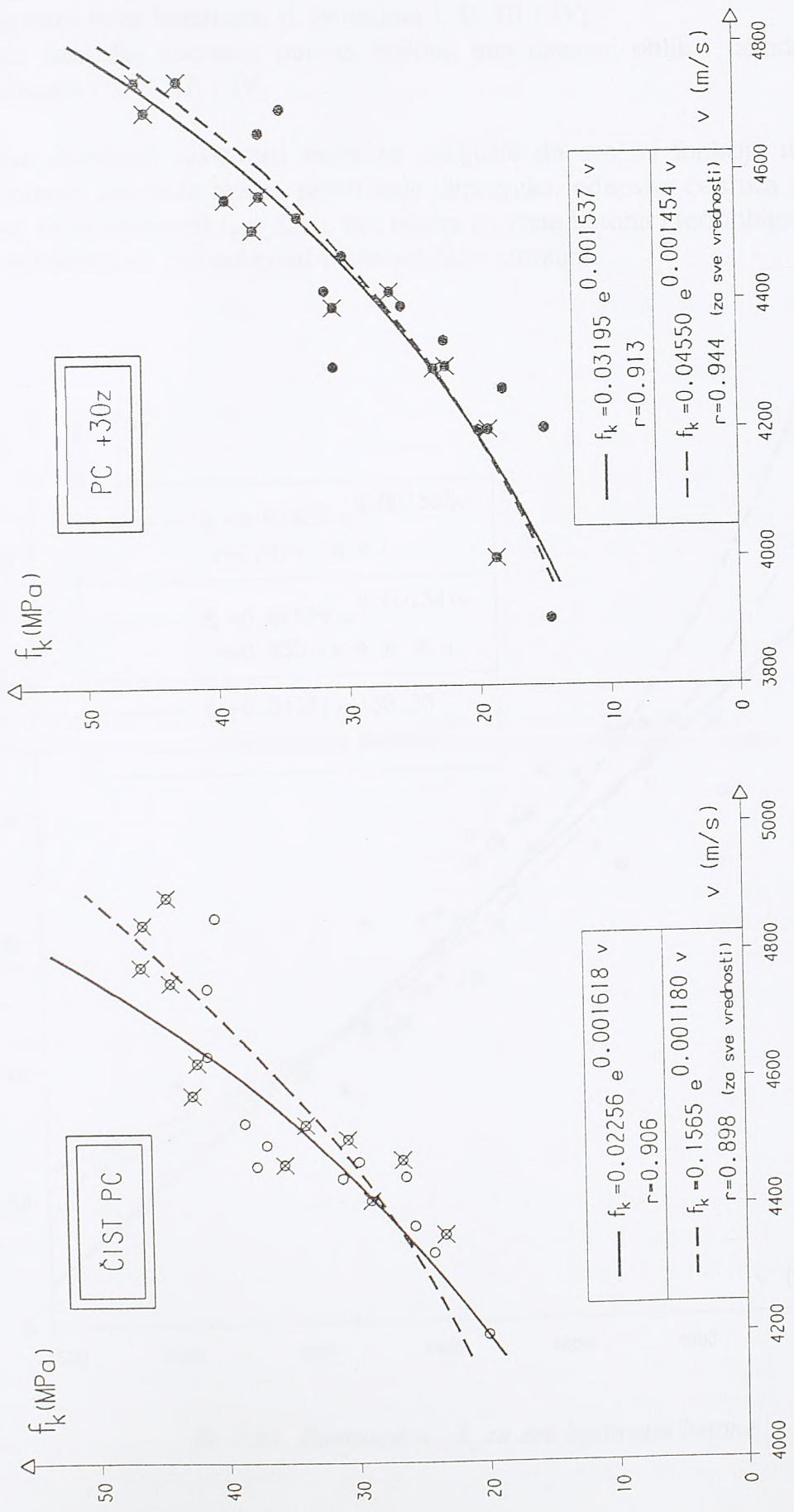


Sl. 7.9 Zavisnost $v - f_k$ za starost betona 3 dana (a), odnosno 7 dana (b)



Sl. 7.11 Zavisnost $v - f_k$ za betone starosti 28 dana negovane u vodi

Sl. 7.10 Zavisnost $v - f_k$ za betone starosti 28 dana negovane u različitim ambijentalnim uslovima

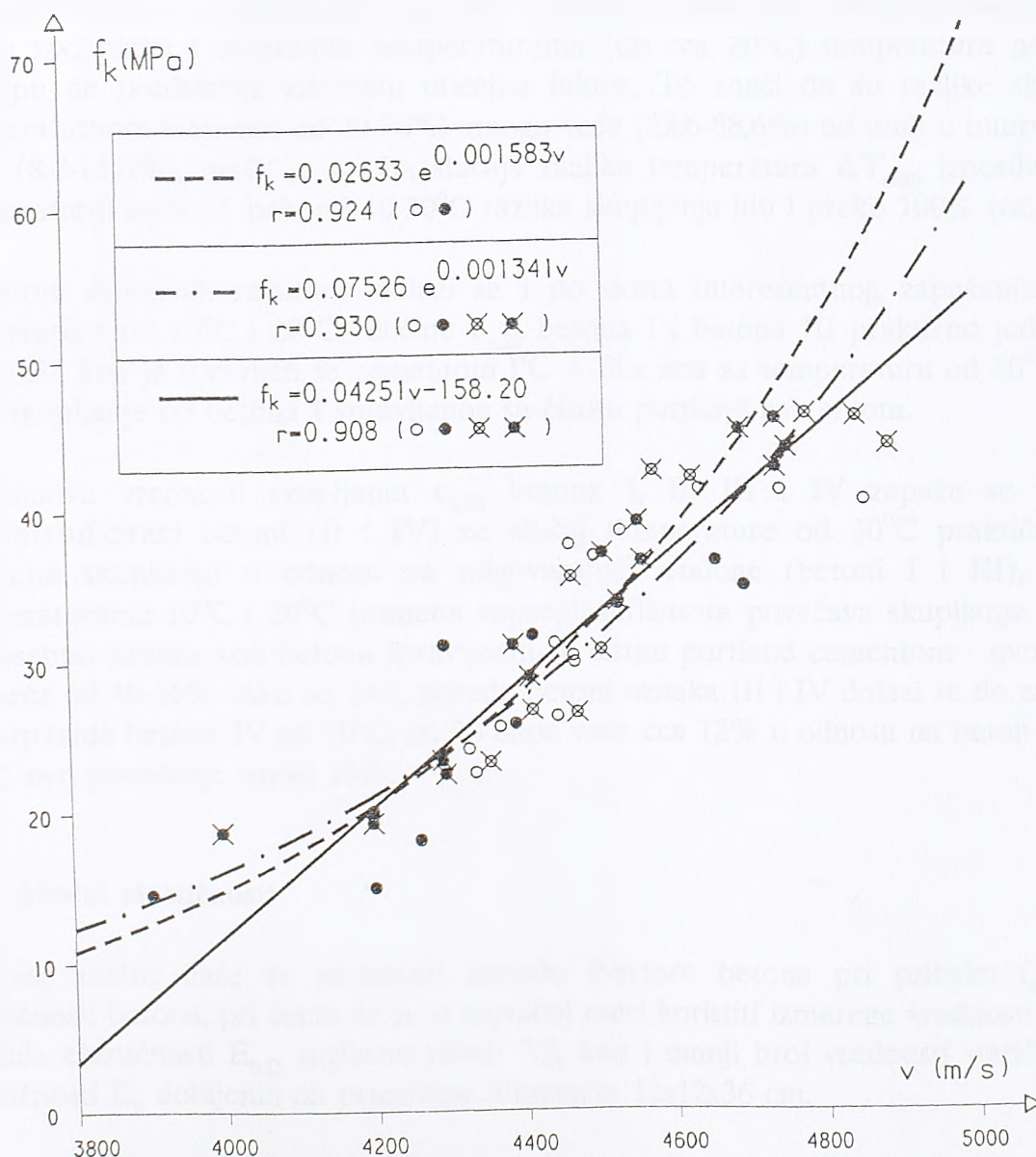


Sl. 7.12 Zavisnost $v - f_k$ za betone spravljene sa čistim portland cementom

Sl. 7.13 Zavisnost $v - f_k$ za betone spravljene sa cementom iz dodatka 30% zgre

- druga funkcija, nacrtana linijom "crta-tačka", takođe ima eksponencijalni oblik i odgovara svim betonima, tj. betonima I, II, III i IV;
- treća funkcija, nacrtana punom linijom, ima linearni oblik i takođe odgovara svim betonima - I, II, III i IV.

