

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Podiplomski program Gradbeništvo
Konstrukcijska smer

Kandidat:

Gregor Trtnik

Uporaba ultrazvočne metode za analizo vezanja in strjevanja betona

Doktorska disertacija št. 190

Mentor:

prof. dr. Goran Turk

Somentor:

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Ljubljana, 19. 3. 2009

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



PODIPLOMSKI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA

DOKTORSKI ŠTUDIJ

Kandidat:

GREGOR TRTNIK, univ. dipl. inž. grad.

**UPORABA ULTRAZVOČNE METODE ZA ANALIZO
VEZANJA IN STRJEVANJA BETONA**

Doktorska disertacija štev.: 190

**THE USE OF ULTRASONIC METHOD TO MONITOR
THE SETTING AND HARDENING PROCESS OF
CONCRETE**

Doctoral thesis No.: 190

Temo doktorske disertacije je odobril Senat Univerze v Ljubljani na svoji 16. seji dne
4. julija 2007 in imenoval
mentorja prof.dr. Gorana Turka,
somentorico doc.dr. Violeto Bokan Bosiljkov.

Ljubljana, 19. marec 2009



Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Komisijo za oceno ustreznosti teme doktorske disertacije v sestavi
prof.dr. Goran Turk,
izr. prof. dr. Igor Planinc,
doc.dr. Violeta Bokan Bosiljkov,
doc.dr. Andrej Zajc, IRMA, Ljubljana,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 6. redni seji dne
28. marca 2007.

Komisijo za oceno doktorske disertacije v sestavi
prof. dr. Marko Valič, UL FPP,
doc. dr. Andrej Zajc, IRMA Ljubljana,
izr. prof. dr. Igor Planinc,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 23. redni seji dne
17. decembra 2008.

Komisijo za zagovor doktorske disertacije v sestavi
prof. dr. Bojan Majes, dekan, predsednik
prof.dr. Goran Turk,
doc.dr. Violeta Bokan Bosiljkov,
prof. dr. Marko Valič, UL FPP,
doc. dr. Andrej Zajc, IRMA Ljubljana,
izr.prof.dr. Igor Planinc,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 25. redni seji dne
25. februarja 2009.



Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **GREGOR TRTNIK, univ. dipl. inž. grad.**, izjavljam, da sem avtor doktorske disertacije z naslovom: »**UPORABA ULTRAZVOČNE METODE ZA ANALIZO VEZANJA IN STRJEVANJA BETONA**«.

Ljubljana, 19. marec 2009

.....
Gregor Trtnik
(podpis)

BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	004:519.22:620.179.16:691.32(043.3)
Avtor:	Gregor Trtnik
Mentor:	prof. dr. Goran Turk
Somentor:	doc. dr. Violeta Bokan Bosiljkov
Naslov:	Uporaba ultrazvočne metode za analizo vezanja in strjevanja betona
Obseg in oprema:	178 str., 49 pregl., 100 sl., 225 en.
Ključne besede:	cementni materiali, hidratacija, formiranje strukture, ultrazvočne meritve, vezanje, tlačna trdnost, adiabatne krivulje, umetne nevronske mreže.

Izvleček

Glavni namen dela je na osnovi obsežnih lastnih eksperimentalnih preiskav analizirati možnost uporabe metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov za zasledovanje procesa vezanja in strjevanja materialov s cementnim vezivom. Podrobno je predstavljena možnost uporabe metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov (USWT) in metode odboja strižnih ultrazvočnih valov (USWR) za zasledovanje hidratacijskega procesa in oceno začetnega časa vezanja tako cementnih past kot betonskih mešanic. Analizirana je korelacija med omenjenima dvema ultrazvočnima metodama. Na osnovi rezultatov obsežnega eksperimentalnega dela je analiziran vpliv različnih komponent betonske mešanice na sovisnost med tlačno trdnostjo betona in hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov in pripravljen ustrezen numerični model za oceno tlačne trdnosti betona neposredno iz hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton. Na osnovi širokega spektra adiabatnih krivulj z različnimi parametri betonske mešanice je pripravljen numerični model za določitev adiabatne krivulje poljubne betonske mešanice, ta model pa je ustrezno vključen v model za napovedovanje razvoja temperaturnega polja v betonskih konstrukcijah.

Glavni prispevki k znanosti, prikazani v disertaciji, so tako:

- razviti potrebno eksperimentalno opremo ter prikazati možnost uporabe nedestruktivne metode merjenja prehoda ultrazvočnih valov skozi materiale s cementnim vezivom za analizo razvoja formiranja strukture ter določitev začetka in konca vezanja,
- analizirati korelacijo med metodo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov in metodo odboja strižnih ultrazvočnih valov za poljubno cementno pasto,
- analizirati vpliv sestave betona na sovisnost med tlačnimi trdnostmi betona in hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton ter pripraviti ustrezen numerični model za nedestruktivno oceno tlačne trdnosti betona z metodo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov,
- pridobiti široko bazo podatkov za določitev vpliva parametrov betonske mešanice na potek adiabatnih krivulj in pripraviti numerični model za izračun adiabatne krivulje poljubne betonske mešanice,
- pripraviti nov model za določitev razvoja temperaturnega polja v betonskih elementih, v katerega bo vključen model za določitev adiabatne krivulje poljubne betonske mešanice,
- opraviti statistične analize ustreznosti predlaganih metod in razvitih numeričnih modelov.

BIBLIOGRAFIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND SUMMARY

UDK: 004:519.22:620.179.16:691.32(043.3)
Author: Gregor Trtnik
Supervisor: prof. dr. Goran Turk
Co-supervisor: assis. prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov
Title: The use of ultrasonic method to monitor the setting and hardening process of concrete
Notes: 178 p., 49 tab., 100 fig., 225 eq.
Key words: cement based materials, hydration, formation of structure, ultrasonic measurements, setting, compressive strength, adiabatic hydration curves, artificial neural networks.

Abstract

The objective of this work is to show the possibility of using an ultrasonic wave transmission method to monitor the setting and hardening process of cement based materials. Therefore, a comprehensive experimental work was performed. The ability of using ultrasonic wave transmission (USWT) and ultrasonic wave reflection (USWR) method to monitor the hydration process and to estimate the initial and final setting times of different cement based materials is studied in detail. The correlation between USWT and USWR methods in their ability to monitor the setting process of cement based materials is also studied. The influence of different concrete and environmental parameters on the relationship between ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves and concrete compressive strength is analysed. Based on the experimental results, a numerical model to predict the velocity-strength relationship is established within the Matlab programming environment. The multi-layer feed-forward neural network was used for this purpose. The idea of modeling adiabatic temperature rise during concrete hydration with the use of artificial neural networks is also introduced and numerical program is proposed, which can be used to predict the adiabatic hydration curve of an arbitrary concrete mixture. This model is implemented into the numerical procedure for calculation of temperature profile of early age mass concrete structure.

Therefore, the main scientific contributions, presented in this dissertation, are:

- to develop an experimental set-up to monitor the hydration process and formation of structure of different cement based materials as well as to estimate the initial and final setting times of these materials,
- to analyse the correlation between the ultrasonic wave transmission and ultrasonic wave reflection method in their ability to monitor the setting process of cement based materials,
- to analyse the influence of different concrete and environmental parameters on the relationship between the velocity of ultrasonic longitudinal waves and concrete compressive strength as well as to develop a suitable numerical model to predict the velocity-strength relationship of concrete mixture,
- to analyse the influence of different concrete parameters on the development of adiabatic hydration curve as well as to develop a suitable numerical program to predict the adiabatic temperature rise of an arbitrary concrete mixture,
- to develop a new numerical procedure for prediction of temperature profile of early age mass concrete structures, into which the proposed numerical program to predict the adiabatic hydration curves will be suitable included,
- to perform the statistical analysis of the proposed methods and numerical programs.

Vsem, ki so me v vseh teh letih mojega šolanja nesebično podpirali, mi kakor-koli pomagali, me razumeli ter verjeli vame in v moje delo.

ZAHVALA

To delo bi težko nastalo brez pomoči mnogih ljudi. Na tem mestu omenjam le nekatere.

Iskrena hvala mentorju prof. dr. Goranu Turku, ki mi je pri študiju in nastanku disertacije vseskozi z veseljem pomagal in svetoval. Njegov optimizem in prijateljstvo sta nemalokrat pripomogla k lažjemu reševanju številnih problemov.

Hvala somentorici doc. dr. Violeti Bokan Bosiljkov za vso strokovno pomoč in nasvete.

Iskreno se zahvaljujem prof. dr. Marku Valiču s Fakultete za Promet in pomorstvo. Pokazal je veliko zanimanje za moje delo, se ničkolikokrat nesebično pripeljal s Portoroža v Ljubljano in mi preko najinih številnih pogovorov s svojimi izkušnjami in znanjem na tem področju ogromno pomagal. Za potrebe preiskav je brez pomisleka odstopil USWR inštrument, s katerim je bilo opravljenih nemalo preiskav, ter pomagal pri avtomatizaciji ostale merilne opreme.

Pri avtomatizaciji opreme je z veseljem pomagal tudi g. Vital Eržen, za kar se tudi njemu najlepše zahvaljujem.

Iskrena hvala mag. Franciju Kavčiču z Inštituta za gradbene materiale IGMAT d.d., ki mi je omogočil raziskovalno delo na inštitutu IGMAT d.d.. V času študija me je vseskozi podpiral ter me obenem seznanjal z delom v podjetju in me vanj vključeval. Za korekten in pošten odnos v času študija se zahvaljujem tudi direktorju inštituta IGMAT d.d. g. Janezu Proseni.

Hvala podjetjema Primorje d.d. in Salonit Anhovo d.d., ki sta za potrebe eksperimentalnih preiskav odstopili potrebne materiale.

Hvala Ministrstvu za Visoko šolstvo, znanost in tehnologijo Republike Slovenije, ki mi je študij finančno omogočilo.

Za prijetno vzdušje v času študija se iskreno zahvaljujem zaposlenim na Katedri za mehaniko Fakultete za Gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, še posebej Evi in Urbanu, s katerima sem v času študija delil sobo 505. Za prijetno in prijateljsko vzdušje se zahvaljujem tudi sodelavcem na oddelku za beton inštituta IGMAT d.d. Iz najrazličnejših vzrokov sem dolžan zahvalo vsem mojim prijateljem, s katerimi smo se vseskozi vzajemno vzpodbujali k študiju in se obenem znali ustrezno sprostiti in zabavati v številnih izven študijskih dejavnostih.

Iskrena hvala mojima staršema za vso podporo in pomoč, ne samo pri študiju, temveč v življenju nasploh. Pomagala sta mi preko številnih ovir, pred katerimi sem se znašel in jih sam nisem znal oziroma zmogel zlahka preskočiti. Hvala moji Nataši, ki mi je vseskozi stala ob strani, me razumela, podpirala in z ljubeznijo prenašala. Naučila me je in mi pokazala, da so v življenju tudi mnogo pomembnejše stvari od betona.

Ljubljana, marec 2009.

KAZALO VSEBINE

1. NAMEN IN STRUKTURA DISERTACIJE.....	1
1.1 SPLOŠNO.....	1
1.2 NAMEN IN CILJI.....	2
1.3 STRUKTURA DISERTACIJE.....	2
2. HIDRATACIJA MATERIALOV S CEMENTNIM VEZIVOM.....	4
2.1 UVOD.....	4
2.2 HIDRATACIJA PORTLANDSKEGA CEMENTA.....	4
2.2.1 Kemijske reakcije portlanskega cementa.....	4
2.2.2 Hidrationski proces.....	5
2.2.3 Parametri vpliva na proces hidratacije cementa v betonu.....	7
2.2.4 Razvoj strukture cementne paste med potekom hidratacije.....	9
2.3 KLASIČNE METODE MERJENJA HIDRATIONSKEGA PROCESA.....	12
3. EKSPERIMENTALNE METODE.....	13
3.1 METODA PREHODA VZDOLŽNIH ULTRAZVOČNIH VALOV.....	13
3.1.1 Splošno.....	13
3.1.2 Razvoj lastnega merilnega inštrumenta.....	14
3.1.3 Razvoj ustreznega kalupa.....	15
3.2 METODA ODBOJA STRIŽNIH ULTRAZVOČNIH VALOV.....	17
3.2.1 Splošno.....	17
3.2.2 Merilni inštrument USWR.....	20
3.3 SEKUNDARNE EKSPERIMENTALNE METODE.....	23
3.3.1 Metoda resonančne frekvence.....	23
3.3.2 Določanje statičnega Youngovega modula.....	25
3.3.3 Določanje časa vezanja cementne paste z metodo Vicata.....	25
3.3.4 Določanje časa vezanja betona z metodo penetrometra.....	26
3.3.5 Določanje tlačne trdnosti betona.....	26
3.3.6 Metoda sklerometričnega indeksa.....	27
3.3.7 Določanje hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi strjene betonske preskušance.....	27
4. MATEMATIČNE IN STATISTIČNE METODE.....	29
4.1 UMETNE NEVRONSKE MREŽE.....	29
4.1.1 Splošno.....	29
4.1.2 Zgradba umetnih nevronske mreže.....	29
4.2 PROGRAM HYMOSTRUC (TU DELFT).....	31
4.2.1 Splošno.....	31
4.2.2 Mehanizem nastajanja hidrationskih produktov.....	32
4.2.3 Hitrost penetracije.....	33
4.3 STATISTIČNE METODE.....	33
4.3.1 Linearna regresija.....	33
4.3.2 Preskušanje domnev.....	35
5. KARAKTERISTIKE UPORABLJENIH MATERIALOV.....	38
5.1 OSNOVNI MATERIALI.....	38
5.1.1 Cement.....	38
5.1.2 Zamesna voda.....	39
5.1.3 Mineralni agregat.....	39
5.2 CEMENTNE PASTE.....	40
5.3 BETONSKE MEŠANICE.....	42
6. MATERIALI PRI ZGODNJI STAROSTI.....	45
6.1 UVOD.....	45
6.2 CEMENTNA PASTA.....	45
6.2.1 Metoda prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov - splošno.....	45

6.2.2	Metoda odboja strižnih ultrazvočnih valov – splošno	48
6.2.3	Vpliv različnih parametrov na potek krivulj v_p-t in $dr-t$	49
6.2.4	Primerjava krivulj v_p-t in $dr-t$	54
6.3	BETONSKE MEŠANICE	56
6.3.1	Maksimalno zrno agregata 4 mm	56
6.3.2	Maksimalno zrno agregata do 16 mm	58
6.4	PRIMERJAVA KRIVULJ v_p-t ZA CEMENTNO PASTO IN BETON	59
6.5	VPLIV VRSTE INŠTRUMENTA NA KRIVULJE v_p-t	59
6.6	ANALIZA PONOVLJIVOSTI MERITEV	61
6.6.1	Uvod	61
6.6.2	Cementne paste	61
6.6.3	Beton	62
6.7	SKLEPI	62
7.	MATERIALI V STRJENEM STANJU	64
7.1	UVOD	64
7.2	EKSPERIMENTALNI REZULTATI	65
7.2.1	Vpliv vrste cementa	65
7.2.2	Vpliv vodo/cementnega razmerja	66
7.2.3	Vpliv temperature okolice	67
7.2.4	Vpliv velikosti maksimalnega zrna agregata	68
7.2.5	Vpliv količine agregata	69
7.2.6	Vpliv oblike agregata v betonu	71
7.2.7	Vpliv vrste agregata	72
8.	UPORABA ULTRAZVOČNE METODE ZA OCENO ČASA VEZANJA MATERIALOV S CEMENTNIM VEZIVOM	74
8.1	UVOD	74
8.2	CEMENTNA PASTA	74
8.2.1	Določitev začetnega in končnega časa vezanja z Vicatovo metodo	74
8.2.2	Ocena časa vezanja z metodo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov	78
8.2.3	Analiza zanesljivosti določitve časa vezanja poljubne cementne paste z metodo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov	82
8.2.4	Ocena časa vezanja z metodo odboja strižnih ultrazvočnih valov	86
8.2.5	Ocena časa vezanja s kombinacijo ultrazvočnih metod	87
8.3	BETON	88
8.3.1	Določitev začetnega in končnega časa vezanja s penetrometrsko metodo	88
8.3.1	Ocena časa vezanja z metodo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov	89
8.4	SKLEPI	91
9.	NUMERIČNI MODEL ZA OCENO TLAČNE TRDNOSTI BETONA NA PODLAGI HITROSTI PREHODA ULTRAZVOKA SKOZI BETON	93
9.1	UVOD	93
9.2	VPLIV POSAMEZNIH PARAMETROV NA ZVEZO $TT-v_p$	94
9.2.1	Vpliv vrste cementa v betonu	95
9.2.2	Vpliv vodo/cementnega razmerja	97
9.2.3	Vpliv temperature okolice	99
9.2.4	Vpliv količine agregata v betonu	101
9.2.5	Vpliv velikosti maksimalnega zrna agregata v betonu	104
9.2.6	Vpliv oblike agregata v betonu	106
9.2.7	Vpliv vrste agregata v betonu	107
9.2.8	Analiza zanesljivosti meritev	109
9.3	VPLIV POSAMEZNIH PARAMETROV NA ZVEZO $E_s-v_p (E_d, G)$	110
9.4	RAZVOJ NUMERIČNEGA MODELA ZA OCENO TLAČNE TRDNOSTI BETONA IZ HITROSTI PREHODA ULTRAZVOKA SKOZI BETON	111

9.4.1 Uvod.....	111
9.4.2 Določitev vplivnih parametrov	112
9.4.3 Struktura umetne nevronske mreže.....	114
9.4.4 Uspešnost in natančnost predlaganega numeričnega modela.....	115
9.4.5 Možnost uporabe predlaganega numeričnega modela	116
9.5 NUMERIČNI MODEL ZA OCENO TLAČNE TRDNOSTI BETONA Z MEŠANO NEDESTRUKTIVNO METODO.....	118
9.5.1 Uvod.....	118
9.5.2 Eksperimentalno delo in rezultati.....	119
9.6 SKLEPI.....	121
10. NUMERIČNI MODEL ZA DOLOČITEV ADIABATNE KRIVULJE POLJUBNE BETONSKE MEŠANICE IN NJEGOVA APLIKACIJA.....	122
10.1 UVOD	122
10.2 RAZVOJ MODELA	123
10.2.1 Eksperimentalno delo.....	123
10.2.2 Priprava modela	124
10.2.3 Natančnost modela.....	125
10.3 UPORABA MODELA.....	127
10.4 PRIPRAVA PROGRAMA ZA DOLOČITEV RAZVOJA TEMPERATURNEGA POLJA V BETONSKIH KONSTRUKCIJAH	128
10.4.1 Uvod.....	128
10.4.2 Vključitev modela za določitev adiabatske krivulje in kratek opis programa	129
10.4.3 Validacija programa	132
10.4.4 Primer praktične uporabe programa.....	133
10.4.5 Možnost uporabe prikazanega numeričnega modela za oceno tlačne trdnosti betona.....	135
10.5 SKLEPI.....	137
11. ZAKLJUČKI IN PRIPOROČILA ZA NADALJNJE DELO.....	139
11.1 ZAKLJUČKI.....	139
11.2 PRIPOROČILA ZA NADALJNJE DELO	141
12 SUMMARY.....	142
VIRI.....	144
UPORABLJENI VIRI.....	144
LASTNI PRISPEVKI, NASTALI V OKVIRU DISERTACIJE	151

KAZALO SLIK

Slika 2.1	Faze hidratacijskega procesa (Schindler 2002).	5
Slika 2.2	a) Hitrost pretvorbe klinkerjevih mineralov pri hidrataciji običajnega portlandskega cementa pri sobni temperaturi (Pešič 1999), b) hitrost nastajanja hidratacijskih produktov pri hidrataciji običajnega portlandskega cementa pri sobni temperaturi (Pešič 1999).	6
Slika 2.3	a) Vpliv deleža C_3A (C_3S je konstanten) na sproščeno toploto hidratacije, b) vpliv deleža C_3S (C_3A je konstanten) na sproščeno toploto hidratacije (Schindler 2002).	7
Slika 2.4	Vpliv posameznih parametrov betonske mešanice na potek relativne adiabatne temperature (Kavčič 2000), a) vpliv vrste cementa v betonu, b) vpliv količine cementa v betonu, c) vpliv začetne temperature sveže betonske mešanice.	9
Slika 2.5	Morfologija kristalov etringita, sataste oblike C-S-H gela in CH kristalov (Ye 2003).	10
Slika 2.6	Formiranje trdne faze v strukturi cementne paste med potekom procesa hidratacije (Ye 2003).	11
Slika 2.7	Kapilarna poroznost (temno) v strjeni cementni pasti (Ye 2003).	11
Slika 3.1	Inštrumenta za kontinuirno merjenje hitrosti prehoda vzdolžnega ultrazvočnega valovanja skozi preskušance, a) inštrument Proceq, b) inštrument Pundit.	15
Slika 3.2	a) Kalup za določanje hitrosti prehoda ultrazvoka skozi preskušane, prva faza razvoja b) primer krivulje hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi preskušane s časom.	15
Slika 3.3	a) Kalup za določanje hitrosti prehoda ultrazvoka skozi preskušane, druga faza razvoja b) primer krivulje hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi preskušane s časom.	16
Slika 3.4	a) Kalup za določanje hitrosti prehoda ultrazvoka skozi preskušane, tretja faza razvoja b) primer krivulje hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi preskušane s časom.	16
Slika 3.5	Shematični prikaz fenomena odboja vzdolžnih ultrazvočnih valov na stiku cementna pasta –jeklo (Voigt 2004).	18
Slika 3.6	Faza vpadnega in odbojnega vala na stiku med a) vmesnim materialom in zrakom, in b) vmesnim materialom in cementno pasto (Voigt 2004).	19
Slika 3.7	Principelna shema merjenja poteka hidratacije in polimerizacije materialov z metodo odmeva ultrazvočnega valovanja na meji dveh sredstev.	21
Slika 3.8	USWR inštrument	21
Slika 3.9	a) Inštrument za merjenje resonančne frekvence, b) sistem podpor.	23
Slika 3.10	Določanje statičnega Youngovega modula, betonski vzorec dimenzij $100 \times 100 \times 400$ mm.	25
Slika 3.11	Preiskava tlačne trdnosti betona po standardu SIST EN 12390-3:2002, a) naprava za destruktivno preiskavo tlačne trdnosti, b) značilna porušitev betonskega vzorca.	26
Slika 3.12	a) Določanje sklerometričnega indeksa, betonski vzorec dimenzij $150 \times 150 \times 150$ mm, b) določanje hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi betonski vzorec dimenzij $150 \times 150 \times 150$ mm.	27
Slika 4.1	Zgradba večslojne umetne nevronske mreže.	29
Slika 4.2	Različne aktivacijske funkcije.	30
Slika 4.3	a) Shematični prikaz mehanizma ekspanzije, b) shematični prikaz formiranja mikrostrukture hidratizirajoče cementne paste (Lochorst 1998).	32
Slika 5.1	Drobljeni agregat apnenčevega izvora, a) frakcija 0 – 4 mm, b) frakcija 4-8 mm, c) frakcija 8 – 16 mm, d) frakcija 16 – 32 mm.	39

Slika 5.2	Agregat kvarcitrno karbonatnega izvora, a) frakcija 0 – 4 mm, b) frakcija 4-8 mm, c) frakcija 4 – 8 mm, prodnat d) frakcija 8 – 16 mm, frakcija 8 – 16 mm, prodnat, frakcija 16 – 32, prodnat.....	40
Slika 6.1	Struktura hidratizirajoče cementne paste C1035 pri različnih časih, izračunana s programom Hymostruc, a) $t = 1$ ura, $\alpha = 0.016$, b) $t = 3$ ure, $\alpha = 0.04$, c) $t = 13$ ur, $\alpha = 0.15$, d) $t = 800$ ur, $\alpha = 0.57$	45
Slika 6.2	Cementna pasta C1035, a) razvoj hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi cementno pasto s časom, b) definicija karakterističnih območij na krivulji $v_p - t$	46
Slika 6.3	Hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov v odvisnosti od temperature skozi a) vodo in led, b) zrak, inštrument Proceq.....	47
Slika 6.4	Hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov v suspenziji zrak/voda pri 20°C (Ye 2003).....	47
Slika 6.5	Cementna pasta C1035, razvoj strižnega odbojnega koeficienta s časom in definicija karakterističnih območij na krivulji $dr - t$	49
Slika 6.6	Vpliv razmerja v/c na razvoj a) hitrosti prehoda vzdolžnega ultrazvočnega valovanja skozi cementne paste in b) strižnega odbojnega koeficienta.....	49
Slika 6.7	Shematični prikaz strukture cementnih past pri starosti 25 ur (program Hymostruc),	50
Slika 6.8	Vpliv vodo/cementnega razmerja na razvoj strukture cementnih past, a) količina trdne faze, b) količina povezovalnih delcev.....	50
Slika 6.9	Vpliv vrste cementa na razvoj a) hitrosti prehoda vzdolžnega ultrazvočnega valovanja skozi cementne paste in b) strižnega odbojnega koeficienta.....	51
Slika 6.10	Shematični prikaz strukture cementnih past pri starosti 25 ur (program Hymostruc),	51
Slika 6.11	Vpliv vrste cementa na razvoj strukture cementnih past, a) količina trdne faze, b) količina povezovalnih delcev.....	51
Slika 6.12	Vpliv temperature okolice na potek naraščanja a) hitrosti prehoda vzdolžnega ultrazvočnega valovanja skozi cementne paste in b) strižnega odbojnega koeficienta.	52
Slika 6.13	Shematični prikaz strukture cementnih past pri starosti 25 ur (program Hymostruc),	52
Slika 6.14	Razvoj strukture cementnih past v odvisnosti od temperature okolice, a) količina trdne faze, b) količina povezovalnih delcev.....	53
Slika 6.15	Vpliv finosti mletja cementa na potek naraščanja a) hitrosti prehoda vzdolžnega ultrazvočnega valovanja skozi cementne paste in b) strižnega odbojnega koeficienta.	53
Slika 6.16	Vpliv deleža minerala C_3A na potek naraščanja a) hitrosti prehoda vzdolžnega ultrazvočnega valovanja skozi cementne paste in b) strižnega odbojnega koeficienta.	54
Slika 6.17	Vpliv posameznih obravnavanih parametrov na zvezo $v_p - dr$, a) vpliv v/c razmerja, b) vpliv vrste cementa, c) vpliv temperature okolice, d) vpliv finosti mletja cementa, e) vpliv deleža C_3A	55
Slika 6.18	Vpliv posameznih obravnavanih parametrov na razvoj hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov s časom za betone z maksimalnim zrnom agregata 4 mm, a) vpliv vodo/cementnega razmerja, b) vpliv količine agregata v betonu, c) vpliv vrste cementa v betonu, d) vpliv vrste agregata v betonu.....	57
Slika 6.19	Vpliv posameznih obravnavanih parametrov na razvoj hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov s časom za betone z maksimalnim zrnom agregata 16 mm, a) vpliv vodo/cementnega razmerja, b) vpliv vrste cementa v betonu, c) velikosti maksimalnega zrna agregata, d) vpliv temperature okolice.....	58
Slika 6.20	Prečni prerez nekaterih betonskih vzorcev, uporabljenih za določitev hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov, a) maksimalno zrna agregata 4 mm, b) maksimalno zrno agregata 8 mm, c) maksimalno zrno agregata 16 mm, d) agregat kvarcitrno karbonatnega izvora, e) manj agregata v betonu.....	59

Slika 6.21	Vpliv vrste inštrumenta na razvoj krivulj $v_p - t$, a) mešanica B4C1065, b) mešanica B4C2054, c) mešanica B4C4054, d) mešanica B4C3054, e) mešanica B8C1054, f) mešanica B16C1054.....	60
Slika 6.22	Vpliv vrste inštrumenta na razvoj a) krivulje $v_p - t$ za cementno pasto C1035, b) krivulje $v_p' - t$ za cementno pasto C1035.....	61
Slika 6.23	Ponovljivost uporabljene metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov – cementne paste.....	62
Slika 6.24	Ponovljivost uporabljene metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov – betonske mešanice, a) maksimalno zrno agregata 4 mm, b) maksimalno zrno agregata 16 mm.....	62
Slika 7.1	Vpliv vrste cementa v betonu na razvoj a) tlačnih trdnosti betona, b) hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton.....	65
Slika 7.2/1	Vpliv v/c razmerja na razvoj tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda ultrazvoka skozi betone, a) tlačne trdnosti, količina agregata v betonu 1500 kg/m^3 , b) hitrost prehoda ultrazvoka, količina agregata v betonu 1500 kg/m^3	66
Slika 7.3	Vpliv temperature okolice na razvoj a) tlačnih trdnosti betona, b) hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton.....	68
Slika 7.4	Vpliv velikosti maksimalnega zrna agregata na a) razvoj tlačnih trdnosti betona, b) razvoj hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton.....	68
Slika 7.5/1	Vpliv količine agregata v betonu na razvoj tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton, a) tlačne trdnosti, v/c = 0.40, b) hitrost prehoda ultrazvoka, v/c = 0.40.....	69
Slika 7.6	Vpliv oblike agregatnih zrn na razvoj a) tlačnih trdnosti betona, b) hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton.....	71
Slika 7.7/1	Vpliv materiala agregata na razvoj tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda ultrazvoka skozi betone, a) tlačne trdnosti, količina agregata 1500 kg/m^3 , b) hitrost prehoda ultrazvoka, količina agregata 1500 kg/m^3	72
Slika 8.1	Vpliv vodo/cementnega razmerja na a) potek globine penetracije Vicatove igle v cementno pasto, b) začetni in končni čas vezanja cementne paste.....	75
Slika 8.2	Vpliv vrste cementa na a) potek globine penetracije Vicatove igle v cementno pasto, b) začetni in končni čas vezanja cementne paste.....	76
Slika 8.3	Vpliv temperature okolice na a) potek globine penetracije Vicatove igle v cementno pasto, b) začetni in končni čas vezanja cementne paste.....	76
Slika 8.4	Vpliv finosti mletja cementa na a) potek globine penetracije Vicatove igle v cementno pasto, b) začetni in končni čas vezanja cementne paste.....	77
Slika 8.5	Vpliv deleža minerala C_3A na a) potek globine penetracije Vicatove igle v cementno pasto, b) začetni in končni čas vezanja cementne paste.....	77
Slika 8.6/1	Povezava med krivuljo $v_p - t$ in prodorom Vicatove igle d_V , a) pasta C1035, b) pasta C1040, c) pasta C1050 (C1, CT21), d) pasta C2 (CF1, CC3A1).....	78
Slika 8.7	Vpliv obravnavanih parametrov na vrednosti $t_{z,V,i}$, t_v in t_{PT1} , a) vpliv razmerja v/c, b) vpliv finosti mletja cementa, c) vpliv vrste cementa, d) vpliv deleža minerala C_3A , e) vpliv temperature okolice, f) vpliv vrste cementa, v/c = 0.40.....	81
Slika 8.8	Ponovljivost metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov, cementne paste C2, a) krivulje $v_p - t$, b) odvodi krivulj $v_p - t$	82
Slika 8.9	Ponovljivost metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov, cementne paste C4, a) krivulje $v_p - t$, b) odvodi krivulj $v_p - t$	83
Slika 8.10	Povezava med krivuljo $dr - t$ in prodorom Vicatove igle d_V , a) pasta C1035, b) pasta C1040, c) pasta C1050, d) pasta C1065.....	86

Slika 8.11	Prikaz časovnega razvoja odpornosti na penetracijo d_p za posamezne betonske mešanice, a) vpliv v/c razmerja, b) vpliv vrste cementa, c) vpliv količine agregata, d) vpliv vrste agregata.....	88
Slika 8.12/1	Povezava med krivuljo $v_p - t$ in prodorom penetracijske igle v betonske mešanice d_p , a) mešanica B4C1054, b) mešanica B4C1048, c) mešanica B4C1065, d) mešanica B4C4054.....	89
Slika 9.1	Zveza $TT - v_p$ za vse betonske preskušance skupaj, a) aproksimacija z najustreznejšim regresijskim modelom (9.16), b) korelacija med dejanskimi in izračunanimi tlačnimi trdnostmi.....	95
Slika 9.2	Vpliv vrste cementa v betonu na razmerje $TT - v_p$, a) posamezni regresijski modeli, b) skupni regresijski model, c) korelacija med dejanskimi in izračunanimi tlačnimi trdnostmi (regresijski model 9.21).....	96
Slika 9.3	Vpliv v/c razmerja na razmerje $TT - v_p$, a) posamezni regresijski modeli, manj agregata, b) skupni regresijski model, manj agregata, c) posamezni regresijski modeli, d) skupni regresijski model, e) posamezni regresijski modeli, več agregata, f) skupni regresijski model, več agregata.....	98
Slika 9.4	Korelacija med dejanskimi in izračunanimi tlačnimi trdnostmi, a) vpliv v/c razmerja, manj agregata, b) vpliv v/c razmerja, c) vpliv v/c razmerja, več agregata.....	99
Slika 9.5	Vpliv temperature okolice na razmerje $TT - v_p$, a) posamezni regresijski modeli, b) skupni regresijski model, c) korelacija med dejanskimi in izračunanimi tlačnimi trdnostmi (regresijski model 9.39).....	100
Slika 9.6	Vpliv količine agregata apnenčevega izvora na razmerje $TT - v_p$, a) posamezni regresijski modeli, v/c = 0.40, b) skupni regresijski model, v/c = 0.40, c) posamezni regresijski modeli, v/c = 0.54, d) skupni regresijski model, v/c = 0.54, e) posamezni regresijski modeli, v/c = 0.65, f) skupni regresijski model, v/c = 0.65.....	102
Slika 9.7	Vpliv količine agregata kvarcitrno karbonatnega izvora na razmerje $TT - v_p$, a) posamezni regresijski modeli, b) skupni regresijski model.....	103
Slika 9.8	Korelacija med dejanskimi in izračunanimi tlačnimi trdnostmi, vpliv količine agregata v betonu, a) v/c = 0.40, b) v/c = 0.54, c) v/c = 0.65, d) agregat kvarcitrno karbonatnega izvora.....	104
Slika 9.9	Vpliv velikosti maksimalnega zrna agregata v betonu na razmerje $TT - v_p$, a) posamezni regresijski modeli, b) skupni regresijski model, c) korelacija med dejanskimi in izračunanimi tlačnimi trdnostmi (regresijski model 9.60).....	105
Slika 9.10	Vpliv oblike zrn agregata v betonu na razmerje $TT - v_p$, a) posamezni regresijski modeli, b) skupni regresijski model, c) korelacija med dejanskimi in izračunanimi tlačnimi trdnostmi (regresijski model 9.63).....	106
Slika 9.11	Vpliv vrste agregata na razmerje $TT - v_p$, a) posamezni regresijski modeli, količina agregata 1500 kg/m ³ , b) skupni regresijski model, količina agregata 1500 kg/m ³ , c) posamezni regresijski modeli, količina agregata 1850 kg/m ³ , d) skupni regresijski model, količina 1850 kg/m ³ , e) posamezni regresijski modeli, količina agregata 2130 kg/m ³ , f) skupni regresijski model, količina agregata 2130 kg/m ³	108
Slika 9.12	Korelacija med dejanskimi in izračunanimi tlačnimi trdnostmi, vpliv vrste agregata, a) količina agregata 1500 kg/m ³ , b) količina agregata 1850 kg/m ³ , c) količina agregata 2130 kg/m ³	109
Slika 9.13	Analiza ponovljivosti zvez $TT - v_p$, a) posamezni regresijski modeli, b) skupni regresijski model.....	110
Slika 9.14	Sovisnosti med E_s , E_d in G ter v_p	111

Slika 9.15	a) Zveza $TT - v_p$ za vse mešanice z vplivnimi parametri, b) korelacija med TT in TT_{reg} za vse mešanice z vplivnimi parametri, c) zveza $TT - v_p$ za vse mešanice z nevplivnimi parametri, d) korelacija med TT in TT_{reg} za vse mešanice z nevplivnimi parametri.	114
Slika 9.16	Korelacija med dejanskimi in izračunanimi tlačnimi trdnostmi, vsi vzorci, a) korelacija $TT - TT_{reg}$, b) korelacija $TT - TT_{NM}$	115
Slika 9.17	Korelacija med dejanskimi in izračunanimi tlačnimi trdnostmi, mešanice z vplivnimi parametri, a) korelacija $TT - TT_{reg}$, b) korelacija $TT - TT_{NM}$	116
Slika 9.18	Zveze $TT - v_p$ za dodatno pripravljene betonske mešanice.	117
Slika 9.19	Korelacija med dejanskimi in izračunanimi tlačnimi trdnostmi, dodatni vzorci, a) korelacija med TT in TT_{reg} , b) korelacija med TT in TT_{NM}	117
Slika 9.20	Možnost uporabe numeričnega modela za napovedovanje nove korelacijske krivulje $TT - v_p$, a) vpliv maksimalnega zrna agregata v betonu, b) vpliv količine agregata v betonu.	118
Slika 9.21	a) Krivulje enakih trdnosti za referenčno betonsko mešanico, metoda SONREB (Samarin 2004), b) Monogram za beton z določenim tipom agregata pri določeni starosti (Samarin 2004).	119
Slika 9.22	Zveza med dejanskimi in izračunanimi tlačnimi trdnostmi, a) Zveza $TT - TT_{R,reg}$, b) Zveza $TT - TT_{reg}$	120
Slika 10.1	a) Uporabljen adiabatni kalorimeter, b) pripadajoča merilna oprema.	123
Slika 10.2	Adiabatne krivulje, uporabljene pri pripravi numeričnega modela.	124
Slika 10.3	Primerjava med dejanskimi in izračunanimi vrednostmi relativne adiabatne temperature, a) brez krivulje A9, b) s krivuljo A9.	125
Slika 10.4	Primerjava dejanske in izračunanih relativnih adiabatnih krivulj A10.	126
Slika 10.5	Možnost napovedovanja nove adiabatne krivulje s prikazanim numeričnim modelom, a) vpliv začetne temperature, b) vpliv količine cementa, c) vpliv vrste cementa.	127
Slika 10.6	Geometrija betonskega valja in položaj nameščenih termočlenov v notranjosti elementa, b) mreža končnih elementov (upoštevana osna simetrija).	132
Slika 10.7	Primerjava med eksperimentalno izmerjenim in izračunanim potekom temperature s časom, a) točka 3, b) točka 4.	132
Slika 10.8	Dejanski in izračunan potek temperature s časom v točki 3 po majhnih korekcijah adiabatne krivulje.	133
Slika 10.9	Vpliv začetne temperature na potek a) adiabatne krivulje, b) absolutne temperature v točki 3, c) relativne temperature v točki 3.	134
Slika 10.10	Vpliv količine cementa v betonu na potek a) adiabatne krivulje, b) absolutne temperature v točki 3.	134
Slika 10.11	Vpliv začetne temperature pri adiabatnem preizkusu na razvoj temperature v točki 3.	135

LIST OF FIGURES

Figure 2.1	Stages during the hydration process (Schindler 2002).	5
Figure 2.2	a) Rate of development of clinker minerals during the hydration process of ordinary portland cement at room temperature (Pešič 1999), b) rate of development of the hydration products during the hydration process of ordinary portland cement at room temperature (Pešič 1999).	6
Figure 2.3	a) Effect of C_3A content (C_3S is constant) on heat of hydration, b) effect of C_3S content (C_3A is constant) on heat of hydration (Schindler 2002).	7
Figure 2.4	The influence of some concrete parameters on the evolution of relative adiabatic temperature rise (Kavčič 2000), a) the influence of the type of cement, b) the influence of the cement content, c) the influence of the initial concrete temperature. ...	9
Figure 2.5	Morphology of the ettringite needles, platy-type II C-S-H and plate-like CH (Ye 2003)	10
Figure 2.6	Formation of structure of hardening cement paste during the hydration process (Ye 2003).	11
Figure 2.7	Capillary porosity in hardened cement paste, capillary pores appear as black (Ye 2003).	11
Figure 3.1	Instruments for the determination of ultrasonic pulse velocity through cement-based specimens, a) instrument Proceq, b) instrument Pundit.	15
Figure 3.2	a) A plastic container for pulse velocity measurements of fresh cement paste and concrete specimens, the first stage of the development, b) example of evolution of the ultrasonic pulse velocity curve with time.	15
Figure 3.3	a) A PMMA container for pulse velocity measurements of fresh cement paste and concrete specimens, the second stage of the development, b) example of evolution of the ultrasonic pulse velocity curve with time.	16
Figure 3.4	a) A styrofoam container for pulse velocity measurements of fresh cement paste and concrete specimens, the third stage of the development, b) example of evolution of the ultrasonic pulse velocity curve with time.	16
Figure 3.5	Schematic of reflection process of longitudinal waves at a steel - cement paste interface (Voigt 2004).	18
Figure 3.6	Phase of incident and reflected wave at a a) buffer/air and b) buffer/cement paste interface (Voigt 2004).	19
Figure 3.7	Block scheme of the ultrasonic pulse echo method for hydration studies of hydraulic materials by the shear wave reflection method.	21
Figure 3.8	USWR instrument.	21
Figure 3.9	a) Apparatus for the determination of resonant frequency, b) support system.	23
Figure 3.10	Determination of static elastic modulus – concrete specimen $100 \times 100 \times 400$ mm.	25
Figure 3.11	Determination of concrete compressive strength according to SIST EN 12390-3:2002 standard, a) apparatus, b) typical failure of cubic specimen.	26
Figure 3.12	a) Determination of rebound number, specimen with the dimensions of $150 \times 150 \times 150$ mm, b) determination of ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves, specimen with the dimensions of $150 \times 150 \times 150$ mm.	27
Figure 4.1	Structure of the multi-layer feed-forward artificial neural network.	29
Figure 4.2	Different types of activation functions.	30
Figure 4.3	a) Schematic representation of expansion mechanism, b) schematic representation of the formation of a load-bearing microstructure in hardening cement paste (Lochorst 1998).	32