Analizom dobijenih zavisnosti može se zaključiti da sve tri funkcije dovoljno dobro u posmatranom intervalu brzina prostiranja ultrazvuka, odnosno čvrstoća zadovoljavaju, pa proizilazi da se zavisnost $f_k = f_k(v)$, bez obzira na vrste betona i termohigrometrijske uslove može aproksimirati jedinstvenim matematičkim izrazom.



Sl. 7.14 Zavisnost $v - f_k$ za sve ispitivane betone

7.2.6 Skupljanje betona

Analizom rezultata prikazanih na sl. 5.66-5.69 i sl. 5.70 koji se odnose na sprovedena ispitivanja skupljanja betona I, II, III i IV, a koja su izvršena tako što su svi betoni negovani na temperaturama 10°C, 20°C i 30°C i u uslovima praktično stoprocentne vlažnosti, da bi docnije bili izloženi normalnoj temperaturi od cca 20°C i relativnoj vlažnosti 55-60%, može se zaključiti da temperaturni faktor bitnije utiče na skupljanje samo pri temperaturi od 30°C. Naime, vrlo jasno se uočava da su pri navedenim uslovima, a tome svakako doprinosi visoka vlažnost ambijenta, skupljanja u prvih 7 dana veoma mala i bez jasnije izražene zavisnosti od temperature. Međutim, slike 5.66-5.69 vrlo jasno pokazuju da su veličine skupljanja, a posebno granične vrednosti $\epsilon_{s,28}$ za temperaturu od 30°C znatno veće od onih koje se odnose na temperature negovanja od 10°C i 20°C. Štaviše, vidi se da su skupljanja $\epsilon_{s,28}$ svih betona za slučaj ovih temperatura vrlo bliska i da na tzv. nižim i umerenim temperaturama (do cca 20°C) temperatura negovanja u principu ne predstavlja značajan uticajan faktor. To znači da su razlike skupljanja u temperaturnom intervalu od 20-30°C mnogo veće (23,6-88,6%) od onih u intervalu od 10-20°C (8,8-15,6%), mada je u oba slučaja razlika temperatura ΔT_{amb} iznosila 10°C. Za temperaturni interval, pak, od 10-30°C razlike skupljanja idu i preko 100% (od 36-118%).

Analizom dobijenih rezultata dolazi se i do dosta interesantnog zapažanja da su za temperature od 10°C i 20°C veličine $\epsilon_{s,28}$ betona I i betona III praktično jednake, a da beton III, koji je spravljen sa cementom PC + 30z ima za temperaturu od 30°C cca 20% veće skupljanje od betona I spravljenog sa čistim portland cementom.

Na osnovu vrednosti skupljanja $\epsilon_{s,28}$ betona I, II, III i IV zapaža se takođe da superplastificirani betoni (II i IV) za slučaj temperature od 30°C praktično nemaju promene skupljanja u odnosu na odgovarajuće etalone (betoni I i III), ali da na temperaturama 10°C i 20°C primena superplastifikatora povećava skupljanje betona što se posebno zapaža kod betona spravljenih sa čistim portland cementom - ovo povećanje se kreće od 49-56%. Ako se, pak, porede betoni oznaka III i IV dolazi se do zaključka da je skupljanje betona IV na 10°C, na 28 dana veće cca 12% u odnosu na beton III, dok na 20°C, ovo povećanje iznosi 16%.

7.2.7 Modul elastičnosti

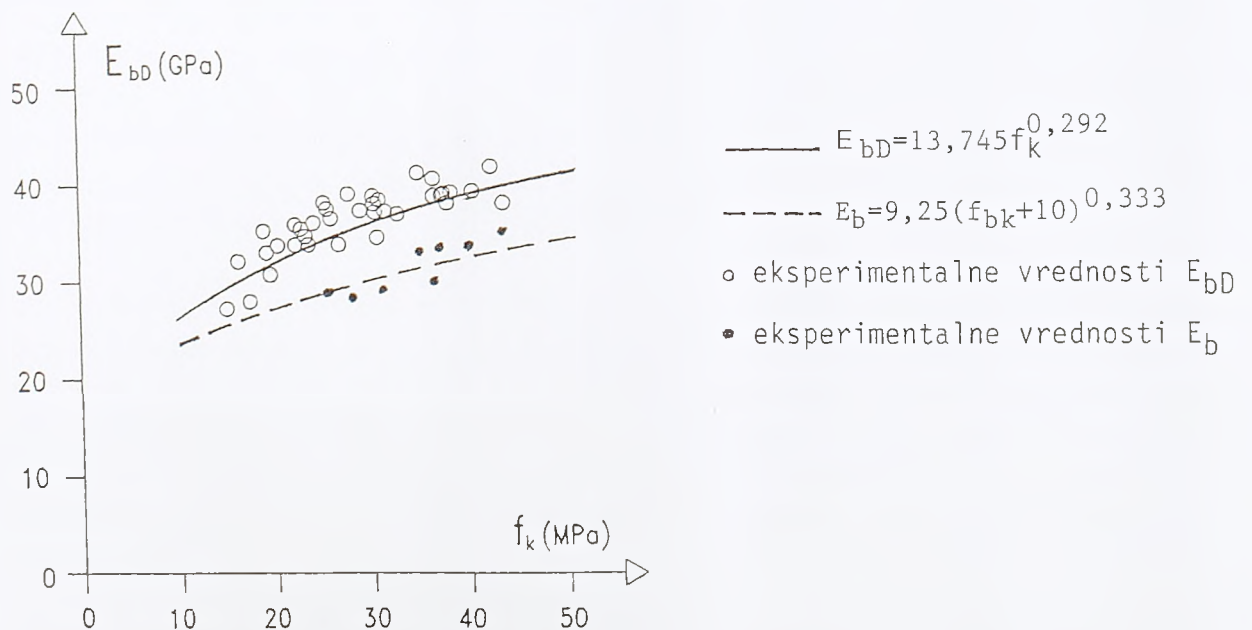
U ovoj analizi daće se zavisnosti između čvrstoće betona pri pritisku f_k i modula elastičnosti betona, pri čemu će se u najvećoj meri koristiti izmerene vrednosti dinamičkih modula elastičnosti $E_{b,D}$ saglasno tabeli 7.2, kao i manji broj vrednosti statičkih modula elastičnosti E_b dobijenih na prizmama dimenzija 12x12x36 cm.

Polazeći od izmerenih veličina $E_{b,D}$ na sl. 7.15 prikazana je funkcionalna zavisnost $E_{b,D} = E_{b,D}(f_k)$ koja sa visokim koeficijentom korelacije aproksimira eksperimentalne vrednosti. Takođe je prikazana i kriva koja povezuje vrednost statičkog modula elastičnosti sa čvrstoćom $f_{b,k}$ saglasno BAB-u '87, kao i niz eksperimentalno utvrđenih vrednosti E_b dobijenih ispitivanjem.

Tabela 7.2 Čvrstoće pri pritisku i dinamički modul elastičnosti za betone I, II, III i IV

Vrsta betona	T_{amb} (°C)	Starost uzoraka (dani)					
		3 dana		7 dana		28 dana	
		f_k (MPa)	E_{bD} (GPa)	f_k (MPa)	E_{bD} (GPa)	f_k (MPa)	E_{bD} (GPa)
I	10	20,4	33,72	25,9	36,49	36,4	38,74
	20	23,3	34,67	28,9	37,28	37,8	38,00
	30	24,1	36,05	30,3	37,98	37,4	38,98
II	10	22,2	32,76	30,4	37,11	40,4	39,24
	20	26,7	33,80	32,7	36,90	43,5	38,00
	30	27,7	39,0	34,8	42,12	42,3	41,74
III	10	15,0	27,26	19,6	30,74	30,6	34,50
	20	16,2	32,13	22,2	35,87	31,4	37,20
	30	18,9	35,25	25,2	38,11	30,8	38,37
IV	10	17,4	28,0	23,6	33,83	37,2	38,84
	20	19,2	33,0	25,5	37,47	38,2	39,10
	30	22,8	35,45	30,2	38,78	36,4	40,52

Krive prikazane na sl. 7.15 ukazuju na dobro slaganje računskih i eksperimentalnih veličina i na osnovu njih je moguće dosta pouzdano odrediti odnos dinamičkog i statičkog modula elastičnosti betona. U konkretnom slučaju, za dijapazon čvrstoća f_k između 10 i 50 MPa, srednja vrednost ovog odnosa iznosi cca 1,15, što znači da je u posmatranom slučaju dinamički modul elastičnosti betona cca 15% veći od statičkog modula elastičnosti.



Sl. 7.15 Zavisnost čvrstoće pri pritisku i modula elastičnosti

Prikazani rezultati ispitivanja takođe ukazuju da se moduli elastičnosti betona (statički i dinamički) uvek mogu izraziti samo u funkciji ostvarene čvrstoće betona, ne vodeći računa o uticajnim faktorima kao što su sastav betona, karakteristike komponenata, termohigrometrijski uticaji i dr.

7.2.8 Upijanje vode

Na osnovu rezultata ispitivanja datih u tabeli 5.18 i na sl. 5.71 vrlo jasno se uočava da se upijanje vode kod svih ispitivanih betona povećava sa porastom temperature negovanja. Pri ovome najveće upijanje vode ima beton spravljen sa cementom PC + 30z (oznaka III), a iza njega po parametru upijanja dolazi beton I - spravljen sa čistim portland cementom. Zapaža se takođe da upotreba superplastifikatora smanjuje vrednost upijanja vode tako da betoni II (spravljen sa čistim portland cementom i uz prisustvo 1% superplastifikatora) i IV (spravljen sa cementom sa 30% zgure i uz prisustvo 1% superplastifikatora) koje treba porediti sa betonima I i III imaju značajno manje vrednosti upijanja. Ovo se može tumačiti prvenstveno gustinom strukture superplastificiranih betona koja je pravashodno posledica nižih vodocementnih faktora.

U svakom slučaju može se sa sigurnošću tvrditi da na svim temperaturama negovanja betoni spravljeni sa cementom sa 30% zgure imaju veća upijanja vode od odgovarajućih betona spravljenih sa čistim portland cementom.

8. ZAKLJUČCI

Pre nego što se započne sa izlaganjem samih zaključaka dobijenih sprovedenim eksperimentalnim ispitivanjima, čini se potrebnim da se ponovo istakne koncepcija istraživanja kako na svežem, tako i na očvrslom betonu. Ova koncepcija je bila zasnovana na rezultatima koji su već dobijeni od strane velikog broja autora koji su obrađivali ovu problematiku i svodila se na nekoliko neospornih činjenica vezanih za uticaj termohigrometrijskih parametara sredine na beton i to:

- konzistencija svežeg betona prevashodno zavisi od temperature same betonske mešavine, koja svakako korespondira sa temperaturom ambijenta;
- na konzistenciju u opštem slučaju ima izvesnog uticaja i vlažnost sredine, ali je ovaj parametar, posebno kada se radi o temperaturama do 30°C minoran, s obzirom da se sloj vazduha uz slobodnu površinu svežeg betona na ovakvim temperaturama, uvek karakteriše visokom relativnom vlažnošću; štaviše, pri primeni regularnih postupaka spravljanja, transporta i ugrađivanja betona, uvek se nastoji da beton bude u izolovanim uslovima, tj. da bude zaštićen od isparavanja, tako da mikroambijentalni uslovi neposredno uz slobodnu površinu betona uglavnom odgovaraju relativnoj vlažnosti između 90 i 100%;
- svojstva očvrsllog betona uvek su funkcija temperature i relativne vlažnosti ambijenta, ali najveći broj istraživača govori da je za karakteristike betona najbitniji režim nege u prvih 7 dana; smatra se, naime, da nakon ovog perioda sve karakteristike betona, a prvenstveno fizičko-mehaničke karakteristike, daleko manje zavise od ambijentalnih uslova;
- napred navedeni eksperimentalni i iskustveni podaci proizveli su to da se u praksi najčešće primenjuje obavezan režim intenzivne nege betona u prvih 7 dana, što podrazumeva njegovu zaštitu od isparavanja vode, odnosno njegovo permanentno kvašenje; na ovaj način u periodu od 7 dana beton je u najvećem broju slučajeva, preko slobodnih površina, izložen uticaju relativne vlažnosti od 90-100% i temperaturama koje odgovaraju spoljašnjoj sredini;
- nakon 7 dana nege u uslovima određene temperature vazduha i visokog procenta vlage spoljašnje sredine, smatra se da je beton već formirao strukturu koja se može smatrati definitivnom, tako da je manje značajno kakvim će ambijentalnim uslovima nakon toga on biti izložen; naime, ukoliko je reč o temperaturama od 5-30°C, pokazalo se da, bez obzira na temperaturu i stepen vlažnosti sredine u periodu posle 7 dana, čvrstoća betona pri pritisku, a pri starosti od 28 dana, uglavnom zavisi samo od režima nege primenjenog u prvih 7 dana.

Napred navedeni stavovi bili su osnov za planiranje eksperimenata u ovom radu, a oni po našem mišljenju predstavljaju i realne uslove koji su prisutni u praksi. Drugim rečima, naši eksperimenti koji su se odnosili na ispitivanje konzistencije svežeg betona vršeni su na nekoliko temperatura ambijenta, a u uslovima vlažnosti od $99 \pm 1\%$, dok su ispitivanja na

očvrslom betonu vršena tako što je beton u prvih 7 dana izlagan različitim temperaturama ambijenta i praktično stoprocentnim vlažnostima sredine, da bi nakon toga on bio izložen za naše uslove normalnoj temperaturi od cca 20°C i relativnoj vlažnosti od 55-60% (videti sl. 5.33).

Na osnovu naših ispitivanja na svežem betonu konstatovano je da je konzistencija u najvećoj meri funkcija proteklog vremena i temperature samog betona, a ona je neosporno zavisna i od temperature ambijenta. Pri ovome je, preko mere sleganja, pokazano da se najveća promena konzistencije kod svih betona javlja u prvih 15 minuta, a da se trend promene - pad sleganja zadržava i nakon ovog vremena, ali znatno manjom brzinom.

Merenja su takođe pokazala da je promenljivost konzistencije naročito izražena na temperaturi od 30°C, a da je najmanje izražena na temperaturi od 10°C, što predstavlja granične temperature primenjene pri našim ispitivanjima.

Posmatrajući rezultate ispitivanja koji se odnose na određenu temperaturu betona (10°C, 20°C i 30°C), može se zaključiti da je promena konzistencije kroz vreme najbrža kod betona spravljenog sa čistim portland cementom uz dodatak 1% superplastifikatora (beton II), iza njega dolazi beton spravljen sa čistim portland cementom (beton I), pa beton spravljen sa cementom uz dodatak 30% zgure (beton III) i na kraju beton spravljen sa cementom uz dodatak 30% zgure i uz prisustvo 1% superplastifikatora (beton IV).

Na osnovu napred rečenog takođe proizilazi da prisustvo superplastifikatora pri nepromenjenoj količini od 1% i pri istoj količini cementa (330 kg/m³) više doprinosi održavanju konzistencije betona spravljenog sa cementom koji sadrži 30% zgure (beton IV), nego što je to slučaj kod betona koji je spravljen sa čistim portland cementom (beton II); to znači da je, posmatrano vremenski, efekat superplastificiranja mnogo bolji u slučaju betona koji u sebi sadrži cement sa dodatkom zgure. Prisustvo zgure u cementu, dakle, produžava "radno vreme" betona, odnosno doprinosi sporijoj promeni konzistencije.

Promenljivost konzistencije koja je određivana i preko Vebe metode nije pokazala tako naglu promenu u prvih 15 minuta kao kod metode sleganja. Naime, imajući u vidu dinamički karakter Vebe metode, ova promenljivost se može u celokupnom vremenskom intervalu (0-90 minuta) aproksimirati jedinstvenom pravom linijom.