Figure 5.1	Crushed limestone aggregat, a) fraction 0 – 4 mm, b) fraction 4 – 8 mm, c) fraction 8 – 16 mm, d) fraction 16 – 32 mm.	39
Figure 5.2	Quarzite carbonate aggregate, a) fraction 0 – 4 mm, b) fraction 4 – 8 mm, c) fraction 4 – 8 mm, gravel, d) fraction 8 – 16 mm, fraction 8 – 16 mm, gravel, fraction 16 – 32 mm, gravel.	40
Figure 6.1	Formation of the structure of cement paste C1035 at different hydration times, evaluated with Hymostruc program, a) $t = 1$ hour, $\alpha = 0.016$, b) $t = 3$ hours, $\alpha = 0.04$, c) $t = 13$ hours, $\alpha = 0.15$, d) $t = 800$ hours, $\alpha = 0.57$	45
Figure 6.2	Cement paste C1035, a) development of ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves through cement paste, b) definition of characteristic stages on the $v_p - t$ curve.	46
Figure 6.3	Ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves at different temperatures through a) water and ice, b) air, instrument Proceq.	47
Figure 6.4	Ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves in air/water system at 20°C (Ye 2003).	47
Figure 6.5	Cement paste C1035, the development of the shear wave reflection coefficient with time and definition of the characteristic stages on the $dr - t$ curve.	49
Figure 6.6	Influence of water/cement ratio on the development of a) ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves through cement pastes, b) ultrasonic shear wave reflection coefficient.	49
Figure 6.7	Schematic representation of the structure of cement pastes at time 25 hours (Hymostruc program),	50
Figure 6.8	Influence of water/cement ratio on the development of structure of cement pastes, a) amount of the connected solid phase, b) amount of bridge volume.	50
Figure 6.9	Influence of cement type on the development of a) ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves through cement pastes, b) ultrasonic shear wave reflection coefficient.	51
Figure 6.10	Schematic representation of the structure of cement pastes at time 25 hours (Hymostruc program),	51
Figure 6.11	Influence of cement type on the development of structure of cement pastes, a) amount of the connected solid phase, b) amount of bridge volume.	51
Figure 6.12	Influence of curing temperature on the development of a) ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves through cement pastes, b) ultrasonic shear wave reflection coefficient.	52
Figure 6.13	Schematic representation of the structure of cement pastes at time 25 hours (Hymostruc program),	52
Figure 6.14	Influence of curing temperature on the development of structure of cement pastes, a) amount of the connected solid phase, b) amount of bridge volume.	53
Figure 6.15	Influence of cement fineness on the development of a) ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves through cement pastes, b) ultrasonic shear wave reflection coefficient.	53
Figure 6.16	Influence of C_3A content on the development of a) ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves through cement pastes, b) ultrasonic shear wave reflection coefficient.	54
Figure 6.17	Influence of discussed parameters on the relationship $v_p - dr$, a) influence of water/cement ratio, b) influence of cement type, c) influence of curing temperature, d) influence of cement fineness, e) influence of amount of C_3A	55
Figure 6.18	Influence of the discussed parameters on the development of ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves for concrete mixtures with maximum nominal	

	aggregate size 4 mm, a) influence of water/cement ratio, b) influence of amount of aggregate, c) influence of cement type, d) influence of aggregate type.	57
Figure 6.19	Influence of the discussed parameters on the development of ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves for concrete mixtures with maximum nominal aggregate size 16 mm, a) influence of water/cement ratio, b) influence of cement type, c) influence of maximum nominal aggregate size, d) influence of curing temperature.	58
Figure 6.20	Cross section of some of concrete specimens, used for determination of ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves, a) maximum nominal aggregate size 4 mm, b) maximum nominal aggregate size 8 mm, c) maximum nominal aggregate size 16 mm, d) quartzite carbonate aggregate, e) lower amount of aggregate content.	59
Figure 6.21	Influence of instrument type on the development of v_p-t curves, a) mixture B4C1065, b) mixture B4C2054, c) mixture B4C4054, d) mixture B4C3054, e) mixture B8C1054, f) mixture B16C1054.	60
Figure 6.22	Influence of instrument type on the development of the a) v_p-t curve for cement paste C1035, b) $v_p'-t$ curve for cement paste C1035.	61
Figure 6.23	Reproducibility of the ultrasonic wave transmission method, used in the study – cement pastes.	62
Figure 6.24	Reproducibility of the ultrasonic wave transmission method, used in the study – concrete mixtures, a) maximum aggregate size 4 mm, b) maximum aggregate size 16 mm.	62
Figure 7.1	Influence of cement type on the development of a) concrete compressive strength, b) ultrasonic pulse velocity.	65
Figure 7.2/1	Influence of aggregate content on the development of concrete compressive strength and ultrasonic pulse velocity, a) compressive strength, amount of aggregate 1500 kg/m ³ , b) ultrasonic pulse velocity, amount of aggregate 1500 kg/m ³	66
Figure 7.3	Influence of curing temperature on the development of a) concrete compressive strength, b) ultrasonic pulse velocity.	68
Figure 7.4	Influence of maximum nominal aggregate size on the development of a) concrete compressive strength, b) ultrasonic pulse velocity.	68
Figure 7.5/1	Influence of amount of aggregate on the development of concrete compressive strength and ultrasonic pulse velocity, a) compressive strength, w/c = 0.40, b) ultrasonic pulse velocity, w/c = 0.40.	69
Figure 7.6	Influence of shape of aggregate grains on the development of a) concrete compressive strength, b) ultrasonic pulse velocity.	71
Figure 7.7/1	Influence of aggregate type on the development of concrete compressive strength and ultrasonic pulse velocity, a) compressive strength, amount of aggregate 1500 kg/m ³ , b) ultrasonic pulse velocity, amount of aggregate 1500 kg/m ³	72
Figure 8.1	Influence of the water/cement ratio on the a) penetration of Vicat needle into the cement paste, b) initial and final setting time of cement paste.	75
Figure 8.2	Influence of cement type on the a) penetration of Vicat needle into the cement paste, b) initial and final setting time of cement paste.	76
Figure 8.3	Influence of curing temperature on the a) penetration of Vicat needle into the cement paste, b) initial and final setting time of cement paste.	76
Figure 8.4	Influence of cement fineness on the a) penetration of Vicat needle into the cement paste, b) initial and final setting time of cement paste.	77
Figure 8.5	Influence of amount of C ₃ A on the a) penetration of Vicat needle into the cement paste, b) initial and final setting time of cement paste.	77

Figure 8.6/1	Relationship between $v_p - t$ curve and penetration of Vicat needle d_V , a) paste C1035, b) paste C1040, c) paste C1050 (C1, CT21), d) paste C2 (CF1, CC3A1).	78
Figure 8.7	Influence of discussed parameters on the $t_{z,V,i}$, t_v , and t_{PT1} values, a) influence of w/c ratio, b) influence of cement fineness, c) influence of cement type, d) influence of amount of C3A, e) influence of curing temperature, f) influence of cement type, w/c = 0.40.	81
Figure 8.8	Reproducibility of the ultrasonic wave transmission method, cement pastes C2, a) $v_p - t$ curves, b) numerical derivatives of $v_p - t$ curves.	82
Figure 8.9	Reproducibility of the ultrasonic wave transmission method, cement pastes C4, a) $v_p - t$ curves, b) numerical derivatives of $v_p - t$ curves.	83
Figure 8.10	Relationship between $dr - t$ curve and penetration of Vicat needle d_V , a) paste C1035, b) paste C1040, c) paste C1050, d) paste C1065.	86
Figure 8.11	A plot of penetration resistance d_p versus elapsed time for each concrete mixture, a) influence of w/c ratio, b) influence of cement type, c) influence of amount of aggregate, d) influence of aggregate type.	88
Figure 8.12/1	Relationship between $v_p - t$ curve and penetration of penetrometer needle d_p , a) mixture B4C1054, b) mixture B4C1048, c) mixture B4C1065, d) mixture B4C4054.	89
Figure 9.1	Relationship $TT - v_p$ for all data, a) approximation with the most appropriate non-linear regression model (Eq. 9.16), b) correlation between actual and calculated compressive strengths.	95
Figure 9.2	Influence of cement type on the $TT - v_p$ relationship, a) individual regression models, b) common regression model, c) correlation between actual and calculated compressive strengths (regression model 9.21).	96
Figure 9.3	Influence of w/c ratio on the $TT - v_p$ relationship, a) individual regression models, lower amount of aggregate, b) common regression model, lower amount of aggregate, c) individual regression models, d) common regression model, e) individual regression models, higher amount of aggregate, f) common regression model, higher amount of aggregate.	98
Figure 9.4	Correlation between actual and calculated compressive strengths, a) influence of w/c ratio, lower amount of aggregate, b) influence of w/c ratio, c) influence of w/c ratio, higher amount of aggregate.	99
Figure 9.5	Influence of curing temperature on the $TT - v_p$ relationship, a) individual regression models, b) common regression model, c) correlation between actual and calculated compressive strengths (regression model 9.39).	100
Figure 9.6	Influence of amount of limestone aggregate on the $TT - v_p$ relationship, a) individual regression models, w/c = 0.40, b) common regression model, w/c = 0.40, c) individual regression models, w/c = 0.54, d) common regression model, w/c = 0.54, e) individual regression models, w/c = 0.65, f) common regression model, w/c = 0.65.	102
Figure 9.7	Influence of amount of quartzite carbonate aggregate on the $TT - v_p$ relationship, a) individual regression models, b) common regression model.	103
Figure 9.8	Correlation between actual and calculated compressive strengths, influence of amount of aggregate, a) w/c = 0.40, b) w/c = 0.54, c) w/c = 0.65, d) quartzite carbonate aggregate.	104
Figure 9.9	Influence of maximum nominal aggregate size on the $TT - v_p$ relationship, a) individual regression models, b) common regression model, c) correlation between actual and calculated compressive strengths (regression model 9.60).	105

Figure 9.10	Influence of shape of aggregate grains on the $TT - v_p$ relationship, a) individual regression models, b) common regression model, c) correlation between actual and calculated compressive strengths (regression model 9.63).....	106
Figure 9.11	Influence of aggregate type on the $TT - v_p$ relationship, a) individual regression models, amount 1500 kg/m ³ , b) common regression model, amount 1500 kg/m ³ , c) individual regression models, amount 1850 kg/m ³ , d) common regression model, amount 1850 kg/m ³ , e) individual regression models, amount 2130 kg/m ³ , f) common regression model, amount 2130 kg/m ³	108
Figure 9.12	Correlation between actual and calculated compressive strengths, influence of aggregate type a) amount of aggregate 1500 kg/m ³ , b) amount of aggregate 1850 kg/m ³ , c) amount of aggregate 2130 kg/m ³	109
Figure 9.13	Reproducibility analysis of the $TT - v_p$ relationships, a) separate regression models, b) common regression model.....	110
Figure 9.14	Relationships between E_s , E_d , and G and v_p	111
Figure 9.15	a) $TT - v_p$ relationship for all concrete mixtures with influential parameters, b) correlation between TT and TT_{reg} for all concrete mixtures with influential parameters, c) $TT - v_p$ relationship for all concrete mixtures with non-influential parameters, d) correlation between TT and TT_{reg} for all concrete mixtures with non-influential parameters.....	114
Figure 9.16	Correlation between actual and calculated compressive strengths, all data, a) correlation $TT - TT_{reg}$, b) correlation $TT - TT_{NM}$	115
Figure 9.17	Correlation between actual and calculated compressive strengths, mixtures with influential parameters, a) correlation $TT - TT_{reg}$, b) correlation $TT - TT_{NM}$	116
Figure 9.18	$TT - v_p$ relationships for additionally prepared concrete mixtures.....	117
Figure 9.19	Correlation between actual and calculated compressive strengths, additionally prepared concrete specimens, a) correlation $TT - TT_{reg}$, b) correlation $TT - TT_{NM}$	117
Figure 9.20	Ability of the proposed numerical model to predict some new correlation curves $TT - v_p$, a) influence of maximum nominal aggregate size, b) influence of amount of aggregate.....	118
Figure 9.21	a) ISO-strength curves for reference concrete in SONREB method (Samarin 2004), b) Monogram for concrete of a particular aggregate type and age (Samarin 2004).....	119
Figure 9.22	Relationship between actual and calculated compressive strengths, a) relationship $TT - TT_{R,reg}$	120
Figure 10.1	a) Adiabatic calorimeter, used in this study, b) suitable PC equipment.....	123
Figure 10.2	Adiabatic hydration curves, used to develop numerical model.....	124
Figure 10.3	Comparison between actual and calculated values of relative adiabatic temperature, a) without A9 curve, b) with A9 curve.....	125
Figure 10.4	Comparison between actual and calculated relative adiabatic hydration curves A10.....	126
Figure 10.5	Ability of the proposed numerical model to predict new adiabatic hydration curves, a) influence of the initial temperature, b) influence of the cement content, c) influence of the cement type.....	127
Figure 10.6	Showing a) the geometry of the concrete test cylinder with the side insulation and locations of the thermal probes inside the concrete element, b) finite element mesh (axial symmetry).....	132

Figure 10.7	Comparison between experimentally determined and calculated temperature development, a) point 3, b) point 4.....	132
Figure 10.8	Actual and calculated temperature development at point 3 after minor corrections of adiabatic hydration curve.	133
Figure 10.9	Influence of the initial temperature on the development of a) adiabatic hydration curve, b) absolute temperature at point 3, c) relative temperature at point 3.	134
Figure 10.10	Influence of cement content on the development of a) adiabatic hydration curve, b) absolute temperature at point 3.....	134
Figure 10.11	Influence of the initial temperature at the adiabatic hydration test on the development of the temperature at point 3.	135

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 3.1	Vrednosti akustične impedance in hitrosti prehoda vzdolžnih in strižnih ultrazvočnih valov skozi različne materiale (Frederick 1965).	17
Preglednica 4.1	Preglednica ANOVA.....	37
Preglednica 5.1	Kemijska sestava uporabljenih cementov.....	38
Preglednica 5.2	Vsebnost mineralov cementnega klinkerja v uporabljenih cementih.	38
Preglednica 5.3	Fizikalne karakteristike uporabljenih cementov.....	39
Preglednica 5.4	Mehanske karakteristike uporabljenih cementov.	39
Preglednica 5.5	Karakteristike referenčne cementne paste.	41
Preglednica 5.6	Karakteristike vseh uporabljenih cementnih past.	41
Preglednica 5.7	Karakteristike referenčne betonske mešanice.....	42
Preglednica 5.8	Karakteristike betonskih mešanic, maksimalno zrno agregata 4 mm.....	43
Preglednica 5.9	Karakteristike betonskih mešanic, maksimalno zrno agregata do 32 mm.....	43
Preglednica 6.1	Karakteristike prevojnih točk na krivuljah $v_p - t$ in $dr - t$	56
Preglednica 7.1	Oznake betonskih mešanic za določitev tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton - vzorci v obliki kocke 150/150/150 mm.....	64
Preglednica 7.2	Oznake mešanic za določitev statičnega elastičnega modula, dinamičnega elastičnega modula in strižnega modula betona.	65
Preglednica 8.1	Karakteristični podatki za vse cementne paste.	79
Preglednica 8.2	Časi konca vezanja posameznih cementnih past in pripadajoče hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov.....	82
Preglednica 8.3	Analiza natančnosti uporabe metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov za oceno časov vezanja cementnih past.....	83
Preglednica 8.4	Preglednica ANOVA za celoten vzorec t_{PT1}	84
Preglednica 8.5	Preglednica ANOVA za vrednosti t_{PT1} za cementne paste ZANC in ZAN3C.	84
Preglednica 8.6	Preglednica ANOVA za celoten vzorec t_V	85
Preglednica 8.7	Preglednica ANOVA za vrednosti t_V za cementne paste ZANC in ZAN3C.	85
Preglednica 8.8	Povezava med krivuljo $dr - t$ in prodorom Vicatove igle d_V - karakteristične vrednosti za vse analizirane cementne paste.	87
Preglednica 8.9	Vrednosti začetnega in končnega časa vezanja betonskih mešanic.....	89
Preglednica 8.10	Karakteristični podatki za vse betonske mešanice.....	91
Preglednica 9.1	Različne empirične zveze med hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton in tlačno trdnostjo betona.....	93
Preglednica 9.2	Ustreznost različnih regresijskih modelov za oceno tlačne trdnosti betona na osnovi hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton.....	95
Preglednica 9.3	Regresijski modeli $TT - v_p$, vpliv vrste cementa v betonu.	96
Preglednica 9.4	Regresijski modeli $TT - v_p$, vpliv vodo/cementnega razmerja, manj agregata v betonu.	97
Preglednica 9.5	Regresijski modeli $TT - v_p$, vpliv vodo/cementnega razmerja.....	97
Preglednica 9.6	Regresijski modeli $TT - v_p$, vpliv vodo/cementnega razmerja, več agregata v betonu.	97

Preglednica 9.7	Regresijski modeli $TT - \nu_p$, vpliv temperature okolice.	100
Preglednica 9.8	Regresijski modeli $TT - \nu_p$, vpliv količine agregata v betonu, $v/c = 0.40$	101
Preglednica 9.9	Regresijski modeli $TT - \nu_p$, vpliv količine agregata v betonu, $v/c = 0.54$	101
Preglednica 9.10	Regresijski modeli $TT - \nu_p$, vpliv količine agregata v betonu, $v/c = 0.65$	101
Preglednica 9.11	Regresijski modeli $TT - \nu_p$, vpliv količine agregata kvarcitrno karbonatnega izvora.	101
Preglednica 9.12	Regresijski modeli $TT - \nu_p$, vpliv velikosti maksimalnega zrna agregata.	105
Preglednica 9.13	Regresijski modeli $TT - \nu_p$, vpliv oblike agregatnih zrn v betonu.	107
Preglednica 9.14	Regresijski modeli $TT - \nu_p$, vpliv vrste agregata v betonu, manj agregata.	107
Preglednica 9.15	Regresijski modeli $TT - \nu_p$, vpliv vrste agregata v betonu.	107
Preglednica 9.16	Regresijski modeli $TT - \nu_p$, vpliv vrste agregata v betonu, več agregata.	107
Preglednica 9.17	Analiza ponovljivosti zvez $TT - \nu_p$	110
Preglednica 9.18	Regresijski modeli $E_s - \nu_p$, $E_d - \nu_p$ in $G - \nu_p$ ter pripadajoči koeficienti korelacije.	111
Preglednica 9.19	Vrednosti R^2 in $\hat{\sigma}$ za posamezne skupine betonskih mešanic.	113
Preglednica 9.20	Osnovne karakteristike dodatnih betonskih vzorcev.	116
Preglednica 9.21	Različni regresijski modeli za oceno tlačne trdnosti betona z mešano nedestruktivno metodo.	119
Preglednica 9.22	Koeficienti korelacije za zvezo $TT - TT_{nd,reg}$	120
Preglednica 10.1	Karakteristike vseh uporabljenih adiabatnih krivulj.	124
Preglednica 10.2	Statistične analize regresijskih modelov in modela NM.	126
Preglednica 10.3	Izračunane vrednosti maksimalne možne hidratacijske toplote za posamezne uporabljene vrste cementa.	128

LIST OF TABLES

Table 3.1	Values of acoustic impedance, speed of longitudinal, and speed of shear ultrasonic waves for different materials (Frederick 1965).	17
Table 4.1	ANOVA table.....	37
Table 5.1	Chemical composition of cements used.	38
Table 5.2	Amount of clinker minerals of cements used.	38
Table 5.3	Physical characteristics of cements used.	39
Table 5.4	Mechanical characteristics of cements used.....	39
Table 5.5	Characteristics of reference cement paste mixture.	41
Table 5.6	Characteristics of all cement paste mixtures used.	41
Table 5.7	Characteristics of reference concrete mixture	42
Table 5.8	Characteristics of concrete mixtures, maximum nominal aggregate size 4 mm.	43
Table 5.9	Characteristics of concrete mixtures, maximum nominal aggregate size 32 mm.	43
Table 6.1	Characteristics of inflection points on $v_p - t$ and $dr - t$ curves.....	56
Table 7.1	Labels of concrete mixtures, used for the determination of compressive strength and ultrasonic pulse velocity - specimen sizes 150/150/150 mm.....	64
Table 7.2	Labels of concrete mixtures, used for the determination of static Young's modulus, dynamic Young's modulus and shear modulus of concrete.....	65
Table 8.1	Characteristic data for all cement pastes.	79
Table 8.2	Final setting times and corresponding values of ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves.....	82
Table 8.3	Sensitivity analysis of the ability of ultrasonic wave transmission method to estimate the setting times of cement pastes.	83
Table 8.4	ANOVA table for the whole t_{PT1} sample.	84
Table 8.5	ANOVA table for t_{PT1} values for cement pastes ZANC in ZAN3C.	84
Table 8.6	ANOVA table for the whole t_V sample.	85
Table 8.7	ANOVA table for t_V values for cement pastes ZANC in ZAN3C.	85
Table 8.8	Relationship between $dr - t$ curve and penetration resistance of Vicat needle d_V - characteristic values for all cement pastes used.	87
Table 8.9	Values of initial and final setting time for all concrete mixtures.....	89
Table 8.10	Characteristic data for all concrete mixtures.	91
Table 9.1	Different empirical relationships between the velocity of ultrasonic longitudinal waves through concrete and concrete compressive strength.	93
Table 9.2	Comparison of different regression models in their ability to estimate the concrete compressive strength on the basis of the velocity of ultrasonic longitudinal waves.	95
Table 9.3	Regression models $TT - v_p$, influence of cement type.	96
Table 9.4	Regression models $TT - v_p$, influence of water/cement ratio, lower amount of aggregate.....	97
Table 9.5	Regression models $TT - v_p$, influence of water/cement ratio.	97
Table 9.6	Regression models $TT - v_p$, influence of water/cement ratio, higher amount of aggregate.....	97

Table 9.7	Regression models $TT - v_p$, influence of curing temperature.....	100
Table 9.8	Regression models $TT - v_p$, influence of amount of aggregate, w/c = 0.40.....	101
Table 9.9	Regression models $TT - v_p$, influence of amount of aggregate, w/c = 0.54.....	101
Table 9.10	Regression models $TT - v_p$, influence of amount of aggregate, w/c = 0.65.....	101
Table 9.11	Regression models $TT - v_p$, influence of amount of quarzite carbonate aggregate...	101
Table 9.12	Regression models $TT - v_p$, influence of maximum nominal aggregate size.....	105
Table 9.13	Regression models $TT - v_p$, influence of shape of aggregate.....	107
Table 9.14	Regression models $TT - v_p$, influence of aggregate type, lower amount of aggregate.	107
Table 9.15	Regression models $TT - v_p$, influence of aggregate type.	107
Table 9.16	Regression models $TT - v_p$, influence of aggregate type, higher amount of aggregate.....	107
Table 9.17	Reproducibility analysis of $TT - v_p$ relationships.....	110
Table 9.18	Regression models $E_s - v_p$, $E_d - v_p$ and $G - v_p$ and corresponding correlation coefficients.	111
Table 9.19	R^2 and $\hat{\sigma}$ values for several groups of concrete mixtures.	113
Table 9.20	Basic characteristics of additionally prepared concrete specimens.	116
Table 9.21	Various multiple regression models suggested by different researchers to estimate the compressive strength of concrete.....	119
Table 9.22	Correlation coefficients, correlation $TT - TT_{nd,reg}$	120
Table 10.1	Characteristics of all adiabatic hydration curves, used in this study	124
Table 10.2	Statistical analysis of the regression models and ANN model.	126
Table 10.3	Calculated maximum heat of hydration values for different cement types used.....	128

DEL 1 UVOD

1. NAMEN IN STRUKTURA DISERTACIJE

1.1 SPLOŠNO

Po stiku cementa in vode nastane kemijska reakcija, ki jo imenujemo hidracija. Eksotermna narava hidracije povzroči proces sproščanja hidratijske toplote, med samim hidratijskim procesom pa nastajajo razni hidratijski produkti. Nastajanje hidratijskih produktov pomeni oblikovanje trdne faze v strukturi materialov s cementnim vezivom. Tako material spreminja svoje stanje od praktično Binghamove tekočine neposredno po stiku cementa in vode do materiala z visoko tlačno trdnostjo. Delež nastalih hidratijskih produktov se s časom povečuje, s čimer se večja povezanost trdne faze, kar rezultira v čedalje manjši obdelavnosti in večji trdnosti materiala.

Proces hidracije največkrat zasledujemo na osnovi spreminjanja temperature v materialu, pri čemer daje najbolj jasno sliko o poteku hidratijskega procesa t.i. adiabatna krivulja. Z ustrezno merilno opremo in računalniško podporo lahko na ta način proces hidracije zasledujemo z merjenjem temperature materiala v poljubno majhnih časovnih intervalih, posamezne faze hidratijskega procesa pa definiramo na osnovi oblike adiabatne krivulje. Ker je adiabatna krivulja pomemben vhodni podatek pri računu razvoja temperaturnega polja v betonskih konstrukcijah, številni raziskovalci predlagajo različne empirične enačbe, s katerimi matematično opišemo potek adiabatne krivulje. Glavna pomanjkljivost takih modelov je v tem, da je potrebno posamezne koeficiente v teh modelih določiti na osnovi eksperimentalnih rezultatov za vsako betonsko mešanico posebej. Razvoj matematičnega modela za določitev adiabatne krivulje poljubne betonske mešanice je torej ključnega pomena za napredek pri računu temperaturnega polja v betonskih konstrukcijah, zlasti v zgodnjem obdobju.

Hiter napredek v razvoju merilne opreme in računalniške tehnologije v zadnjem času omogoča razvoj novih tehnik in metod zasledovanja hidratijskega procesa materialov s cementnim vezivom. Tako lahko proces hidracije učinkovito zasledujemo na osnovi spreminjanja vrednosti akustične emisije, električne prevodnosti materiala, prehoda ultrazvoka skozi material itd. Poznamo tri glavne ultrazvočne metode, in sicer metodo prehoda ultrazvočnih valov (angl. wave transmission method), metodo odboja ultrazvočnih valov (angl. wave reflection method) in t.i. metodo udarec-odmev (angl. impact – echo method).

V nasprotju z adiabatno kalorimetrijo temeljijo ultrazvočne metode neposredno na formiranju strukture materialov s cementnim vezivom. S pravilnim pristopom in poznavanjem same narave metode lahko tako poleg razvoja hidratijskega procesa spremljamo tudi nekatere pomembne točke v razvoju strukture materialov s cementnim vezivom, kot na primer čas prve povezave trdne faze v materialu ter začetek in konec vezanja materiala. Zaradi intenzivnega hidratijskega procesa v zgodnjem obdobju je za pravilno in korektno izvedbo meritve ključnega pomena dovolj velika občutljivost samega ultrazvočnega inštrumenta ter avtomatsko zajemanje podatkov v vnaprej podanih, poljubno majhnih časovnih intervalih. Tako je v zadnjem času v svetu opazen razvoj ultrazvočnih metod za merjenje hidratijskega procesa predvsem v prvih 24-ih urah po stiku cementa in vode.

V svetu in pri nas se nedestruktivna metoda prehoda ultrazvočnega valovanja tradicionalno uporablja za določevanje nepravilnosti v strukturi betona ter za oceno tlačne trdnosti betona. Pri tem zveze med hitrostjo prehoda ultrazvoka in tlačno trdnostjo betona bazirajo na empirično določenih regresijskih modelih. Izrazito nehomogena struktura betona ter kompleksen in neenakomeren vpliv posameznih komponent betona na hitrost prehoda ultrazvoka in tlačno trdnost sta vzrok za relativno nenatančno oceno tlačne trdnosti betona s predlaganimi regresijskimi modeli. Podrobna študija vpliva posameznih

komponent betonske mešanice na zvezo med hitrostjo prehoda ultrazvoka in tlačno trdnostjo betona ter razvoj novih numeričnih modelov sta tako ključnega pomena za natančnejšo nedestruktivno oceno tlačne trdnosti betona na osnovi hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton.

1.2 NAMEN IN CILJI

Osnovni namen disertacije je prikazati možnost uporabe dveh različnih nedestruktivnih ultrazvočnih metod za analizo razvoja hidratacijskega procesa oziroma formiranja strukture cementno vezanih materialov, poleg tega pa je prikazan tudi razvoj oziroma nadgradnja numeričnega modela za določitev temperaturnega razporeda v betonskih konstrukcijah.

Glavni namen in cilji disertacije so tako:

- razviti potrebno eksperimentalno opremo in na osnovi lastnih eksperimentalnih preiskav analizirati možnost uporabe metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov in metode odboja strižnih ultrazvočnih valov za spremljanje razvoja strukture cementno vezanih materialov;
- analizirati morebitno korelacijo med obema uporabljenima ultrazvočnima metodama;
- analizirati možnost uporabe obeh ultrazvočnih metod za oceno začetka in konca vezanja cementno vezanih materialov;
- analizirati možnost uporabe metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov za oceno tlačne trdnosti betona;
- razviti ustrezeni numerični model za oceno tlačne trdnosti betona in hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton;
- razviti numerični model za določitev adiabatne krivulje poljubne betonske mešanice in ga vgraditi v numerični model za oceno temperaturnega polja v betonskih konstrukcijah;
- opraviti ustrezne statistične analize najpomembnejših eksperimentalnih ugotovitev.

1.3 STRUKTURA DISERTACIJE

Struktura disertacije je smiselno razdeljena na pet delov:

- DEL 1 – Uvod (poglavje 1, poglavje 2);
- DEL 2 – Metode dela in uporabljeni materiali (poglavje 3, poglavje 4, poglavje 5);
- DEL 3 – Eksperimentalni rezultati (poglavje 6, poglavje 7, poglavje 8);
- DEL 4 – Modeliranje (poglavje 9, poglavje 10);
- DEL 5 – Zaključki (poglavje 11).

Prvo poglavje opisuje namen in znanstveno vrednost dela, v poglavju 2 pa je na kratko opisan proces hidratacije in formiranja strukture materialov s cementnim vezivom. Navedeni so posamezni parametri, ki vplivajo na potek hidratacijskega procesa in formiranja strukture materialov s cementnim vezivom.

Drugi del je namenjen podrobnejšemu opisu uporabljenih metod dela in materialov. Tako so v poglavju 3 navedene in opisane relevantne eksperimentalne metode, pri čemer je poudarek na opisu uporabljene metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi materiale s cementnim vezivom in metode odboja strižnih ultrazvočnih valov. Podrobneje so predstavljene teoretične osnove omenjenih metod in faze razvoja same merilne opreme. Poglavje 4 opisuje uporabljene matematične in statistične metode, pri čemer je poudarek na metodi umetnih nevronske mreže. V poglavju 5 so navedeni in na kratko opisani vsi uporabljeni materiali in sestave vseh uporabljenih cementnih past in betonskih mešanic.

V tretjem delu so prikazani eksperimentalni rezultati. Tako so v poglavju 6 prikazani in razloženi rezultati avtomatiziranih ultrazvočnih meritev za materiale v zgodnji fazi hidratacijskega procesa. Meritve so bile narejene tako na različnih cementnih pastah kot na različnih betonskih mešanicah. Pri cementnih pastah so bile meritve hidratacijskega procesa oziroma formiranja strukture opravljene tako z metodo prehoda

vzdolžnih ultrazvočnih valov kot z metodo odboja strižnih ultrazvočnih valov. Podrobneje je analizirana korelacija med omenjenima metodama. Analiziran je vpliv različnih parametrov na potek krivulj hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov in strižnega odbojnega koeficienta s časom. Analizirana je ponovljivost metode prehoda ultrazvočnih valov ter vpliv vrste inštrumenta na časovni potek krivulj hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi materiale s cementnim vezivom.

V poglavju 7 so prikazani rezultati merjenja hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov in tlačnih trdnosti betona na strjenih betonskih vzorcih pri starostih betona do 7 dni. Podrobno je analiziran vpliv posameznih parametrov betonske mešanice in pogojev okolja na razvoj hitrosti prehoda ultrazvoka in tlačnih trdnosti.

Eno izmed pomembnejših poglavij v disertaciji je poglavje 8, v katerem je analizirana možnost uporabe metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov, metode odboja strižnih ultrazvočnih valov in kombinacije obeh ultrazvočnih metod za oceno začetka in konca vezanja poljubne cementne paste. Analizirana je tudi možnost uporabe metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov za oceno začetka in konca vezanja betona.

Najobsežnejši del disertacije predstavlja del 4. V poglavju 9 je podrobno prikazana študija vpliva posameznih komponent betonske mešanice in pogojev okolja na sovisnost med hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov in tlačnimi trdnostmi betona. Na osnovi eksperimentalnih rezultatov je bil pripravljen numerični model za oceno tlačne trdnosti betona z metodo prehoda ultrazvočnih valov.

Za razliko od predhodnih poglavij, ki temeljijo na zasledovanju hidratacijskega procesa na osnovi formiranja produktov hidratacije v materialih s cementnim vezivom, se v poglavju 10 ukvarjamo z merjenjem hidratacijskega procesa na osnovi naraščanja temperature v materialu med procesom hidratacije. Na osnovi široke baze eksperimentalno določenih adiabatnih krivulj je bil pripravljen numerični model za določitev adiabatne krivulje poljubne betonske mešanice. Ta model je vključen v numerični model za določitev razvoja temperaturnega polja v betonski konstrukciji v zgodnjem obdobju. Na realnem primeru je prikazana korelacija med izračunanimi in eksperimentalno določenimi temperaturami v betonskem elementu. Prikazana je možnost uporabe numeričnega modela za oceno tlačne trdnosti betona.

Peti del vsebuje zaključke in ugotovitve ter priporočila za nadaljnje delo.

2. HIDRATACIJA MATERIALOV S CEMENTNIM VEZIVOM

2.1 UVOD

Hidratacija cementa v betonu je pomemben predmet raziskav že odkar se je pojavila prva proizvodnja portlanskega cementa, približno pred 150-imi leti (van Breugel 1991). Po stiku cementa in vode nastane eksotermna kemijska reakcija, imenovana hidratacija, pri kateri se sprošča hidratacijska toplota. Med potekom hidratacije material spreminja svoje agregatno stanje od praktično Binghamove tekočine do materiala z visoko tlačno trdnostjo. Te spremembe so posledica sprememb v strukturi betona med potekom procesa hidratacije cementa.

Veliko število raziskovalcev obravnava tako sam proces hidratacije cementa v betonu kot metode merjenja in zasledovanja hidratacijskega procesa ter oblikovanja strukture materialov s cementnim vezivom. Podrobne študije hidratacijskega procesa cementa v betonu sta predstavila že Powers in Brownyard (1947), razvoj strukture materialov s cementnim vezivom pa je v svoji doktorski disertaciji podrobno analiziral van Breugel (1991). V zadnjem času je nastalo tudi veliko število drugih doktorskih disertacij na temo hidratacije portlanskega cementa in modeliranja tega procesa. Pregledno delo o hidrataciji portlanskega cementa je predstavil Hewlett (2004).

2.2 HIDRATACIJA PORTLANDSKEGA CEMENTA

2.2.1 Kemijske reakcije portlanskega cementa

Portlandski (PC) cement sestavljajo minerali PC klinkerja in različni dodatki (sadra, elektrofiltrski pepel itd.). PC klinker v pretežni meri sestavljajo kalcij (Ca), silicij (Si) in kisik (O₂). Sestavo PC klinkerja največkrat izražamo z masnimi procenti posameznega oksida. Glavni oksidi v PC klinkerju so CaO, SiO₂, Al₂O₃ in Fe₂O₃, osnovni minerali, ki sestavljajo PC klinker, pa so trikalcijev silikat 3CaOSiO₂ (C₃S), dikalcijev silikat 2CaOSiO₂ (C₂S), trikalcijev aluminat 3CaOAl₂O₃ (C₃A) in tetrakalcijev aluminoforit 4CaOAl₂O₃Fe₂O₃ (C₄AF). Količino posameznega minerala v PC klinkerju lahko ocenimo iz kemijske sestave PC cementa z enačbami Boguea (Bogue 1929):

$$C_3S = 4.07 \text{ CaO} - (7.60 \text{ SiO}_2 + 6.72 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 1.43 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + 2.85 \text{ SO}_3) \quad (2.1)$$

$$C_2S = 2.87 \text{ SiO}_2 - 0.754 \text{ C}_3\text{S} \quad (2.2)$$

$$C_3A = 2.65 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1.69 \text{ Fe}_2\text{O}_3 \quad (2.3)$$

$$C_4AF = 3.04 \text{ Fe}_2\text{O}_3 \quad (2.4)$$

Po stiku cementa in vode nastane veliko število zapletenih kemijskih reakcij. Reakcija dikalcijevega silikata oziroma trikalcijevega silikata z vodo povzroči nastanek kalcijevega silikat hidrata C-S-H (enačbi 2.5 in 2.6). Le-ta predstavlja približno 50-70 % mase hidratizirane cementne paste in pomembno prispeva k trdnosti in obstojnosti strjene cementne paste in betona (Schindler 2002)



Pri reakciji C₂S in C₃S z vodo se tvori tudi kalcijev hidroksid ali portlandit Ca(OH)₂, ki je v primerjavi s C-S-H gelom krhkejši in po stiku z oksidi lahko postane nestabilen. V kolikor je v sestavi materiala prisoten tudi elektrofiltrski pepel (EFP), nadaljnja reakcija kalcijevega hidroksida, vode in elektrofiltrskega pepela povzroči nastanek dodatnega C-S-H gela, kar prikazuje enačba (2.7). Nastanek dodatnega C-S-H pripomore k nastanku gostejše in manj prepustne strukture strjene cementne paste.



V drugi skupini reakcij nastopa mineral C_3A . Po reakciji minerala C_3A s sadro in vodo se tvori etringit AFt. Sčasoma postane nastali etringit nestabilen in reagira s preostalim deležem C_3A in vodo, pri čemer nastane stabilen produkt kalcijev monosulfoaluminat hidrat AFm.



Tudi po zadnji reakciji je še vedno lahko prisoten delež nevezanega C_3A , iz katerega po nadaljnji reakciji z vodo nastane kalcijev aluminat hidrat C-A-H.

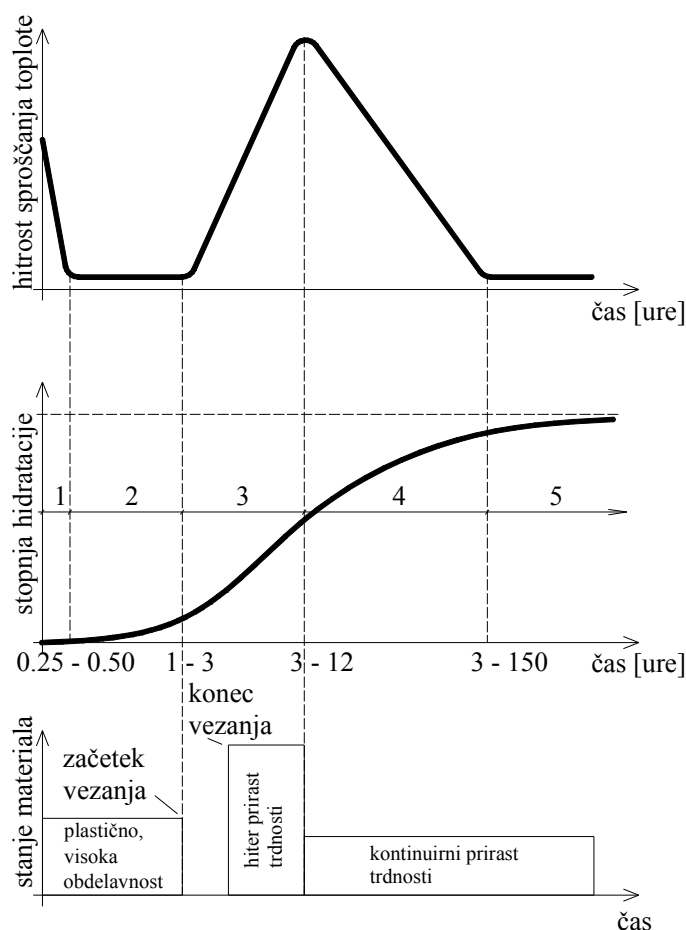


Glavni mineral tretje skupine reakcij je tetrakalcijev aluminoforit C_4AF . Reakcije tega minerala z vodo je podobna reakciji (2.10).



2.2.2 Hidrationski proces

Hitrost hidrationskega procesa ni konstantna in je odvisna od številnih parametrov (poglavje 2.2.3), v osnovi pa ločimo pet obdobij (1,2,...,5) hidrationskega procesa PC cementa v betonu (slika 2.1).



Slika 2.1 Faze hidrationskega procesa (Schindler 2002).
Figure 2.1 Stages during the hydration process (Schindler 2002).

Predindukcijsko obdobje (1, slika 2.1) traja prvih nekaj minut po stiku cementa in vode. V tem času poteka hitro raztapljanje spojin v vodi, najaktivnejši mineral v tem obdobju je trikalcijev aluminat C_3A . V tem obdobju se poleg kalcijevih ionov formirajo tudi drugi ioni, in sicer OH^- , SO_4^{2-} , K^+ in Na^+ . Mineral C_3A se raztaplja in reagira z gipsom, pri čemer nastaja etringit (enačba 2.8), ki se obarja na posameznih delcih. V tej fazi se alkalnost cementne paste bistveno poveča in doseže vrednost pH 12 ali več.