Na osnovu naših eksperimentalnih ispitivanja pokazalo se da je moguće formirati zavisnost Vebe-stepeni u funkciji mere sleganja i da se pri tom dobija logaritamska funkcija koja ima visok koeficijent korelacije.

Ispitivanja su pokazala da zavisnost "potrebna masa tečne faze - temperatura betona" nije izrazito linearna funkcija i da čak za betone istog sastava i iste početne konzistencije značajno zavisi od vrste cementa koji je upotrebljen pri spravljanju betona, kao i od prisustva ili neprisustva superplastifikatora. Tako, na primer, potreba za tečnom fazom je na svim temperaturama veća kod betona spravljenog sa cementom uz dodatak 30% zgure nego kod betona spravljenog na bazi čistog portland cementa. Isto tako, upotreba superplastifikatora kako kod betona spravljenih sa čistim portland cementom, tako i kod

onih spravljenih uz dodatak zgure, pokazuje značajno povećanje, odnosno smanjenje tečne faze zavisno od temperature betona u odnosu na neplastificirane betone - etalone. Kako se uvek radilo o konstantnom procentu superplastifikatora (1% u odnosu na masu cementa), opet se pokazalo da vrsta cementa igra značajnu ulogu u odnosu na količinu tečne faze potrebne za postizanje iste konzistencije betona.

Analizirajući rezultate ispitivanja izvršenih na očvrslim betonima, odmah se zapaža da 28-dnevne čvrstoće betona značajno zavise od režima nege. Naime, jasno je da su ove čvrstoće kod betona I, II, III i IV negovanih u vodi uvek veće od čvrstoća istih betona koji su prvih 7 dana negovani na temperaturama 10°C, 20°C ili 30°C, odnosno na način definisan slikom 5.33. Ove razlike se kreću od 5% do 20% i najviše su izražene kod betona negovanih na temperaturi 10°C. Isto tako, zapaža se da je povećanje čvrstoća betona negovanih u vodi prema onim negovanim pri različitim ambijentalnim uslovima (10°C, 20°C i 30°C) uvek izraženije kod betona spravljenih sa dodatkom zgure (oznaka III), kao i kod onih spravljenih sa dodatkom zgure i superplastifikatora (oznaka IV). Na osnovu toga sledi zaključak da su betoni spravljeni sa dodatkom zgure osetljiviji na način negovanja.

Sledeći zaključak koji se može izvesti pri analizi rezultata ispitivanja čvrstoća betona je taj da u okviru jedne temperature ambijenta (10°C, 20°C i 30°C) najveće 28-dnevne čvrstoće uvek pokazuje superplastificirani beton spravljen sa čistim portland cementom (beton II), a najniže čvrstoće beton spravljen sa cementom sa 30% zgure (beton III). Ostali ispitivani betoni - beton na bazi čistog portland cementa (oznaka I) i superplastificirani beton sa cementom sa 30% zgure (oznaka IV), na 28 dana, pak, imaju praktično iste čvrstoće. Na osnovu ovoga sledi da se u pogledu uticaja nege beton sa cementom sa 30% zgure tek uz upotrebu superplastifikatora izjednačava po nominalnoj čvrstoći sa betonom na bazi čistog portland cementa, a sve to naravno pod uslovom da predmetni betoni imaju praktično istu konzistenciju.

Sve ovo govori o tome da vrsta primenjenog cementa u betonu, odnosno dodatak zgure, kao i prisustvo superplastifikatora u smislu povećanja ili smanjenja tečne faze, pri istim ambijentalnim uslovima mogu da prouzrokuju značajne razlike u 28-dnevnim čvrstoćama betona. Naime, za različite vrste betona (I, II III i IV), pri istim ambijentalnim uslovima ove razlike iznose i preko 30%. Navedene razlike egzistiraju čak i u uslovima, nepromenjene temperature ambijenta od 20°C i ponovo iznose cca 30%. Stoga se može zaključiti da dodatak zgure u kombinaciji sa temperaturnim faktorom suštinski utiče na čvrstoću betona pri pritisku. Sve ovo je u uskoj vezi sa potrebom za tečnom fazom, tj. bruto vodocementnim faktorom potrebnim za postizanje iste konzistencije svežeg betona, koja je predstavljala konstantu pri našim ispitivanjima.

Čvrstoća betona, kao što je napred već rečeno, svakako zavisi od primenjenog bruto vodocementnog faktora, tj. potrebe za tečnom fazom. Međutim, ova funkcija zavisi i od temperaturnog parametra, pa tako interval temperatura od 10°C do 20°C kod svih vrsta betona daje porast čvrstoća pri pritisku pri čemu bruto vodocementni faktor raste, dok za interval temperatura od 20°C do 30°C, dolazi do pada čvrstoća pri čemu opet bruto vodocementni faktor raste.

Uticaj superplastifikatora na beton izražen je samo kroz redukciju količine vode tj. betoni spravljeni sa čistim portland cementom ili sa cementom uz dodatak 30% zgre, kod zavisnosti $\omega_{br} - f_{k,28}$, uvek imaju fazno pomeranje ka području nižih vodocementnih faktora.

Posmatrajući familije krivih $t - f_k$ za različite temperature negovanja (10°C , 20°C i 30°C) koje odgovaraju pojedinim vrstama betona I, II, III i IV, proizilazi da 28-dnevne čvrstoće ovih betona ne zavise bitnije od režima nege; naime, dobijene razlike čvrstoća se kreću u relativno uskim okvirima (od 2,5-7,1%), bez izraženog uticaja temperaturnog faktora. Međutim, sasvim je drugačiji slučaj sa čvrstoćama istih betona na 3 i na 7 dana, kada je očigledno da temperatura igra suštinsku ulogu. Ovaj faktor utiče kako na brzinu prirasta čvrstoće - na odnose čvrstoća prema 28-dnevnoj čvrstoći, tako i na same vrednosti ovih karakteristika betona. Naime, na osnovu rezultata ispitivanja sledi da u okviru jednog istog betona najbrži prirast i najveće vrednosti čvrstoća na 3 i na 7 dana imaju betoni negovani na 30°C , iza njih dolaze betoni negovani na 20°C , a tek na kraju betoni negovani na 10°C .

Rezultati sprovedenih ispitivanja pokazuju da u odnosu na sve tretirane betone s punim pravom može da se primeni koncept zrelosti. Ovo je zaključeno na osnovu karaktera funkcija $M - f_k$ koje uvek predstavljaju određene glatke, monotono rastuće krive, koje se sa visokim koeficijentima korelacije mogu aproksimirati određenim analitičkim izrazima.

Kako su pri našim eksperimentalnim ispitivanjima varirana ukupno 3 uticajna faktora: vrsta cementa, količina superplastifikatora i temperatura nege betona u prvih 7 dana, matematička interpretacija rezultata ispitivanja čvrstoća pri pritisku pokazala je da se sa povećanjem sadržaja zgre u cementu čvrstoće $f_{k,7}$ i $f_{k,28}$ u oba temperaturna područja ($10^\circ\text{C}-20^\circ\text{C}$ i $20^\circ\text{C}-30^\circ\text{C}$) smanjuju. S druge strane, pak, predmetne čvrstoće se sa povećanjem sadržaja superplastifikatora povećavaju nezavisno od temperaturnog intervala nege. Međutim, na osnovu analize sledi da će čvrstoće $f_{k,7}$ biti veće zavisno od povećanja temperature nege, dok će se čvrstoće $f_{k,28}$ relativno smanjivati u funkciji povećanja temperature nege. Zaključci koji proističu na osnovu analize matematičkih zavisnosti u potpunosti se poklapaju sa zaključcima koji su već izloženi napred na osnovu analize eksperimentalnih rezultata. Tako, na primer, čvrstoće pri pritisku u starosti od 28 dana uzoraka negovanih prvih 7 dana na 30°C , kod svih vrsta betona pokazuju pad u odnosu na iste betone koji su neprekidno negovani na 20°C .