Po začetnem kratkem obdobju hitre hidratacije sledi *indukcijsko obdobje* (2) oziroma obdobje mirovanja. V tem obdobju se reakcijska hitrost močno zmanjša, vzrok za to pa pojasnujeta dve teoriji:

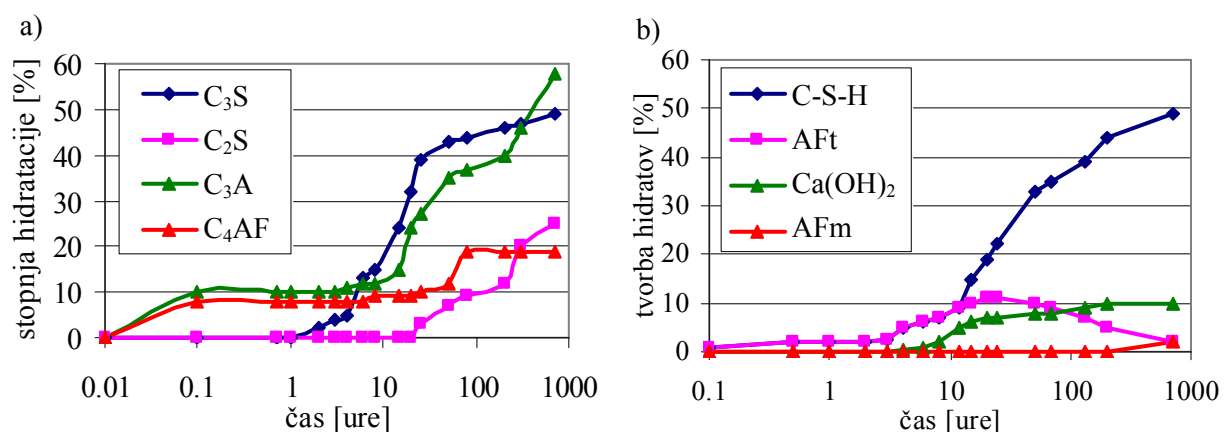
1. *Teorija zaščitnega sloja* pravi, da se v predindukcijskem obdobju okoli hidratacijskih produktov oblikuje zaščita, ki upočasni hidratacijo. Sčasoma ta zaščita počni oziroma postane prepustnejša, zaradi česar hidratacija ponovno steče.
2. *Teorija kristalizacijskih jeder* pravi, da hidratacijo upočasni nastanek nasičene razstopine kalcijevega hidroksida. S pojavom kristalizacijskih jeder v raztopini se pojavi obarjanje, zaradi česar pade koncentracija kalcijevih ionov, hidratacija pa zopet steče.

Teorija zaščitnega sloja in teorija kristalizacijskih jeder sta podrobneje opisani v literaturi (van Breugel 1991, van Breugel 2001). V indukcijskem obdobju ostane cementna pasta v plastičnem stanju z visoko obdelavnostjo. Konec indukcijskega obdobja je največkrat definiran kot začetek vezanja cementne paste in ga določimo v skladu s standardno Vicatovo metodo (SIST EN 196-3:2005).

Indukcijskemu obdobju sledi *obdobje pospešene hidratacije* (3), v katerem je hidratacijski proces najintenzivnejši. To obdobje je pogojeno s hitrostjo nukleacije in rasti hidratacijskih produktov. Tu hitrost hidratacije C_3S in C_2S narašča in doseže maksimalno vrednost. Končni čas vezanja se po navadi pojavi pred časom maksimalne hitrosti sproščanja hidratacijske toplote, torej pred koncem obdobja pospešene hidratacije.

Obdobju pospešene hidratacije sledi *obdobje pojemajoče hidratacije* (4), v katerem hitrost hidratacijskega procesa pada. Proces postane odvisen od difuzije ionov skozi plasti hidratacijskih produktov, ki predstavljajo plast okoli nehidratiziranih delov cementnih zrn. Kot posledica hidratacije C_3S in C_2S nastaja C-S-H gel, pri čemer se prispevek C_2S k skupni količini C-S-H gela s časom povečuje. Zaradi pomanjkanja sulfata v raztopini začne etringit v tej fazi reagirati z nehidratiziranim C_3A in nastane kalcijev monosulfoaluminat hidrat AFm (enačba 2.9). V nadaljevanju hidratacije nastopi zorenje hidratiziranega materiala, ki je povezano z nadaljnjo polikondenzacijo SiO_4 in podaljševanjem verig SiO_4 v nastalem C-S-H gelu.

V *obdobju mirne* oziroma *nespremenljive hidratacije* (5) se hidratacijski proces skoraj umiri.



Slika 2.2 a) Hitrost pretvorbe klinkerjevih mineralov pri hidrataciji običajnega portlandskega cementa pri sobni temperaturi (Pešič 1999), b) hitrost nastajanja hidratacijskih produktov pri hidrataciji običajnega portlandskega cementa pri sobni temperaturi (Pešič 1999).

Figure 2.2 a) Rate of development of clinker minerals during the hydration process of ordinary portland cement at room temperature (Pešič 1999), b) rate of development of the hydration products during the hydration process of ordinary portland cement at room temperature (Pešič 1999).

2.2.3 Parametri vpliva na proces hidratacije cementa v betonu

Proces hidratacije in sproščena hidratacijska toplota sta odvisna od mnogih parametrov, npr.:

1. vrste cementa;
2. vodo/cementnega razmerja;
3. finosti mletja cementa;
4. temperature okolice, v kateri se material nahaja med hidratacijskim procesom;
5. začetne temperature sveže betonske mešanice;
6. količine cementa in/ali
7. prisotnosti kemijskih in mineralnih dodatkov v materialu itd.

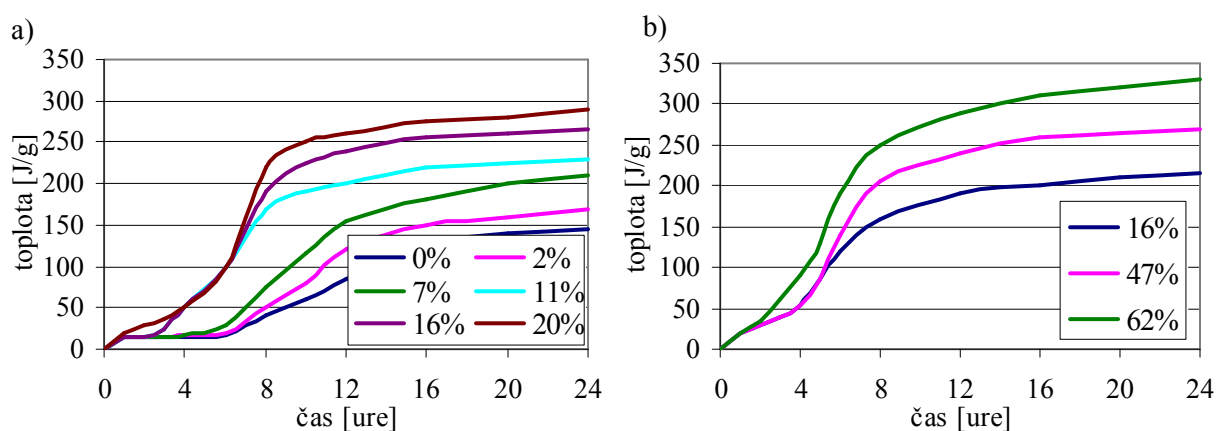
2.2.3.1 Vrsta cementa v betonu

Standard SIST EN 197-1 loči pet glavnih vrst PC cementov, in sicer:

1. CEM I, običajni PC cement;
2. CEM II, PC cement z dodatki;
3. CEM III, žlindrin cement;
4. CEM IV, pucolanski cement;
5. CEM V, mešani cement.

Znotraj teh glavnih vrst so navedene še posamezne podvrste cementov (skupaj 27 proizvodov). Vrsta cementa pomembno vpliva na proces hidratacije, in sicer preko same kemijske sestave in preko finosti mletja cementa.

Večji delež mineralov C_3A in C_3S pospeši hidratacijski proces PC cementa in rezultira v večji količini sproščene hidratacijske toplote, nastale med hidratacijskim procesom. Slika 2.3 prikazuje vpliv deleža mineralov C_3A in C_3S na količino in hitrost sproščanja hidratacijske toplote v prvem dnevu hidratacijskega procesa.



Slika 2.3 a) Vpliv deleža C_3A (C_3S je konstanten) na sproščeno toploto hidratacije, b) vpliv deleža C_3S (C_3A je konstanten) na sproščeno toploto hidratacije (Schindler 2002).

Figure 2.3 a) Effect of C_3A content (C_3S is constant) on heat of hydration, b) effect of C_3S content (C_3A is constant) on heat of hydration (Schindler 2002).

2.2.3.2 Finost mletja cementa

Velikost delcev v PC cementu je med 1 in 150 μm (van Breugel 1991), razporeditev velikosti delcev pa matematično najpogosteje opišemo z Rosin-Rammlerjevo funkcijo, ki jo zapišemo z enačbo (Rosin 1933):

$$G(x) = 100 (1 - \exp(-b x^n)), \quad (2.12)$$

kjer predstavlja $G(x)$ [%] masni procent delcev, ki gredo skozi sito premera x , x je karakteristična velikost cementnega delca [μm], b in n pa sta empirični konstanti, določeni po metodi najmanjših kvadratov.

Velikost in oblika delcev cementa vplivata na specifično površino cementa, s katero opišemo finost mletja cementa. Specifična površina cementa je definirana kot velikost površine cementa na enoto mase in pri običajnih PC cementnih znaša med 250 m²/kg pri grobo mletih cementih in 550 m²/kg pri fino mletih cementnih.

Specifično površino cementa največkrat določimo ob predpostavki, da so cementni delci okrogle oblike premera od x_0 do x_∞ in da razporeditev velikosti cementnih delcev lahko opišemo z Rosin-Ramlerjevo funkcijo (2.12). V tem primeru izračunamo specifično površino cementa SP [m²/kg] po enačbi

$$SP = \int_{x_0}^{\infty} \frac{3bn}{\rho_{ce}} x^{n-2} \exp(-bx^n) dx, \quad (2.13)$$

kjer predstavlja ρ_{ce} gostoto cementa. SP izračunamo z ustrežno numerično integracijo. Specifično površino cementa, izračunano z enačbo (2.13), imenujemo Blainova specifična površina cementa (Blaine 1943). Specifična površina oziroma finost mletja cementa pomembno vpliva na proces hidratacije. Večja specifična površina pospeši hidratacijski proces in obratno. Ta fenomen je izrazitejši v prvih dneh hidratacije cementa.

2.2.3.3 Temperatura okolice

Temperatura okolice, pri kateri se hidratacija odvija, bistveno vpliva na hitrost poteka hidratacije in sproščanja hidratacijske toplote. Višja temperatura okolice pospeši hidratacijski proces in obratno (van Breugel 1991).

2.2.3.4 Začetna temperatura betona

Začetna temperatura betona pomembno vpliva na potek procesa hidratacije in na količino sproščene hidratacijske toplote. Začetni razvoj temperature in s tem toplote v betonu je višji pri višji temperaturi sveže cementne paste oziroma betona, krajši pa je tudi čas, pri katerem je ta maksimalna vrednost hitrosti dosežena.

2.2.3.5 Količina cementa v betonu

Ustrezna količina cementa v betonu nam lahko v specifičnih razmerah, ko tehnološko svežega betona ne moremo dovolj segreti glede na zunanje temperaturne razmere, nemalokrat omogoči izvedbo gradbenih del. Tako na primer pri betoniranju v hladnem uporabljamo večje količine cementa kot pri betoniranju pri normalnih temperaturah, saj z večanjem količine cementa dvigujemo končno temperaturo in hkrati povečujemo hitrost hidratacijskega procesa cementa v betonu. Količina cementa v betonu vpliva tudi na čas, pri katerem je dosežena največja hitrost hidratacijskega procesa, le-ta se namreč z večjo vsebnostjo cementa krajša. Stopnja hidratacije pa je nižja pri višji vsebnosti cementa, zato lahko v betonu z večanjem vsebnosti cementa nemalokrat dobimo slabše izkoristke cementa.

2.2.3.6 Vodo/cementno razmerje

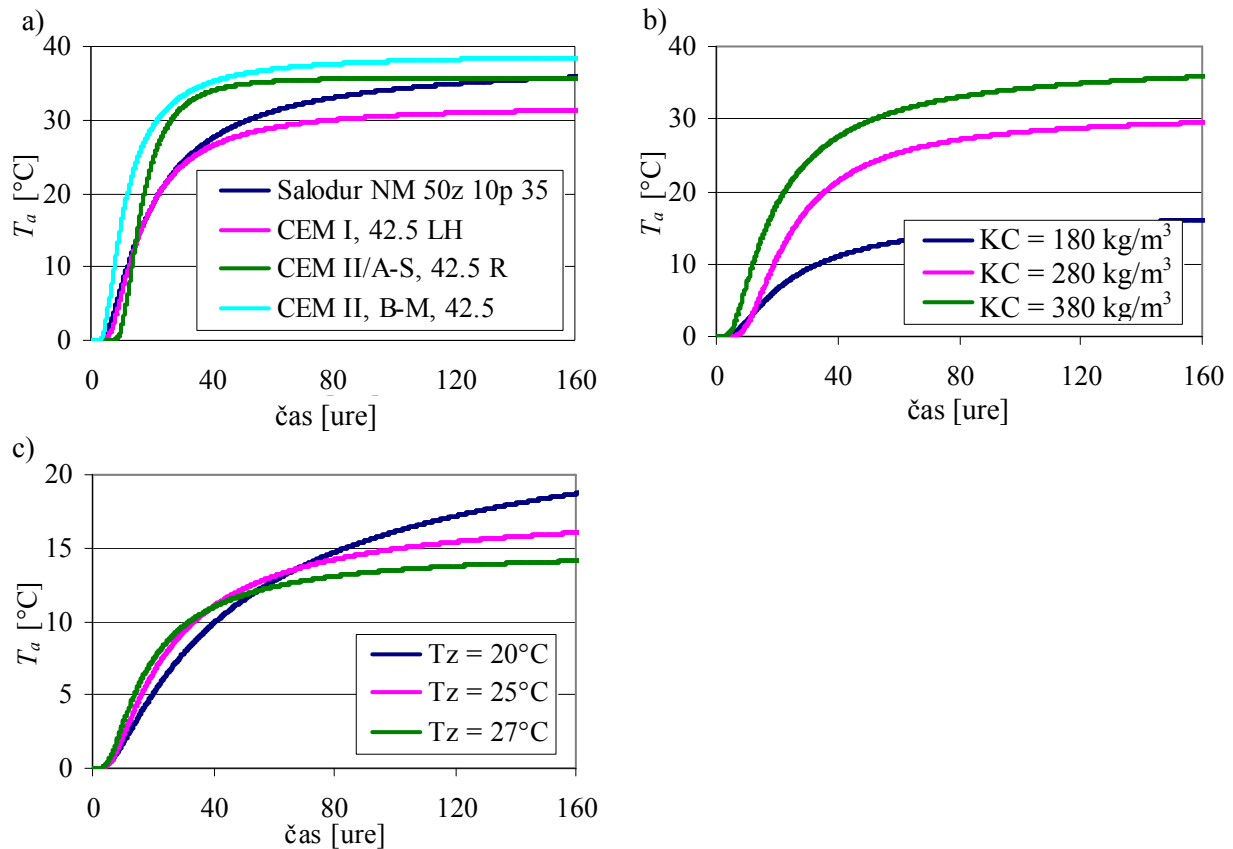
Vodo/cementno (v/c) razmerje predstavlja razmerje med maso vode in maso cementa v betonski mešanici. Znano je, da je popolna hidratacija izredno redka, končna stopnja hidratacije α_{kon} pa je povezana z velikostjo v/c razmerja (van Breugel 1991). V splošnem je končna stopnja hidratacije višja pri višjem v/c razmerju in obratno. Razmerje v/c ne vpliva na hitrost hidratacije v začetnem obdobju, po določenem času pa se hitrost hidratacijskega procesa manjša z manjšanjem v/c razmerja in obratno.

2.2.3.7 Kemijski in mineralni dodatki

Zlasti pri betoniranju v ekstremnih pogojih lahko s posebnimi kemijskimi in/ali mineralnimi dodatki bodisi pospešimo ali upočasnimo proces hidratacije cementa. Največji vpliv na potek hidratacije imajo pospeševalci vezanja in strjevanja ter zavirala vezanja, medtem ko je vpliv drugih vrst kemijskih dodatkov na potek hidratacije zanemarljiv. Vseeno pa se tudi vpliv pospeševalcev vezanja in strjevanja ter

zaviralcev vezanja kaže predvsem v časovni zamaknjenosti začetka hidratacije glede na etalonski beton, medtem ko se sama stopnja hidratacije ne spreminja bistveno.

Slika 2.4 prikazuje vpliv vrste cementsa, količine cementsa v betonu in začetne temperature svežega betona na potek naraščanja relativne spremembe adiabatne temperature T_a posameznih betonskih mešanic.



Slika 2.4 Vpliv posameznih parametrov betonske mešanice na potek relativne adiabatne temperature (Kavčič 2000), a) vpliv vrste cementsa v betonu, b) vpliv količine cementsa v betonu, c) vpliv začetne temperature sveže betonske mešanice.

Figure 2.4 The influence of some concrete parameters on the evolution of relative adiabatic temperature rise (Kavčič 2000), a) the influence of the type of cement, b) the influence of the cement content, c) the influence of the initial concrete temperature.

2.2.4 Razvoj strukture cementne paste med potekom hidratacije

Med hidratacijskim procesom cementna pasta spreminja svoje agregatno stanje od praktično Binghamove tekočine do materiala z visoko trdnostjo. Tvorijo se hidratacijski produkti (trdna faza) in pore. Ločimo tri glavne hidratacijske produkte trdne faze, in sicer kalcijev silikat hidrat (C-S-H), kalcijev hidroksid (CH) in etringit (AFt).

2.2.4.1 Trdna faza

Trikalcijev aluminat C_3A je najaktivnejši mineral PC klinkerja v prvi fazi hidratacijskega procesa. Po koncu indukcijskega obdobja nastopi reakcija trikalcijskega silikata C_3S , kar povzroči formiranje t.i. zunanega gela C-S-H (*zunanji hidratacijski produkti*) na etringitovih kristalih, nastalih v prvi fazi reakcije C_3A . Kasneje nastopi sekundarna hidratacija minerala C_3A , posledica katere je nastanek večjih etringitovih igel in formiranje notranjega gela C-S-H (*notranji hidratacijski produkti*).

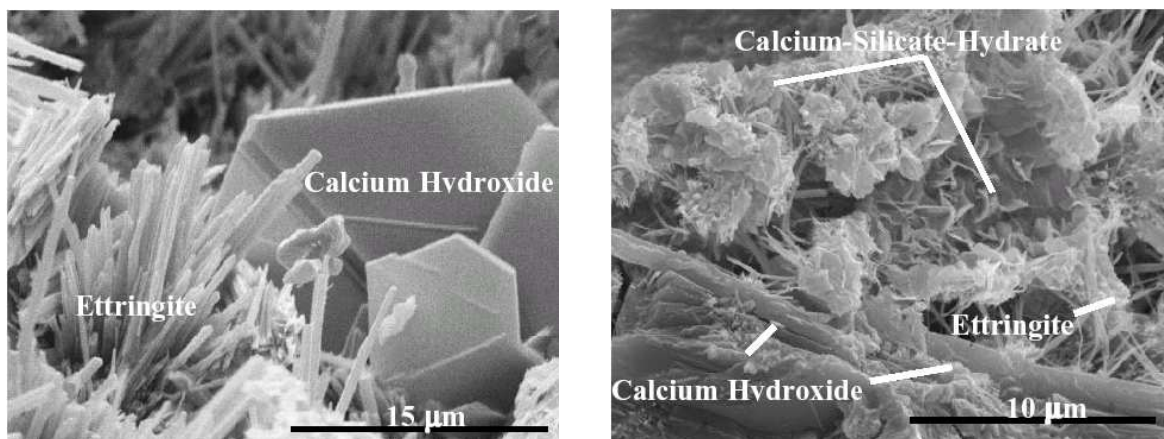
Etringitovi kristali (AFt) se najpogosteje pojavljajo v obliki iglic dolžine do 10 μm in premera okrog 0.25 μm (slika 2.5). Sčasoma se etringit pretvori v kalcijev monosulfoaluminat hidrat (AFm), katerega

volumen je približno 2.5-krat manjši od volumna etringitovih kristalov (van Breugel 1991). Volumske spremembe, nastale pri pretvorbi etringitovih kristalov v monosulfat, lahko nemalokrat vplivajo na samo trdnost cementne paste.

Gel C-S-H ima precej amorfno morfologijo in se pojavlja v različnih oblikah (Hewlett 2004). Glede na to razlikujemo med štirimi morfologijami gela C-S-H (slika 2.5):

1. *Tip I* se nahaja v obliki podolgovatih iglic, velikosti med 0.5 - 2 μm .
2. *Tip II* ima zapleteno mrežasto obliko. Za razliko od etringitovih igel in tipa I gela C-S-H, je za tip II značilno, da so delci močno zamreženi in tvorijo nekakšno satasto strukturo.
3. *Tip III* se nahaja v obliki delcev, ki imajo podobno dimenzijo v vseh treh smereh. Velikost teh delcev po navadi ne presega 0.3 μm .
4. *Tip IV* se nahaja v obliki notranjih produktov (poglavje 4.2), kar ima za posledico zelo gosto strukturo cementne paste.

Medtem ko se morfologiji I in II formirata predvsem v zgodnji fazi hidratacijskega procesa, se morfologiji III in IV formirata po nekaj dneh. Pomembno je poudariti, da so prve povezave med posameznimi cementnimi zrni posledica prav formiranja gela C-S-H.



Slika 2.5 Morfologija kristalov etringita, sataste oblike C-S-H gela in CH kristalov (Ye 2003).

Figure 2.5 Morphology of the ettringite needles, platy-type II C-S-H and plate-like CH (Ye 2003).

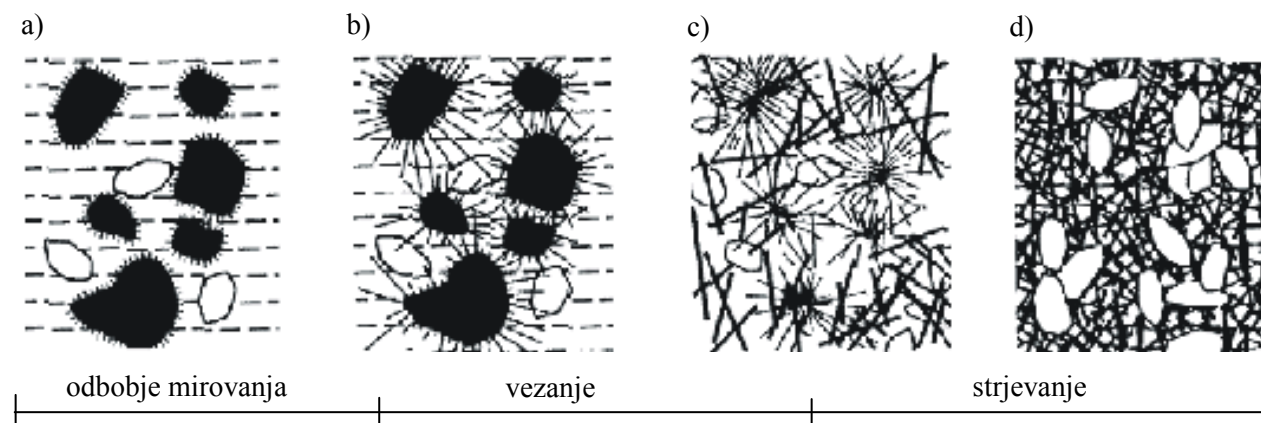
Kristali CH predstavljajo okoli 10-20% mase hidratizirane cementne paste. Po navadi se ti kristali pojavljajo v obliki heksagonalnih ploščic s pravilnimi robovi (slika 2.5) in so načeloma bistveno večji od delcev C-S-H. Kristali CH so lahko veliki do 100 μm ali celo do 1000 μm .

Na samo morfologijo nastalih hidratacijskih produktov v največji meri vplivata temperatura okolice med potekom hidratacije cementne paste in vodo/cementno razmerje. Vpliv temperature na morfologijo hidratacijskih produktov ni v celoti raziskan. Nekateri avtorji (van Breugel 1991, Hewlett 2004) navajajo, da je posledica hidratacije pri višjih temperaturah večja dimenzija hidratacijskih produktov. Povečanje velikosti hidratacijskih produktov naj bi bilo premo sorazmerno povečanju temperature okolice. Nasprotno pa nekateri drugi avtorji ugotavljajo, da hidratacija pri nižjih temperaturah pomeni boljše formirane in večje hidratacijske produkte.

Večje, kot je vodo/cementno razmerje, več prostora je na voljo za razvoj hidratacijskih produktov (manj cementa je v betonski mešanici, večje so razdalje med posameznimi diskretnimi cementnimi delci v začetni raztopini). Predvsem v zgodnji fazi hidratacije, ko se formira etringit, je morfologija hidratacijskih produktov v veliki meri odvisna od velikosti prostora, ki ga v začetku zavzame voda. V splošnem višje vodo/cementno razmerje pomeni večje hidratacijske produkte in obratno.

Formiranje trdne faze v strukturi cementne paste med potekom procesa hidratacije je shematično prikazano na sliki 2.6. Po stiku cementa z vodo so posamezni delci izolirani drug od drugega oziroma nepovezani (slika a). Z nadaljevanjem procesa hidratacije se na cementnih zrnih formira gel C-S-H v igličasti obliki. V nekem trenutku so posamezna cementna zrna povezana preko nastajajočih iglic

kristalov C-S-H in CH (slika b). Delež trdne faze v cementni strukturi se povečuje, po nekem obdobju pa so nastali hidratacijski produkti v celoti povezani (slika c). Delež trdne faze se le še malenkostno večja (slika 4d).



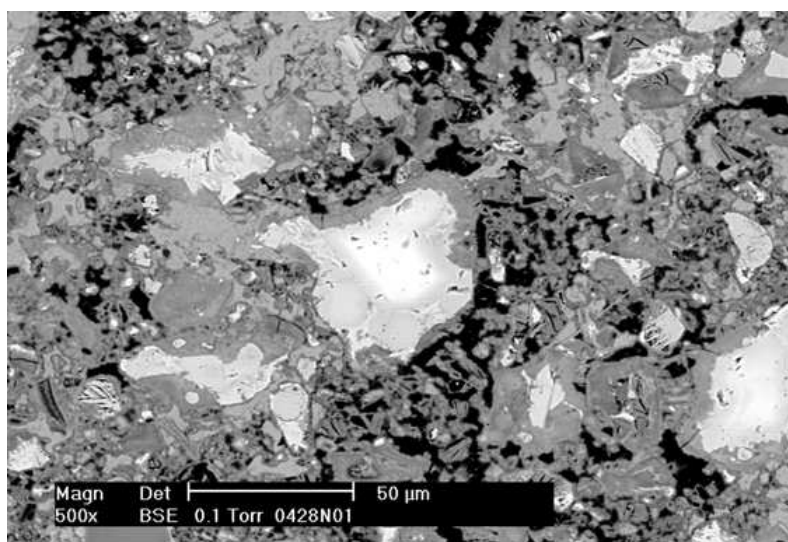
Slika 2.6 Formiranje trdne faze v strukturi cementne paste med potekom procesa hidratacije (Ye 2003).
Figure 2.6 Formation of structure of hardening cement paste during the hydration process (Ye 2003).

2.2.4.2 Struktura por cementne paste

Razvoj strukture por v cementni pasti je v veliki meri odvisen od razvoja procesa hidratacije in vodo cementnega razmerja. Različni avtorji predlagajo različne klasifikacije por v cementni pasti, na splošno pa delimo pore v naslednje tri skupine (van Breugel 1991, Ye 2003):

1. gelske pore,
2. kapilarne pore in
3. zračne odprtine.

Gelske pore se nahajajo v gelu C-S-H in so zelo majhne, velikosti od 0.5 do 10 nm, tako da jih z elektronskim mikroskopom težko opazimo. Veliko avtorjev sklepa, da se odprte gelske pore nahajajo v zunanjih produktih gela C-S-H (pore, večje od 5 nm), kompaktne gelske pore pa v notranjih produktih C-S-H gela (pore, manjše od 5 nm). Na splošno velja, da so, predvsem v zgodnjem hidratacijskem obdobju, notranji produkti gostejši kot zunanji produkti. Ko hidratacijski produkti ne zapolnijo celotnega prostora, nastane med njimi prostor, ki ga imenujemo kapilarna poroznost cementne paste. Te pore so večje od gelskih por in so velike približno med 10-20 nm.



Slika 2.7 Kapilarna poroznost (temno) v strjeni cementni pasti (Ye 2003).
Figure 2.7 Capillary porosity in hardened cement paste, capillary pores appear as black (Ye 2003).

Kapilarne pore (slika 2.7) so odvisne od stopnje hidratacije in vodo/cementnega razmerja. Z večjim vodo/cementnim razmerjem se velikost kapilarnih por veča, večja pa se tudi skupni volumen teh por. Z večanjem stopnje hidratacije pa se velikost in volumen kapilarnih por manjšata.

2.3 KLASIČNE METODE MERJENJA HIDRATACIJSKEGA PROCESA

Hidratacijski proces cementno vezanih materialov največkrat zasledujemo na osnovi merjenja spreminjanja temperature materiala. Obstajajo številne laboratorijske tehnike zasledovanja hidratacijskega procesa v betonu na osnovi temperature. Tovrstne metode preiskav lahko v splošnem razdelimo na izotermne, adiabatne in poladiabatne (van Breugel 1991). Izotermne metode se običajno uporabljajo za preiskave čiste cementne paste in omogočajo merjenje povečevanja toplote ob pogoju, da je bil vzorec izpostavljen konstantni temperaturi. Pri adiabatni metodi z ustrezno opremo (adiabatni kalorimeter) omogočimo, da je temperatura okolice vzorca stalno enaka temperaturi betonskega preskušanca. Pri adiabatni metodi tako ni izmenjave toplote, ki nastane v betonskem vzorcu kot posledica hidratacijskega procesa, s toploto iz okolice. Pri metodi zasledovanja hidratacijskega procesa s poladiabatno metodo uporabljamo kalorimeter oziroma opremo, kjer je izmenjava toplote z okoljem omejena.

Izotermne razmere ne odsevajo razmer v realnih konstrukcijah, kjer se temperatura stalno spreminja. V tem smislu imata adiabatna in poladiabatna metoda prednost pred izotermno metodo, po drugi strani pa je resnične adiabatne razmere praktično nemogoče doseči. Kljub temu pa se pri uporabi adiabatne kalorimetrije stanju v središču velikega vzorca realneje približamo kot v primeru uporabe izotermne metode.

Adiabatna in poladiabatna kalorimetrija sta bili razviti za merjenje razvoja temperature v cementni pasti, cementnih maltah in betonskih vzorcih. Čeprav so vzorci, ki so razviti za uporabo s pastami in maltami, običajno veliko manjši od betonskih vzorcev, dobljeni rezultati ne podajajo direktnih meritev prirastka temperature v betonu. Tovrstni rezultati se lahko uporabijo le za oceno obnašanja betona ob poznavanju sestave mešanice in toplotnih karakteristik agregata.

DEL 2 METODE DELA IN UPORABLJENI MATERIALI

3. EKSPERIMENTALNE METODE

3.1 METODA PREHODA VZDOLŽNIH ULTRAZVOČNIH VALOV

3.1.1 Splošno

Z mehanskim vzbujanjem se v trdnem materialu generira napetostno valovanje. Ločimo tri osnovne tipe valov:

1. vzdolžni oz. longitudinalni valovi - valovi P,
2. prečni, strižni oz transverzalni valovi - valovi S in
3. površinski oziroma Rayleighovi valovi - valovi R.

Različni tipi valovanja se med seboj ločijo glede na smer in hitrost nihanja delcev nosilnega medija. Valovi P razvijejo najvišjo hitrost, valovi R pa najnižjo. Tako velja:

$$v_P > v_S > v_R, \quad (3.1)$$

kjer je v_P hitrost vzdolžnega valovanja, v_S hitrost prečnega valovanja in v_R hitrost površinskega valovanja. Razmerje med hitrostmi posameznih tipov valov je odvisno od Poissonovega koeficienta materiala μ . Za betone iz prodnatega agregata z vrednostjo Poissonovega koeficienta $\mu = 0.18$ velja (Voigt 2004):

$$\frac{v_S}{v_P} = 0.62, \quad \frac{v_R}{v_P} = 0.57. \quad (3.2)$$

V primeru vzdolžnega valovanja materialni delci nihajo v smeri vzporedno z valovi P, medtem ko v primeru prečnega valovanja materialni delci nihajo v smeri pravokotno na smer valov S. V primeru površinskega valovanja materialni delci nihajo eliptično.

Hitrost akustičnega valovanja v materialu je odvisna od gostote materiala ρ ter vrednosti elastičnega modula E , strižnega modula G in Poissonovega koeficienta materiala. Velja:

$$v_P = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}, \quad v_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}}, \quad G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (3.3)$$

Že leta 1950 so Cheesman, Jones in Whitehurst (Voigt 2004) merili hitrost potovanja ultrazvočnih valov skozi strjen beton, medtem ko je bil Popovics (Voigt 2004) verjetno prvi, ki je preučeval možnost zasledovanja procesa hidratacije materialov s cementnim vezivom z metodo prehoda ultrazvočnih valov. Neisecke (1974) je v okviru svoje doktorske disertacije ugotovil, da se trend porasta hitrosti valov P skozi beton razlikuje od trenda porasta hitrosti valov S. Kruml (1990) ter Domone in Thurairatnam (1990) so ugotavljali možnost uporabe metode prehoda ultrazvočnega valovanja za merjenje procesa vezanja betona, medtem ko je Popovics (1994) ugotovil, da je vsebnost cementne paste v betonu parameter, ki najpomembnejše vpliva na hitrost prehoda ultrazvoka skozi beton v zgodnji fazi. D'Angelo s sodelavci (1995) je analiziral možnost zasledovanja povezanosti matrice cementne paste s primarnimi in sekundarnimi valovi. Ugotovili so, da so valovi S občutljivejši na delež povezanosti trdne faze v cementni

pasti. Yaman (2000) je v okviru svoje doktorske disertacije predstavil numerični model na osnovi metode končnih elementov za simulacijo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton, Ye (2003) pa je v svoji doktorski disertaciji predlagal regresijsko enačbo za izračun hitrosti prehoda ultrazvoka skozi cementno pasto in beton.

Predvsem hiter razvoj računalniške opreme je parameter, ki je v zadnjih letih odločilno prispeval k vidnemu napredku in izboljšavam različnih ultrazvočnih metod merjenja tako samega hidratacijskega procesa materialov s cementnim vezivom kot tudi tlačne trdnosti in drugih mehanskih karakteristik različnih betonov. Grosse in Reinhardt (1996a, 1996b, 2000 2003, 2004 2006) sta predstavila opremo in pripadajočo računalniško programsko orodje za avtomatsko določanje hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi materiale s cementnim vezivom, frekvence valovanja in relativne energije. Analizirala sta vpliv sestave betonske mešanice ter vpliv različnih kemijskih in mineralnih dodatkov na razvoj hitrosti prehoda ultrazvoka skozi materiale s cementnim vezivom. Pokazala sta, da lahko razvoj hitrosti vzdolžnih ultrazvočnih valov zadovoljivo opišemo z Boltzmannovo funkcijo, ki se običajno uporablja v termodinamiki. Krauss in Hariri (2006) sta predstavila možnost uporabe vzdolžnih ultrazvočnih valov za določitev začetne stopnje hidratacije betona. Kamada s sodelavci (2005) je analiziral možnost uporabe vzdolžnih ultrazvočnih valov za zasledovanje naraščanja strižne trdnosti cementne paste in formiranje etringitovih kristalov v cementni strukturi. Hernandez s sodelavci (2004) je analiziral vpliv porne vode na hitrost potovanja ultrazvočnih valov skozi cementno pasto. Voigt (2004) je primerjal hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov v_p in sproščanje adiabatne temperature T_a in ugotovil, da hitrost prehoda ultrazvočnih valov narašča hitreje od naraščanja adiabatne toplote, kar še posebej velja za zgodnje obdobje hidratacijskega procesa (med 5 do 18 urami). Ugotovil je potenčno zvezo med v_p in T_a , ne glede na velikost vodo/cementnega razmerja.

3.1.2 Razvoj lastnega merilnega inštrumenta

Pri določanju hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi preskušanece ponavadi uporabljamo ultrazvočni aparat s sprejemno in oddajno sondo, ki ju namestimo na dve med seboj vzporedni stranici vzorca. Na ta način merimo čas potovanja signala t_p [μ s] od oddajne do sprejemne sonde in iz znane razdalje L_p [mm] med obema ultrazvočnima sondama izračunamo hitrost potovanja vzdolžnih ultrazvočnih valov v_p [km/s] skozi preskušanece v skladu z enačbo

$$v_p = \frac{L_p}{t_p}. \quad (3.4)$$

Predvsem v zgodnji fazi hidratacije materialov s cementnim vezivom je za natančno in zanesljivo določanje hitrosti prehoda ultrazvoka skozi preskušance pomembno, da metoda omogoča avtomatsko merjenje v vnaprej podanih, poljubno majhnih časovnih intervalih ter avtomatsko shranjevanje podatkov. Ena izmed glavnih nalog pri razvoju lastne merilne opreme je bila torej razviti oziroma ustrezno modificirati obstoječe ultrazvočne inštrumente, da bi omogočali popolnoma avtomatsko zajemanje in shranjevanje podatkov v vnaprej podanih, poljubno majhnih časovnih intervalih. Podobna naprava je bila razvita na univerzi v Stuttgartu (Grosse in Reinhardt 2006).

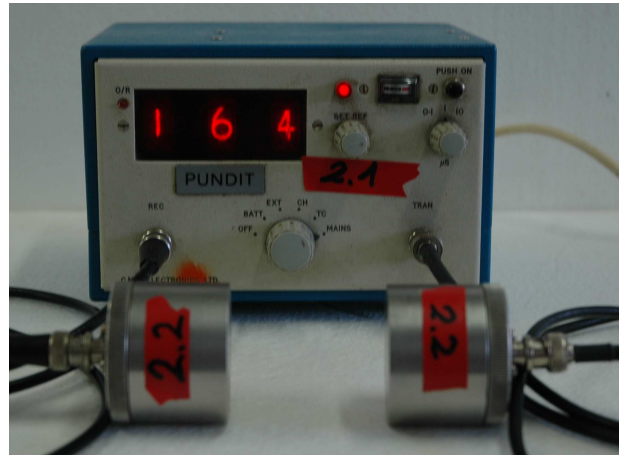
V ta namen smo opravili modifikacijo inštrumenta Proceq Concrete Tester CCT 4, ki je prikazan na sliki 3.1a. Inštrument deluje s frekvenco 20 kHz. Premer sprejemne in oddajne sonde je 25 mm, dolžina sond pa 50 mm. Poleg tega smo razvili tudi računalniški program za samodejno shranjevanje časov prehoda t_p . Program avtomatično zapiše številko posamezne meritve in podatke t_p v ustrezno datoteko v formatu ASCII.

Dodatno smo podobno modifikacijo opravili tudi na inštrumentu Pundit, ki je prikazan na sliki 3.1b. Inštrument Pundit deluje s frekvenco 40 kHz, premer oddajne in sprejemne sonde pa znaša 51 mm.

a)



b)



Slika 3.1 Inštrumenta za kontinuirno merjenje hitrosti prehoda vzdolžnega ultrazvočnega valovanja skozi preskušance, a) inštrument Proceq, b) inštrument Pundit.

Figure 3.1 Instruments for the determination of ultrasonic pulse velocity through cement-based specimens, a) instrument Proceq, b) instrument Pundit.

3.1.3 Razvoj ustreznega kalupa

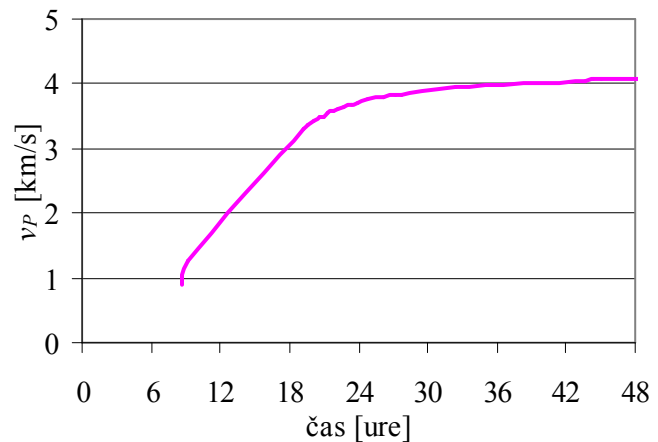
Poleg ustrezne modifikacije samega merilnega inštrumenta smo morali posebno pozornost posvetiti tudi razvoju samega kalupa, in sicer materialu in dimenzijam. V nadaljevanju so predstavljene posamezne faze razvoja ustreznega merilnega kalupa. Vse testne meritve so bile opravljene na betonskih mešanicah z enakimi karakteristikami, kar potrjuje tudi dejstvo, da je bila hitrost v_p po določenem času (24 ur) v vseh primerih precej podobna.