Praćenje karakteristika betona preko metode ultrazvuka, kao i merenja dinamičkog modula elastičnosti preko rezonantne frekvencije, pokazala su nagli prirast brzine prostiranja ultrazvuka u prvih nekoliko dana i malo umereniji prirast dinamičkog modula elastičnosti, pri čemu su ovi priraštaji u oba slučaja znatno iznad priraštaja čvrstoća pri pritisku. I ove vrednosti, pak - brzine prostiranja ultrazvuka i dinamički moduli elastičnosti zavise kako od vrste betona, tako i od temperaturnog faktora. Naime, pri ispitivanjima, uvek se dobijaju niže vrednosti kod betona spravljenih sa cementom sa dodatkom 30% zgre, što potvrđuje poznatu činjenicu da se hidratacija cementa sa zgurom obavlja znatno sporije. Tako, na primer, pri malim starostima betona - 1 dan, prirast brzine prostiranja ultrazvuka pokazuje najveće razlike u odnosu na vrstu betona i temperaturu ambijenta (od 0,696 - 0,936); kasnije, ove razlike su sve manje, tako da se može reći da temperaturni faktor ne utiče bitnije na dalji prirast brzine prostiranja ultrazvuka. U istoj starosti, pak, od jednog dana,

prirast dinamičkog modula elastičnosti se kreće od 0,354 do 0,808. Nadalje, u kasnijim starostima betona, ove razlike se smanjuju i prate prirast brzine prostiranja ultrazvuka. Tako, na primer, u starosti od 7 dana, kod dinamičkog modula elastičnosti prirasta takoreći i nema kod betona spravljenih sa čistim portland cementom (oznaka I i II), dok kod onih spravljenih sa dodatkom 30% zguře (oznaka III i IV), prirast postoji.

Uticaoj temperaturnog faktora na dinamički modul elastičnosti je naročito izražen kod betona III i IV (spravljenih sa zgurom) u maloj starosti. Naime, dinamički modul elastičnosti betona III na 10°C, za starost od 1 dan, ima cca 45% nižu vrednost od one dobijene na 30°C, dok kod betona IV, na istoj temperaturi i u istoj starosti, dinamički modul elastičnosti ima čak 49% nižu vrednost od one na 30°C. Isto tako, rezultati ispitivanja pokazuju veoma interesantnu činjenicu da ne dolazi do pada dinamičkog modula elastičnosti pri porastu temperature ambijenta od 20°C do 30°C, kao što je to slučaj kod ispitivanja čvrstoća pri pritisku.

Brzine prostiranja ultrazvuka, pak, kod betona III i IV (spravljenih sa 30% zguře i sa 30% zguře i sa superplastifikatorom), u svim starostima stalno rastu, dok kod betona spravljenog sa čistim portland cementom (oznaka I) ili sa čistim portland cementom i uz dodatak 1% superplastifikatora (oznaka II) to nije slučaj; naime, kod betona I i II negovanih na 30°C dolazi do smanjenja brzina prostiranja ultrazvuka u odnosu na iste uzorke negovane na 20°C.

Treba istaći da su i ovde, kao i kod čvrstoća pri pritisku, brzine prostiranja ultrazvuka dobijene na uzorcima koji su stalno negovani u vodi po pravilu uvek veće od onih negovanih u drugim ambijentalnim uslovima. Izuzeci od ovog pravila postoje, ali samo u malim starostima betona (1 dan) i pri povišenim temperaturama ambijenta (30°C).

Na osnovu svega iznetog može se zaključiti da je metoda merenja dinamičkog modula elastičnosti preko rezonantne frekvencije prihvatljivija za praćenje prirasta čvrstoće betona pri pritisku kroz vreme. Međutim, za praćenje razlika unutar iste starosti, a u okviru različitih sastava betona, čini se da je isto tako pogodna i metoda ultrazvuka.

Ispitivanje skupljanja betona negovanih pri različitim ambijentalnim uslovima privh 7 dana, a kasnije u laboratorijskim uslovima, pokazalo je da temperaturni faktor utiče bitnije na skupljanje samo pri temperaturi od 30°C, što znači da su vrednosti skupljanja $\epsilon_{s,28}$ za temperaturu od 30°C znatno veće od onih koje se odnose na temperature negovanja od 10°C i 20°C. Isto tako, zaključuje se da su razlike skupljanja u temperaturnom intervalu od 20°C - 30°C mnogo veće (23,6 - 88,6%) od onih u intervalu od 10°C - 20°C (8,8 - 15,6%), mada je u oba slučaja razlika temperatura iznosila 10°C.

Analizom dobijenih rezultata dolazi se i do dosta interesantnog zapažanja da su za temperature od 10°C i 20°C veličine $\epsilon_{s,28}$ betona I i betona III praktično jednake, a da beton III, koji je spravljen sa cementom PC + 30z, ima za temperaturu od 30°C cca 20% veće skupljanje od betona I spravljenog sa čistim portland cementom. Takođe se može zaključiti da primena superplastifikatora na temperaturama 10°C i 20°C povećava

skupljanje betona, što je posebno izraženo kod betona spravljenih sa čistim portland cementom - ovo povećanje se kreće od 49-56%.

Rezultati ispitivanja upijanja vode, koji mogu poslužiti kao faktor za ocenu trajnosti betona, pokazali su da se ova karakteristika betona u svim slučajevima povećava sa porastom temperature negovanja. Pri ovome najveće upijanje vode ima beton spravljen sa cementom uz dodatak 30% zgure (oznaka III), što je i logično obzirom na potrebu za tečnom fazom, tj. s obzirom na bruto vodocementni faktor predmetnog betona. Superplastificirani betoni, pak, u svim slučajevima pokazuju značajno manje vrednosti upijanja. Ovo se može tumačiti prvenstveno gustom strukture superplastificiranih betona, koja je prevashodno posledica nižih vodocementnih faktora.

9. LITERATURA

- [1] Ahverdov, I.N., Osnovy fiziki betona, Strojizdat, Moskva, 1981.
- [2] Aignesberger, A., Kern, A., Use of Melamine-Based Superplasticizer as a Water Reducer, Developments in the Use of Superplasticizers, American Concrete Institute, Ottawa, 1981
- [3] Aignesberger, A., Reichert, J., Melment in Concrete - Long Term Behaviour and Selected Case Histories, International Symposium on Superplasticizers in Concrete, Volume I, Ottawa, 1978.
- [4] Aitcin, P.C. and Riad, N., Curing Temperature and Very High Strenght Concrete, Concrete International, vol. 10, N° 10, 1988.
- [5] Al-Ani, S.H., Al-Zaiwary, M.A.K., The Effect of Curing Period and Curing Delay on Concrete in Hot Weather, Materials and Structures, Vol. 21, 1988.
- [6] Aroch, C.E., Effect of Mix Temperature on the Workability and Early Strenght Development of Superplasticized Mortar Made of Portland and Blast-Furnace Cement, RILEM Symposium: Technology of Concrete when Pozzolans, Slags and Chemical Admixtures are Used, Monterrey, 1985.
- [7] Baženov, Ju. M., Tehnologija betona, Vysšaja škola, Moskva, 1978.
- [8] Ben-Bassat, M., Nixon, P.J., Hardcastle, J., The Effect of Differences in the Composition of Portland Cement on the Properties of Hardened Concrete, Magazine Of Concrete Research, Vol. 42, No. 151, June 1990.
- [9] Bensted, J., Early Hydration of Portland Cement - Effect of Water/Cement Ratio, Cement and Concrete Research, Vol. 13, 1983.
- [10] Berhane, Z., Compressive Strenght of Mortar in Hot-Humid Enviroment, Cement and Concrete Research, Vol. 13, 1983.
- [11] Berhane, Z., Evaporation of Water from Fresh Mortar and Concrete at Different Enviromental Conditions, ACI Journal, November-December 1984.
- [12] Berhane, Z., Mechanical Properties of Concrete in Hot Climates, RILEM TC:94 CHC, Belgrade Meeting, 1990.
- [13] Berry, E.E., Concrete Made with Supplementary Cementing Materials, Progress in Concrete Technology, Energy, Mines and Resources, Ottawa, 1980.
- [14] Beslač, J., Superplastificirani beton, Monografija IG, Zagreb, 1980.
- [15] Bjegović, D., Projektiranje betonskih konstrukcija u kemijski agresivnoj okolini, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet Gradjevinskih znanosti, doktorska disertacija, Zagreb, 1991.
- [16] Bogue, P.H., The Chemistry of Portland Cement, Reinhold Publishing Corporation, New York, 1955.
- [17] Brooks, J.J., Influence of Mix Proportions, Plasticizers and Superplasticizers on Creep and Drying Shrinkage of Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 41, No. 148, September 1989.
- [18] Brophy, J.H., Rose, R.M., Wulff, J., Termodinamika strukture (prevod sa engleskog), Zavod za grafičku tehniku TMF, Beograd, 1976.