V prvi fazi razvoja smo pripravili kalup iz plastične mase z ustreznimi odprtini premera 26 mm na dveh nasprotni ležečih stranicah kalupa. Notranje dimenzije kalupa so znašale $150 \times 150 \times 150$ mm (slika 3.2a). Razdalja L_p med oddajno in sprejemno sondo je v tem primeru znašala $L_p = 140$ mm. Slika 3.2b prikazuje primer dobljene hitrosti prehoda ultrazvoka skozi betonski preskušanec, ki se je med samo meritvijo nahajal v omenjenem plastičnem kalupu. Vidimo, da hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi betonski preskušanec v prvi fazi ni bilo možno določiti. Vzrok za to je po vsej verjetnosti prevajanje ultrazvočnega valovanja preko sten kalupa neposredno po vgraditvi betonskega vzorca.

a)



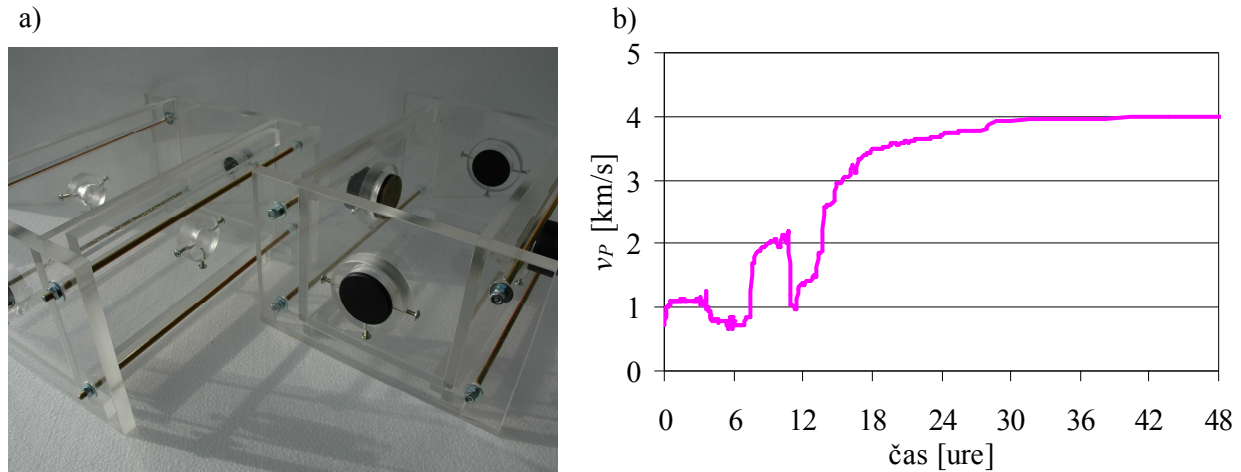
b)



Slika 3.2 a) Kalup za določanje hitrosti prehoda ultrazvoka skozi preskušanec, prva faza razvoja b) primer krivulje hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi preskušanec s časom.

Figure 3.2 a) A plastic container for pulse velocity measurements of fresh cement paste and concrete specimens, the first stage of the development, b) example of evolution of the ultrasonic pulse velocity curve with time.

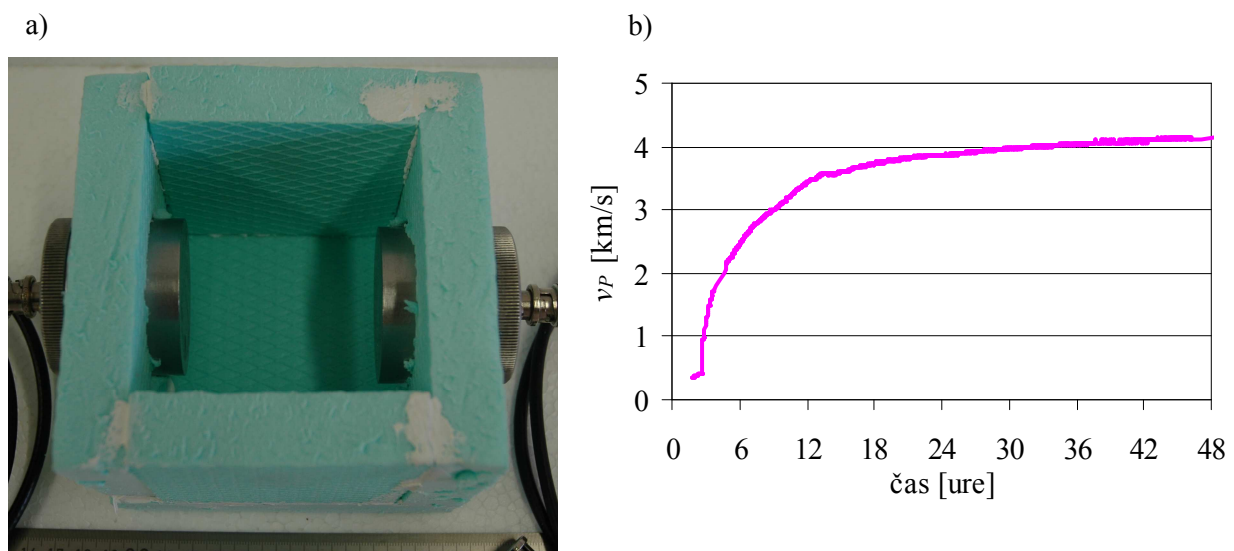
V drugi fazi razvoja kalupa smo tako pripravili dva kalupa iz pleksi stekla dimenzije $150 \times 150 \times 300$ mm (slika 3.3a). Razdalja L_P med oddajno in sprejemno sondo je v tem primeru znašala $L_{P1} = 140$ mm oziroma $L_{P2} = 290$ mm. Iz slike 3.3b vidimo, da je v tem primeru inštrument zaznal prehod vzdolžnih ultrazvočnih valov že v samem začetku merjenja, sam potek hitrosti v_P pa je zelo neenakomeren. Poleg tega je hitrost na začetku merjenja, glede na nekatere podatke iz literature, previsoka. Tako smo sklepali, da je tudi v tem primeru prišlo do prevajanja ultrazvočnega valovanja preko sten kalupa v zgodnji fazi hidratacijskega procesa (do starosti 12 ur po zamešanju betonske mešanice).



Slika 3.3 a) Kalup za določanje hitrosti prehoda ultrazvoka skozi preskušanec, druga faza razvoja b) primer krivulje hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi preskušanec s časom.

Figure 3.3 a) A PMMA container for pulse velocity measurements of fresh cement paste and concrete specimens, the second stage of the development, b) example of evolution of the ultrasonic pulse velocity curve with time.

V tretji fazi razvoja smo pripravili kalup iz ekstrudiranega polistirena s komercialnim imenom Stirodur. Obenem smo zmanjšali tudi dimenzije samega kalupa, ki so tako znašale $80 \times 80 \times 80$ mm v primeru merjenja hitrosti prehoda ultrazvoka skozi betonski preskušanec in $70 \times 70 \times 70$ mm v primeru merjenja hitrosti prehoda ultrazvoka skozi preskušanec iz cementne paste. Odprtine na dveh nasproti ležečih straneh so bile velikosti premera 25 mm v primeru merjenja z inštrumentom Proceq ter 51 mm v primeru merjenja z inštrumentom Pundit (slika 3.4a)



Slika 3.4 a) Kalup za določanje hitrosti prehoda ultrazvoka skozi preskušanec, tretja faza razvoja b) primer krivulje hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi preskušanec s časom.

Figure 3.4 a) A styrofoam container for pulse velocity measurements of fresh cement paste and concrete specimens, the third stage of the development, b) example of evolution of the ultrasonic pulse velocity curve with time.

Iz slike 3.4b vidimo, da je potek hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi betonski preskušaneec v tem primeru zvezen. Nadalje opazimo, da je vrednost začetne hitrosti v_p okrog 300 m/s, kar je v skladu s podatki iz literature, ter da je kontinuirno merjenje hitrosti v_p možno od nekega določenega časa naprej. Ta fenomen je razložen v poglavju 6.

Po treh fazah razvoja smo prišli do ugotovitve, da je za korektno merjenje hitrosti prehoda ultrazvoka skozi materiale s cementnim vezivom v zgodnji fazi najustreznejši kalup iz ekstrudiranega polistirena. S spreminjanjem dolžine kalupa se oblika krivulje praktično ni spremenila.

3.2 METODA ODBOJA STRIŽNIH ULTRAZVOČNIH VALOV

3.2.1 Splošno

Na stiku med dvema materialoma z različnimi akustičnimi lastnostmi se del valovanja ultrazvočnih valov odbije od stične površine, del valovanja pa potuje skozi naslednji medij (slika 3.5). Koeficient odboja označimo z r , koeficient prehoda pa s t , pri čemer velja¹:

$$r = \frac{p_r}{p_e}, \quad t = \frac{p_t}{p_e}, \quad (3.5)$$

kjer je p_e zvočni tlak oddajnega signala, p_r zvočni tlak odbojnega signala in p_t zvočni tlak signala, ki potuje v naslednji medij. Odbojni koeficient r in koeficient prehoda t sta neposredno povezana z akustično impedanco materiala Z . Akustična impedanca materiala je produkt gostote materiala in hitrosti valovanja skozi material:

$$Z = \rho v, \quad (3.6)$$

za koeficienta r in t pa velja:

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad t = \frac{2 Z_2}{Z_2 + Z_1}, \quad (3.7)$$

kjer sta Z_1 in Z_2 akustični impedanci materialov 1 in 2.

V preglednici 3.1 so prikazane vrednosti akustične impedance in hitrosti prehoda vzdolžnih in strižnih ultrazvočnih valov skozi nekatere materiale.

Preglednica 3.1 Vrednosti akustične impedance in hitrosti prehoda vzdolžnih in strižnih ultrazvočnih valov skozi različne materiale (Frederick 1965).

Table 3.1 Values of acoustic impedance, speed of longitudinal, and speed of shear ultrasonic waves for different materials (Frederick 1965).

material	v_p [m/s]	v_s [m/s]	Z [kg/m ² s]
aluminij	6400	3130	17.3×10^6
jeklo	6100	3240	46.3×10^6
kremen	5570	3520	14.5×10^6
voda	1450	-	1.48×10^6
led	3980	1990	3.6×10^6
zrak (10°C)	325.2	-	0.000436
zrak (-10°C)	337.3	-	0.000420

V primeru viskoelastičnega materiala so akustična impedanca Z , strižni modul G in viskoznost materiala η kompleksne količine, ki jih zapišemo z enačbami:

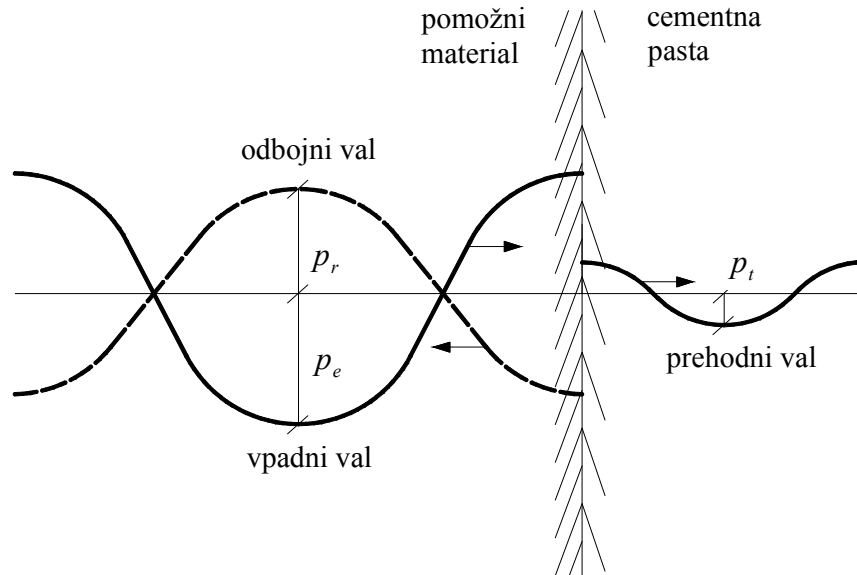
¹ Koeficient odboja r je brezdimenzijska količina, zato v nadaljevanju enot pri koeficientu r oziroma dr ne pišemo.

$$Z = R + iX \quad (3.8)$$

$$G^* = G' + iG'' \quad (3.9)$$

$$\eta^* = \eta' + i\eta'', \quad (3.10)$$

kjer je R realni del akustične impedance in X imaginarni del akustične impedance. Modul G' opisuje elastično, modul G'' pa viskozno obnašanje materiala. Realni del viskoznosti η' predstavlja viskozno, imaginarni del viskoznosti η'' pa elastično obnašanje materiala.



Slika 3.5 Shematični prikaz fenomena odboja vzdolžnih ultrazvočnih valov na stiku cementna pasta –jeklo (Voigt 2004).

Figure 3.5 Schematic of reflection process of longitudinal waves at a steel - cement paste interface (Voigt 2004).

Z upoštevanjem zveze

$$G = \rho v_s^2, \quad (3.11)$$

ki sledi iz enačbe (3.3), ter enačb (3.6) in (3.8), lahko kompleksni strižni modul ter njegovi realni in kompleksni komponenti zapišemo z enačbami

$$G^* = \frac{Z^2}{\rho} = \frac{(R + iX)^2}{\rho}, \quad G' = \frac{R^2 - X^2}{\rho}, \quad G'' = \frac{2RX}{\rho}, \quad (3.12)$$

kompleksni strižni modul pa je s kompleksno viskoznostjo povezan preko enačbe (Valič 2000)

$$G^* = \omega \eta^*, \quad (3.13)$$

kjer je ω kotna zvočna frekvenca materiala. Velja tudi:

$$G' = \omega \eta', \quad G'' = \omega \eta'' \quad (3.14)$$

in nadalje:

$$\eta' = \frac{2RX}{\rho \omega}, \quad \eta'' = \frac{R^2 - X^2}{\rho \omega}. \quad (3.15)$$

Z upoštevanjem zgornjih povezav lahko akustično impedanco visko-elastičnega materiala zapišemo z enačbo

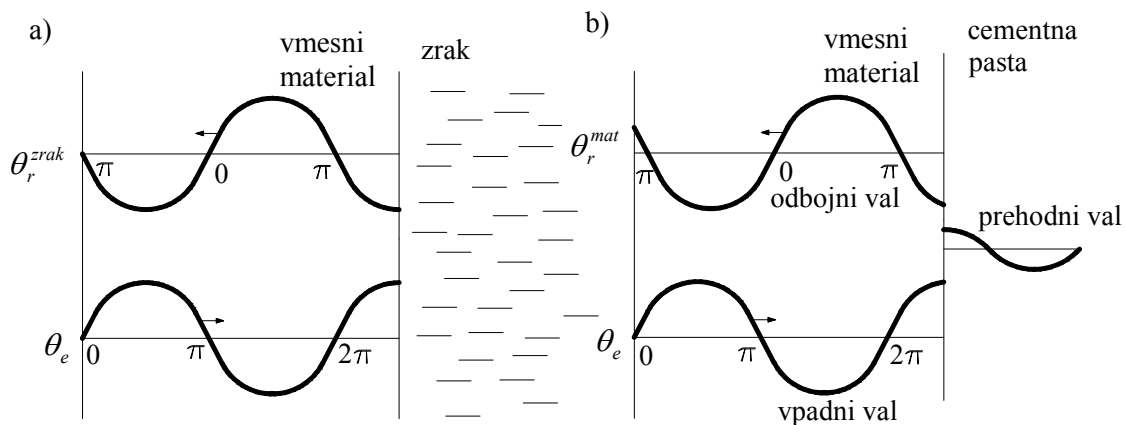
$$Z = \sqrt{\rho G' + i \rho \omega \eta'}, \quad (3.16)$$

kjer prvi člen na desni strani enačbe opisuje elastične, drugi člen pa viskozne lastnosti visko-elastičnega materiala.

V primeru visko-elastičnega materiala je tudi odbojni koeficient kompleksna količina in ga zapišemo z enačbo

$$r^* = r_0 \exp(i\varphi) = r_0 (\cos \varphi + i \sin \varphi), \quad (3.17)$$

kjer je r_0 velikost refleksijskega koeficienta, določena s prvo od enačb (3.5), φ pa predstavlja razliko med faznim kotom vpadnega (θ_e) in odbojnega (θ_r) vala (slika 3.6).



Slika 3.6 Faza vpadnega in odbojnega vala na stiku med a) vmesnim materialom in zrakom, in b) vmesnim materialom in cementno pasto (Voigt 2004).

Figure 3.6 Phase of incident and reflected wave at a) buffer/air and b) buffer/cement paste interface (Voigt 2004).

Fazno razliko φ velikokrat zapišemo v odvisnosti od fazne spremembe odbojnega vala, ki nastane zaradi prisotnosti testnega materiala na stiku med testnim in vmesnim (angl. "buffer") materialom. Velja torej:

$$\theta = \theta_r^{mat} - \theta_r^{zrak}, \quad (3.18)$$

kjer je θ_r^{mat} fazni kot odbojnega vala na stiku med pomožnim in vmesnim materialom, θ_r^{zrak} pa je fazni kot odbojnega vala na stiku med vmesnim materialom in zrakom. Velja:

$$\theta_r^{mat} = \theta_e + \varphi, \quad \theta_r^{zrak} = \theta_e + \pi, \quad \varphi = \theta + \pi. \quad (3.19)$$

Z upoštevanjem zadnje od enačb (3.19) v enačbi (3.17) lahko kompleksni odbojni koeficient zapišemo v obliki

$$r^* = r_0 \exp i(\pi + \theta) = -r_0 (\cos \varphi + i \sin \varphi), \quad (3.20)$$

v skladu s prvo od enačb (3.7) pa lahko zapišemo:

$$Z_{mat} = Z_{pom} \frac{1 + r^*}{1 - r^*}, \quad (3.21)$$

kjer je Z_{mat} akustična impedanca testnega materiala, Z_{pom} pa akustična impedanca vmesnega materiala. Z upoštevanjem (3.20) v (3.21) dobimo nadalje:

$$Z_{mat} = Z_{pom} \frac{1 + r_0 (\cos \theta + i \sin \theta)}{1 - r_0 (\cos \theta + i \sin \theta)}. \quad (3.22)$$

Z upoštevanjem zveze (3.8) za akustično impedanco Z_{mat} zapišemo realno in imaginarno komponento kompleksne akustične impedance Z_{mat} z enačbama:

$$R = Z_{pom} \frac{1 - r_0^2}{1 + r_0^2 + 2r_0 \cos \theta}, \quad X = Z_{pom} \frac{2r_0 \sin \theta^2}{1 + r_0^2 + 2r_0 \cos \theta}. \quad (3.23)$$

Možnost uporabe metode odboja ultrazvočnih valov za študij hidratacije cementnih past je prvi predstavil Stepišnik s sodelavci (Stepišnik 1981), Valič s sodelavci (2000) pa je izdelal aparaturo za merjenje procesa hidratacije cementnih past na osnovi odboja strižnega ultrazvočnega valovanja (USWR inštrument). Podroben opis USWR inštrumenta je prikazan v poglavju 3.2.2.

Valič in Stepišnik (1998, 1999) sta prikazala občutljivost metode odboja strižnega ultrazvočnega valovanja za študij hidratacije različnih cementnih past, pri čemer sta pokazala, da je strižni odbojni koeficient r oziroma sprememba strižnega odbojnega koeficienta dr premo sorazmerna s količino hidratiziranega cementa oziroma stopnjo hidratacije α . Pri tem sta razvoj odbojnega koeficienta opisala z znano Avramijevo enačbo. Valič (2000) je prikazal povezavo med vrednostjo odbojnega koeficienta in strižnim modulom cementne paste, Valič in Vuk (2000) pa sta pokazala občutljivost USWR inštrumenta na prisotnost različnih kemijskih in mineralnih dodatkov v cementni pasti. Podobne študije je opravil tudi Ozturk s sodelavci (1999), pri čemer je kot pomožni material uporabil jeklo.

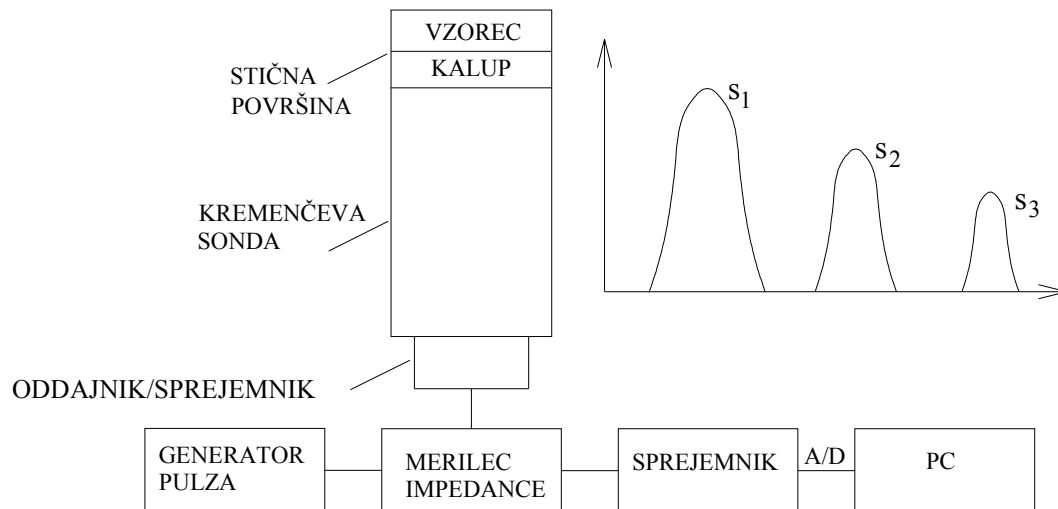
Voigt s sodelavci (2005) je primerjal razvoj hitrosti vzdolžnih ultrazvočnih valov in razvoj strižnega odbojnega koeficienta z razvojem temperature v betonskem vzorcu in ugotovil, da je korelacija med strižnim odbojnim koeficientom in temperaturo boljša kot korelacija med hitrostjo prehoda vzdolžnih valov in temperaturo. Primerjal je tudi razvoj strižnega odbojnega koeficienta in adiabatne temperature ter ugotovil podoben trend razvoja obeh omenjenih količin. Sun s sodelavci (2006) je predstavila možnost uporabe metode odboja strižnega valovanja za določitev viskoznosti cementnih past, pri čemer je pokazala, da viskoznost cementne paste narašča z nižanjem vodo/cementnega razmerja.

Številni avtorji so analizirali morebitno korelacijo med razvojem strižnega odbojnega koeficienta in tlačno trdnostjo materialov s cementnim vezivom. Voigt s sodelavci (2006) je pokazal, da je zveza med tlačno trdnostjo betona in strižnim odbojnim koeficientom v zgodnjem obdobju potenčna, kasneje pa linearna. Pokazal je, da je razmerje med strižnim odbojnim koeficientom in tlačno trdnostjo neodvisno od temperature okolice in vodo/cementnega razmerja (2006). Akkaya s sodelavci (2003) predlaga linearno zvezo med strižnim odbojnim koeficientom in tlačno trdnostjo betona, pri čemer začne ta zveza veljati pri neki določeni vrednosti, pri kateri beton pridobi začetno tlačno trdnost.

3.2.2 Merilni inštrument USWR

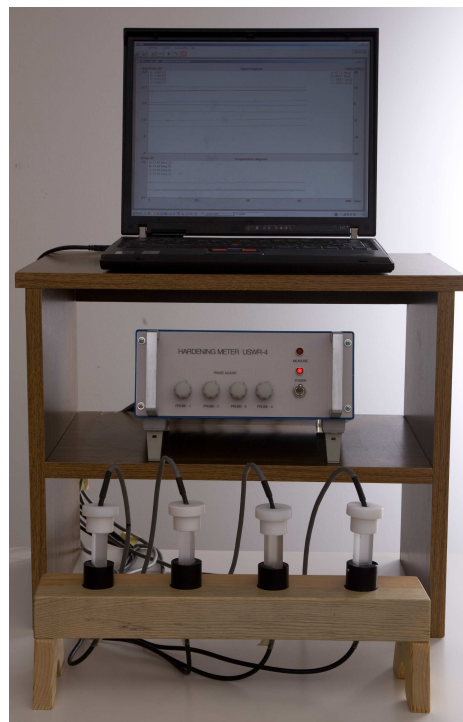
Na sliki 3.7 je prikazana enostavna principelna shema merjenja strižnega odbojnega koeficienta r z USWR inštrumentom, ki ga je razvil Valič s sodelavci (2000). Inštrument je sestavljen iz štirih ultrazvočnih sond iz zelo čistega kremenca, katerih nasprotni stranici sta popolnoma paralelni med seboj in izrazito gladki (slika 3.8). Sama merilna sonda je pravokotne oblike z dimenzijami prereza 13×16 mm in dolžino $L = 62$ mm. Zgornji del sonde je bodisi pravokotnega bodisi okroglega prereza. Na spodnji strani sonde je nameščena merilna glava z aluminijastim ohišjem cilindrične oblike premera 30 mm in dolžine 40 mm, ki vsebuje t.i. PZE generator strižnega ultrazvočnega valovanja in deluje kot oddajnik in sprejemnik hkrati. Na zgornjo stran ustrezno namestimo poseben teflonast kalup, ki je lahko okroglega ali pravokotnega prereza. Merilna oziroma stična površina med vzorcem cementne paste (testni material) in kremenčevo merilno glavo (pomožni material) znaša približno 2 cm^2 , sama količina testnega vzorca pa okrog 10 g.

Inštrument deluje na principu merjenja velikosti prvega (s_1) in drugega (s_2) povratnega odmeva strižnega ultrazvočnega valovanja (slika 3.7). Ultrazvočni generator oddaja kratek ($4 \mu\text{s}$) in šibak (2 W) pulz s frekvenco 17 MHz vsako milisekundo. Tvori se strižno ultrazvočno valovanje z amplitudo A_i , ki poteka do vrha ultrazvočne sonde oziroma do stične površine med ultrazvočno sondo in testnim materialom s hitrostjo strižnega valovanja v_{s1} . Na stični površini med ultrazvočno sondo in testnim materialom se del valovanja odbije in reflektira nazaj do merilne glave. Ustvari se prvi povratni odmev s_1 . Ta nato poteka do stične površine med ultrazvočno sondo in testnim vzorcem, del tega signala pa se ponovno odbije do merilne glave. Ustvari se drugi povratni odmev s_2 itd. Kot rezultat dobimo celoten vlak odmevov, ki si sledijo v določenem intervalu. Časovni interval med dvema zaporednima odmevoma znaša $2L/v_{s1}$.



Slika 3.7 Principelna shema merjenja poteka hidratacije in polimerizacije materialov z metodo odmeva ultrazvočnega valovanja na meji dveh sredstev.

Figure 3.7 Block scheme of the ultrasonic pulse echo method for hydration studies of hydraulic materials by the shear wave reflection method.



Slika 3.8 USWR inštrument
Figure 3.8 USWR instrument.

Na ta način aparat izračuna odbojni strižni koeficient r neposredno iz amplitud prvega in drugega odmeva s_1 in s_2 . Amplituda s_1 je sorazmerna z $A_1 r$, amplituda s_2 pa z $A_1 r^2 r_0$, kjer konstanta r_0 predstavlja vrednost odbojnega koeficienta na stiku med kvarčno sondo in PZE kristalom. Velja:

$$\frac{s_2}{s_1} = r r_0. \quad (3.24)$$

Znano je, da strižno valovanje skozi zrak ne poteka, kar pomeni $r_{\text{zrak}} = 1$. Velja torej:

$$\left(\frac{s_2}{s_1} \right)_{\text{zrak}} = r_{\text{zrak}} r_0 = r_0 \quad (3.25)$$

in nadalje

$$r = \left(\frac{s_2}{s_1} \right) / \left(\frac{s_2}{s_1} \right)_{\text{zrak}}. \quad (3.26)$$

Vrednost $(s_2 / s_1)_{\text{zrak}}$ je na nek način koeficient normiranja in je karakteristika vsake merilne sonde posebej. Za kontinuirno določanje odbojnega koeficienta po enačbi (3.26) je potrebno merjenje in zapisovanje amplitud dveh odbojnih signalov s_1 in s_2 hkrati, kar pomeni, da bi v tem primeru inštrument potreboval dva izhoda. Izkaže se, da je možna taka modifikacija aparata, da le-ta omogoča kontinuirno merjenje odbojnega koeficienta r neposredno iz zajemanja vrednosti amplitude le enega odbojnega signala (Valič 2000).

Med hidratacijo cementa se cementna pasta strjuje, s čimer se povečuje vrednost njene akustične impedance. To pomeni, da se vrednost odbojnega koeficienta $r(t)$ s časom zmanjšuje. Ker je za opisovanje hidratijskega procesa udobneje uporabiti naraščajočo krivuljo, spremembo odbojnega koeficienta s časom pišemo v obliki

$$dr(t) = 1 - r(t), \quad (3.27)$$

ki je lažje primerljiva z bolj znanimi naraščajočimi krivuljami, ki opisujejo potek hidratijskega procesa cementa (na primer razvoj stopnje hidratacije $\alpha(t)$ s časom).

Inštrument je povezan z osebnim računalnikom, ki avtomatsko, v vnaprej izbranih časovnih presledkih, shranjuje podatke, s posebnim programom pa se potek krivulje $r(t)$ sproti riše na zaslonu. Program shranjuje podatke o odbojnem koeficientu, faznem kotu in temperaturi vzorca s časom v datoteko formata ASCII.

Natančnost in zanesljivost inštrumenta USWR-4 je predstavil Valič (2000). Med testiranjem je inštrument izmeril približno 10^8 vrednosti brez napake. Natančnost merjenja odbojnega koeficienta r znaša $\leq \pm 0.5\%$ in se povečuje z manjšanjem vrednosti dr . Stabilnost inštrumenta je bila izmerjena s 24-urnim merjenjem odbojnega koeficienta r_{zrak} na stiku med merilno sondo in zrakom in je znašala $\leq \pm 0.2\%$ / 24 h.

Temperaturna stabilnost inštrumenta je bila določena z merjenjem odbojnega koeficienta r_{zrak} pri različnih temperaturah okolice od sobne temperature do temperature $T=60^\circ\text{C}$ in znaša -0.2% / $^\circ\text{C}$. Nepravilnosti pri različnih temperaturah okolice lahko odpravimo z vzporednim merjenjem temperature vzorca z vgrajenimi temperaturnimi senzorji (slika 3.8).

Ponovljivost merjenja odbojnega koeficienta $r(t)$ je bila določena z večkratnimi merjenji odbojnega koeficienta pri enakih mešaninah in enakih pogojih okolice. Posamezne izmerjene krivulje $r(t)$ so bile v vseh primerih skoraj identične.

3.3 SEKUNDARNE EKSPERIMENTALNE METODE

3.3.1 Metoda resonančne frekvence

Metoda resonančne frekvence za določanje dinamičnega Youngovega modula E_d , strižnega modula G in Poissonovega koeficienta μ elastičnih, homogenih in izotropnih materialov pri sobni temperaturi je opisana v standardu ASTM E 1876-99 (Standard ASTM E 1876-99). Metoda je uporabna za vzorce v obliki prizem pravokotnega ali okroglega prereza, uporabna pa je tudi za kompozitne oziroma nehomogene in neizotropne materiale z natančnim upoštevanjem učinkov nehomogenosti, ki neposredno vplivajo na elastične lastnosti preskušanca.

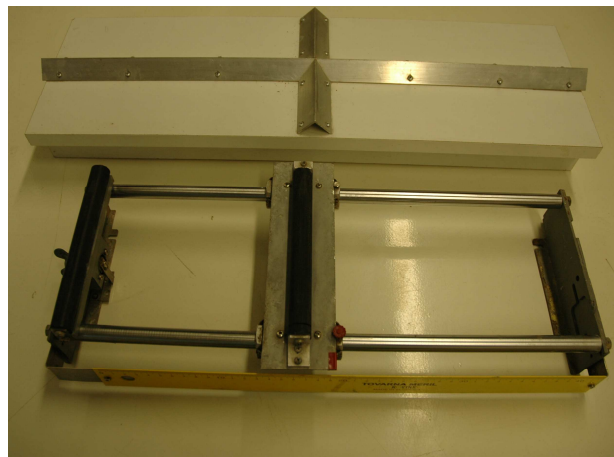
Metoda je popolnoma neporušna in je zasnovana na principu indukcije valovanja v vzorcu z mehanskim impulzom. Zaradi svoje enostavnosti omogoča izvedbo velikega števila meritev v relativno kratkem času. Princip metode je zasnovan na merjenju resonančne frekvence vzorca, ki je vzbujena z enim elastičnim udarcem s posebnim orodjem za vzbujanje mehanskih impulzov. Sprejemnik zazna mehanske vibracije, ki jih pretvori v električne signale. Podpore za vzorec, točke vzbujanja vibracij in točke zaznavanja vibracij so določene tako, da omogočajo meritev željenega načina prehodnih vibracij.

Inštrument za merjenje resonančne frekvence je prikazan na sliki 3.9a. Sestavljen je iz impulzerja, detektorja signala, elektronskega sistema in ustreznega sistema podpor (slika 3.9b).

a)



b)



Slika 3.9 a) Inštrument za merjenje resonančne frekvence, b) sistem podpor.
Figure 3.9 a) Apparatus for the determination of resonant frequency, b) support system.

Z impulzerjem se generira ustrezen impulz. Velikost in oblika impulzerja sta odvisni od velikosti in mase vzorca ter potrebne sile za ustvarjanje vibracij. Pri vzorcih običajnih dimenzij je dolžina impulzne palice okrog 10 cm, na njenem koncu pa je nameščena jeklena kroglasta utež premera 5 mm, s katero se generira mehanski impulz.

Z detektorjem signala izmerimo prosto valovanje v vzorcu. Detektorji so po navadi v obliki PZE merilcev pospeškov, ki po direktnem kontaktu z vzorcem izmerijo signal valovanja v vzorcu. V primeru nekontaktne detekcije se največkrat uporabljajo posebni akustični mikrofoni. Frekvenčno območje detektorja mora biti v skladu s pričakovanimi frekvencami vzorca.

Elektronski sistem je sestavljen iz ojačevalnika signala, detektorja, ki analizira ojačan signal, in sistema, ki določi frekvenco valovanja ter prikaže rezultat. Za samo obdelavo signala je tako primeren sistem analize frekvence z možnostjo shranjevanja podatkov v spomin. Z digitalnim osciloskopom s spominom in s sistemom analize signala s hitro Fourierjevo transformacijo je sistem sposoben analizirati tudi zahtevnejše oblike valovanj in tako določiti osnovne resonančne frekvence testnega vzorca.

Ustrezne podpore služijo izolaciji zunanjih vibracij na vzorec, pri čemer ne omejujejo zahtevanega načina vibriranja vzorca. Tako se za vsako obliko valovanja uporablja točno določen podporni sistem.

Opisana metoda resonančne frekvence je uporabna za vzorec pravokotnega ali okroglega prereza z ravnimi površinami ploskev. Resonančna frekvenca je funkcija dimenzij, mase in elastičnega modula vzorca, zato morajo biti dimenzije (razmerje med širino, debelino in dolžino) izbrane tako, da prihaja do čim manj eksperimentalnih težav med samo meritvijo in kasneje med izračunom, dimenzije in masa vzorca pa morajo biti izmerjene z določeno natančnostjo. Na vzorcu je potrebno natančno označiti mesto udarca, mesto zajemanja signala ter mesta naleganja vzorca na določen sistem podpor.

Dinamični Youngov modul E_d [Pa] vzorca pravokotnega prereza izračunamo po enačbi

$$E_d = 0.9465 \frac{m f_f^2 L^3}{b t^3} T_1, \quad (3.28)$$

kjer je m [g] masa vzorca, b [mm] širina vzorca, L [mm] dolžina vzorca, t [mm] debelina vzorca in f_f [Hz] osnovna resonančna frekvenca vzorca pri upogibu. V enačbi (3.28) je T_1 korekcijski faktor za osnovno upogibno frekvenco, ki upošteva geometrijo vzorca, Poissonovo število itd. in ga izračunamo po empirični enačbi

$$T_1 = 1 + 6.585 \left(1 + 0.0752\mu + 0.8109\mu^2 \right) \left(\frac{t}{L} \right)^2 - 0.868 \left(\frac{t}{L} \right)^4 - \frac{8.34 (1 + 0.20\mu + 2.173\mu^2) (t/L)^4}{1 + 6.34 (1 + 0.14\mu + 1.536\mu^2) (t/L)^2} \quad (3.29)$$

V primeru, ko je $L/t \leq 20$ in Poissonovo število ni znano, je potrebno privzeti začetno Poissonovo število. Za določanje dejanskega Poissonovega števila, osnovanega na osnovi eksperimentalnega Youngovega in strižnega modula, se uporabi naslednji iterativni postopek:

1. izmeri se resonančno in torzijsko frekvenco vzorca s pravokotnim presekom, pri čemer se za določitev dinamičnega strižnega modula uporabi enačbe (3.30), (3.31) in (3.32),
2. izračuna se dinamični Youngov modul v skladu z enačbama (3.28) in (3.29),
3. izračuna se novo vrednost Poissonovega števila,
4. ponavlja se postopek iz točk 2 in 3, dokler se vrednosti Poissonovega števila iz predzadnje in zadnje iteracije ne razlikujeta za neko vnaprej predpisano majhno vrednost,
5. izračuna se ostale količine z vrednostjo Poissonovega števila iz zadnje iteracije.

Dinamični strižni modul G [Pa] vzorca pravokotnega prečnega prereza izračunamo po enačbi

$$G = \frac{4 L m f_t^2}{b t} \left(\frac{B}{1 + A} \right), \quad (3.30)$$

kjer je f_t [Hz] osnovna torzijska resonančna frekvenca, A in B pa empirična korekcijska faktorja, odvisna od razmerja med debelino in širino vzorca. V kolikor je zahtevana napaka izračuna manjša kot 2%, je faktor A lahko izpuščen. Koeficienta A in B izračunamo po enačbah

$$A = \frac{0.5062 - 0.8776(b/t) + 0.3504(b/t)^2 - 0.0078}{12.03(b/t) + 0.9892(b/t)^2} \quad (3.31)$$

$$B = \frac{b/t + t/b}{4(t/b) - 2.52(t/b)^2 + 0.21(t/b)^6}. \quad (3.32)$$

3.3.2 Določanje statičnega Youngovega modula

Statični elastični modul betona E_s [Pa] smo določili skladno s standardoma ISO 6784 (1982) in JUS U.M1.025 (1982), kjer je statični elastični modul definiran z enačbo

$$E_s = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}. \quad (3.33)$$

Tu je $\Delta\sigma$ razlika med napetostjo pri 1/3 predvidene tlačne trdnosti betona (napetost σ_a) in začetno napetostjo 0.5 MPa (napetost σ_b), $\Delta\varepsilon$ pa razlika med deformacijama vzorca pri napetostih σ_a in σ_b . Statični elastični modul posamezne vrste betona smo določali na treh betonskih prizmah z dimenzijami 100/100/400 mm z univerzalnim preskuševalnim strojem ZWICK 400 (slika 3.10). Pred preiskavo statičnega elastičnega modula betona smo v skladu s standardom SIST EN 12390-3 (2003) določili tlačno trdnost tega betona na treh vzorcih v obliki kock s stranico 15 cm. Kot tlačna trdnost betona je bila upoštevana povprečna tlačna trdnost vseh treh izmerjenih vrednostih.

Pred določitvijo statičnega elastičnega modula smo betonski vzorec predobremenili v petih ciklikih, pri čemer smo v posameznem ciklusu ustrezno povečevali napetost v betonskem vzorcu do napetosti σ_a , nato pa napetost zmanjšali do napetosti σ_b . Statični modul E_s smo izračunali iz razlike deformacij in napetosti v zadnjem ciklusu skladno z enačbo (3.33).



Slika 3.10 Določanje statičnega Youngovega modula, betonski vzorec dimenzij 100 × 100 × 400 mm.
Figure 3.10 Determination of static elastic modulus – concrete specimen 100 × 100 × 400 mm.

3.3.3 Določanje časa vezanja cementne paste z metodo Vicata

Standardna metoda za določanje časa vezanja cementne paste je opisana v standardu SIST EN 196-3:2005 (2005) in temelji na globini prodora posebne jeklene igle v cementno pasto.

Cementno pasto standardne konsistence neposredno po zamešanju namestimo v cilindrično oblikovane gumijaste kalupe višine (40.00 ± 0.20) mm z notranjim premerom (75.00 ± 10) mm. V enakomernih

časovnih intervalih merimo globino prodora igle v cementno pasto, pri čemer je začetek vezanja cementne paste $t_{z,V}$ definiran kot čas, pri katerem razdalja d_V med spodnjo površino vzorca in testno iglo znaša $d_V = (6 \pm 3)$ mm. Za določitev končnega časa vezanja $t_{k,V}$ cementne paste celoten preskušane obrnemo in s posebno iglo merimo globino penetracije glave igle v cementno pasto. Končni čas vezanja je definiran kot čas, pri katerem je penetracija igle manjša od 1 mm.

3.3.4 Določanje časa vezanja betona z metodo penetrometra

Standardna metoda za določanje časa vezanja betonskih mešanic je opisana v standardu ASTM C 403-88 (1988). V skladu s standardom začetni in končni čas vezanja določamo na betonskih mešanicah z maksimalnim zrnem agregata 4 mm, pri čemer je začetni čas $t_{z,P}$ definiran kot čas, pri katerem napetost, potrebna za prodor posebne penetracijske igle v betonsko mešanico do globine 25 mm, znaša 3.5 N/mm^2 . Končni čas vezanja $t_{k,P}$ je definiran kot čas, pri katerem velikost te napetosti znaša 27.6 N/mm^2 . Inštrument vsebuje 6 penetracijskih igel, ki se med seboj razlikujejo po velikosti površine krožnega prereza (645, 323, 161, 65, 32 in 16 mm^2). Čas penetracije do predpisane globine mora v skladu s standardom znašati 10 ± 2 s.