- [19] Budnikov, P.P., Izabranie trudi, AN USSR - Kiev, 1960.
- [20] Byfors, J., Plain Concrete at Early Ages, CBI Forskning Research, Stockholm, 1980.
- [21] Byfors, J., General Report, Mechanical Properties, International Conference on Concrete at Early Ages, Volume II, Paris, 1982.
- [22] Byfors, J., Pulse Velocity Measurements for Indication of the Compressive Strength at Early Ages, International Conference on Concrete at Early Ages, Volume I, Paris, 1982.
- [23] Carino, N.J., Maturity Functions for Concrete, International Conference on Concrete at Early Ages, Volume I, Paris, 1982.
- [24] Casson, R.B.J. and Domone, P.I.J., Ultrasonic Monitoring of the Early Age Properties of Concrete, International Conference on Concrete at Early Ages, Volume I, Paris, 1982.
- [25] Cebeci, O.Z., Strength of Concrete in Warm and Dry Environment, Materials and Structures, No. 20, 1987.
- [26] Chengju, G., Measuring Consistency of Freshly Mixed Concrete, Concrete International, Vol. 9, No. 8, August 1987.
- [27] Chern, J.-C., Chan, Y.-W., Deformations of Concretes Made with Blast-Furnace Slag Cement and Ordinary Portland Cement, ACI Materials Journal, Vol. 86, No. 4, July-August 1989.
- [28] Cilason, N., Ileri, A.H.S., Chiruzzi, M., Working with Superplasticizers in Concrete: A Wide Field of Application, RILEM International Symposium, Barcelona, May 1990.
- [29] The CIRIA Guide to Concrete Construction in the Gulf Region, CIRIA Special Publication 31, 1984.
- [30] Collepardi, M. and Corradi, M., Influence of Naphthalene-Sulphonated Polymer Based Superplasticizers on the Strength of Ordinary and Lightweight Concretes, International Symposium on Superplasticizers in Concrete, Volume II, Ottawa, 1978.
- [31] Collepardi, M., Scienza e tecnologia del calcestruzzo, Hoepli, Milano, 1980.
- [32] Collepardi, M., Corradi, M., Valente M., Low-Slump-Loss Superplasticized Concrete, International Symposium on Superplasticizers in Concrete, Washington, 1979.
- [33] Concrete Manual, US Bureau of Reclamation, 1968.
- [34] Czernin, W., Zementchemie für Bauingenieure, Bauverlag GmbH, Wiesbaden-Berlin, 1960.
- [35] Dagleish, B.J., Chose, A., Jennings, H.M. and Pratt, P.L., The Correlation of Microstructure with Setting and Hardening in Cement Paste, International Conference on Concrete at Early Ages, Volume I, Paris, 1982.
- [36] Detwiler, R., Krishnan, K. and Mehta, P., Effect of Granulated Blast Furnace Slag on the Transition Zone in Concrete, Concrete Durability, ACI - SP-100, Vol. I, Detroit, 1988.
- [37] Dezhnev, G., Dayu, X. and Zhang, L., Model of Mechanism for Naphthalene Series Water-Reducing Agent, ACI Journal, September-October 1982.
- [38] Dhir, R.K., Yap, A.W.F., Superplasticized High-Workability Concrete: Some Properties in the Fresh and Hardened States, Magazine of Concrete Research, Vol. 35, No. 125, December 1983.

- [39] Dhir, R.K., Yap, A.W.F., Superplasticized Flowing Concrete: Durability Properties, Magazine of Concrete Research, Vol. 36, No. 127, June 1984.
- [40] Dobroljubov, G., Ratinov, V.B., Rozenberg, T.I., Prognozirovanie dolgovečnosti betona s dobavkami, Strojizdat, Moskva, 1983.
- [41] Domone, P.L., Concrete, Part Three, Construction Materials, Their Nature and Behaviour, Edited by Y.M. Illston, London, 1994.
- [42] Douglas, A., Bilodeau, A. and Malhotra, V.M., Properties and Durability of Alkali-Activated Slag Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 89, September-October 1992.
- [43] Djaković, Lj., Koloidna hemija, Tehnički fakultet, Novi Sad, 1990.
- [44] Gvozdev, A.A., Jašin, A.V., Petrova, K.V., Belobrov, I.K., Guzeev, E.A., Pročnost' strukturnye izmenenija i deformacii betona, Strojizdat, Moskva, 1978.
- [45] Hansen, P.F., Jessing, J.K., Monsted, R., Trudso, E., Physical and Chemical Properties of Cement Mortar Cured at Elevated Temperatures, International Symposium on Cement, Tokyo, 1968.
- [46] Hansen, T.C., Proceedings, American Concrete Institute, No. 67, 1970.
- [47] Hattori, K., Experiences with Mighty Superplasticizer in Japan, International Symposium on Superplasticizers in Concrete, Volume I, Ottawa, 1978.
- [48] Hayakawa, M., Yamamoto, Y., Takeda, K., Tanaka, H., Natsuume, K., Effect of Polycarbonate-Based Superplasticizer on Properties of Flowing Concrete, RILEM Symposium: Technology of Concrete when Pozzolans, Slags and Chemical Admixtures Are Used, Monterrey, 1985.
- [49] Henning, O., Goretzki, I., Effect of Plasticizers on the Degree of Hydration, International Conference on Concrete at Early Ages, Volume I, Paris, 1987.
- [50] Hester, W.T., Field Applications of High-Range Water Reducing Admixtures, International Symposium on Superplasticizers in Concrete, Volume II, Ottawa, 1978.
- [51] Hewlett, P.C., The Concept of Superplasticized Concrete, International Symposium on Superplasticizers in Concrete, Ottawa, 1978.
- [52] Hewlett, P.C., Experiences in the Use of Superplasticizers in England, International Symposium on Superplasticizers in Concrete, Volume I, Ottawa, 1978.
- [53] Hot Weather Concreting, Proposed Revision, ACI 305R-89, 1989.
- [54] Ibrahim, L.A.M., Ultrasonic Assessment of Concrete Strength at Early Ages, University College of London, Dpt. of Civil and Municipal Engineering, (Thesis of Ph.D), London, 1976.
- [55] Idorn, M.G., Hydration of Portland Cement Paste at High Temperature under Atmospheric Pressure, Principal Paper, International Conference on Cement, Tokyo, 1968.
- [56] Isachenko, V.P., Osipova, V.A., Sukomel, A.S., Heat Transfer, English translation, Moskow, 1977, (third printing 1987).
- [57] Jevtić, D., Dodaci betonu, Gradjevinski kalendar, 1983.
- [58] Jevtić, D., Dodaci betonu, Seminar "Beton, svojstva i tehnologija", Arandjelovac, 1984.
- [59] Jevtić, D., Uticaj dodatka superplastifikatora na svojstva cementa i betona u funkciji primene čistog portland cementa i cementa sa dodatkom zgure, magistarski rad, TMF, Beograd, 1985.

- [60] Jevtić, D., Neka iskustva u primeni superplastifikatora kod čistog portland cementa i portland cementa sa dodatkom zgure, *Izgradnja*, 11/85, 1985.
- [61] Jevtić, D., Analiza uticaja dejstva mraza na beton spravljen sa dodatkom superplastifikatora, *Naše gradjevinarstvo*, 12/85, 1985.
- [62] Jevtić, D., Dodaci betonu, *Naše gradjevinarstvo*, 5-6, 1991.
- [63] Jevtić, D., Modeliranje karakteristika betona primenom dodataka tipa superplastifikatora, *Savremeni problemi tehnologije betona i tehnologije gradjenja*, Beograd, 1993.
- [64] Kasai, Y., Method of Estimation for Compressive Strength of Concrete at Early Ages, *International Conference on Concrete of Early Ages, Volume I*, Paris, 1982.
- [65] Kasai, Y., Matsui, I., Yokohama, K., Volume Change of Concrete at Early Ages, *International Conference on Concrete of Early Ages, Volume I*, Paris, 1982.
- [66] Kasami, H., Ikeda, T. and Yamane, S., Workability and Pumpability of Superplasticized Concrete - Experience in Japan, *International Symposium on Superplasticizers in Concrete, Volume I*, Ottawa, 1978.
- [67] Kayyali, O.A., Porosity of Concrete in Relation to the Nature of the Paste-Aggregate Interface, *Materials and Structures*, Vol. 20, N° 115, January 1987.
- [68] Kind, V.V., *Korozija cementa i betona u hidrotehničkim objektima*, Gradjevinska knjiga, 1959.
- [69] Kondo, R. and Ueda, S., Kinetics and Mechanisms of the Hydration of Cements, *5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Volume 2*, Tokyo, 1968.
- [70] Kukko, H. and Mannonen, R., Properties of Alkali-Activated Blastfurnace Slag (F-Cement) as Binder in Concrete, *RILEM Symposium: Technology of Concrete when Pozzolans, Slags and Chemical Admixtures Are Used*, Monterrey, 1985.
- [71] Kurbatova, I.I., *Himija gidratacii portlandcementsa*, Strojizdat, Moskva, 1979.
- [72] LaFraugh, R.W., The Use of Superplasticizers in the Precast Industry, *International Symposium on Superplasticizers in Concrete, Volume I*, Ottawa, 1978.
- [73] Leščinskij, M.Ju., *Ispytanie betona, spravočnoe posobie*, Strojizdat, Moskva, 1980.
- [74] Mailvaganam, N.P., Slump Loss in Flowing Concrete, *International Symposium on Superplasticizers in Concrete, Volume II*, Ottawa, 1978.
- [75] Malhotra, V.M., Effect of Repeated Dosages of Superplasticizers on Workability, Strength and Durability of Concrete, *International Symposium Superplasticizers in Concrete*, Ottawa, 1978.
- [76] Malhotra, V.M., Superplasticizers: Their Effect on Fresh and Hardened Concrete, *Progress in Concrete Technology, Energy, Mines and Resources*, Ottawa, 1980.
- [77] Malhotra, V.M., Malanka, D., Performance of Superplasticizers in Concrete: Laboratory Investigation - Part I, *International Symposium on Superplasticizers in Concrete*, Ottawa, 1978.
- [78] Mali, E., Rebić, M., Zajc, A., Korla, J., Vrste i metode ispitivanja karakteristika očvrsljih betona, *Tehnologija Betona*, Cavtat, 1982.

- [79] Manmohan, D., Mehta, P.K., Influence of Pozzolanic, Slag and Chemical Admixtures on Pore Size Distribution and Permeability of Hardened Cement Pastes, *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 3, No. 1, Summer 1981.
- [80] Mather, B., The Warmer the Concrete the Faster the Cement Hydrates, *Concrete International*, Vol.9, No. 8, August 1987.
- [81] Mehta, P.K., *Concrete: Structure, Properties and Materials*, Prentice-Hall, New Jersey, 1986.
- [82] Mehta, P.K. and Aitcin, P.C., Microstructural Basis of Selection of Materials and Mix Proportions for High Strength Concrete, SP 121, *High Strength Concrete*, Second International Symposium, ACI, 1990.
- [83] Meusel, J.W., Rose, J.H., Production of Granulated Blast Furnace Slag at Sparrows Point, and the Workability and Strength Potential of Concrete Incorporating the Slag, Fly Ash, Silica Fume, Slag & Other Mineral By-Products in Concrete, ACI Publication, SP-79, vol. II, Detroit, 1979.
- [84] Meyer, A., Experiences in the Use of Superplasticizers in Germany, *International Symposium on Superplasticizers in Concrete*, Volume I, Ottawa, 1978.
- [85] Miladinović, Ž., *Beton - Osobine i tehnologija*, Izgradnja, Beograd, 1986.
- [86] Mills, R.H. and Meisner, T.M., Use of Superplasticizers in Fibre Reinforced Concrete, *International Symposium on Superplasticizers in Concrete*, Volume II, Ottawa, 1978.
- [87] Monosi, S. and Collepardi, M., Low Porosity and Early Durability of Concrete, RILEM, *From Materials Science to Construction Materials Engineering*, Vol. I, Versailles, September 1987.
- [88] Monteiro, P.J.M. and Mehta, P.K., Ettringite Formation on the Aggregate-Cement Paste Interface, *Cement and Concrete Research*, Vol. 15, 1985.
- [89] Mor, A., Mehta, P.K., Effect of Superplasticizing Admixtures on Cement Hydration, *Cement and Concrete Research*, Vol. 14, 1984.
- [90] Muravljov, M., *Gradjevinski materijali*, Naučna knjiga, Beograd, 1989.
- [91] Muravljov, M., *Osnovi teorije i tehnologije betona*, Gradjevinska knjiga, Beograd, 1991.
- [92] Muravljov, M., *Kompozitni materijali*, Naše gradjevinarstvo, 5-6, 1991.
- [93] Muravljov, M., Kinetika hidratacije cementa i koncept zrelosti betona, *Savremeni problemi tehnologije betona i tehnologije gradjenja*, Beograd, 1993.
- [94] Muravljov, M., Jevtić, D., Investigation of Cement for Concrete to be Used in Structures Near Seawater, *ASTM, Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 6, N° 2, Winter 1984.
- [95] Muravljov, M., Jevtić, D., Uslovi za izradu betona otpornih na agresivno delovanje morske vode, *Jugoslovensko savetovanje "Korozija i propadanje gradjevinskih materijala i njihova zaštita"*, Split, 1985.
- [96] Muravljov, M., Jevtić, D., Mogućnost poboljšanja nekih svojstava betona primenom aditiva, *Savetovanje "O savremenim dostignućima na području projektovanja, gradjenja i održavanja betonskih kolovoznih konstrukcija"*, Portorož, 1985.
- [97] Muravljov, M., Jevtić, D., *Betoni vrlo visokih čvrstoća i neki aspekti njihove primene u prednapregnutim konstrukcijama*, III Jugoslovensko savetovanje o prednaprežanju, Beograd, 1985.

- [98] Muravljev, M., Jevtić, D., Resistance to Corrosion of Portland Cement Concrete and Concrete with Slag, Structural Faults & Repair, London 1987.
- [99] Muravljev, M., Jevtić, D., Efikasnost primene dodatka betonu superplastifikatora u funkciji vodocementnog faktora, Jugoslovensko savetovanje "O primeni novog pravilnika za beton i armirani beton, Dubrovnik, 1988.
- [100] Muravljev, M., Jevtić, D., Uticaj superplastifikatora na povećanje trajnosti betona, Materijali i konstrukcije 1-2, XXXV, 1992.
- [101] Muravljev, M., Ukrainčik, V., Bjegović, D., Jevtić, D., Denić, N., Korozija i zaštita materijala, Gradjevinski kalendar, 1989.
- [102] Muravljev, M., Živković, S., Jevtić, D., Kovačević, T., Study of the Cause of Deterioration and of the Possibility for Repair of Concrete Structure of the Hospital in Agedabia-Lybia, Gradjevinski Fakultet, Beograd, 1991.
- [103] Muravljev, M., Živković, S., Kovačević, T., Jevtić, D., Primena metoda ultrazvuka i sklerometra kod ocene čvrstoće betona gotovih elemenata i konstrukcija, IV Jugoslovenski naučni skup INDIS, Novi Sad, 1986.
- [104] Muravljev, M., Živković, S., Jevtić, D., Primena metode ultrazvuka za rešavanje nekih specifičnih problema betona i betonskih konstrukcija, II Kongres Društva gradjevinskih konstruktera Srbije, Arandjelovac, 1992.
- [105] Muravljev, M., Živković, S., Jevtić, D., Prilog istraživanju promenljivosti konzistencije svežeg betona u funkciji vremena i temperature, Naše gradjevinarstvo 5-6, 1994.
- [106] Nevil, M.A., Svojstva betona, Gradjevinska knjiga, Beograd, 1976.
- [107] Neville, M.A., Brooks, J.J., Concrete Technology, Longman Scientific and Technical, New York, 1987.
- [108] Odler, I. and Roessler, M., Investigations on the Relationship Between Porosity, Structure and Strength of Hydrated Portland Cement Pastes, II. Effect of Pore Structure and of Degree of Hydration, Cement and Concrete Research, Vol. 15, 1985.
- [109] Ogawa, A., Application of Melment to the Production System of Precast Concrete Elements, International Symposium on Superplasticizers in Concrete, Volume II, Ottawa, 1978.
- [110] Pakvor, A., Prilog proučavanju termičkih napona i deformacija betonskih blokova, doktorska disertacija, Gradjevinski fakultet, Beograd, 1979.
- [111] Parcevaux, P., Pore Size Distribution of Portland Cement Slurries at Very Early Stages of Hydration (Influence of Curing Temperature and Pressure), Cement and Concrete Research, Vol. 14, 1984.
- [112] Parrott, L.J., General Report, Methods of Indicating the Stage of Hardening, International Conference on Concrete at Early Ages, Volume II, Paris, 1982.
- [113] Patel, R.G., Killoh, D.C., Parrot, L.J., Gutteridge, W.A., Influence of Curing at Different Relative Humidities upon Compound Reactions and Porosity in Portland Cement Paste, Materials and Structures No. 21, 1988.
- [114] Penttala, V.E., Effects of Microporosity on the Compression Strength and Freezing Durability of High-Strength Concretes, Magazine of Concrete Research, N° 148, September 1989.