Pri vsaki betonski mešanici smo začetni in končni čas vezanja določali na treh betonskih vzorcih dimenzij $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$, kot končni rezultat pa je bila upoštevana povprečna vrednost začetnega in končnega časa vezanja na vseh treh vzorcih.

3.3.5 Določanje tlačne trdnosti betona

Dejansko tlačno trdnost betona TT [N/mm^2] smo določali na betonskih vzorcih dimenzije $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ v skladu s standardom SIST EN 12390-3:2002 (2002). Pri tem je bila uporabljena hidravlična stiskalnica proizvajalca Toni Technik, prikazana na sliki 3.11 a.

a)



b)



Slika 3.11 Preiskava tlačne trdnosti betona po standardu SIST EN 12390-3:2002, a) naprava za destruktivno preiskavo tlačne trdnosti, b) značilna porušitev betonskega vzorca.

Figure 3.11 Determination of concrete compressive strength according to SIST EN 12390-3:2002 standard, a) apparatus, b) typical failure of cubic specimen.

Sama preiskava tlačne trdnosti se razume kot enoosno napetostno stanje, saj je vzorec spodaj in zgoraj vpet v izredno toge masivne kovinske plošče. Pri tem je zgornja plošča priključena členkasto, spodnja pa togo vpeta. Dejansko pa se zaradi trenja med vzorcem in kovinskimi ploščami pojavlja triosno napetostno stanje. Pomembna je hitrost obremenjevanja betonskih preskušancev, saj z višjo hitrostjo dobimo višje trdnostne karakteristike strjenega betona. V skladu s standardom SIST EN 12390-3:2002 preskušance stiskamo s konstantnim obremenjevanjem s hitrostjo med $0.2 - 1.0 \text{ MPa/s}$, ki sme nihati za največ $\pm 10 \%$.

Znano je, da so natezne in upogibne trdnosti betona veliko manjše od njegovih tlačnih trdnosti, kar je vidno tudi pri sami destruktivni preiskavi tlačne trdnosti betona. Tudi pri tej preiskavi beton namreč popusti, ko je dosežena natezna ali strižna trdnost materiala. To je možno sklepati že iz same oblike porušitve preskušanca, kjer se pojavi tipična porušitev oblike "peščene ure" (slika 3.11b). Kot nagiba zdrsne ploskve je odvisen od velikosti kohezije in kota notranjega trenja betona.

3.3.6 Metoda sklerometričnega indeksa

Nedestruktivna ocena tlačne trdnosti betona z metodo sklerometričnega indeksa je opisana v standardu SIST EN 12504-2:2002 (2002). Pri tej metodi s sklerometrom (slika 3.12a) merimo odboj kladiivca od betonske površine ter na osnovi vrednosti odboja RS , ki jo imenujemo sklerometrični indeks, ocenimo tlačno trdnost betona. Prednost te metode je v tem, da lahko v zelo kratkem času izvedemo veliko število meritev in tlačno trdnost betona ocenimo na osnovi statistične analize dobljenih rezultatov. Na ta način dobimo dobro oceno o tlačni trdnosti betona blizu površine konstrukcijskega elementa. Prav zato standard predpisuje, da mora debelina konstrukcijskega elementa ali testnega vzorca, ki mora biti nepremično podprt, znašati najmanj 100 mm. Posebej pomembna je priprava površine betonskega elementa. Le-ta mora biti v naprej ustrezno pripravljena, gladka, čista in čim manj porozna. Priporočena velikost testne površine je 300×300 mm, posamezne točke udarcev pa ne smejo biti bližje kot 25 mm. V skladu s standardom je na enem preskusnem mestu potrebnih najmanj devet udarcev, pri čemer je zelo pomembna tudi smer udarca. Standard predpisuje, da je potrebno upoštevati še naslednje lastnosti betonske površine: trdnostni razred betona, tip betonske površine, vrsto betona, pogoje vlažnosti betonske površine, karbonatizacijo itd.

a)



b)



Slika 3.12 a) Določanje sklerometričnega indeksa, betonski vzorec dimenzij $150 \times 150 \times 150$ mm, b) določanje hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi betonski vzorec dimenzij $150 \times 150 \times 150$ mm.

Figure 3.12 a) Determination of rebound number, specimen with the dimensions of $150 \times 150 \times 150$ mm, b) determination of ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves, specimen with the dimensions of $150 \times 150 \times 150$ mm.

3.3.7 Določanje hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi strjene betonske preskušance

Hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi strjen beton smo določali v skladu s standardom SIST EN 12504-4:2004 (2004). Pri tem smo uporabili inštrument Controls Mod. 58-E0046. Premer sprejemne in oddajne sonde je znašal 50 mm, maksimalna resonančna frekvenca pa 54 kHz. Inštrument Controls Mod. 58-E0046 je prikazan na sliki 3.12b. Hitrost prehoda ultrazvoka smo določali na betonskih vzorcih v obliki kocke s stranico 15 cm, pri čemer so bili vzorci pripravljene in negovani skladno z veljavnima standardoma SIST EN 12390-1:2001 (2001) in SIST EN 12390-2:2001 (2001). Skladno s standardom SIST EN 12504-4:2004 smo čas prehoda ultrazvoka na posameznem betonskem preskušancu izmerili trikrat, in sicer preko opaženih (ravnih) stranic vzorca. V skladu s standardom se rezultati ne smejo

razlikovati za več kot ± 1 % povprečne vrednosti vseh meritev. Hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi betonski preskušaneec je bila nato določena po enačbi (3.4). Po koncu merjenja časa prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi betonski preskušaneec smo na istem preskušancu določili tlačno trdnost betona skladno s standardom SIST EN 12390-3:2002 (2002) (poglavje 3.3.5). Za doseg boljšega sprijemnega kontakta med vzorcem in ultrazvočnima sondama smo sonde pred vsakim merjenjem namazali s posebno glicerinsko pasto.

4. MATEMATIČNE IN STATISTIČNE METODE

4.1 UMETNE NEVRONSKE MREŽE

4.1.1 Splošno

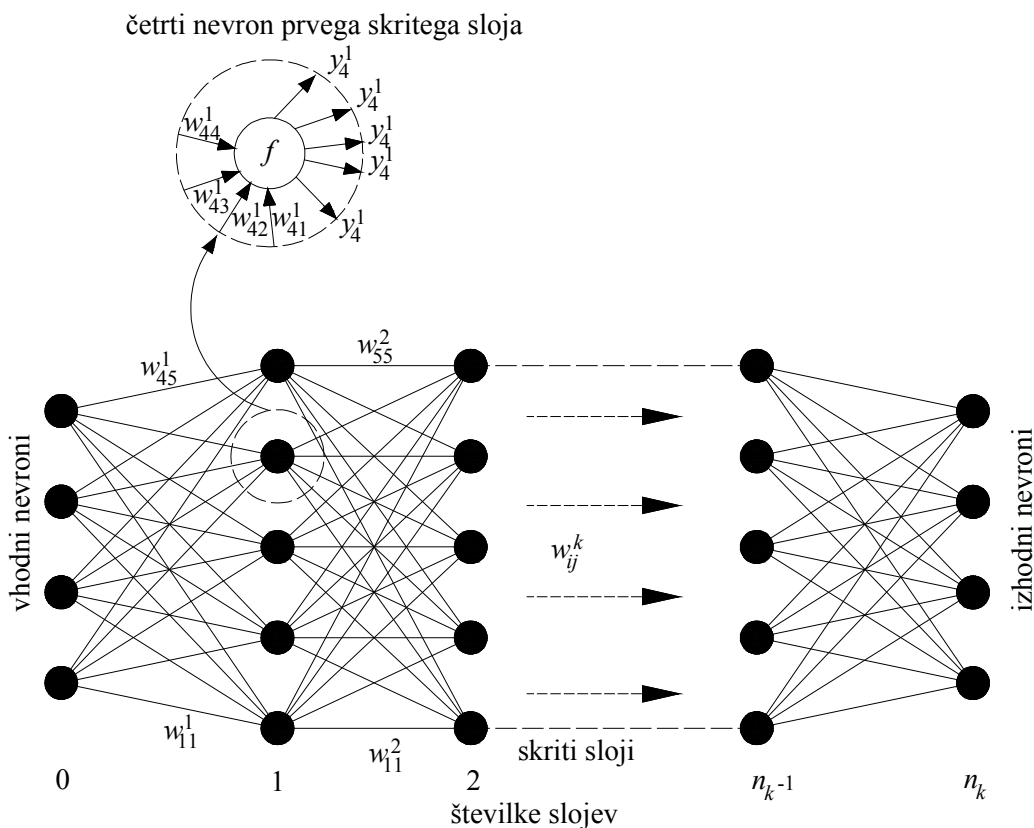
Ideja o nastanku in razvoju umetnih nevronske mreže izhaja iz želje po posnemanju možganov, katerih osnovna lastnost je sposobnost učenja. Tako so umetne nevronske mreže nemalokrat uspešne pri reševanju problemov, ki so za standardni način reševanja prezahtevni ali težko rešljivi.

Ideja o matematičnem modelu umetnega nevrona se je pojavila že v prvi polovici prejšnjega stoletja, vendar takratna tehnologija ni omogočala nadaljnega razvoja. Do novega zagona je prišlo leta 1986, ko je Rumelhart s sodelavci (1986) predstavil algoritem za določanje uteži v večslojnih umetnih nevronske mrežah s poljubnim številom skritih slojev. Uteži med nevroni se spreminjajo iterativno glede na zahteve izhodnega signala, ki naj se čim manj razlikuje od željenega signala.

4.1.2 Zgradba umetnih nevronske mrež

Zgradba in zasnova umetnih nevronske mrež je podobna zgradbi bioloških možganov. Le-ti so sestavljeni iz velikega števila živčnih celic (nevronov), ki so med seboj povezane z dendriti, preko katerih komunicirajo med seboj.

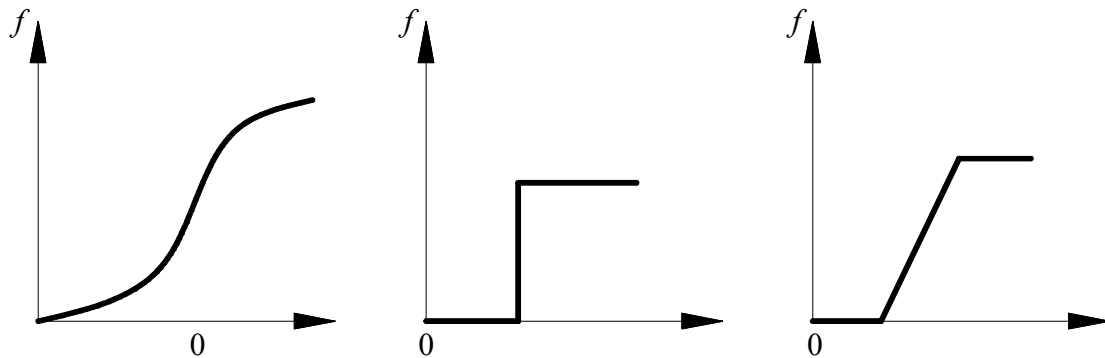
Umetna nevronska mreža je prav tako sestavljena iz velikega števila osnovnih elementov, ki jih imenujemo umetni nevroni, ki so med seboj povezani z utežmi w (slika 4.1). Posamezni nevron prejme signal od drugih nevronov in ga ustrezno obdela. Nevron je enota, ki lahko prejme večje število vhodnih signalov, odda pa le en (izhodni) signal.



Slika 4.1 Zgradba večslojne umetne nevronske mreže.
 Figure 4.1 Structure of the multi-layer feed-forward artificial neural network.

Uteži predstavljajo jakost povezave med posameznimi nevroni oziroma vpliv posameznega nevrona na drug nevron. Z aktivacijsko funkcijo f se signal bodisi ojača bodisi oslabi. Poznamo več vrst aktivacijskih funkcij (slika 4.2), in sicer:

- *linearno*, pri kateri je izhodni signal proporcionalen vhodnemu signalu,
- *stopničasto*, pri kateri izhodni signal zavzame določeno vrednost, odvisno od aktivnosti posameznega nevrona in
- *nelinearno*, pri kateri se izhodni signal spreminja zvezno nelinearno, odvisno od stanja aktivnosti nevrona.



Slika 4.2 Različne aktivacijske funkcije.

Figure 4.2 Different types of activation functions.

Umetna nevronska mreža je običajno večslojna. Prvi sloj predstavljajo vhodni nevroni oziroma materialni parametri (neodvisne spremenljivke). Vhodni nevroni komunicirajo z okolico v obliki vhodnih signalov. Sledijo skriti sloji nevronov. Teh je lahko več, nimajo pa neposredne povezave z okolico. Nevroni zadnjega sloja so povezani z nevroni zadnjega skritega sloja in predstavljajo iskano fizikalno količino (odvisna spremenljivka).

Vrednost i -tega nevrona v k -tem sloju označimo z $y_i^{(k)}$, povezavo oziroma utež med i -tim nevronom k -tega sloja in j -tim nevronom $(k-1)$ -ega sloja pa z $w_{ij}^{(k)}$ (slika 4.1).

Za pravilno delovanje umetne nevronske mreže je potreben ustrezen niz uteži, ki povezujejo nevrone. Vrednosti posameznih uteži nevronska mreža določi po ustreznem postopku, ki ga imenujemo učenje umetne nevronske mreže. Le-to poteka na podlagi znanega vhodno-izhodnega niza podatkov. Vhodnemu sloju posredujemo niz vhodnih podatkov, na podlagi katerih mreža izračuna ustrezne izhodne vrednosti. Glede na razliko med željenimi in izračunanimi izhodnimi vrednostmi nevronska mreža iterativno spreminja vrednosti uteži med posameznimi nevroni, dokler razlika med željeno in izračunano vrednostjo ni manjša od neke vnaprej predpisane vrednosti E_p . Za učenje umetnih nevronske mreže se najpogosteje uporablja posplošeno delta pravilo (Rumelhart, 1986).

Izhodni signal nevrona $y_i^{(k)}$ izračunamo kot

$$y_i^{(k)} = f\left(\sum_{j=1}^{n_k-1} w_{ij}^{(k)} y_j^{(k-1)}\right), \quad (4.1)$$

kjer je $y_j^{(k-1)}$ vrednost nevrona j v sloju $(k-1)$, $n_k - 1$ pa je število nevronov na $(k-1)$ -tem sloju. Mera za napako E_p k -tega vhodno izhodnega para je definirana z razliko med izračunano in ciljno (t_{pi}) vrednostjo kot

$$E_p = \frac{1}{2} (t_{pi} - y_{pi}^{(k)})^2, \quad (4.2)$$

skupno napako pa izračunamo kot

$$E = \sum_{p=1}^{n_p} E_p, \quad (4.3)$$

kjer je n_p število vseh vhodno-izhodnih parov. Pri posplošenem delta pravilu spreminjamo uteži iterativno po gradientni metodi:

$$w_{ij}^{(k)} := w_{ij}^{(k)} + \eta \frac{\partial E_p}{\partial w_{ij}^{(k)}}, \quad (4.4)$$

kjer pri odvajanju upoštevamo verižno pravilo in dobimo:

$$\frac{\partial E_p}{\partial w_{ij}^{(k)}} = \frac{\partial E_p}{\partial y_{ij}^{(k)}} \frac{\partial y_{ij}^{(k)}}{\partial w_{ij}^{(k)}} = (t_{pj} - y_{pj}^{(k)}) y_{pj}^{(k)} (1 - y_{pj}^{(k)}) = \delta_{pj}^{(k)}. \quad (4.5)$$

4.2 PROGRAM HYMOSTRUC (TU DELFT)

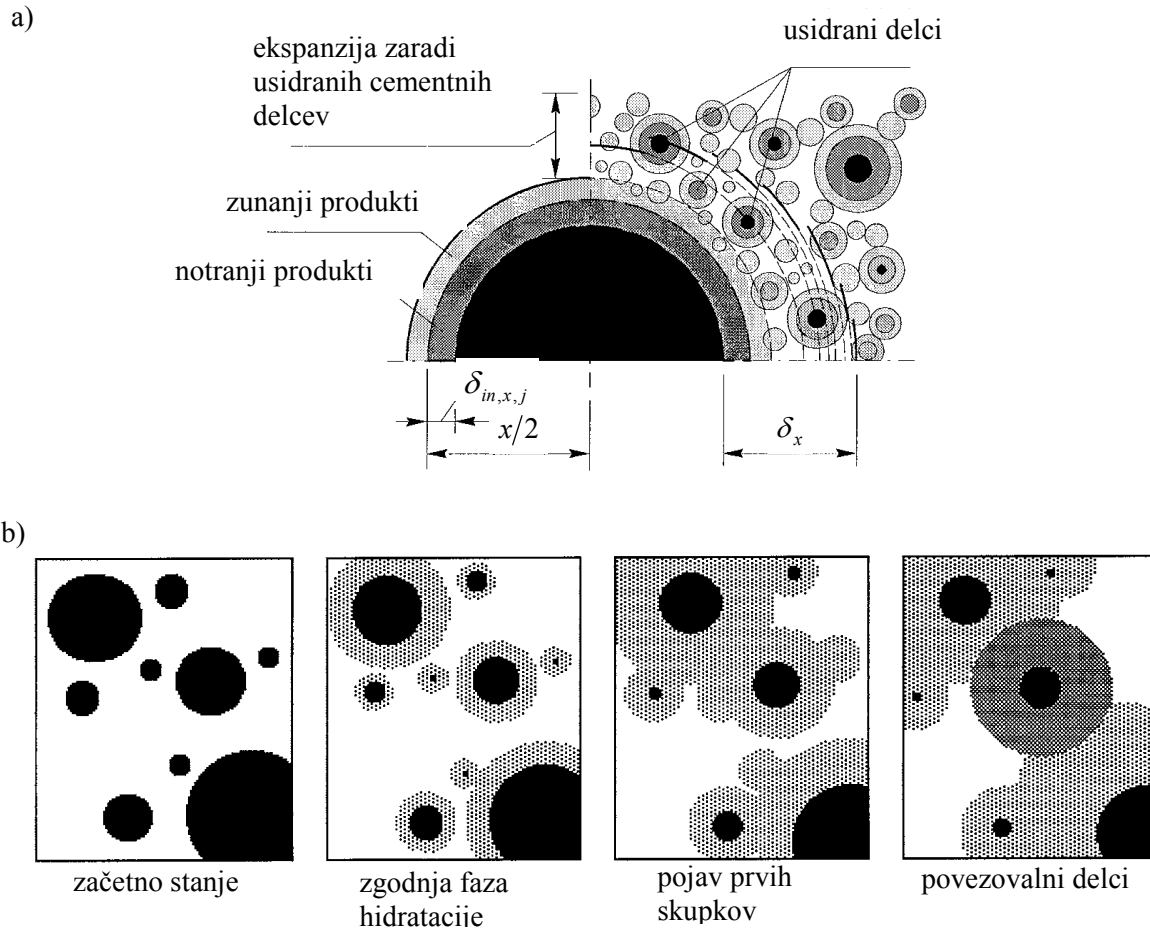
4.2.1 Splošno

Modeliranje razvoja procesa hidratacije in formiranja strukture materialov s cementnim vezivom je izziv raziskovalcem po vsem svetu. Predvsem v zadnjih 15-ih letih se številni raziskovalci ukvarjajo z razvojem najrazličnejših matematičnih modelov za simulacijo razvoja strukture materialov s cementnim vezivom (Jennings in Johnson 1986, van Breugel 1991, Navi in Pignat 1996, Bentz 1997, Maekava s sodelavci 1999). Trenutno se najbolj uporabljata matematična modela CEMHYD3D (Bentz 1997) in HYMOSTRUC (van Breugel 1991), Garboczi s sodelavci (2000) pa je poudaril pomembnost razvoja numeričnega modeliranja procesa hidratacije in formiranja strukture materialov s cementnim vezivom na podlagi eksperimentalnih rezultatov.

V programu HYMOSTRUC je razvoj strukture simuliran s formiranjem kontaktov med posameznimi cementnimi delci (slika 4.3), ki se med potekom procesa hidratacije na račun nastajanja hidratacijskih produktov ustrezno povečujejo. Delce, ki povezujejo posamezne skupke nastajajočih hidratacijskih produktov, imenujemo povezovalni delci in označimo z oznako B . Rast cementnih delcev je posledica večjega volumna hidratacijskih produktov od volumna nehidratiziranih cementnih zrn, ta faktor pa znaša $\nu = 2.20$ (van Breugel 1991). Program HYMOSTRUC loči notranje in zunanje hidratacijske produkte (slika 4.3), v programu pa so upoštevane naslednje osnovne predpostavke:

1. reakcijski produkti se formirajo v neposredni bližini hidratizirajočih cementnih zrn;
2. gostota hidratacijskih produktov je konstantna;
3. tako raztapljanje (notranji hidratacijski produkti) kot tudi ekspanzija (zunanji hidratacijski produkti) potekata koncentrično, hitrost nastajanja hidratacijskih produktov pa je funkcija kemijske sestave cementa in temperature;
4. hitrost nastajanja hidratacijskih produktov je enaka za cementna zrna enakih velikosti.

Na začetku hidratacijskega procesa so nehidratizirani cementni delci enakomerno razporejeni po raztopini, razporeditev velikosti cementnih delcev pa je določena v skladu s Rosin-Ramlerjevo porazdelitvijo (enačba 2.12).



Slika 4.3 a) Shematični prikaz mehanizma ekspanzije, b) shematični prikaz formiranja mikrostrukture hidratizirajoče cementne paste (Lochorst 1998).

Figure 4.3 a) Schematic representation of expansion mechanism, b) schematic representation of the formation of a load-bearing microstructure in hardening cement paste (Lochorst 1998).

4.2.2 Mehanizem nastajanja hidratacijskih produktov

V določenem času t_j je stopnja hidratacije cementnega delca s premerom x enaka $\alpha_{x,j}$, pripadajoča debelina penetracije (debelina notranjih hidratacijskih produktov) $\delta_{in,x,j}$ pa znaša:

$$\delta_{in,x,j} = \frac{x}{2} \left(1 - (1 - \alpha_{x,j})^{1/3} \right). \quad (4.6)$$

Volumen zunanjih hidratacijskih produktov pri stopnji hidratacije $\alpha_{x,j}$ znaša:

$$v_{ou,x,j} = (v - 1) \alpha_{x,j} v_x, \quad (4.7)$$

kjer je v_x volumen nehidratiziranega cementnega delca s premerom x . Volumen zunanjih hidratacijskih produktov cementnega delca s premerom x je v splošnem sestavljen iz zunanjih hidratacijskih produktov tega cementnega delca in iz usidranih cementnih delcev, katerih premer je manjši od osnovnega cementnega delca s premerom x (slika 4.3a). V kolikor je volumen zunanjih hidratacijskih produktov cementnega delca s premerom x sestavljen le iz nastajajočih hidratacijskih produktov tega delca (enačba 4.7), potem zunanji radij in debelino tega delca izračunamo kot:

$$R_{ou,x,j} = \left(\frac{v_{ou,x,j}}{4\pi/3} + \left(\frac{x}{2} \right)^3 \right)^{1/3}, \quad \delta_{ou,x,j} = R_{ou,x,j} - \frac{x}{2}. \quad (4.8)$$

V realnosti so v območju zunanjih produktov hidratizirajočih cementnih delcev prisotni hidratizacijski produkti drugih (manjših) cementnih delcev, kar povzroči dodatno ekspanzijo volumna zunanjih hidratacijskih produktov delca s premerom x . Mehanizem ekspanzije posameznih cementnih delcev zapišemo v obliki geometrijske vrste (van Breugel 1991).

4.2.3 Hitrost penetracije

Za določeno betonsko mešanico je oblika adiabatne krivulje določena s hitrostjo penetracije notranjih hidratacijskih produktov posameznega cementnega delca (Koenders 1997), ki ima v programu HYMOSTRUC obliko

$$\frac{\Delta\delta_{in,x,j+1}}{\Delta t_{j+1}} = K_0(C_3S) \Omega(v/c) F_1(T) \left[F_2(T, \beta_2) \left(\frac{\delta_{tr}(C_2S)}{\delta_{xj}} \right)^{\beta_1} \right]^\lambda, \quad (4.9)$$

kjer je $\Delta\delta_{in,x,j+1}$ povečanje debeline penetracije v časovnem koraku Δt_{j+1} , $K_0(C_3S)$ je osnovni faktor hitrosti penetracije [μm], $\delta_{tr}(C_2S)$ pa skupna debelina [μm] notranjih in zunanjih hidratacijskih produktov, pri kateri hitrost reakcije postane odvisna od difuzije. β_1 in β_2 sta empirični konstanti, ki ju je potrebno določiti za vsako betonsko mešanico posebej, $\Omega(v/c)$ pa operator, ki zajema vpliv vodo/cementnega razmerja na hitrost procesa hidratacije. $F_1(T)$ je t.i. Arrheniusova zrelostna funkcija (poglavje 10), ki zajema vpliv temperature okolice na hitrost hidratacijskega procesa, $F_2(T, \beta_2)$ pa temperaturna funkcija, ki upošteva vpliv začetne temperature sveže betonske mešanice na gostoto hidratacijskih produktov. V splošnem se z večanjem začetne temperature gostota hidratacijskih produktov povečuje (Hewlett 2004).

V programu HYMOSTRUC so K_0 , δ_{tr} , β_1 in β_2 empirični parametri, ki jih je v splošnem potrebno določiti za vsako betonsko mešanico posebej. Z obsežno študijo (van Breugel 1991, Koenders 1997) so bile določene splošno privzete vrednosti omenjenih parametrov.

4.3 STATISTIČNE METODE

4.3.1 Linearna regresija

Regresijska funkcija $\hat{Y} = f(X)$ opisuje, kakšen je vpliv spremenljivke X na Y brez drugih vplivov, ki so lahko posledica vpliva drugih spremenljivk ali slučajnega odstopanja. Slučajno spremenljivko Y lahko zapišemo kot vsoto dveh spremenljivk po enačbi

$$Y = \hat{Y} + \varepsilon = f(X) + \varepsilon, \quad (4.10)$$

kjer je X neodvisna, Y pa odvisna spremenljivka. Pri tem predstavlja spremenljivka ε napako oziroma slučajno odstopanje. V primeru, da je regresijska funkcija $f(X)$ linearna, velja:

$$Y = f(X) = a + bX, \quad (4.11)$$

pri čemer za posamezen i -ti element vzorca X_i in Y_i z n elementi zapišemo enačbo

$$Y_i = \hat{Y}_i + \varepsilon_i = a + bX_i + \varepsilon_i; \quad i = 1, \dots, n. \quad (4.12)$$

Z regresijo določimo tiste vrednosti ocen \hat{a} in \hat{b} , za katere je prileganje regresijske premice elementom vzorca najboljše. V primeru, da za določitev ocene parametrov \hat{a} in \hat{b} uporabimo metodo najmanjših kvadratov, moramo poiskati minimum funkcije $S(a,b)$, ki predstavlja vsoto kvadratov odstopanj ε_i :

$$S(a,b) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - (a + bX_i))^2. \quad (4.13)$$

Funkcijo $S(a,b)$ odvajamo po a in b in zahtevamo, da so odvodi enaki nič:

$$\frac{\partial S(a,b)}{\partial a} = \sum_{i=1}^n 2(Y_i - \hat{a} - \hat{b}X_i)(-1) = 0 \quad \frac{\partial S(a,b)}{\partial b} = \sum_{i=1}^n 2(Y_i - \hat{a} - \hat{b}X_i)(-X_i) = 0. \quad (4.14)$$

Po preureditvi dobimo sistem normalnih enačb, ki ga sestavljata dve linearni enačbi z dvema neznankama \hat{a} in \hat{b} . Po krajšem računu dobimo rešitvi

$$\hat{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \hat{b} = \bar{Y} - \bar{X} \hat{b} = \bar{Y} - \frac{S_{XY}}{S_X^2} \bar{X} \quad \hat{b} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i X_i - \bar{X}\bar{Y}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2 - \bar{X}^2} = \frac{S_{XY}}{S_X^2} \quad (4.15)$$

kjer \bar{X} in \bar{Y} predstavljata povprečje vzorcev X_i in Y_i in ju določimo kot

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i. \quad (4.16)$$

V enačbah (4.15) predstavlja S_X^2 varianco vzorca, ki jo določimo po enačbi

$$S_X^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2, \quad (4.17)$$

S_{XY} pa je kovarianca, določena z enačbo

$$S_{XY} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}). \quad (4.18)$$

Oceni parametrov \hat{a} in \hat{b} sta slučajni spremenljivki, za katere lahko zapišemo srednji vrednosti in varianci

$$E[\hat{a}] = a \quad \text{var}[\hat{a}] = \frac{\sigma^2}{n} \left(1 + \frac{\bar{X}^2}{S_X^2} \right) \quad (4.19a)$$

$$E[\hat{b}] = b \quad \text{var}[\hat{b}] = \frac{\sigma^2}{S_X^2 n}. \quad (4.19b)$$

V enačbah (4.19) sta varianci obeh parametrov izraženi z varianco σ^2 slučajne spremenljivke ε . Ker te variance ne poznamo, jo moramo oceniti iz vzorca. Nepristransko oceno $\hat{\sigma}^2$ določimo po enačbi

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{a} - \hat{b}X_i)^2 = \frac{n}{n-2} S_Y^2 (1 - R_{XY}^2), \quad (4.20)$$

kjer je R_{XY} ocena koeficienta korelacije in jo določimo z enačbo

$$R_{XY} = \frac{S_{XY}}{S_X S_Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}. \quad (4.21)$$

4.3.2 Preskušanje domnev

4.3.2.1 Splošno

Statistična domneva ali hipoteza je vsaka domneva o slučajni spremenljivki X , preskus domneve oziroma test pa je vsak postopek, po katerem lahko na temelju vzorca slučajne spremenljivke $X(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ničelno domnevo zavrnilo ali obdržimo. Domnevo preskusimo po naslednjem postopku:

1. Postavimo t.i. ničelno in alternativno domnevo:
 - H_0 : ničelna domneva
 - H_1 : alternativna domneva.
2. Izberemo statistiko, ki ustreza ničelni domnevi ter določimo njeno porazdelitev.
3. Izberemo tveganje oziroma stopnjo značilnosti α . Na osnovi tveganja in porazdelitve statistike določimo meje kritičnega območja statistike.
4. Na vzorčnih podatkih izračunamo vrednost statistike.
5. S primerjavo vrednosti statistike in kritičnega območja ničelno domnevo zavrnilo ali obdržimo.

4.3.2.2 Preskušanje domnev o vrednosti koeficientov linearne regresije

Preskušanje domneve o vrednosti koeficientov linearne regresije lahko uporabimo kot kontrolo ponovljivosti eksperimentalnih meritev, kjer so elementi vzorca X_i in Y_i povezani z enačbo (4.12). V ta namen celotno meritev oziroma celotni vzorec ponovimo m -krat in zapišemo regresijski model (4.12) za vsak posamezen vzorec in skupni regresijski model za vse vzorce skupaj. Tako dobimo m regresijskih modelov:

$$Y_{i,j} = \hat{Y}_{i,j} + \varepsilon_{i,j} = a_j + b_j X_{i,j} + \varepsilon_{i,j} \quad i = 1, \dots, n_j \quad j = 1, \dots, m \quad (4.22)$$

in skupni regresijski model:

$$Y_{i,0} = \hat{Y}_{i,0} + \varepsilon_{i,0} = a_0 + b_0 X_{i,0} + \varepsilon_{i,0} \quad i = 1, \dots, n_v \quad (4.23)$$

kjer je n_j število elementov v j -tem vzorcu, $n_v = \sum_{j=1}^m n_j$ pa število vseh elementov v skupnem vzorcu.

Postavimo ničelne in alternativne domneve:

$$H_{0,j} : a_j = a_0 \text{ in } H_{0,j} : b_j = b_0$$

$$H_{1,j} : a_j \neq a_0 \text{ in } H_{1,j} : b_j \neq b_0.$$

Ob predpostavki, da so slučajne spremenljivke X_i porazdeljene normalno, je statistika T porazdeljena po Studentovi porazdelitvi t z $n_j - 2$ oziroma $n_v - 2$ prostostnimi stopnjami. Statistiki T_A in T_B določimo po enačbah:

$$T_A = \frac{\hat{a} - E[\hat{a}]}{\sqrt{\text{var}[\hat{a}]}} \quad T_B = \frac{\hat{b} - E[\hat{b}]}{\sqrt{\text{var}[\hat{b}]}}. \quad (4.24)$$

Z upoštevanjem enačb (4.15), (4.19) in (4.20) v enačbah (4.24) dobimo po krajšem preoblikovanju:

$$T_A = \frac{\bar{Y} - \frac{S_{XY}\bar{X}}{S_X^2} - a_0}{\sqrt{\frac{(-S_{XY}^2 + S_X^2 S_Y^2)(S_X^2 + \bar{X}^2)}{(n_j - 2)S_X^4}}} \quad T_B = \frac{\frac{S_{XY}}{S_X^2} - b_0}{\frac{\sqrt{n_j}}{\sqrt{n_j - 2}} S_Y \sqrt{1 - R_{XY}^2} \frac{1}{S_X \sqrt{n_j}}}. \quad (4.25)$$

Meje kritičnega območja zavrnitve ničelne domneve so $(-\infty, -t_{1-\alpha/2}] \cup [t_{1-\alpha/2}, \infty)$.

4.3.2.3 Analiza variance

Z analizo variance ugotavljamo, kako ena ali več neodvisnih spremenljivk vpliva na slučajno spremenljivko Y . Pri tem je vzorec urejen tako, da so vrednosti neodvisnih spremenljivk (faktorji X) razvrščene v a razredov, pri čemer je v posameznem razredu n_i elementov. Osnovni model takih podatkov zapišemo z enačbo:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij} \quad i = 1, \dots, a \quad j = 1, \dots, n_i, \quad (4.26)$$

kjer Y_{ij} predstavljajo vzorčne vrednosti slučajne spremenljivke Y , μ predstavlja pričakovano vrednost, α_i predstavljajo vplive posameznih razredov faktorja, ε_{ij} pa predstavljajo vzorčna odstopanja od modela. Običajno predpostavimo, da so odstopanja ε_{ij} porazdeljena normalno s pričakovano vrednostjo nič in standardno deviacijo σ . Pri analizi variance preskusimo domnevo, da faktor ne vpliva na spremenljivko Y . Tako ničelno oziroma alternativno domnevo zapišemo kot:

H_0 : $\alpha_i = 0$; za vse $i = 1, \dots, a \rightarrow$ faktor ne vpliva

H_0 : $\alpha_i \neq 0$; za vsaj en $i = 1, \dots, a \rightarrow$ faktor vpliva.

Ničelno domnevo preskusimo s statistiko F . Za izračun statistike F je potrebno najprej izračunati povprečja posameznih razredov \bar{Y}_i in skupno povprečje vzorca \bar{Y} v skladu s formulama

$$\bar{Y}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij} \quad \bar{Y} = \frac{1}{n_v} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij}, \quad (4.27)$$

pri čemer $n_v = \sum_{i=1}^a n_i$ predstavlja skupno število elementov v celotnem vzorcu. Izračunamo vsote kvadratov razlik SS , pri čemer uporabimo formule

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y})^2 \quad SS_A = n_i \sum_{i=1}^a (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2 \quad SS_E = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2 \quad (4.28)$$

kjer SS_T predstavlja celotno vsoto kvadratov, SS_A pa je vsota kvadratov zaradi vpliva faktorja in predstavlja vsoto kvadratov zaradi razlik med povprečnimi vrednostmi \bar{Y}_i v razredih. SS_E je vsota

kvadratov zaradi vpliva napak oziroma nepojasnjenih odstopanj in predstavlja vsoto kvadratov razlik med posameznimi elementi vzorca Y_{ij} in povprečji \bar{Y}_i posameznih razredov. Velja, da je:

$$SS_T = SS_A + SS_E . \quad (4.29)$$

Na osnovi vsot kvadratov pripravimo preglednico analize variance, ki jo krajše imenujemo tudi preglednica ANOVA.

Preglednica 4.1 Preglednica ANOVA.

Table 4.1 ANOVA table.

vir	vsota	prostostne	povprečni	statistika
odstopanj	kvadratov	stopnje	kvadrati	F
faktor	SS_A	n_{psA}	MS_A	F
napaka	SS_E	n_{psE}	MS_E	
skupaj	SS_T	n_{psT}		

Prostostne stopnje n_{psA} , n_{psE} in n_{psT} izračunamo kot:

$$n_{psA} = a - 1 \quad n_{psE} = n_v - a \quad n_{psT} = n_v - 1 , \quad (4.30)$$

kjer velja:

$$n_{psT} = n_{psA} + n_{psE} . \quad (4.31)$$

Povprečne kvadrate izračunamo kot:

$$MS_A = \frac{SS_A}{n_{psA}} \quad MS_E = \frac{SS_E}{n_{psE}} , \quad (4.32)$$

statistiko F pa z enačbo

$$F = \frac{MS_A}{MS_E} . \quad (4.33)$$

Statistika F se porazdeljuje po porazdelitvi F s prostostnimi stopnjami $\nu_1 = n_{psA}$ in $\nu_2 = n_{psE}$, kritično območje oziroma območje zavrnitve ničelne domneve pa je $[F_{1-\alpha}, \infty)$. Če je statistika F večja od kritične vrednosti $F_{krit} = F_{1-\alpha, \nu_1, \nu_2}$ oziroma presega mejo območja zavrnitve ničelne hipoteze, ničelno hipotezo zavrnemo in trdimo, da je vpliv faktorja na spremenljivko Y statistično značilen.

5. KARAKTERISTIKE UPORABLJENIH MATERIALOV

5.1 OSNOVNI MATERIALI

5.1.1 Cement

V okviru eksperimentalnega dela so bile uporabljene naslednje štiri vrste cementa proizvajalca Salomit Anhovo:

1. Cement CEM II/A-S 42,5R, oznaka C1;
2. Cement CEM I 42,5N, oznaka C2;
3. Cement CEM I 42,5 N SR, oznaka C3;
4. Cement CEM I 52,5R, oznaka C4.

Preglednice 5.1 – 5.4 prikazujejo posamezne karakteristike uporabljenih cementov². Vsebnost mineralov cementnega klinkerja je bila ocenjena iz kemijske sestave posameznih cementov v skladu z enačbami Bogue-a (enačbe 2.1 – 2.4). Fizikalno mehanske lastnosti cementov so bile določene skladno s standardom SIST EN 197-1 (2002).

Preglednica 5.1 Kemijska sestava uporabljenih cementov.

Table 5.1 Chemical composition of cements used.

parameter	CEM II/A-S 42,5R		CEM I 42,5N		CEM I 42,5 N SR		CEM I 52,5R		metoda preskušanja
	delež [%]	zahteva standarda	delež [%]	zahteva standarda	delež [%]	zahteva standarda	delež [%]	zahteva standarda	
SiO ₂	21.9	-	20.8	-	21.5	-	20.5	-	XRF
Al ₂ O ₃	5.4	-	4.8	-	4.1	-	4.7	-	XRF
Fe ₂ O ₃	2.9	-	3.3	-	5.0	-	3.1	-	XRF
CaO	60.4	-	64.6	-	63.5	-	63.3	-	XRF
MgO	2.8	-	1.8	-	1.7	-	1.9	-	XRF
Na ₂ O	0.3	-	0.3	-	0.2	-	0.3	-	XRF
K ₂ O	0.7	-	0.8	-	0.7	-	0.8	-	XRF
SO ₃	2.6	< 4	2.7	< 3.5	2.3	< 3.5	3.3	< 4	XRF
Klorid	0.02	< 1	-	-	< 0,01	< 0,1	< 0.01	< 0.1	XRF
žaroizguba netopno	2.8	-	< 5	-	< 5	-	< 5	-	SIST EN 196-2
	0.5	-	< 5	-	< 5	-	< 5	-	SIST EN 196-2

Preglednica 5.2 Vsebnost mineralov cementnega klinkerja v uporabljenih cementih.

Table 5.2 Amount of clinker minerals of cements used.

parameter	CEM II/A-S 42,5R	CEM I 42,5 N	CEM I 42,5 N SR	CEM I 52,5R
C ₃ S [%]	32.8	60.2	55.9	57.7
C ₂ S [%]	46.3	13.6	21.9	13.0
C ₃ A [%]	10.4	7.2	2.3	6.9
C ₄ AF [%]	10.5	9.3	15.0	8.9
apnenec [%]		-	-	4
sadra [%]		5	5	5

² Podatki, prikazani v preglednicah 5.1-5.4, so podani s strani proizvajalca uporabljenih cementov.

Preglednica 5.3 Fizikalne karakteristike uporabljenih cementov.

Table 5.3 Physical characteristics of cements used.

parameter	CEM II/A-S 42,5R	CEM I 42,5N	CEM I 42,5 N SR	CEM I 52,5R
specifična površina [cm ² /g]	4260	2640	3130	4310
ostanek na situ 90 mm [%]	0.35	3.8	2.0	0.8
standardna konsistenca [%]	27.6	25.6	24.8	29.6
začetek vezanja [min]	152	195	205	160
konec vezanja [min]	203	230	260	185
prostorniska obstojnost	0	0.3	0.2	0.3

Preglednica 5.4 Mehanske karakteristike uporabljenih cementov.

Table 5.4 Mechanical characteristics of cements used.

parameter	CEM II/A-S 42,5R	CEM I 42,5N	CEM I 42,5 N SR	CEM I 52,5R
upogibna trdnost [N/mm ²]				
2 dni	4.6	4.0	3.8	6.0
28 dni	8.1	8.1	7.8	8.4
tlačna trdnost [N/mm ²]				
2 dni	25.0	22.4	18.4	38.7
28 dni	52.1	48.5	47.7	62.5

5.1.2 Zamesna voda

V okviru eksperimentalnega dela je bila uporabljena pitna voda iz vodovoda, katere v skladu s standardom SIST EN 1008 (2003) ni potrebno dodatno preskušati.

5.1.3 Mineralni agregat

V okviru eksperimentalnega dela smo uporabili 2 tipa mineralnega agregata, in sicer agregat kvarcitrno karbonatnega izvora ter agregat apnenčevega izvora. Pri vsakem tipu sta bila uporabljena tako drobljeni kot prodnati agregat.

5.1.3.1 Agregat apnenčevega izvora

Slika 5.1 prikazuje drobljeni agregat apnenčevega izvora, katerega gostota je znašala 2710 kg/m³. V skladu z različnimi podatki iz literature znaša hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi agregat apnenčevega izvora med 4.8 - 5.2 km/s.

a)



b)



c)



d)



Slika 5.1 Drobljeni agregat apnenčevega izvora, a) frakcija 0 – 4 mm, b) frakcija 4-8 mm, c) frakcija 8 – 16 mm, d) frakcija 16 – 32 mm.

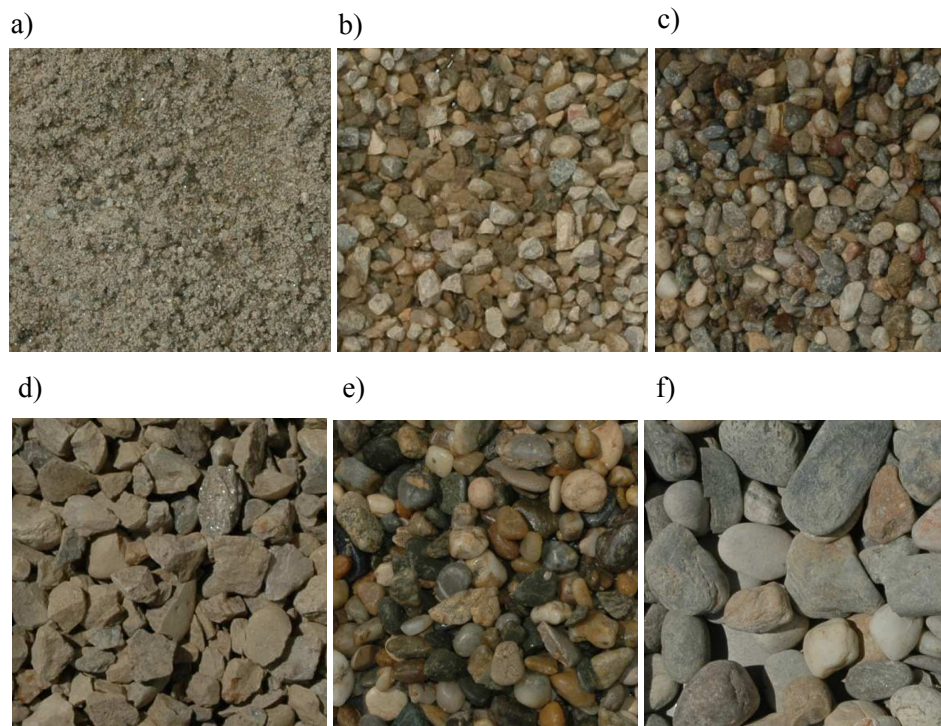
Figure 5.1 Crushed limestone aggregate, a) fraction 0 – 4 mm, b) fraction 4 – 8 mm, c) fraction 8 – 16 mm, d) fraction 16 – 32 mm.

Poenostavljena mineraloško-petrografska analiza agregata je bila izvedena skladno s standardom SIST EN 932-3:1999 (1999). Preiskani vzorci agregata z drobljenimi zrni predstavljajo svetlo siv

intramikrospartiten apnenec z rahlo zaobljenimi robovi in hrapavo površino. Posamezna zrna so kompaktna in rahlo podolgovate oblike. Zelo redke žilice so zapolnjene s kalcitnim vezivom. V frakcijah je prisotno tudi približno 30% temno rjavega intrabiospartitnega apnenca tipa packstone-grainstone s hrapavo površino.

5.1.3.1 Agregat kvarcitrno karbonatnega izvora

Slika 5.2 prikazuje agregat kvarcitrno karbonatnega izvora, katerega gostota je znašala 2550 kg/m^3 . V skladu z različnimi podatki iz literature znaša hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi ta agregat med 2.8 - 3.7 km/s.



Slika 5.2 Agregat kvarcitrno karbonatnega izvora, a) frakcija 0 – 4 mm, b) frakcija 4-8 mm, c) frakcija 4 – 8 mm, prodnat d) frakcija 8 – 16 mm, frakcija 8 – 16 mm, prodnat, frakcija 16 – 32, prodnat.

Figure 5.2 Quarzite carbonate aggregate, a) fraction 0 – 4 mm, b) fraction 4 – 8 mm, c) fraction 4 – 8 mm, gravel, d) fraction 8 – 16 mm, fraction 8 – 16 mm, gravel, fraction 16 – 32 mm, gravel.

Poenostavljena mineraloško-petrografska analiza agregata je bila izvedena skladno s standardom SIST EN 932-3:1999 (1999). V uporabljenem kvarcitrno karbonatnem agregatu je prisotnih približno 24 % zrn karbonatnega izvora in 76 % zrn iz magmatskih ter metamorfnih kamnin silikatnega izvora. Vzorci frakcij 0 – 4, 4 – 8, 8 – 16 in 16 – 32 (prodnat agregat) predstavljajo polzaobljen heterogen kvarcitrno karbonatni prod. Zrna karbonatnih kamnin (apnenec in dolomit) so v frakcijah do 8 – 16 dobro zaobljena. Metamorfne kamnine (predvsem gnajs in blestnik) so preperele, podobno tudi kamnina granit. V frakciji 0 – 4 je povečan delež minerala kremenja in muskovita.

5.2 CEMENTNE PASTE

Posamezne cementne paste so se med seboj razlikovale v vrsti uporabljenega cementa (TC), velikosti vodo/cementnega razmerja (v/c), finosti mletja cementa (SP), količine minerala C_3A v cementnem klinkerju (C_3A) in temperaturi okolice, kateri je bila cementna pasta izpostavljena v času hidratacijskega procesa (T_0). Karakteristike referenčne cementne paste OSN so prikazane v preglednici 5.5, preglednica 5.6 pa prikazuje karakteristike vseh uporabljenih cementnih past. Za ugotavljanje vpliva finosti mletja cementa smo uporabili cementa CEM I 42,5N in CEM I 52,5R, katerih kemijska sestava je podobna, bistveno se razlikujeta le v finosti mletja cementa (preglednica 5.3). Zaradi relativno podobne kemijske sestave smo omenjena dva cementa zmešala v razmerju 50/50 in tako dobili tretjo vrsto cementa za

ugotavljanje vpliva finosti mletja cementa na potek hidratacije (oznaka CF3). V tem primeru je finost mletja cementa znašala 3490 cm²/g, vsebnost minerala C₃A pa 7.10 %.

Preglednica 5.5 Karakteristike referenčne cementne paste.

Table 5.5 Characteristics of reference cement paste mixture.

oznaka	OSN
TC	CEM II/A-S 42,5R
v/c	0.35
To [°C]	20 ± 2
SP [cm ² /g]	4260
C3A [%]	10.4

Podobno smo za ugotavljanje vpliva deleža C₃A uporabili cementa CEM I 42,5N in CEM I 42,5 N SR, ki smo ju prav tako zmešali v razmerju 50/50 in tako dobili tretji tip cementa za potrebe ugotavljanja vpliva deleža C₃A. V tem primeru je delež minerala C₃A znašal 4.80 %, finost mletja pa 2805 cm²/g (oznaka CC3A3).

Preglednica 5.6 Karakteristike vseh uporabljenih cementnih past.

Table 5.6 Characteristics of all cement paste mixtures used.

oznaka	TC	v/c	To [°C]	SP [cm ² /g]	C3A [%]
C1030	CEM II/A-S 42,5R	0.30	21	4260	10.4
C1035	CEM II/A-S 42,5R	0.35	21	4260	10.4
C1040	CEM II/A-S 42,5R	0.40	21	4260	10.4
C1050, CT21, OSN	CEM II/A-S 42,5R	0.50	21	4260	10.4
C1060	CEM II/A-S 42,5R	0.60	21	4260	10.4
C1065	CEM II/A-S 42,5R	0.65	21	4260	10.4
C2, CF1, CC3A1	CEM I 42,5N	0.50	21	2640	7.2
C3, CC3A2	CEM I 42,5N SR	0.50	21	3130	2.3
C4, CF2	CEM I 52,5R	0.50	21	4310	6.9
CT11	CEM II/A-S 42,5R	0.50	11	4260	10.4
CT26	CEM II/A-S 42,5R	0.50	26	4260	10.4
CT32	CEM II/A-S 42,5R	0.50	32	4260	10.4
CT11060	CEM II/A-S 42,5R	0.60	11	4260	10.4
CT26060	CEM II/A-S 42,5R	0.60	26	4260	10.4
CT32060	CEM II/A-S 42,5R	0.60	32	4260	10.4
CF3	CEM I 42,5N + + CEM I 52,5R	0.50 0.50	21 21	3490	7.1
CC3A3	CEM I 42,5N + + CEM I 42,4N SR	0.50 0.50	21 21	2800	4.8
C2040	CEM I 42,5N	0.40	21	2640	7.2
C3040	CEM I 42,5N SR	0.40	21	3130	2.3
C4040	CEM I 52,5R	0.40	21	4310	6.9

5.3 BETONSKE MEŠANICE

V sklopu eksperimentalnega dela smo sprojektirali več betonskih mešanic, ki so se med seboj razlikovale glede na:

- količino agregata v betonu (KA);
- vrsto agregata v betonu (MA);
- velikost maksimalnega agregatnega zrna v betonu (MAX);
- obliko agregatnih zrn v betonu (OA);
- vrsto cementa v betonu (TC);
- velikost vodo/cementnega razmerja (v/c).

Poleg omenjenih parametrov so se posamezne betonske mešanice razlikovale tudi glede temperature okolice, ki so ji bili posamezni betonski vzorci izpostavljeni med potekom procesa hidratacije cementa v betonu (T_0). Pri zasledovanju hidratacijskega procesa z adiabatno kalorimetrijo so se betonske mešanice razlikovale tudi glede začetne temperature betona pri adiabatnem preskusu (T_0) in glede količine cementa v betonu (KC).

V preglednici 5.7 so prikazane karakteristike referenčne betonske mešanice. Količina posameznih materialov sestave betonske mešanice je podana v kilogramih na enoto volumna materiala.

Preglednica 5.7 Karakteristike referenčne betonske mešanice

Table 5.7 Characteristics of reference concrete mixture

agregat	material	apnenec				
	oblika	drobljenec				
	količina [kg/m^3]	1851				
	frakcije [mm]	0-1	0-4	4-8	8-16	16-32
	delež [%]	7	44	20	29	-
	količina [kg/m^3]	131	811	372	537	-
cement	vrsta	CEM II/A-S 42,5R				
	količina [kg/m^3]	370				
voda	količina [kg/m^3]	199.8				
v/c razmerje	0.54					
prostorninska masa [kg/m^3]	2370					
začetna temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	21					
temperatura okolice [$^{\circ}\text{C}$]	21 ± 2					

Betonske mešanice smo v prvi fazi razdelili na mešanice z maksimalnim zrnom agregata 4 mm in na mešanice z maksimalnim zrnom agregata večjim od 4 mm. Preglednica 5.8 prikazuje karakteristike in oznake betonskih mešanic z maksimalnim zrnom agregata 4 mm (oznake B4...). Mešanice so se razlikovale glede na količino agregata v betonu, vrsto agregata, tip cementa in velikost vodo/cementnega razmerja.

Preglednica 5.9 prikazuje oznake in karakteristike uporabljenih betonskih mešanic z maksimalnim zrnom agregata do 32 mm (oznake B8..., B16..., B32...). Te mešanice so se med seboj razlikovale glede na material agregata (MA), količino agregata v betonu (KA), maksimalno zrno agregata (MAX), obliko agregata (OA), tip cementa v betonu (TC), vodo/cementno razmerje (v/c) in temperaturo okolice, ki ji je bila betonska mešanica izpostavljena v času hidratacijskega procesa.

Preglednica 5.8 Karakteristike betonskih mešanic, maksimalno zrno agregata 4 mm.
Table 5.8 Characteristics of concrete mixtures, maximum nominal aggregate size 4 mm.

oznaka	TC	v/c	KA [kg/m ³]	MA
B4CA054	CEM II/A-S 42,5R	0.54	1850	apnenec
B4C1048	CEM II/A-S 42,5R	0.48	1850	apnenec
B4C1065	CEM II/A-S 42,5R	0.65	1850	apnenec
B4C1KA2	CEM II/A-S 42,5R	0.54	1500	apnenec
B4C1KA3	CEM II/A-S 42,5R	0.54	2130	apnenec
B4C2054	CEM I 42,5N	0.54	1850	apnenec
B4C3054	CEM I 42,5N SR	0.54	1850	apnenec
B4C4054	CEM I 52,5R	0.54	1850	apnenec
B4C1MA2	CEM II/A-S 42,5R	0.54	1850	kvarcit karbonat

Preglednica 5.9 Karakteristike betonskih mešanic, maksimalno zrno agregata do 32 mm.
Table 5.9 Characteristics of concrete mixtures, maximum nominal aggregate size 32 mm.

oznaka	TC	v/c	KA [kg/m ³]	MA	MAX [mm]	OA	To [°C]
B16C1040	CEM II/A-S 42,5R	0.40	1850	apnenec	16	drobljen	21
B16C1045	CEM II/A-S 42,5R	0.45	1850	apnenec	16	drobljen	21
B16C1050	CEM II/A-S 42,5R	0.50	1850	apnenec	16	drobljen	21
B16C1054	CEM II/A-S 42,5R	0.54	1850	apnenec	16	drobljen	21
B16C1065	CEM II/A-S 42,5R	0.65	1850	apnenec	16	drobljen	21
B16C2054	CEM I 42,5N	0.54	1850	apnenec	16	drobljen	21
B16C3054	CEM I 42,5N SR	0.54	1850	apnenec	16	drobljen	21
B16C4054	CEM I 52,5R	0.54	1850	apnenec	16	drobljen	21
B16C1KA2040	CEM II/A-S 42,5R	0.40	1500	apnenec	16	drobljen	21
B16C1KA2	CEM II/A-S 42,5R	0.54	1500	apnenec	16	drobljen	21
B16C1KA2065	CEM II/A-S 42,5R	0.65	1500	apnenec	16	drobljen	21
B16C1KA3040	CEM II/A-S 42,5R	0.40	2130	apnenec	16	drobljen	21
B16C1KA3	CEM II/A-S 42,5R	0.54	2130	apnenec	16	drobljen	21
B16C1KA3065	CEM II/A-S 42,5R	0.65	2130	apnenec	16	drobljen	21
B16C1T-1	CEM II/A-S 42,5R	0.54	1850	apnenec	16	drobljen	-1
B16C1T10	CEM II/A-S 42,5R	0.54	1850	apnenec	16	drobljen	10
B16C1T32	CEM II/A-S 42,5R	0.54	1850	apnenec	16	drobljen	32
B4C1054	CEM II/A-S 42,5R	0.54	1850	apnenec	4	drobljen	21
B8C1054	CEM II/A-S 42,5R	0.54	1850	apnenec	8	drobljen	21
B32C1054	CEM II/A-S 42,5R	0.54	1850	apnenec	32	drobljen	21
B16C1MA2	CEM II/A-S 42,5R	0.54	1850	kvarcit karbonat	16	drobljen	21
B16C1KA2MA2	CEM II/A-S 42,5R	0.54	1500	kvarcit karbonat	16	drobljen	21
B16C1KA3MA2	CEM II/A-S 42,5R	0.54	2130	kvarcit karbonat	16	drobljen	21
B16C1OA2	CEM II/A-S 42,5R	0.54	1850	apnenec	16	okrogel	21

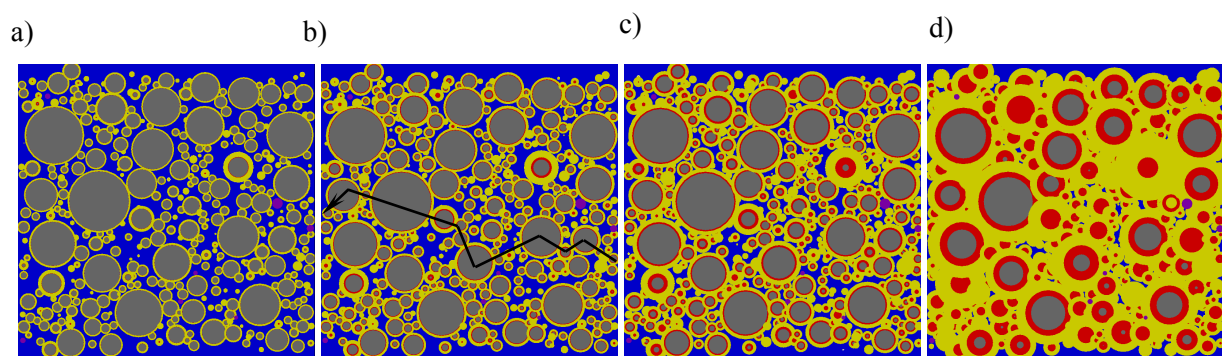
DEL 3 EKSPERIMENTALNI REZULTATI

6. MATERIALI PRI ZGODNJI STAROSTI

6.1 UVOD

V literaturi se pojavljajo različne definicije dolžine zgodnje starosti materialov s cementnim vezivom. Tako Carino s sodelavci (1989) definira zgodnjo starost kot obdobje, v katerem material izrazito spreminja svoje lastnosti, dolžina tega obdobja pa naj bi pri običajnem PC cementu in hidrataciji pri sobnih temperaturah trajala 3 dni. Grubl (2001) definira zgodnjo starost kot obdobje med 2-4 ure in 15-24 ure po stiku cementa in vode, Reinhardt (1991) pa kot obdobje med prvim in sedmim dnem starosti betona. Mehta in Monteiro (1993) definirata to starost kot obdobje, v katerem se določena lastnost materiala še pomembno spreminja. Voigt (2004) predlaga definiranje zgodnjega obdobja do starosti materiala 7 dni oziroma odvisno od intenzivnosti spremembe vsake posamezne lastnosti materiala posebej.

Materiali s cementnim vezivom med procesom hidratacije spreminjajo svoje agregatno stanje od praktično Binghamove tekočine do Hookovega materiala z visoko trdnostjo. Te spremembe so posledica sprememb v strukturi materiala med potekom procesa hidratacije. Na sliki 6.1 je shematično prikazana struktura hidratizirajoče cementne paste, izračunane z numeričnim programom Hymostruc (van Breugel 1991). Modra barva predstavlja zamesno vodo, siva nehidratizirani del cementnih zrn, rumena zunanje hidratacijske produkte in rdeča notranje hidratacijske produkte. Vidimo, da je do določenega časa trdna faza nepovezana (slika 6.1a). Po tem času nastopi povezanost trdne faze (črna puščica na sliki 6.1b), s časom pa se delež trdne faze in s tem delež povezane trdne faze povečuje.



Slika 6.1 Struktura hidratizirajoče cementne paste C1035 pri različnih časih, izračunana s programom Hymostruc, a) $t = 1$ ura, $\alpha = 0.016$, b) $t = 3$ ure, $\alpha = 0.04$, c) $t = 13$ ur, $\alpha = 0.15$, d) $t = 800$ ur, $\alpha = 0.57$.

Figure 6.1 Formation of the structure of cement paste C1035 at different hydration times, evaluated with Hymostruc program, a) $t = 1$ hour, $\alpha = 0.016$, b) $t = 3$ hours, $\alpha = 0.04$, c) $t = 13$ hours, $\alpha = 0.15$, d) $t = 800$ hours, $\alpha = 0.57$.

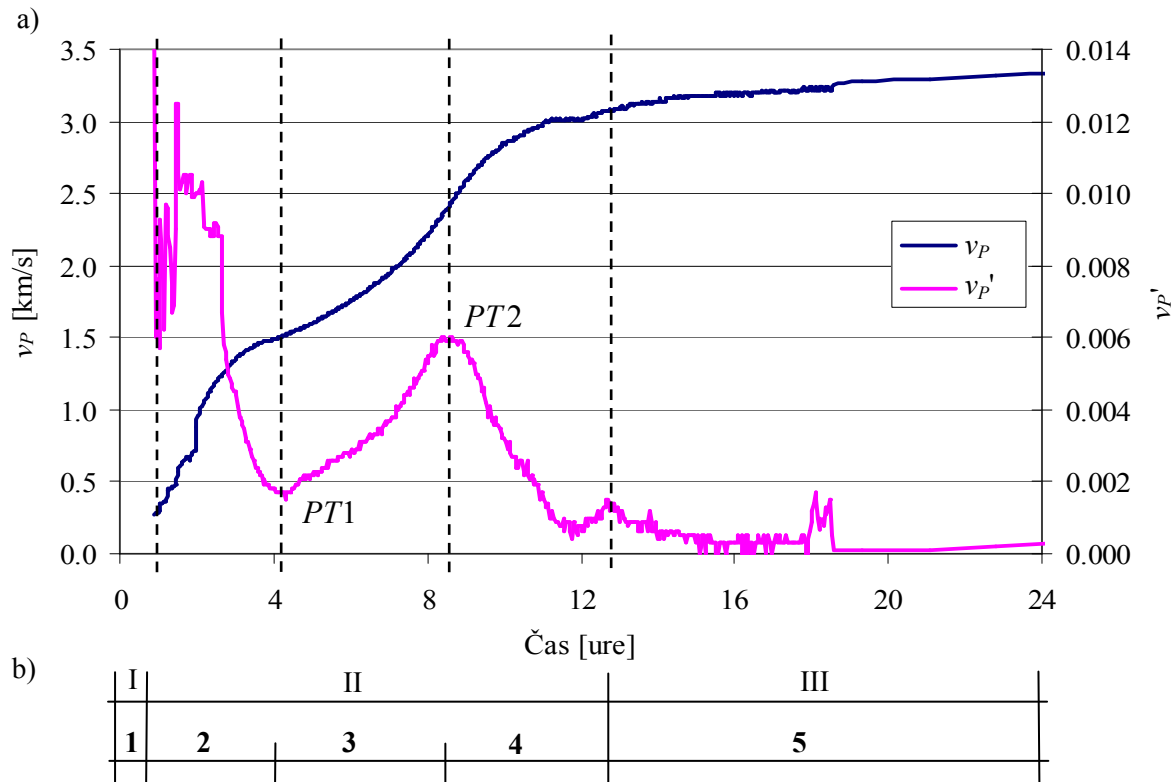
6.2 CEMENTNA PASTA

6.2.1 Metoda prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov - splošno

Slika 6.2 prikazuje tipično krivuljo razvoja hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov v_p skozi cementno pasto s časom (modra krivulja) in njen odvod (rdeča krivulja). Hitrost prehoda vzdolžnih

ultrazvočnih valov skozi cementno pasto s časom kontinuirno narašča, na osnovi njene oblike pa lahko krivuljo v_p-t razdelimo na več območij. V prvi fazi lahko krivuljo razdelimo na tri območja (območja I, II, III na sliki 6.2), ki jih je predlagal Ye (2003), na osnovi odvoda krivulje v_p-t pa omenjeno krivuljo razdelimo na pet območij. Taka razdelitev območij na krivulji v_p-t zelo dobro sovпада z definicijo posameznih obdobij hidratacijskega procesa na osnovi hitrosti sproščanja toplote, kot jih je predlagal Schindler s sodelavci (2002, slika 2.1).

Medtem ko sta Ye (2003) in Kamada s sodelavci (2005) v svojih študijah zaznala pojav le ene izrazite prevojnne točke, so eksperimenti, izvedeni v okviru te študije, pokazali pojav dveh izrazitih prevojnne točk $PT1$ in $PT2$ na krivuljah v_p-t (slika 6.2).



Slika 6.2 Cementna pasta C1035, a) razvoj hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi cementno pasto s časom, b) definicija karakterističnih območij na krivulji v_p-t .

Figure 6.2 Cement paste C1035, a) development of ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves through cement paste, b) definition of characteristic stages on the v_p-t curve.

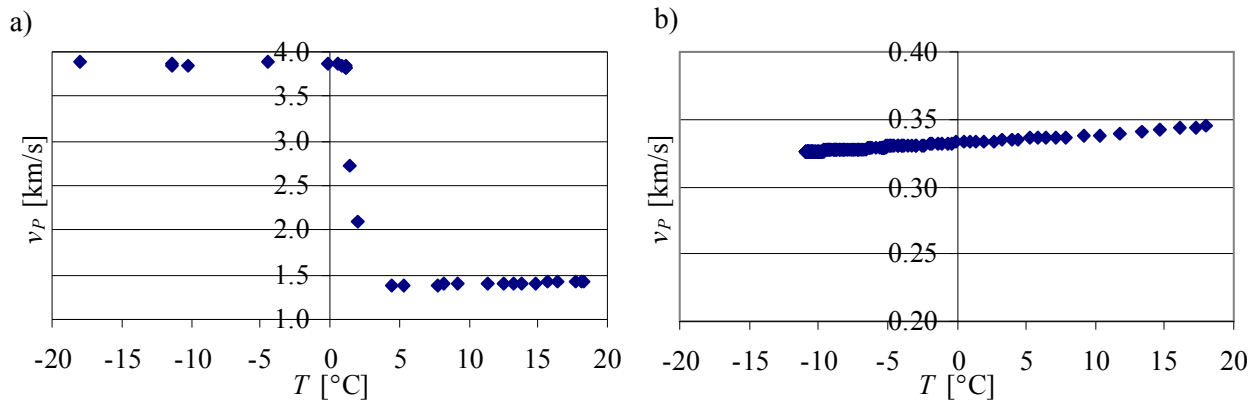
Območje I (1) Obdobje mirovanja – indukcijsko obdobje

V prvi fazi inštrument ni zaznal prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi cementne paste³, začetna vrednost hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi cementno pasto pa je znašala med 250 m/s in 500 m/s. Ta vrednost je bistveno nižja od vrednosti hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi vodo (1430 m/s, slika 6.3a) in v nekaterih primerih celo nižja od vrednosti hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi zrak (340 m/s, slika 6.3b). Različni avtorji navajajo različne možne vzroke za nastanek omenjenega fenomena. V skladu s Keatingom (1998) in Sayerom (1993) je nizka hitrost vzdolžnih ultrazvočnih valov posledica majhnih zračnih mehurčkov, ki se nahajajo v cementni pasti neposredno po stiku cementa in vode ter povzročajo močno dušenje ultrazvočnih valov (slika 6.4). Le-ti so bodisi nastali med mešanjem cementne paste ali pa so posledica zračnih mehurčkov, ki so se predhodno nahajali v zamesni vodi. Feylessoufi s sodelavci (2001) navaja kot možen vzrok za nizko hitrost vzdolžnega ultrazvočnega valovanja skozi cementno pasto v začetni fazi nepopolno mešanje

³ Fenomen nezaznavanja prehoda vzdolžnih UZ valov na samem začetku merjenja je najverjetneje posledica tako strukture materiala v tej fazi kot tudi samega merilnega inštrumenta oz. metode.

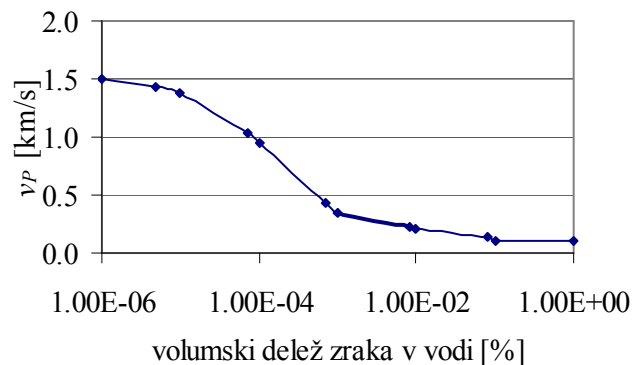
cementa in vode, kar prav tako povzroči močno dušenje vzdolžnih ultrazvočnih valov. Robeyst s sodelavci (2008) poudarja pomembnost nadaljnjih raziskav tega fenomena.

Iz slik 6.3 je razvidno, da vrednosti hitrosti prehoda vzdolžnega ultrazvočnega valovanja skozi vodo, led in zrak, popolnoma ustrezajo vrednostim, navedenim v literaturi (preglednica 3.1), kar je pomemben podatek predvsem z vidika natančnosti in ustreznosti tako merilnega inštrumenta kot same eksperimentalne metode. Podobna kontrola ustreznosti inštrumenta je bila izvedena tudi z inštrumentom Pundit, pri čemer so bili rezultati praktično identični.



Slika 6.3 Hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov v odvisnosti od temperature skozi a) vodo in led, b) zrak, inštrument Proceq.

Figure 6.3 Ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves at different temperatures through a) water and ice, b) air, instrument Proceq.



Slika 6.4 Hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov v suspenziji zrak/voda pri 20°C (Ye 2003).

Figure 6.4 Ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves in air/water system at 20°C (Ye 2003).

Dolžina faze I (1) je seveda odvisna od vrste cementa, vodo/cementnega razmerja, finosti mletja cementa itd. (poglavje 2).

Območje II (2, 3, 4) Obdobje pospeševanja

Po določenem času začne hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi cementno pasto intenzivno naraščati. V tem obdobju intenzivno nastajajo različni hidratizacijski produkti (poglavje 2.2.4), ki formirajo trdno fazo v strukturi hidratizirajoče cementne paste. Po nekem času se vzpostavi prva povezava trdne faze (slika 6.1b), sčasoma pa postaja delež trdne faze vse večji in vse bolj povezan (slika 2.6, slika 6.1), kar rezultira v naglem naraščanju hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi cementno pasto. V obdobju pospeševanja se hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov povečuje proporcionalno s povečevanjem deleža povezane trdne faze.

Iz slike 6.2 vidimo, da hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi cementno pasto intenzivno narašča, še preden je vzpostavljena prva povezava trdne faze v cementni strukturi. Ta fenomen je posledica dejstva, da so vzdolžni ultrazvočni valovi močno odvisni od formiranja zgodnjega

hidratizacijskega produkta etringita (poglavje 2.2.4). Igllice etringita sicer ne formirajo povezave med nastajajočimi hidratizacijskimi produkti, prispevajo pa k povečevanju deleža trdne faze na račun zmanjševanja poroznosti, kar rezultira v povečevanju hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi cementno pasto. Voigt s sodelavci (2005) kot drug možen razlog naraščanja hitrosti vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi cementno pasto pred pojavom prve povezave trdne faze navaja tudi usedanje cementnih zrn zaradi gravitacije, kar rezultira v gostejši cementni pasti in posledično boljši povezanosti trdnih delcev v raztopini, brez dejanskih povezav, ki nastanejo kot posledica naraščanja hidratizacijskih produktov.

V fazi obdobja pospeševanja sta opazni dve izraziti prevojni točki, ki ju označimo kot $PT1$ in $PT2$, na osnovi teh dveh karakterističnih točk pa lahko območje II razdelimo še na tri podobmočja (slika 6.2). Iz slike 6.2 je razvidno, da se prva prevojna točka pojavi približno takrat, ko hitrost prehoda vzdolžnega ultrazvočnega valovanja skozi hidratizirajočo cementno pasto doseže hitrost prehoda vzdolžnega ultrazvočnega valovanja skozi vodo (slika 6.3a). Pojav prevojne točke je v svojem prispevku omenil tudi Kamada s sodelavci (2005), pri čemer je čas pojava te točke definiral kot konec območja I na krivulji $v_p - t$. Po pojavu prve prevojne točke hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov še naprej hitro narašča vse do pojava druge prevojne točke. Po tem času se hitrost naraščanja postopoma zmanjšuje in se po koncu podobmočja 4 skoraj popolnoma umiri.

Območje III (5) Obdobje umiritve

Po koncu območja II (podobmočja 4) se kljub nadaljnjemu povečevanju stopnje hidratacije α (slika 6.1) delež povezane trdne faze le še malenkostno povečuje. Temu primerno se hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi cementno pasto v tem obdobju skoraj umiri oziroma narašča izredno počasi.

6.2.2 Metoda odboja strižnih ultrazvočnih valov – splošno

Slika 6.5 prikazuje značilno krivuljo naraščanja strižnega odbojnega koeficienta dr , določenega z USWR napravo (poglavje 3.2.2). Na prvi stopnji lahko krivuljo $dr - t$ razdelimo na tri območja (Sun 2006), podrobnejša analiza pa omogoči razdelitev krivulje na 5 območij.

Območje I (1, 2) Obdobje mirovanja

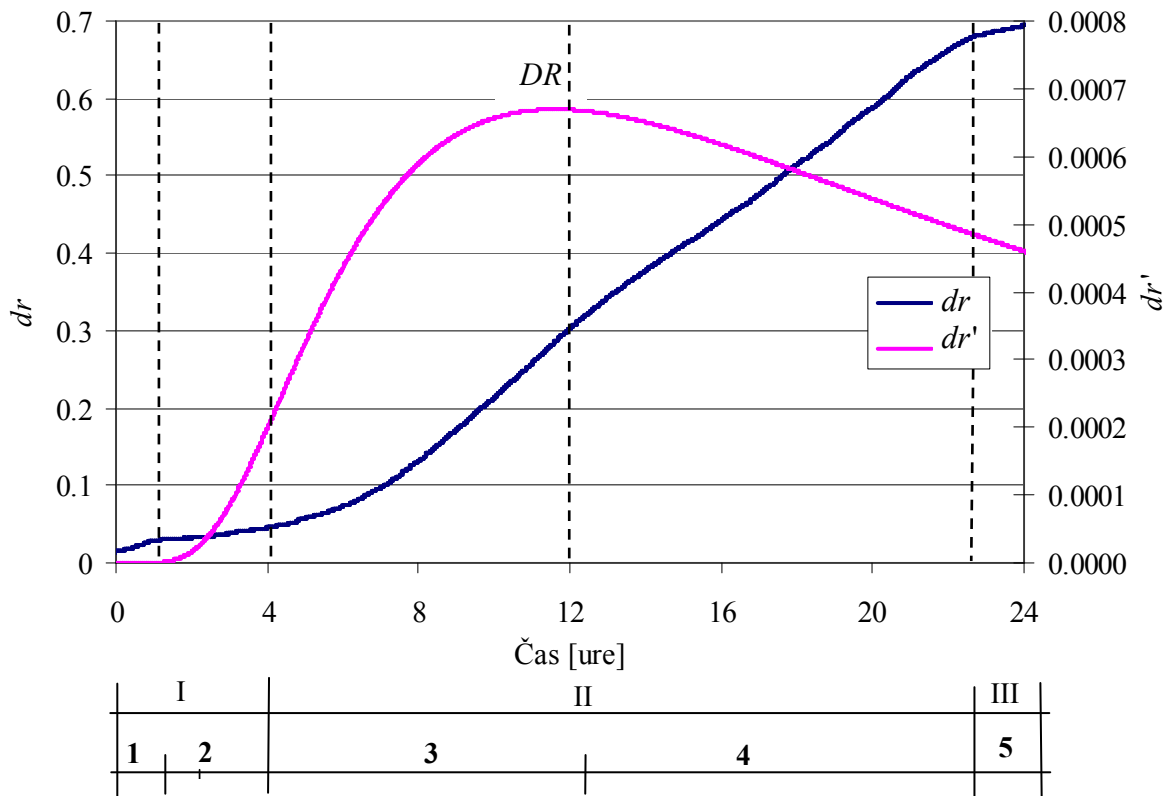
V fazi I so hidratizirajoči cementni delci naključno razporejeni v mešanici cementa in vode. Čeprav se v tej fazi že pričnejo formirati prvi hidratacijski produkti, pa se povezava med njimi še ne vzpostavi (poglavje 2.2.4). Ker se strižni valovi v taki raztopini ne prenašajo, vrednost strižnega odbojnega koeficienta v fazi I ne narašča bistveno.

Območje II (3, 4) Obdobje pospeševanja

Z nadaljevanjem hidratacijskega procesa po določenem času nastopi povezanost nastajajočih hidratacijskih produktov (slika 6.1b), kar rezultira v intenzivnem naraščanju strižnega odbojnega koeficienta. Deleža trdne in povezane trdne faze v cementni strukturi se v tem obdobju izrazito povečujeta, temu primerno pa se povečuje tudi vrednost strižnega odbojnega koeficienta.

Območje III (5) Obdobje umiritve

Po koncu območja II (podobmočja 4) se kljub nadaljnjemu povečevanju stopnje hidratacije α (slika 6.1) delež povezane trdne faze le še malenkostno povečuje. Temu primerno se tudi naraščanje vrednosti strižnega odbojnega koeficienta v tem obdobju skoraj umiri oziroma narašča izredno počasi.



Slika 6.5 Cementna pasta C1035, razvoj strižnega odbojnega koeficienta s časom in definicija karakterističnih območij na krivulji $dr-t$.

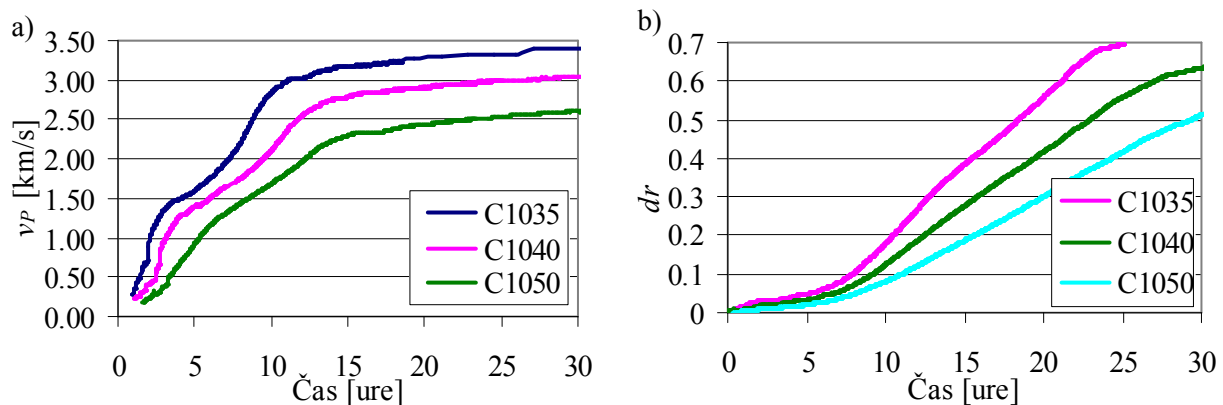
Figure 6.5 Cement paste C1035, the development of the shear wave reflection coefficient with time and definition of the characteristic stages on the $dr-t$ curve.

6.2.3 Vpliv različnih parametrov na potek krivulj v_p-t in $dr-t$

Slike 6.6 - 6.10 prikazujejo vpliv posameznih obravnavanih parametrov na potek naraščanja hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov v_p skozi cementne paste in strižnega odbojnega koeficienta dr .

Vpliv vodo/cementnega razmerja

Sliki 6.6 prikazujeta vpliv vodo/cementnega razmerja na potek veličin v_p in dr .

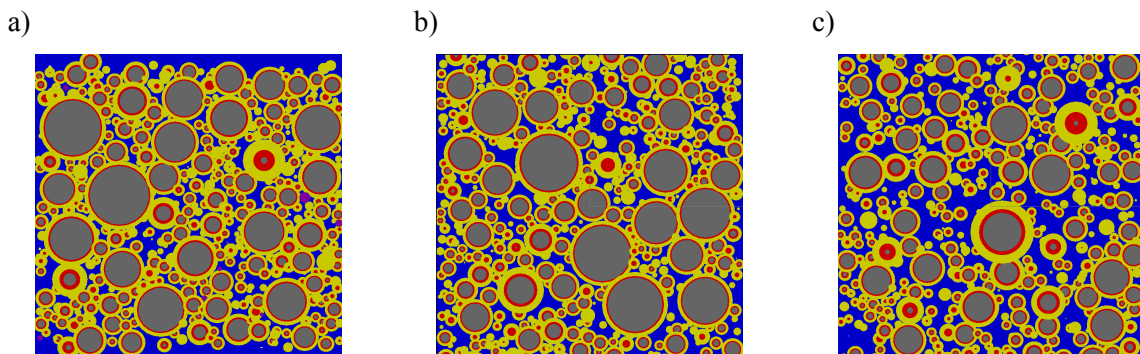


Slika 6.6 Vpliv razmerja v/c na razvoj a) hitrosti prehoda vzdolžnega ultrazvočnega valovanja skozi cementne paste in b) strižnega odbojnega koeficienta.

Figure 6.6 Influence of water/cement ratio on the development of a) ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves through cement pastes, b) ultrasonic shear wave reflection coefficient.