- [115] Perenchio, W.F., Whiting, D.A., Kantro, D.L., Water Reduction, Slump Loss and Entrained Air Void Systems as Influenced by Superplasticizers, International Symposium on Superplasticizers in Concrete, Volume I, Ottawa, 1978.
- [116] Popovics, S., Effect of Curing Method and Final Moisture Condition on Compressive Strength of Concrete, ACI Journal, July-August 1986.
- [117] Powers, T.C., The Nonvaporable Water Content of Hardened Portland Cement Paste - Its Significance for Concrete Research and its Method of Determination, ASTM Bull. No. 158, May 1949.
- [118] Powers, T.C., Brownyard, T.L., Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste, PCA, Bull. No. 22, 1948.
- [119] Ramakrishnan, V., Workability and Strength of Superplasticized Concrete, International Symposium on Superplasticizers in Concrete, Volume II, Ottawa, 1978.
- [120] Ramachandran, V.M., Role of Calcium Chloride in Concrete, Progress in Concrete Technology, Energy, Mines and Resources, Ottawa, 1980.
- [121] Ramachandran, V.M., Adsorption and Hydration Behaviour of Tricalcium Aluminate-Water and Tricalcium Aluminate-Gypsum-Water Systems in the Presence of Superplasticizers, ACI Journal, May-June 1983.
- [122] Ratinov, V.B., Ivanov, F.M., Himija v stroitel'stve, Strojizdat, Moskva, 1977.
- [123] Reichel, W., Conrad, D., Beton, Band 1 - Eigenschaften, Projektierung, Prufung, VEB Verlag fur Bauwesen, Berlin, 1981.
- [124] Reichel, W., Glatte, R., Beton, Band 2 - Herstellung, Verarbeitung, Erhaltung, VEB Verlag fur Bauwesen, Berlin, 1981.
- [125] Rose, J.H., The Influence of Curing Temperature on the Strength of Concrete Containing Granulated Blast-Furnace Slag, RILEM Symposium: Technology of Concrete when Pozzolans, Slags and Chemical Admixtures Are Used, Monterrey, 1985.
- [126] Roy, D.M. and Idorn, G.M., Hydration, Structure and Properties of Blast-Furnace Slag Cements, Mortars and Concrete, ACI Journal, Vol. 79, No. 6, Nov-Dec 1982.
- [127] Samarai, M., Ramakrishnan, V., Malhotra, V.M., Effect of Retempering with Water on Properties of Fresh and Hardened Concrete Mixed at Higher Ambient Temperatures, Proceedings of the First International RILEM Congress, Vol. 2, Versailles, 1987.
- [128] Seabrook, P.T. and Malhotra, V.M., Accelerated Strength Testing of Superplasticized Concrete and the Effect of Repeated Doses of Superplasticizers on Properties of Concrete, International Symposium on Superplasticizers in Concrete, Volume II, Ottawa, 1978.
- [129] Sivasundaram, V. and Malhotra, V.M., Properties of Concrete Incorporating Low Quantity of Cement and High Volumes of Granulated Slag, ACI Materials Journal, November-December 1992.
- [130] Stefanov, B.V., Rusanova, N.G., Voljanskij, A.A., Tehnologija betonnyh i zhelezobetnyh izdelij, Višča škola, Kiev, 1982.
- [131] Swamy, R.N., The Nature of the Strength of Concrete, Progress in Concrete Technology, Energy, Mines and Resources, Ottawa 1980.

- [132] Šejkin, A.E., Čehovskij, Ju.V., Brusser, M.I., *Struktura i svojstva cementnyh betonov*, Strojizdat, Moskva, 1979.
- [133] Šestoperov, S.V., *Tehnologija betona*, Vysšaja škola, Moskva, 1977.
- [134] Talling, B., *Accelerated Hardening of Slag When Used as Active Binder*, RILEM Symposium: *Technology of Concrete When Pozzolans, Slags and Chemical Admixtures Are Used*, Monterrey, 1985.
- [135] Taplin, J.M., *A Method for Following the Hydration Reaction in Portland Cement Paste*, Aust. J. Appl. Sci. 10, 1959.
- [136] Tenoutasse, N. and Manion, A.M., *Influence of Industrial By-Products on the Porosity of Hydrated Portland Cement*, RILEM, *From Materials Science to Construction Materials Engineering*, Vol. I, Versailles, September 1987.
- [137] Ukrainčik, V., *Prilog optimizaciji obradivosti svežeg betona*, doktorska disertacija, Zagreb, 1979.
- [138] Valore, R.C., Kudrenski, W. and Gray, D.E., *Application of High-Range Water-Reducing Admixtures in Steam-Cured Cement-Fly Ash Concretes*, *International Symposium on Superplasticizers in Concrete*, Volume II, Ottawa, 1978.
- [139] Van Vlack, L.H., *Materials Science for Engineers*, World Student Series Edition, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 1970.
- [140] Verbeck, G. and Helmuth, R.H., *Structures and Physical Properties of Cement Paste*, 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Volume 3, Tokyo, 1968.
- [141] Wesche, K., *Baustoffe für tragende Bauteile*, Band 2, *Nichtmetallische-anorganische Stoffe*, Beton, Mauerwerk, Bauverlag, 1974.
- [142] Wittman, F.H., *General Report, Models for Calculating Different Properties as Function of the Degree of Hydration*, *International Conference on Concrete at Early Ages*, Volume II, Paris, 1982.
- [143] Wu, X., Roy, D.M., Langton, C.A., *Early Stage Hydration of Slag-Cement*, *Cement and Concrete Research*, Vol. 13, 1983.
- [144] Zajcev, Ju.V., *Mehanika razrušenija dlja stroitelej*, Vysšaja škola, Moskva, 1991.
- [145] Zazimko, V.G., *Optimizacija svojstv stroitel'nyh materialov*, "Transport", Moskva, 1981.
- [146] Zolotnickij, I.Ja., *Novye metody uhoda za betonom*, Budivel'nik, Kiev, 1981.
- [147] Živković, S., *Prilog istraživanju uticaja temperature i drugih relevantnih parametara na neka svojstva svežeg betona i betona male starosti*, Doktorska disertacija, Gradjevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1989.
- [148] Živković, S., *Beton u vrućim klimatima*, *Savremeni problemi tehnologije betona i tehnologije gradjenja*, Beograd, 1993.
- [149] Živković, S., Jevtić, D., *Uticaj povišenih temperatura na svojstva svežeg i očvrslog betona*, *Savreemene tendencije u betonskim konstrukcijama*, "Izgradnja", Beograd, 1994.