Z nižanjem vodo/cementnega razmerja se tako hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov kot vrednost strižnega odbojnega koeficienta povečujeta, kar je posledica gostejše strukture cementne paste v primeru nižjega vodo/cementnega razmerja (Hewlett 2004) ter večje količine nastalih hidratacijskih produktov oziroma večje količine trdne faze v strukturi cementne paste (slika 6.8a) (van Breugel 1991). Hitrost prehoda ultrazvočnih valov skozi materiale s cementnim vezivom je namreč v veliki meri odvisna od količine trdne faze in količine povezane trdne faze (Ye 2003).

Sliki 6.7 in 6.8 prikazujeta strukturo cementnih past C1035, C1040 in C1050 pri starosti 25 ur in razvoj trdne faze S oziroma količine hidratacijskih produktov s časom ter delež povezovalnih delcev B (poglavje 4.2.1) za cementne paste C1035, C1040 in C1050. Rezultati, prikazani na slikah 6.7 in 6.8, so izračunani z numeričnim programom Hymostruc. Iz slik 6.8a in 6.8b je razvidno, da je v primeru nižjega vodo/cementnega razmerja tako delež skupne trdne faze kot delež povezovalnih delcev večji, pri čemer je vpliv vodo/cementnega razmerja veliko izrazitejši v primeru deleža povezovalnih delcev.



Slika 6.7 Shematični prikaz strukture cementnih past pri starosti 25 ur (program Hymostruc),

a) pasta C1035, $\alpha = 0.20$, $S = 429.4 \text{ mm}^3/\text{g}$, $B = 37.4 \text{ mm}^3/\text{g}$,

b) pasta C1040, $\alpha = 0.21$, $S = 427.6 \text{ mm}^3/\text{g}$, $B = 33.6 \text{ mm}^3/\text{g}$,

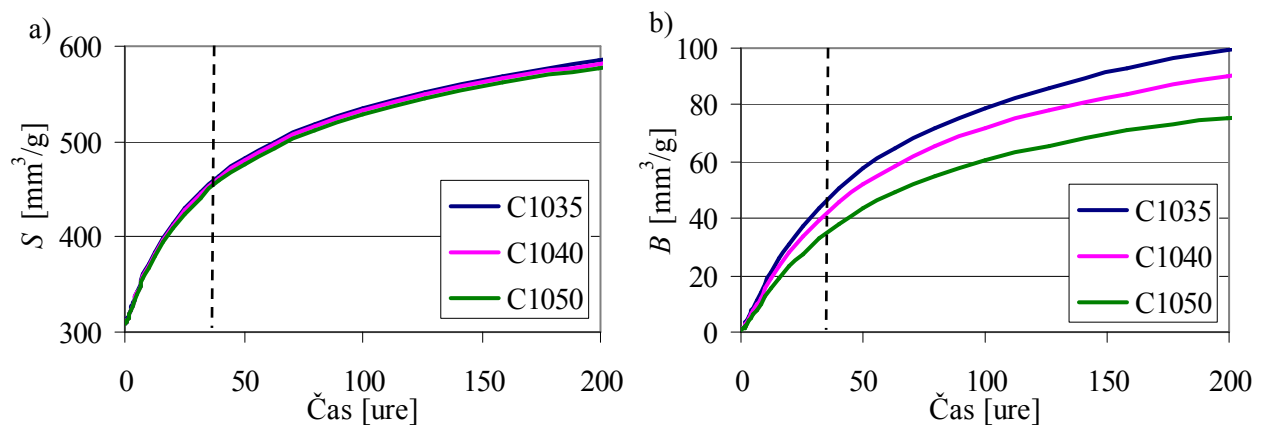
c) pasta C1050, $\alpha = 0.22$, $S = 424.2 \text{ mm}^3/\text{g}$, $B = 27.7 \text{ mm}^3/\text{g}$.

Figure 6.7 Schematic representation of the structure of cement pastes at time 25 hours (Hymostruc program),

a) cement paste C1035, $\alpha = 0.20$, $S = 429.4 \text{ mm}^3/\text{g}$, $B = 37.4 \text{ mm}^3/\text{g}$,

b) cement paste C1040, $\alpha = 0.21$, $S = 427.6 \text{ mm}^3/\text{g}$, $B = 33.6 \text{ mm}^3/\text{g}$,

c) cement paste C1050, $\alpha = 0.22$, $S = 424.2 \text{ mm}^3/\text{g}$, $B = 27.7 \text{ mm}^3/\text{g}$.



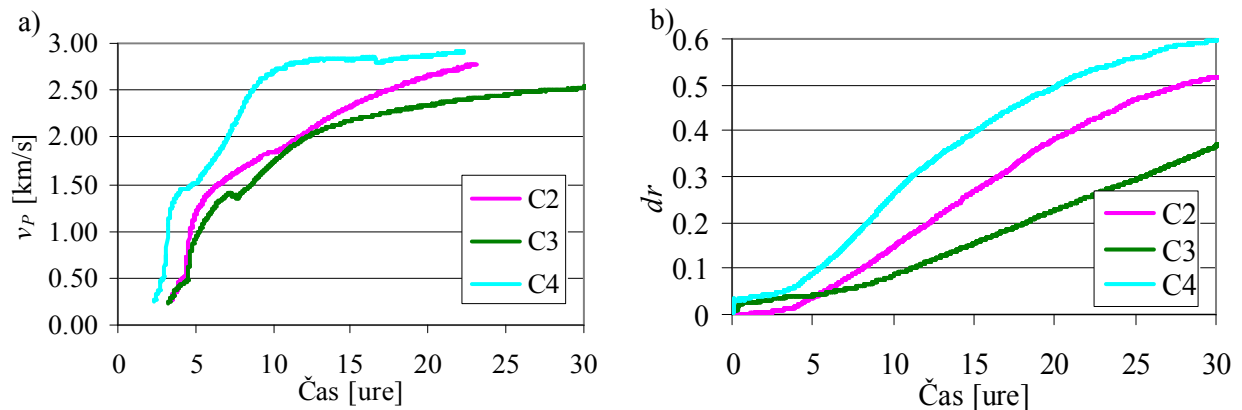
Slika 6.8 Vpliv vodo/cementnega razmerja na razvoj strukture cementnih past, a) količina trdne faze, b) količina povezovalnih delcev.

Figure 6.8 Influence of water/cement ratio on the development of structure of cement pastes, a) amount of the connected solid phase, b) amount of bridge volume.

Vpliv vrste cementa

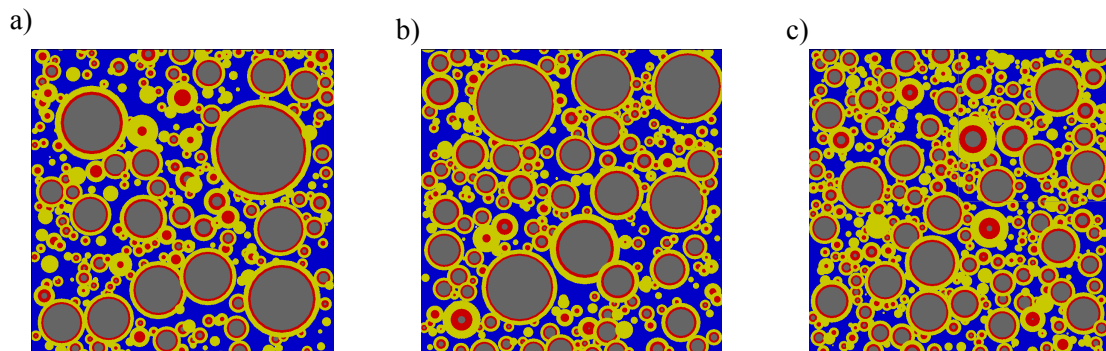
Sliki 6.9 prikazujeta vpliv vrste cementa na potek veličin v_p in dr . Pričakovano je hidratacijski proces in s tem formiranje strukture cementne paste najhitrejši v primeru uporabe cementa CEM I 52,5R (C4) z najvišjo specifično površino cementnih zrn in najpočasnejši v primeru uporabe cementa CEM I 42,5 N SR

z nižjo specifično površino cementnih zrn in ekstremno nizko vrednostjo minerala C_3A (sulfatno odporni cement) v strukturi cementnega klinkerja.



Slika 6.9 Vpliv vrste cementa na razvoj a) hitrosti prehoda vzdolžnega ultrazvočnega valovanja skozi cementne paste in b) strižnega odbojnega koeficienta.

Figure 6.9 Influence of cement type on the development of a) ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves through cement pastes, b) ultrasonic shear wave reflection coefficient.



Slika 6.10 Shematični prikaz strukture cementnih past pri starosti 25 ur (program Hymostruc),

a) pasta C2, $\alpha = 0.20$, $S = 421.3 \text{ mm}^3/\text{g}$, $B = 19.2 \text{ mm}^3/\text{g}$,

b) pasta C3, $\alpha = 0.22$, $S = 408.3 \text{ mm}^3/\text{g}$, $B = 19.7 \text{ mm}^3/\text{g}$,

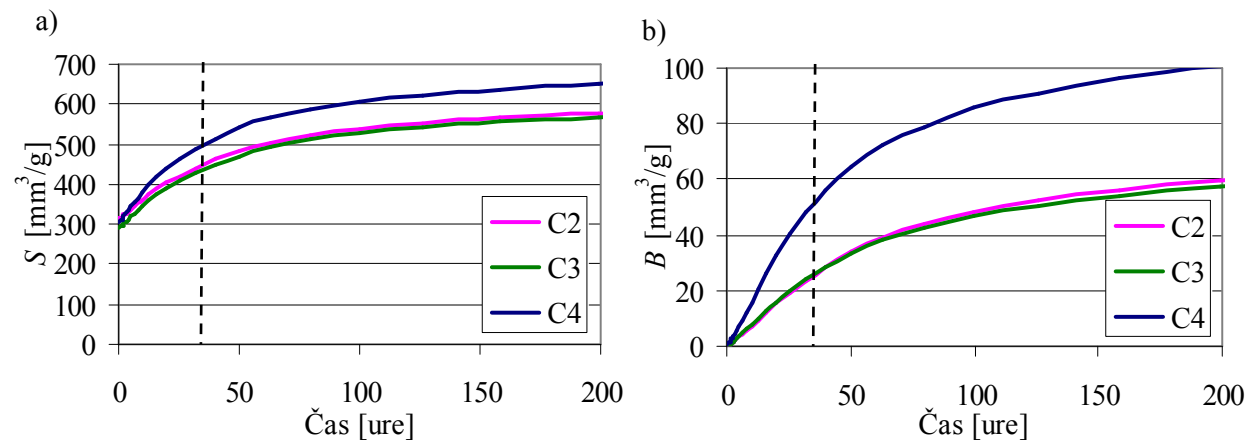
c) pasta C4, $\alpha = 0.27$, $S = 463.4 \text{ mm}^3/\text{g}$, $B = 40.1 \text{ mm}^3/\text{g}$.

Figure 6.10 Schematic representation of the structure of cement pastes at time 25 hours (Hymostruc program),

a) cement paste C2, $\alpha = 0.20$, $S = 421.3 \text{ mm}^3/\text{g}$, $B = 19.2 \text{ mm}^3/\text{g}$,

b) cement paste C3, $\alpha = 0.22$, $S = 408.3 \text{ mm}^3/\text{g}$, $B = 19.7 \text{ mm}^3/\text{g}$,

c) cement paste C4, $\alpha = 0.27$, $S = 463.4 \text{ mm}^3/\text{g}$, $B = 40.1 \text{ mm}^3/\text{g}$.



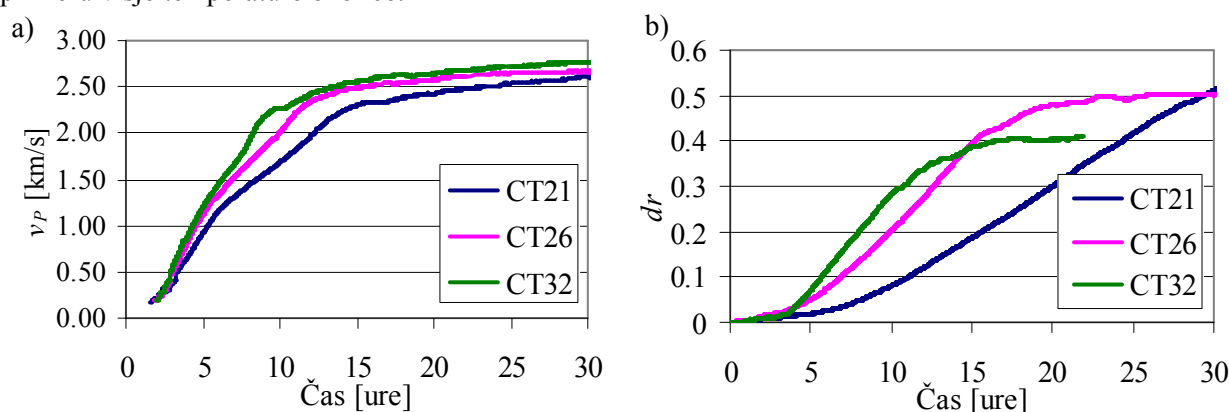
Slika 6.11 Vpliv vrste cementa na razvoj strukture cementnih past, a) količina trdne faze, b) količina povezovalnih delcev.

Figure 6.11 Influence of cement type on the development of structure of cement pastes, a) amount of the connected solid phase, b) amount of bridge volume.

Znano je (van Breugel 1991, Hewlett 2004), da višji delež minerala C_3A pospeši hidratacijski proces, predvsem v samem začetku (slika 2.3a). Sliki 6.10 in 6.11 prikazujeta strukturo cementnih past C2, C3 in C4 pri starosti 25 ur in razvoj trdne faze S oziroma količine hidratacijskih produktov s časom ter delež povezovalnih delcev B (poglavje 4.2.1) za cementne paste C2, C3 in C4. Rezultati, prikazani na slikah 6.10 in 6.11, so izračunani z numeričnim programom Hymostruc. Iz slik 6.11a in 6.11b je razvidno, je v primeru uporabe cementa CEM I 52,5R tako delež skupne trdne faze kot delež povezovalnih delcev precej večji kot v primeru uporabe drugih dveh tipov cementov.

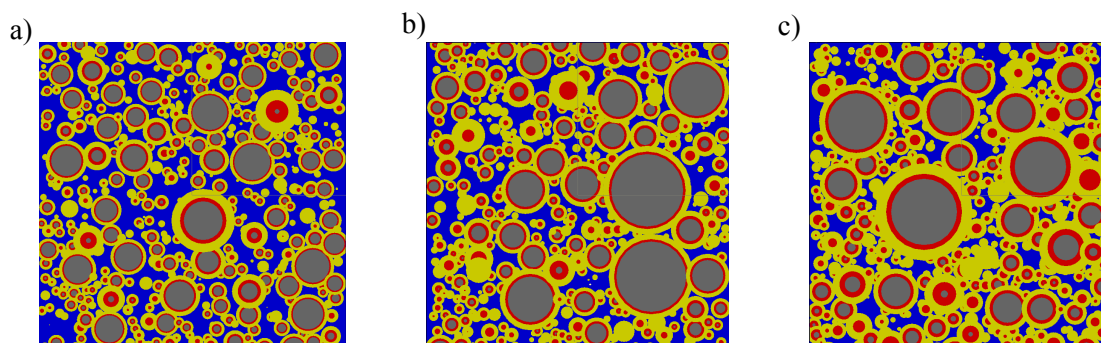
Vpliv temperature okolice

Sliki 6.12 prikazujeta vpliv temperature okolice na razvoj hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov in strižnega odbojnega koeficienta s časom. V začetni fazi hidratacijskega procesa sta obe količini večji v primeru višje temperature okolice.



Slika 6.12 Vpliv temperature okolice na potek naraščanja a) hitrosti prehoda vzdolžnega ultrazvočnega valovanja skozi cementne paste in b) strižnega odbojnega koeficienta.

Figure 6.12 Influence of curing temperature on the development of a) ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves through cement pastes, b) ultrasonic shear wave reflection coefficient.



Slika 6.13 Shematični prikaz strukture cementnih past pri starosti 25 ur (program Hymostruc),

a) pasta C1050, $\alpha = 0.22$, $S = 424.2 \text{ mm}^3/\text{g}$, $B = 27.7 \text{ mm}^3/\text{g}$,

b) pasta CT26, $\alpha = 0.31$, $S = 483.5 \text{ mm}^3/\text{g}$, $B = 45.9 \text{ mm}^3/\text{g}$,

c) pasta CT32, $\alpha = 0.40$, $S = 536.4 \text{ mm}^3/\text{g}$, $B = 62.4 \text{ mm}^3/\text{g}$.

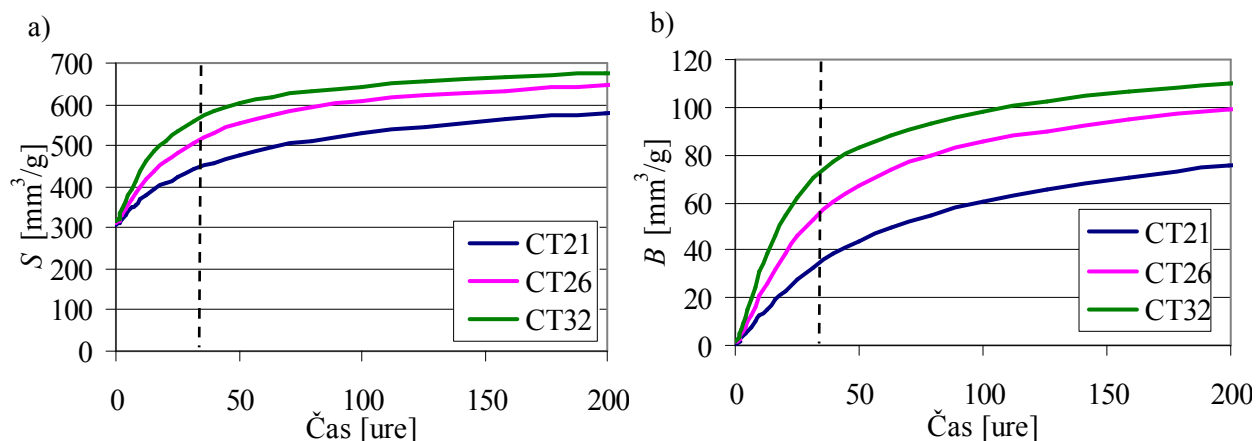
Figure 6.13 Schematic representation of the structure of cement pastes at time 25 hours (Hymostruc program),

a) cement paste C1050, $\alpha = 0.22$, $S = 424.2 \text{ mm}^3/\text{g}$, $B = 27.7 \text{ mm}^3/\text{g}$,

b) cement paste CT26, $\alpha = 0.31$, $S = 483.5 \text{ mm}^3/\text{g}$, $B = 45.9 \text{ mm}^3/\text{g}$,

c) cement paste CT32, $\alpha = 0.40$, $S = 536.4 \text{ mm}^3/\text{g}$, $B = 62.4 \text{ mm}^3/\text{g}$.

Rezultat je pričakovan, saj višje temperature okolice pospešijo hidratacijski proces in s tem nastajanje hidratacijskih produktov. V kasnejši fazi se krivulje v_p-t in $dr-t$ približujejo oziroma celo sekajo (slika 6.12b). To je posledica enakomernejšega poteka hidratacije v primeru nižjih temperatur okolice in s tem nastanek gostejših hidratacijskih produktov (van Breugel 1991, Hewlett 2004). Podoben efekt je opazen tudi pri merjenju hidratacijskega procesa z metodo adiabatne kalorimetrije (Trtnik 2008f) (poglavje 10). Razvidno je, da je vpliv temperature okolice veliko izrazitejši v primeru uporabe metode odboja strižnih ultrazvočnih valov.



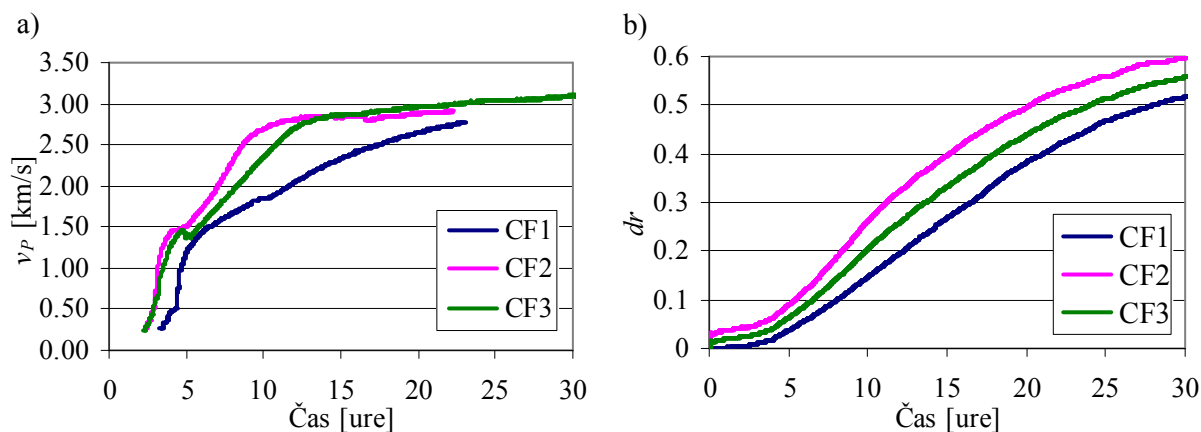
Slika 6.14 Razvoj strukture cementnih past v odvisnosti od temperature okolice, a) količina trdne faze, b) količina povezovalnih delcev.

Figure 6.14 Influence of curing temperature on the development of structure of cement pastes, a) amount of the connected solid phase, b) amount of bridge volume.

Sliki 6.13 in 6.14 prikazujeta strukturo cementnih past CT21, CT26 in CT32 pri starosti 25 ur in razvoj trdne faze S oziroma količine hidratacijskih produktov s časom ter delež povezovalnih delcev B (poglavje 4.2.1) za cementne paste CT21, CT26 in CT32. Rezultati, prikazani na slikah 6.13 in 6.14, so izračunani z numeričnim programom Hymostruc. Razvidno je, da sta v primeru višje temperature okolice tako delež skupne trdne faze kot delež povezovalnih delcev precej večja kot v primeru nižje temperature okolice.

Vpliv finosti mletja cementa

Vpliv finosti mletja cementa na potek krivulj v_p-t in $dr-t$ je prikazan na slikah 6.15. Pričakovano sta obe količini, tako v_p kot dr , pri določenem času večji v primeru večje specifične površine cementnih zrn in obratno. Večja finost mletja cementa namreč pospeši nastajanje hidratacijskih produktov v strukturi cementne paste med potekom hidratacijskega procesa (van Breugel 1991, Hewlett 2004). Vpliv finosti mletja cementa na tvorbo količine hidratacijskih produktov in povezovalnih delcev je razviden tudi iz slik 6.11⁴.



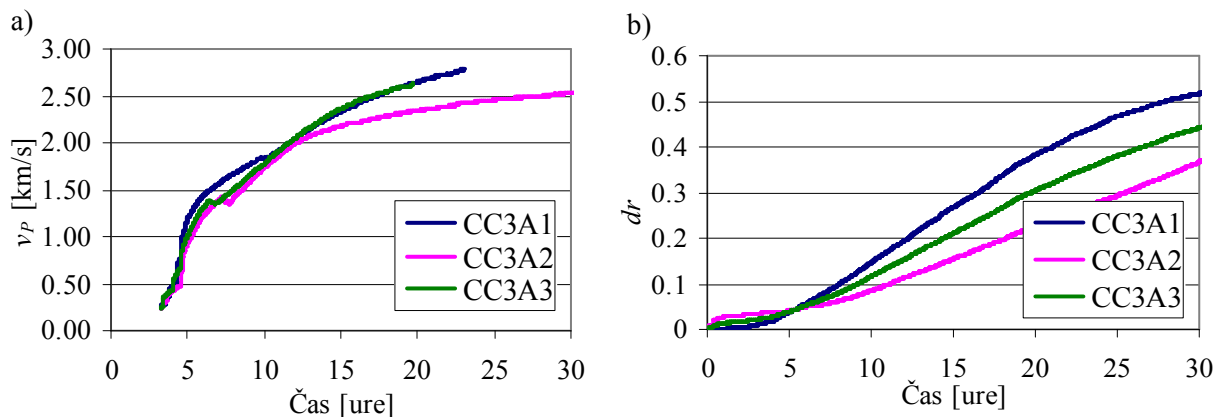
Slika 6.15 Vpliv finosti mletja cementa na potek naraščanja a) hitrosti prehoda vzdolžnega ultrazvočnega valovanja skozi cementne paste in b) strižnega odbojnega koeficienta.

Figure 6.15 Influence of cement fineness on the development of a) ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves through cement pastes, b) ultrasonic shear wave reflection coefficient.

⁴ Sestava cementov CEM I 52,5R (oznaka C4) in CEM I 42,5N (C2) je precej podobna, bistveno pa se razlikujeta v finosti mletja (preglednice 5.1 - 5.3).

Vpliv deleža minerala C_3A

Sliki 6.16 prikazujeta vpliv deleža minerala C_3A na potek krivulj v_p-t in $dr-t$. Znano je (van Breugel 1991, Hewlett 2004, Schindler 2004), da mineral C_3A pospeši proces hidratacije cementa, še posebej v zgodnjem hidratacijskem obdobju (slika 2.3a). Tudi v tem primeru sta torej obe metodi korektno zaznali vpliv deleža minerala C_3A v strukturi cementnega klinkerja.



Slika 6.16 Vpliv deleža minerala C_3A na potek naraščanja a) hitrosti prehoda vzdolžnega ultrazvočnega valovanja skozi cementne paste in b) strižnega odbojnega koeficienta.

Figure 6.16 Influence of C_3A content on the development of a) ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves through cement pastes, b) ultrasonic shear wave reflection coefficient.

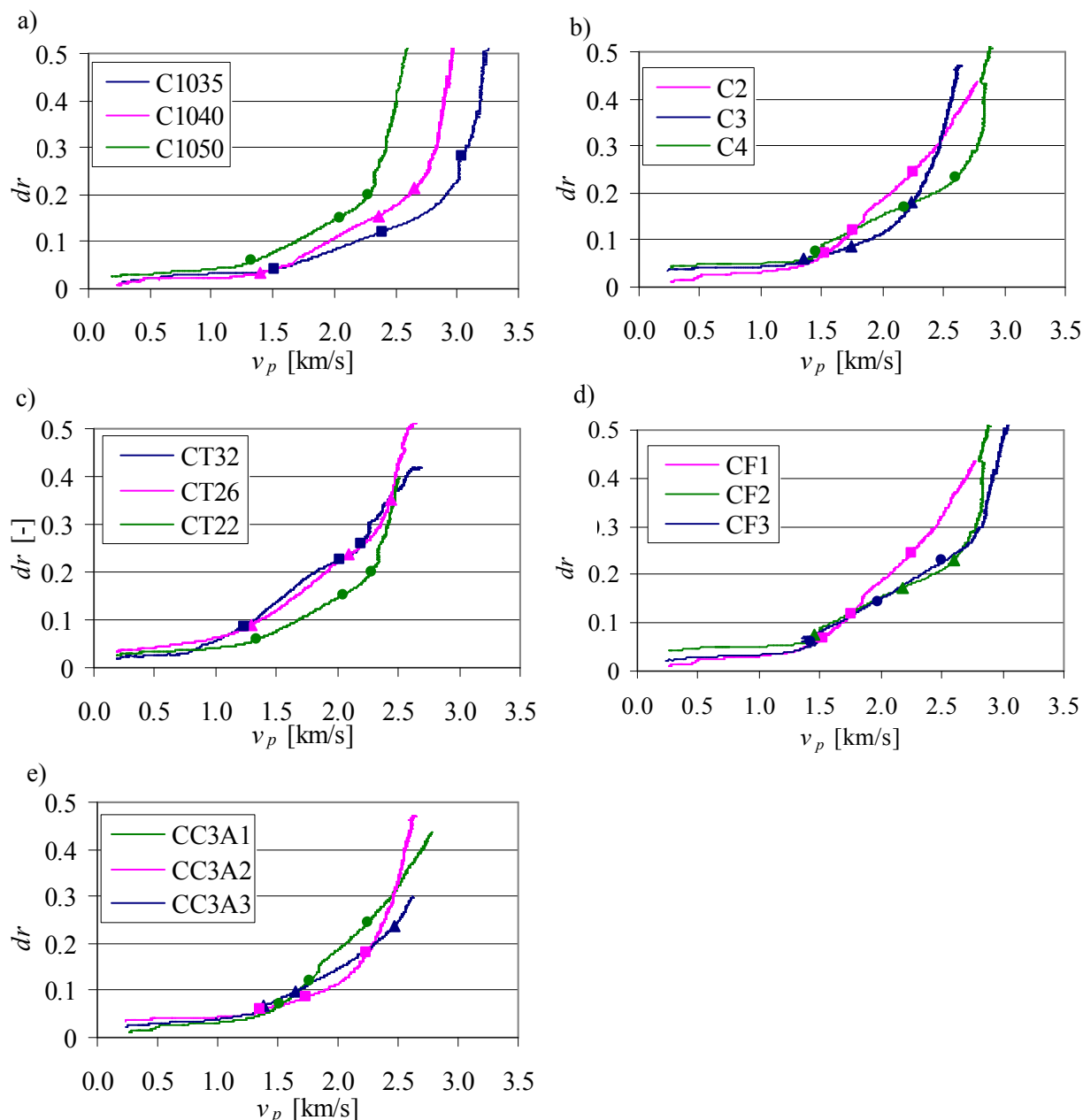
6.2.4 Primerjava krivulj v_p-t in $dr-t$

Eksperimentalni rezultati so pokazali, da tako metoda prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov kot metoda odboja strižnih ultrazvočnih valov zelo dobro opišeta potek hidratacijskega procesa in formiranja strukture poljubne cementne paste, je pa sama oblika krivulj v_p-t in $dr-t$ precej različna, kar izhaja tako iz fizikalne narave obnašanja dveh različnih tipov ultrazvočnih valov kot iz same metode. Slike 6.17 prikazujejo neposredno primerjavo med vrednostmi v_p in dr v določenem času za vse obravnavane cementne paste posebej.

Razvidno je, da lahko posamezno krivuljo $v_p - dr$ v splošnem razdelimo na tri območja. V prvi fazi hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov v_p skozi cementne paste izrazito narašča, medtem ko je vrednost strižnega odbojnega koeficienta dr skoraj konstantna. To je posledica večje občutljivosti vzdolžnih ultrazvočnih valov na formiranje strukture cementne paste v prvem obdobju hidratacijskega procesa (poglavje 6.2.1). V tej fazi ima cementa pasta stanje t.i. Binghamove tekočine, skozi katero pa se strižni valovi ne prenašajo (poglavje 6.2.2). Ko hitrost v_p doseže vrednost okrog 1.40 – 1.50 km/s, začne vrednost strižnega odbojnega koeficienta intenzivno naraščati, pri čemer hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov še vedno narašča. Po določenem času, odvisno od strukture posamezne cementne paste, se začne hitrost v_p umirjati, medtem ko vrednost strižnega odbojnega koeficienta dr še vedno intenzivno narašča. Iz slik 6.17 vidimo, da zveza $v_p - dr$ ni enolična, kar kaže, da sta oba tipa ultrazvočnega valovanja različno občutljiva na posamezne parametre oziroma strukturo cementne paste. Krivulje $v_p - dr$ se najbolj razlikujejo v primeru različnih v/c razmerij (slika 6.17a).

Odvajanje krivulj v_p-t in $dr-t$ pokaže, da imajo vse krivulje v_p-t po dve, krivulje $dr-t$ pa po eno izrazito prevojno točko (sliki 6.2 in 6.5). Preglednica 6.1 prikazuje karakteristike druge prevojne točke $PT2$ (slika 6.2) na krivuljah v_p-t in karakteristike prevojne točke DR (slika 6.5) na krivuljah $dr-t$. Ti dve točki določata čas in vrednost maksimalne hitrosti naraščanja hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih

valov in strižnega odbojnega koeficienta ter sta na slikah 6.17 prikazani kot druga in tretja točka na posamezni krivulji $v_p - dr$. Vloga prve točke na krivuljah $v_p - dr$ je razložena v poglavju 8.2.5.



Slika 6.17 Vpliv posameznih obravnavanih parametrov na zvezo $v_p - dr$, a) vpliv v/c razmerja, b) vpliv vrste cementa, c) vpliv temperature okolice, d) vpliv finosti mletja cementa, e) vpliv deleža C_3A .

Figure 6.17 Influence of discussed parameters on the relationship $v_p - dr$, a) influence of water/cement ratio, b) influence of cement type, c) influence of curing temperature, d) influence of cement fineness, e) influence of amount of C_3A .

Časi in vrednosti posameznih odvodov sovpadajo s predhodnimi ugotovitvami o vplivu posameznih obravnavanih parametrov na potek hidratacije oziroma formiranja strukture hidratizirajočih se cementnih past. Tako je maksimalna vrednost odvodov PT_2 in DR večja v primeru nižjega vodo/cementnega razmerja, višje temperature okolice, večje specifične površine cementnih zrn in višjega deleža vsebnosti minerala C_3A v cementnem klinkerju. Prav tako je maksimalna vrednost odvoda najvišja v primeru uporabe cementa CEM I 52,5R (C4) in najnižja v primeru uporabe cementa tipa CEM I 42,5 N SR (C3). Podobno je vrednost maksimalne hitrosti naraščanja strižnega odbojnega koeficienta in hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi cementne paste dosežena najhitreje v primeru nižjega

vodo/cementnega razmerja, višje temperature okolice, večje finosti mletja cementnih zrn, večjega deleža minerala C_3A v cementnem klinkerju in v primeru uporabe cementa tipa CEM I 52,5R. Iz preglednice 6.1 je razvidno, da je v vseh primerih čas maksimalne hitrosti naraščanja strižnega odbojnega koeficienta dr daljši kot čas maksimalne hitrosti naraščanja hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi cementne paste v_p .

Preglednica 6.1 Karakteristike prevojnih točk na krivuljah v_p-t in $dr-t$.

Table 6.1 Characteristics of inflection points on v_p-t and $dr-t$ curves.

Oznaka mešanice	Čas pojava prevojne točke [ure]		Vrednost odvoda	
	t_{PT2}	t_{DR}	$PT2$	DR
C1035	8.5	12.3	0.39	0.040
C1040	11.0	12.8	0.26	0.036
C1050	12.5	14.6	0.16	0.028
CT22	12.5	14.6	0.16	0.028
CT26	10.4	13.4	0.22	0.042
CT32	8.3	8.5	0.35	0.045
C2	8.9	14.1	0.17	0.024
C3	10.0	16.7	0.16	0.017
C4	7.6	9.2	0.40	0.036
CF1	8.9	14.1	0.17	0.024
CF2	7.6	9.2	0.40	0.036
CF3	8.1	10.2	0.20	0.030
CC3A1	8.9	14.1	0.17	0.024
CC3A2	10.0	16.7	0.16	0.017
CC3A3	9.0	16.5	0.16	0.019

Odvodi vseh krivulj v_p-t ter vloga in karakteristike prvih prevojnih točk na krivuljah v_p-t so prikazani v poglavju 8.

6.3 BETONSKE MEŠANICE

6.3.1 Maksimalno zrno agregata 4 mm

Slike 6.18 prikazujejo vpliv vodo/cementnega razmerja, količine agregata v betonu, vrste cementa v betonu in vrste agregata v betonu na potek razvoja hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov v_p s časom. Prikazani rezultati so bili določeni z inštrumentom Pundit, velikost maksimalnega zrna agregata pa je v vseh primerih znašala 4 mm.

Iz slike 6.18a je razvidno, da je, podobno kot v primeru samih cementnih past, tudi v primeru betonskih mešanic pri določenem času hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi material pričakovano višja v primeru nižjega vodo/cementnega razmerja.

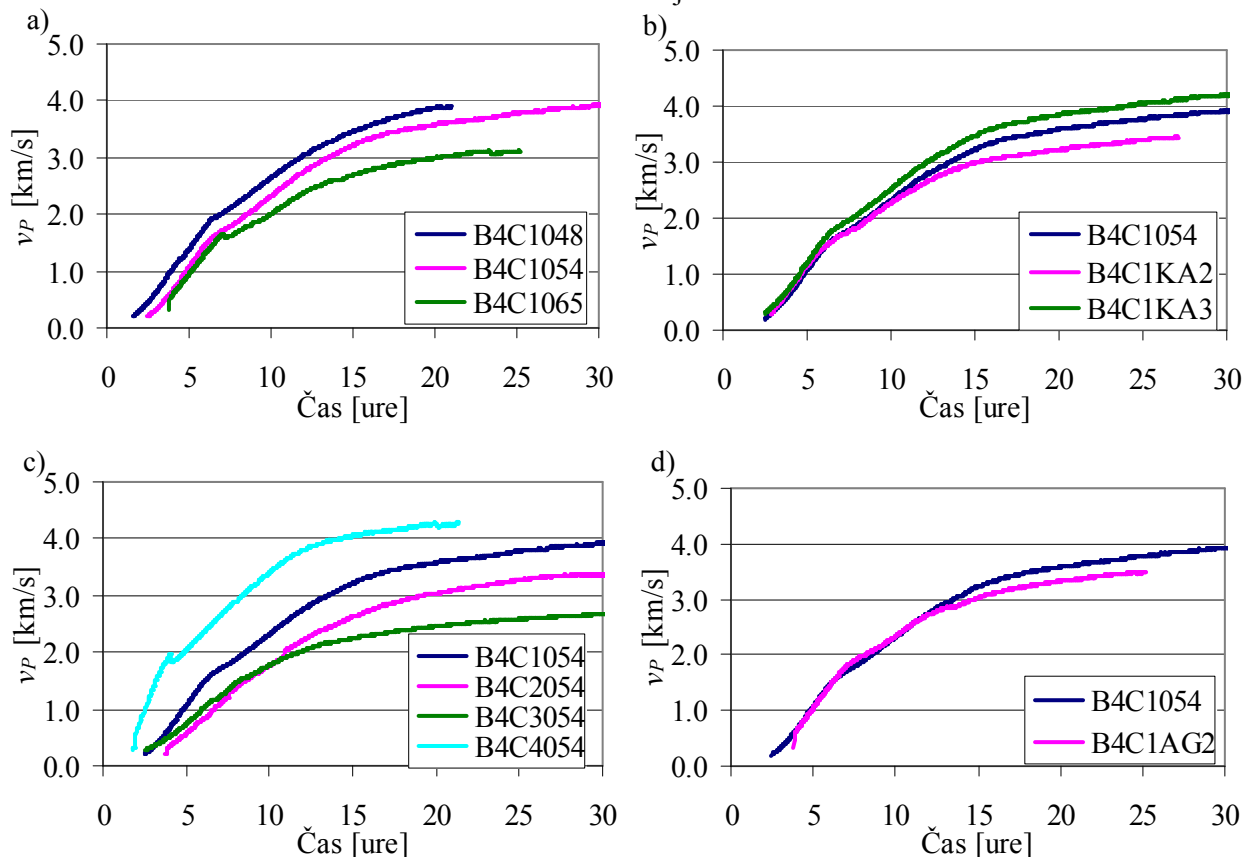
Nadalje opazimo, da se z večanjem vsebnosti agregata v betonu hitrost prehoda ultrazvoka skozi beton povečuje (slika 6.18b), kar je v skladu z ugotovitvami drugih raziskovalcev (Berriman s sodelavci 2005, Abo-Qudais 2004, del Rio 2004), ki so analizirali vpliv količine agregata v betonu na strjenih betonskih vzorcih. Omenjen fenomen je razviden tudi iz formule za izračun hitrosti prehoda ultrazvoka v_p skozi beton, ki jo je predlagal Ye (2003):

$$\frac{1}{v_p} = \frac{V_{pasta}}{v_{pasta}} + \frac{V_{agregat}}{v_{agregat}}, \quad (6.1)$$

kjer sta V_{pasta} in $V_{agregat}$ volumska deleža cementne paste in agregata v betonski strukturi, v_{pasta} in $v_{agregat}$ pa hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi cementno pasto in mineralni agregat.

Pričakovano je hitrost prehoda ultrazvoka skozi beton močno odvisna tudi od vrste uporabljenega cementa v betonu. Le-ta je podobno kot v primeru čiste cementne paste najvišja v primeru uporabe cementa tipa CEM I 52,5R (B4C4054) in najnižja v primeru uporabe cementa tipa CEM I 42,5 N SR (B4C3054).

Slika 6.18d prikazuje vpliv vrste agregata v betonu na razvoj hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton s časom. Razvidno je, da je v primeru agregata apnenčevega izvora (B4C1054) hitrost v_p nekoliko večja kot v primeru uporabe agregata kvarcinitno karbonatnega izvora. Ta fenomen je posledica strukture oziroma gostote omenjenih dveh kamnin (poglavje 5.1.3). Do podobnih ugotovitev je prišel tudi Lorenzi s sodelavci (2007), pri čemer je vpliv vrste agregata v betonu na potek hitrosti vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton analiziral na strjenih betonskih vzorcih.



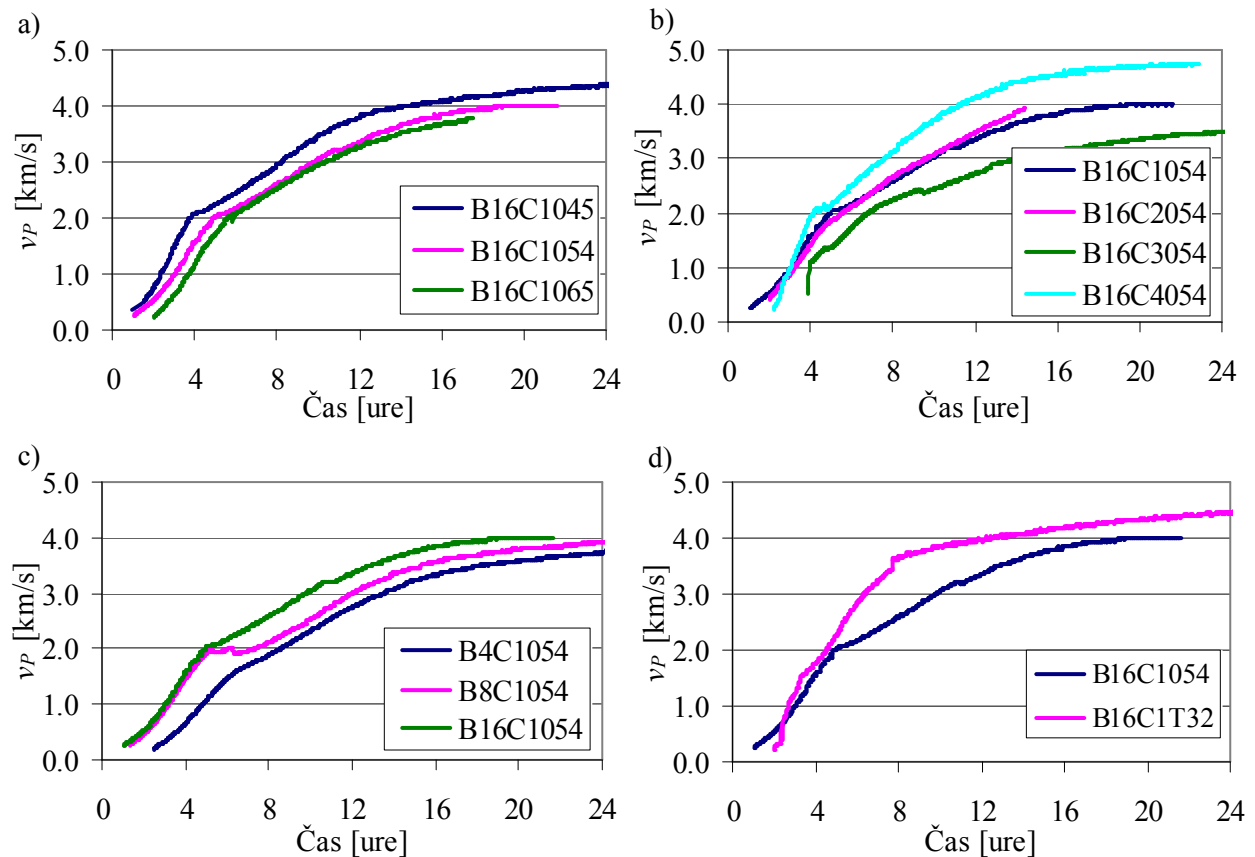
Slika 6.18 Vpliv posameznih obravnavanih parametrov na razvoj hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov s časom za betone z maksimalnim zrnom agregata 4 mm, a) vpliv vodo/cementnega razmerja, b) vpliv količine agregata v betonu, c) vpliv vrste cementa v betonu, d) vpliv vrste agregata v betonu.

Figure 6.18 Influence of the discussed parameters on the development of ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves for concrete mixtures with maximum nominal aggregate size 4 mm, a) influence of water/cement ratio, b) influence of amount of aggregate, c) influence of cement type, d) influence of aggregate type.

6.3.2 Maksimalno zrno agregata do 16 mm

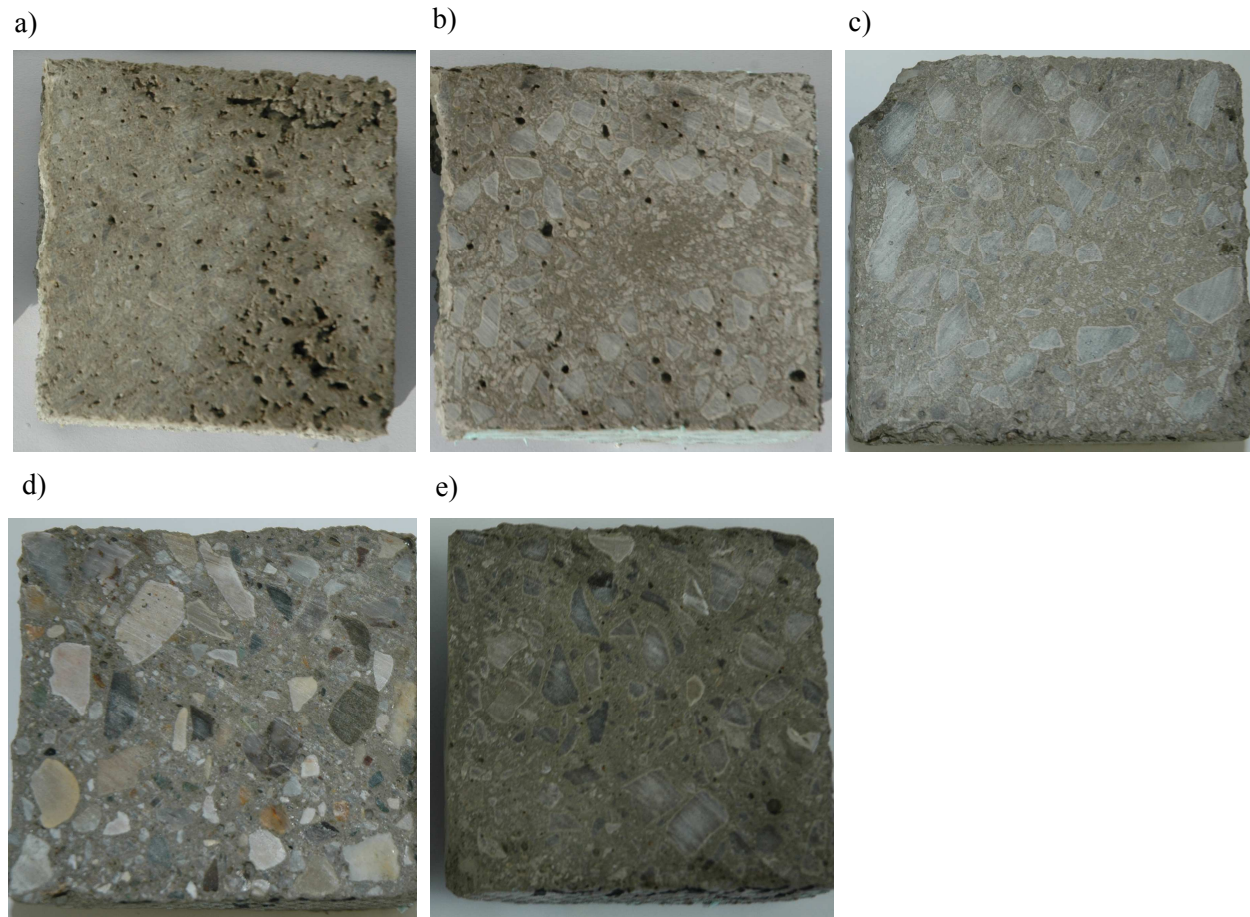
Slike 6.19 prikazujejo vpliv različnih parametrov na potek hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov s časom za betone z maksimalnim zrnem agregata do 16 mm. Podobno kot v primeru betona z maksimalnim zrnem agregata 4 mm (poglavje 6.3.1) je hitrost v_p v določenem času večja pri betonu z nižjim vodo/cementnim razmerjem (slika 6.19a) in pri uporabi cementa tipa CEM I 52,5R (slika 6.19 b). Slika 6.19c prikazuje vpliv velikosti maksimalnega zrna agregata v betonu na hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton. Vidimo, da je pri določenem času hitrost v_p večja pri betonu z večjim maksimalnim zrnem agregata in obratno. Do podobnih ugotovitev sta prišla tudi Abo-Qudais (2004) in Rio s sodelavci (2004), pri čemer sta vpliv maksimalnega zrna agregata v betonu na potek hitrosti vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton analizirala na strjenih betonskih vzorcih. Pričakovano je hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov višja tudi v primeru višje temperature okolice, kateri je bil beton izpostavljen med procesom hidratacije (slika 6.19 d).

Slike 6.20 prikazujejo prečni prerez različnih betonskih vzorcev, na katerih so bile opravljene preiskave prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi betone. Dimenzije vzorcev so bile $80 \times 80 \times 80$ mm.



Slika 6.19 Vpliv posameznih obravnavanih parametrov na razvoj hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov s časom za betone z maksimalnim zrnem agregata 16 mm, a) vpliv vodo/cementnega razmerja, b) vpliv vrste cementa v betonu, c) velikosti maksimalnega zrna agregata, d) vpliv temperature okolice.

Figure 6.19 Influence of the discussed parameters on the development of ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves for concrete mixtures with maximum nominal aggregate size 16 mm, a) influence of water/cement ratio, b) influence of cement type, c) influence of maximum nominal aggregate size, d) influence of curing temperature.



Slika 6.20 Prečni prerez nekaterih betonskih vzorcev, uporabljenih za določitev hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov, a) maksimalno zrna agregata 4 mm, b) maksimalno zrno agregata 8 mm, c) maksimalno zrno agregata 16 mm, d) agregat kvarcitrno karbonatnega izvora, e) manj agregata v betonu.

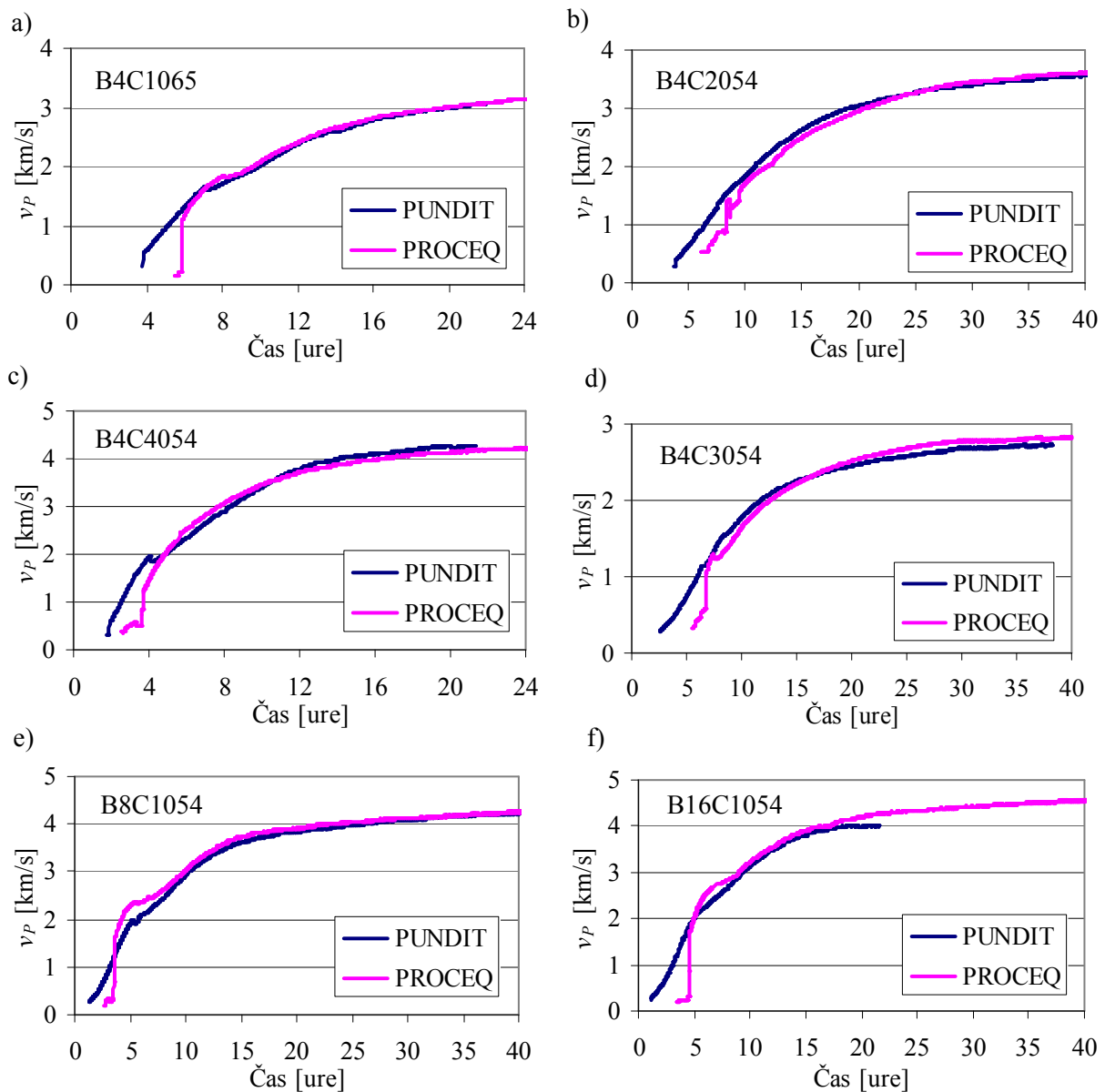
Figure 6.20 Cross section of some of concrete specimens, used for determination of ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves, a) maximum nominal aggregate size 4 mm, b) maximum nominal aggregate size 8 mm, c) maximum nominal aggregate size 16 mm, d) quartzite carbonate aggregate, e) lower amount of aggregate content.

6.4 PRIMERJAVA KRIVULJ v_p-t ZA CEMENTNO PASTO IN BETON

Iz primerjave slik 6.6a, 6.9a, 6.12a, 6.15a in 6.16a, ter slik 6.18 in 6.19 je razvidno, da metoda prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov korektno opiše vpliv posameznih parametrov na proces hidratacije oziroma formiranja strukture tako v primeru samih cementnih past kot v primeru različnih betonskih mešanic. V vseh primerih hitrost prehoda ultrazvoka kontinuirno narašča s časom, začetna vrednost hitrosti pa znaša okrog 300 m/s (poglavje 6.2.1). V primeru betonskih mešanic je pri določenem času hitrost prehoda vzdolžnega ultrazvočnega valovanja pričakovano višja kot v primeru same cementne paste, kar je posledica višje hitrosti skozi kamnino, iz katere so posamezna agregatna zrna v betonu (apnenec, kvarcit karbonat, poglavje 5), kot pa hitrosti skozi čisto cementno pasto. Nadalje opazimo, da v primeru betonskih mešanic prevojnne točke niso tako izrazite kot v primeru čiste cementne paste.

6.5 VPLIV VRSTE INŠTRUMENTA NA KRIVULJE v_p-t

Slike 6.21 prikazujejo vpliv vrste inštrumenta na razvoj hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi različne betonske mešanice. Pri tem sta bila uporabljena inštrumenta proizvajalcev Proceq in Pundit, katerih osnovne karakteristike so navedene v poglavju 3.1.2.



Slika 6.21 Vpliv vrste inštrumenta na razvoj krivulj v_p-t , a) mešanica B4C1065, b) mešanica B4C2054, c) mešanica B4C4054, d) mešanica B4C3054, e) mešanica B8C1054, f) mešanica B16C1054.

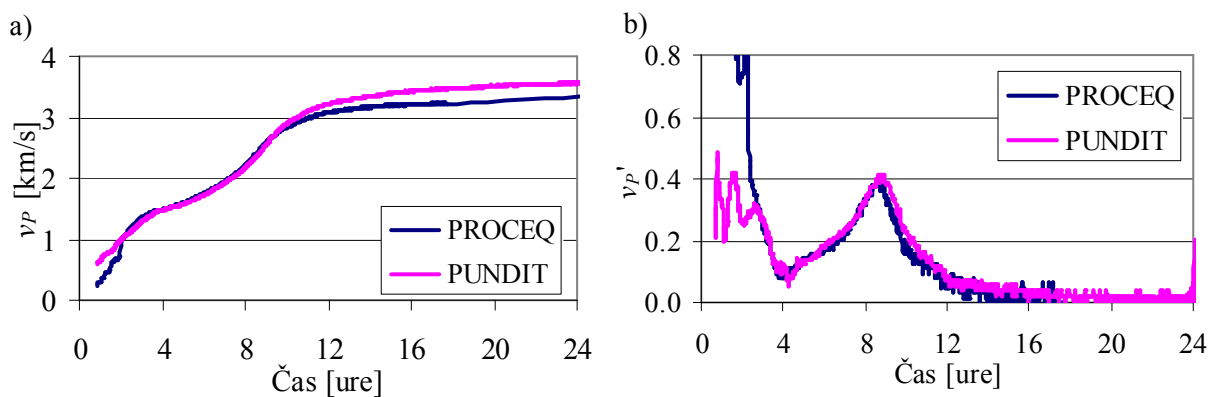
Figure 6.21 Influence of instrument type on the development of v_p-t curves, a) mixture B4C1065, b) mixture B4C2054, c) mixture B4C4054, d) mixture B4C3054, e) mixture B8C1054, f) mixture B16C1054.

Razvidno je, da je inštrument Pundit prej zaznal prehod ultrazvočnih valov skozi betonske mešanice, hitrost naraščanja teh valov pa je potekala kontinuirno od samega začetka merjenja. V primeru inštrumenta Proceq se je začetek merjenja pojavil nekoliko kasneje, takoj po začetku pa je opaziti izrazitejši skok v hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton. Le-ta je tem večji, čim večja je velikost maksimalnega zrna agregata D v betonu. To je posledica različnih premerov Φ ultrazvočnih sond pri inštrumentih Proceq in Pundit (poglavje 3.1.2). Premer sond pri inštrumentu Pundit znaša 51 mm in tako omogoča večjo merilno površino betonske mešanice, kar je še posebej pomembno pri večjih agregatnih zrnih v betonski mešanici. Pri meritvah v zgodnji fazi heterogenega vzorca so namreč pomembne naslednje karakteristike: premer sonde Φ , premer agregata D , razdalja L_p med oddajno in sprejemno sondo ter valovna dolžina λ . V primeru, ko je razmerje D/Φ večje od neke določene vrednosti $(D/\Phi)_{krit}$ in dolžina L_p manjša od kritične vrednosti $(L_p)_{krit}$, se pojavi izrazit skok na krivulji hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov s časom. Meritve v tem režimu so sicer zanimive v smislu

razumevanja samega dogajanja in delovanja metode. S povečanjem razdalje L_p so omenjeni hitri prehodi izginili.

Po določenem času (okrog 8 ur) je oblika krivulje v_p-t neodvisna od vrste uporabljenega inštrumenta, hitrosti prehoda ultrazvočnih valov, izmerjene z obema inštrumentoma, pa so skoraj identične v vseh primerih.

Slika 6.22 prikazuje vpliv omenjenih inštrumentov na potek krivulje v_p-t in njenega odvoda $v_p'-t$ v primeru cementnih past. Na sliki je prikazana le primerjava med krivuljama v_p-t in $v_p'-t$ za cementno pasto C1035. Razvidno je, da vrsta inštrumenta ni bistveno vplivala na rezultate meritev ter da predvsem obe prevojni točki praktično popolnoma sovpadata. Podobne ugotovitve so bile opazne tudi pri vseh drugih analiziranih cementnih pastah.



Slika 6.22 Vpliv vrste inštrumenta na razvoj a) krivulje v_p-t za cementno pasto C1035, b) krivulje $v_p'-t$ za cementno pasto C1035.

Figure 6.22 Influence of instrument type on the development of the a) v_p-t curve for cement paste C1035, b) $v_p'-t$ curve for cement paste C1035.

6.6 ANALIZA PONOVLJIVOSTI MERITEV

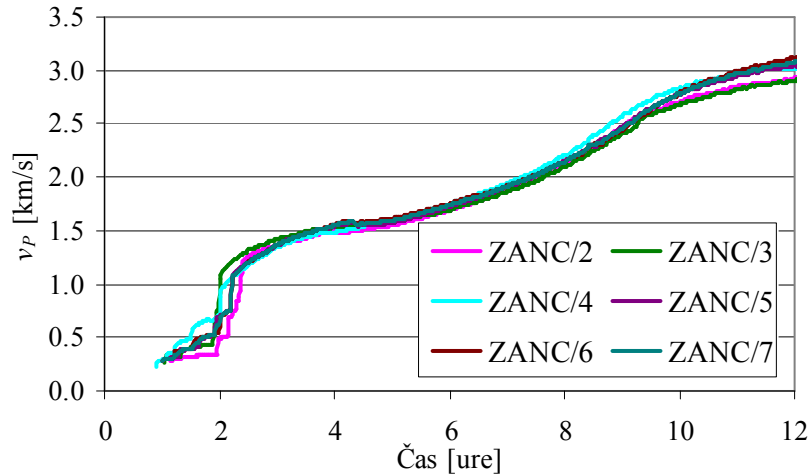
6.6.1 Uvod

Odraž dobre in zanesljive eksperimentalne metode je seveda tudi njena ponovljivost, s katero ocenimo zanesljivost samih eksperimentalnih rezultatov. V ta namen smo pripravili več vzorcev (mešanic) z enakimi karakteristikami. V primeru cementnih past so bile meritve ponovljene 6-krat na mešanicah z oznako C1035, v primeru betonskih mešanic pa po štirikrat za mešanice z maksimalnim zrnem 4 mm in 16 mm.

6.6.2 Cementne paste

Slika 6.23 prikazuje razvoj hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov s časom skozi šest enakih vzorcev cementnih past. Razvidno je, da je potek vseh krivulj v_p-t precej podoben. Nekoliko večja odstopanja so opazna na samem začetku merjenja, kar je posledica malenkostnih razlik pri namestitvi merilnih sond na začetku merjenja. Po določenem času (približno 2.5 ure) je potek vseh krivulj precej podoben. Meritve so bile opravljene tako z inštrumentom Proceq kot z inštrumentom Pundit.

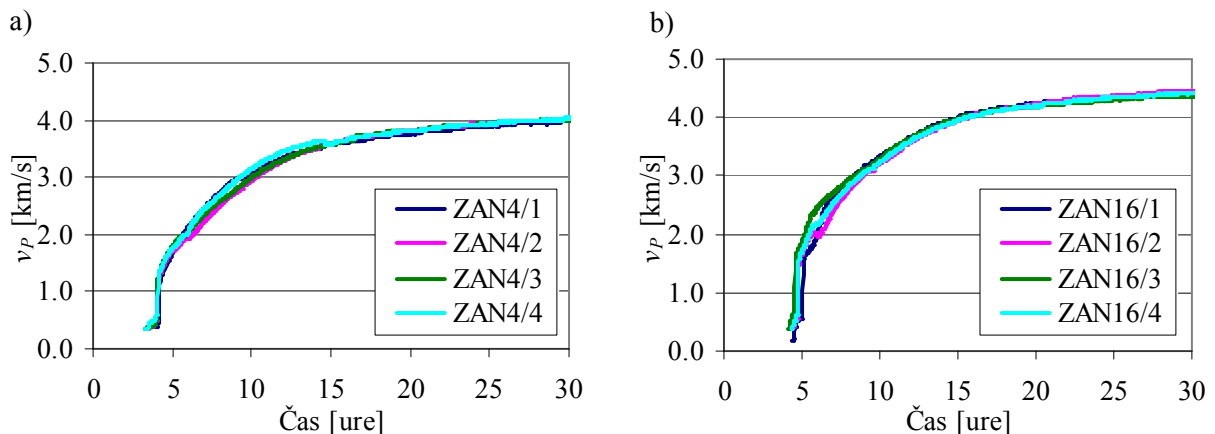
V nadaljevanju je prikazana podrobnejša statistična analiza ponovljivosti pojava prve prevojne točke na krivuljah v_p-t (poglavje 8.2.3).



Slika 6.23 Ponovljivost uporabljene metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov – cementne paste.
Figure 6.23 Reproducibility of the ultrasonic wave transmission method, used in the study – cement pastes.

6.6.3 Beton

Sliki 6.24 prikazujeta razvoj hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov s časom skozi štiri betonske vzorce z enakimi karakteristikami v primeru velikosti maksimalnega zrna agregata 4 mm (slika 6.24a) in 16 mm (slika 6.24b). Razvidno je, da je potek krivulj v_p-t v obeh primerih precej podoben. Meritve so bile opravljene z inštrumentom Proceq.



Slika 6.24 Ponovljivost uporabljene metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov – betonske mešanice, a) maksimalno zrno agregata 4 mm, b) maksimalno zrno agregata 16 mm.
Figure 6.24 Reproducibility of the ultrasonic wave transmission method, used in the study – concrete mixtures, a) maximum aggregate size 4 mm, b) maximum aggregate size 16 mm.

6.7 SKLEPI

V tem poglavju so prikazani rezultati določanja hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov v_p skozi različne materiale s cementnim vezivom pri zgodnji starosti. Dodatno je prikazana možnost uporabe metode odboja strižnih ultrazvočnih valov oziroma spreminjanja vrednosti strižnega odbojnega koeficienta dr za spremljanje razvoja hidratacijskega procesa in formiranja strukture različnih cementnih past.

Pokazano je, da lahko z obema ultrazvočnima metodama ob primerni eksperimentalni opremi in ustrezni računalniški podpori korektno spremljamo razvoj hidratacijskega procesa materialov s cementnim

vezivom. Obe metodi zadovoljivo upoštevata vpliv različnih parametrov sestave materiala in pogojev okolja na potek formiranja strukture materiala med hidratacijskim procesom.

Avtomatski zapis posameznih meritev v dovolj kratkih časovnih intervalih omogoča razdelitev krivulj v_p-t in $dr-t$ na pet območij in pokaže pojav dveh izrazitih prevojnih točk na krivulji v_p-t in ene prevojne točke na krivulji $dr-t$. Neposredna primerjava krivulj v_p-t in $dr-t$ pokaže, da lahko krivuljo v_p-dr razdelimo na tri tipična območja. V prvi fazi se vrednost dr ne spreminja bistveno, medtem ko hitrost v_p že intenzivno narašča. Ko hitrost v_p doseže vrednost okrog 1450 m/s, kar približno ustreza vrednosti hitrosti v_p skozi vodo, začne tudi vrednost dr intenzivno naraščati. Po določenem času se vrednost v_p postopoma umirja, medtem ko vrednost dr še vedno intenzivno narašča. Razlike med krivuljama v_p-t in $dr-t$ so posledica tako fizikalne narave obeh tipov ultrazvočnega valovanja kot tudi same eksperimentalne metode.

Metodo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov odlikuje velika ponovljivost, kar je pomembna karakteristika vsake uporabne eksperimentalne metode.

Podobno kot v primeru samih cementnih past lahko z metodo prehoda ultrazvočnih valov korektno spremljamo razvoj hidratacijskega procesa in formiranja strukture različnih betonskih mešanic. Hitrost v_p je v tem primeru odvisna tudi od količine agregata v betonu, vrste agregata in velikosti maksimalnega zrna agregata in je v splošnem višja od hitrosti v_p v primeru čiste cementne paste.

7. MATERIALI V STRJENEM STANJU

7.1 UVOD

Določitev hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi betonske preskušance je opisana v standardu SIST EN 12504-4:2004 (2004) (poglavje 3.3.7), destruktivna preiskava tlačne trdnosti betona pa v standardu SIST EN 12390-3:2002 (2002) (poglavje 3.3.5). Za določitev hitrosti prehoda ultrazvoka skozi strjene betonske vzorce in za določitev tlačne trdnosti betonskih vzorcev smo uporabili betonske mešanice, ki so prikazane v preglednici 7.1. Pri tem smo analizirali vpliv več parametrov na velikost hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov v_p [km/s] in dejanske tlačne trdnosti betona TT [N/mm²], in sicer:

1. vpliv količine agregata v betonu KA;
2. vpliv vrste agregata v betonu MA;
3. vpliv velikosti maksimalnega zrna agregata v betonu MAX;
4. vpliv oblike agregatnih zrn OA;
5. vpliv vrste cementa v betonu TC;
6. vpliv vodo/cementnega razmerja v/c ;
7. vpliv temperature okolice T_o .

Pri vsaki betonski mešanici smo pripravili po 12 preskušancev v obliki kocke s stranico 15 cm, ki smo jih preiskali pri starosti 1, 2, 3 in 7 dni. Pri tem smo pri posamezni starosti hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov in tlačno trdnost betona določili na treh preskušancih, kot reprezentativne vrednosti velikosti hitrosti prehoda ultrazvoka v_p in tlačne trdnosti TT pa so bile upoštevane povprečne vrednosti treh rezultatov. Pri vsakem betonskem preskušancu je bil najprej izmerjen čas prehoda ultrazvočnega valovanja skozi betonski preskušanec, nato pa izvedena destruktivna preiskava tlačne trdnosti betona.

Preglednica 7.1 Oznake betonskih mešanic za določitev tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton - vzorci v obliki kocke 150/150/150 mm.

Table 7.1 Labels of concrete mixtures, used for the determination of compressive strength and ultrasonic pulse velocity - specimen sizes 150/150/150 mm.

parameter	oznake mešanic				
vrsta cementa	B16C1054	B16C2054	B16C3054	B16C4054	-
razmerje v/c	B16C1040	B16C1045	B16C1050	B16C1054	B16C1065
	B16C1KA2040	B16C1KA2	B16C1KA2065	-	-
	B16C1KA3040	B16C1KA3	B16C1KA3065	-	-
temperatura okolice	B16C1T-1	B16C1T10	B16C1054	-	-
količina agregata	B16C1KA2040	B16C1040	B16C1KA3040	-	-
	B16C1KA2	B16C1054	B16C1KA3	-	-
	B16C1KA32065	B16C1065	B16C1KA3065	-	-
	B16C1KA2MA2	B16C1MA2	B16C1KA3MA2	-	-
maks. zrno agregata	B4C1054	B8C1054	B16C1054	B32C1054	-
oblika agregata	B16C1054	B16C1OA2	-	-	-
vrsta agregata	B16C1KA2	B16C1KA2MA2	-	-	-
	B16C1054	B16C1MA2	-	-	-
	B16C1KA3	B16C1KA3MA2	-	-	-

V okviru eksperimentalnega dela smo pri določenih betonskih mešanicah (preglednica 7.2) pripravili tudi po tri preskušance v obliki prizem dolžine 400 mm s prečnim prerezemom 100/100 mm, na katerih smo določali statični elastični modul betona E_s (poglavje 3.3.2), dinamični elastični modul betona E_d in

dinamični strižni modul betona G (poglavje 3.3.1). Na istih vzorcih smo izmerili tudi hitrost prehoda ultrazvoka skozi beton v_p [km/s].

Preglednica 7.2 Oznake mešanic za določitev statičnega elastičnega modula, dinamičnega elastičnega modula in strižnega modula betona.

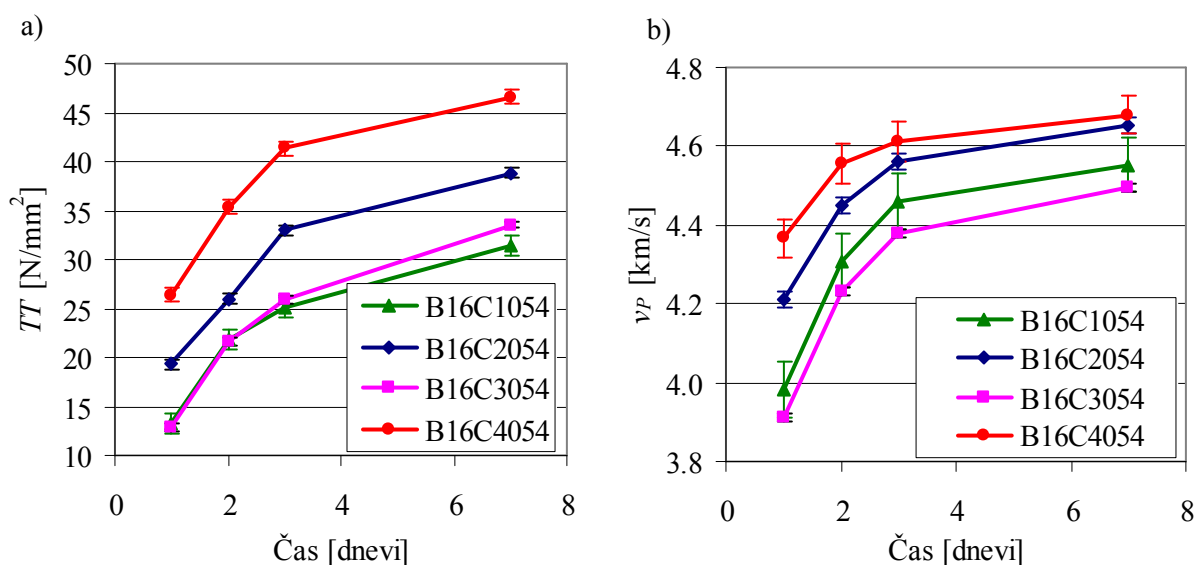
Table 7.2 Labels of concrete mixtures, used for the determination of static Young's modulus, dynamic Young's modulus and shear modulus of concrete.

parameter	oznake mešanic			
vrsta cementa	B16C1054	B16C2054	B16C3054	B16C4054
količina agregata	B16C1054	B16C1KA2	B16C1KA3	-
maks. zrno agregata	B4C1054	B8C1054	B16C1054	B32C1054
oblika agregata	B16C1054	B16C1OA2	-	-
vrsta agregata	B16C1054	B16C1MA2	-	-

7.2 EKSPERIMENTALNI REZULTATI

7.2.1 Vpliv vrste cementa

Vpliv vrste uporabljenih cementov na razvoj tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda ultrazvoka skozi betone s časom je razviden iz slike 7.1.



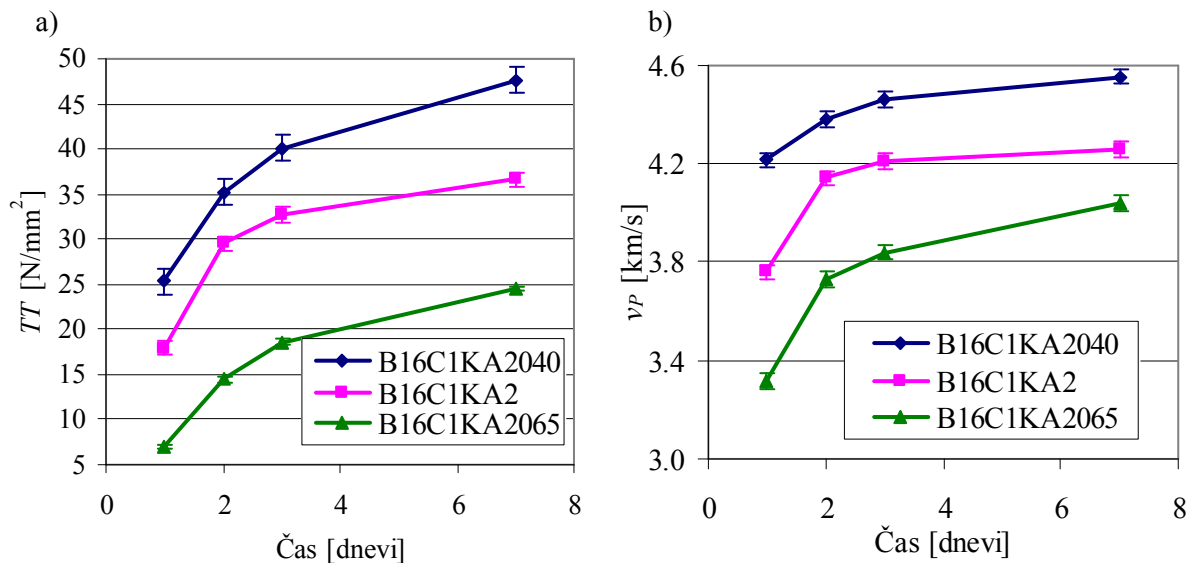
Slika 7.1 Vpliv vrste cementa v betonu na razvoj a) tlačnih trdnosti betona, b) hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton.

Figure 7.1 Influence of cement type on the development of a) concrete compressive strength, b) ultrasonic pulse velocity.

V ta namen smo primerjali betonske mešanice z oznakami B16C1054, B16C2054, B16C3054 in B16C4054. Pričakovano so bile tlačne trdnosti najvišje v primeru uporabe cementa CEM I 52,5R (krivulja B16C4054), nekoliko nižje tlačne trdnosti so bile dosežene z uporabo cementa CEM I 42,5N (krivulja B16C2054), najnižje tlačne trdnosti pa so bile dosežene z uporabo cementov CEM II/A-S 42,5R (krivulja B16C1054) in CEM I 42,5 N SR (krivulja B16C3054). Hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov je bila najvišja v primeru uporabe cementa C4 in najnižja v primeru uporabe cementa C3 (poglavje 6.2.3).

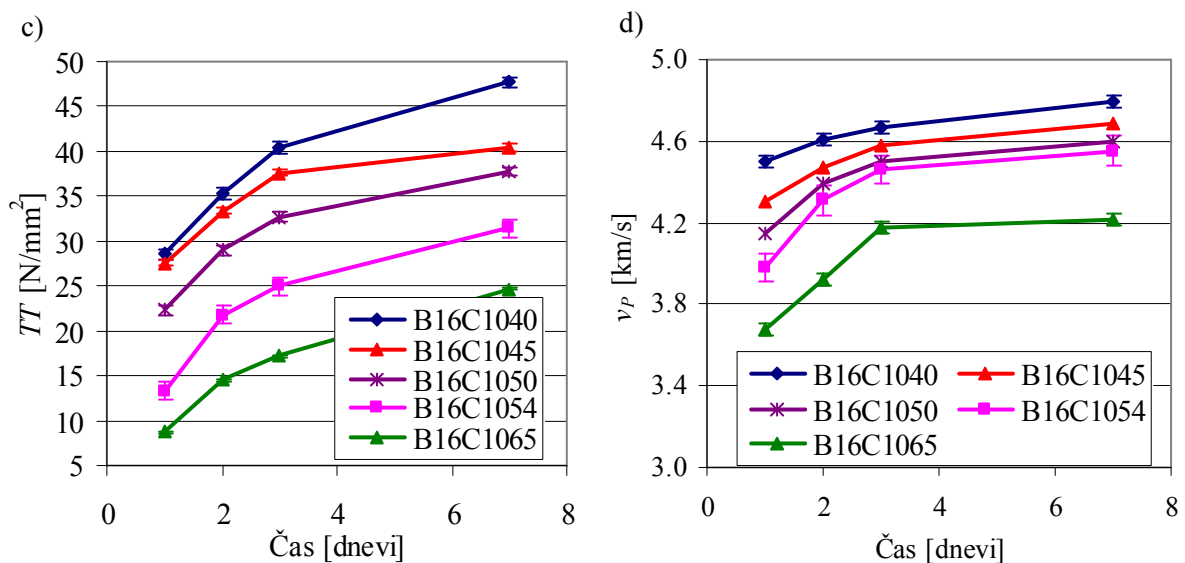
7.2.2 Vpliv vodo/cementnega razmerja

Vpliv v/c razmerja na razvoj tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda ultrazvoka skozi betone je razviden iz slik 7.2.



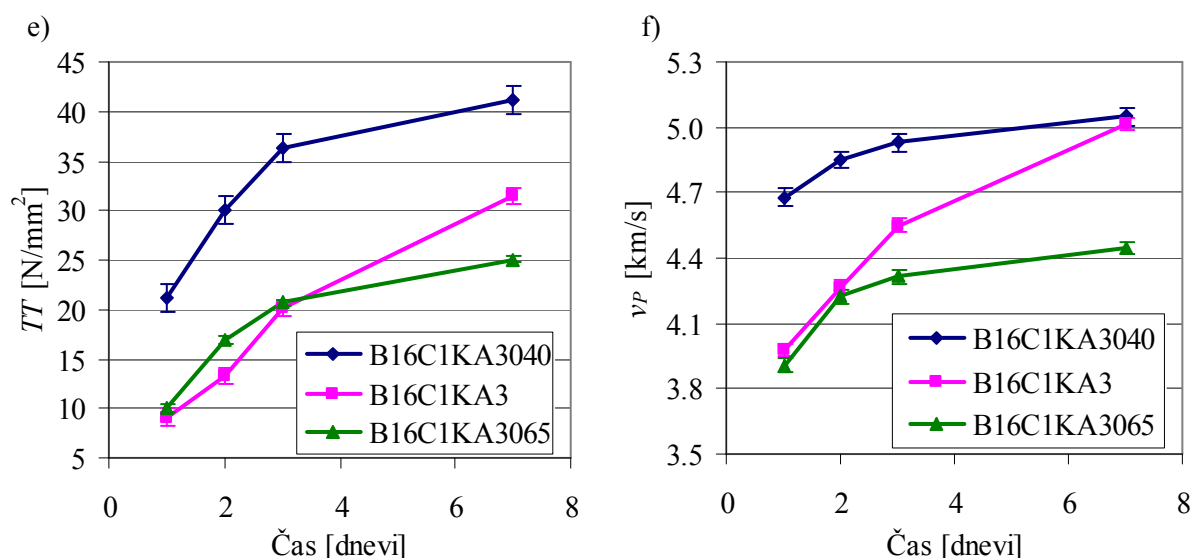
Slika 7.2/1 Vpliv v/c razmerja na razvoj tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda ultrazvoka skozi betone, a) tlačne trdnosti, količina agregata v betonu 1500 kg/m³, b) hitrost prehoda ultrazvoka, količina agregata v betonu 1500 kg/m³.

Figure 7.2/1 Influence of aggregate content on the development of concrete compressive strength and ultrasonic pulse velocity, a) compressive strength, amount of aggregate 1500 kg/m³, b) ultrasonic pulse velocity, amount of aggregate 1500 kg/m³.



Slika 7.2/2. Vpliv v/c razmerja na razvoj tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda ultrazvoka skozi betone, c) tlačne trdnosti, količina agregata v betonu 1850 kg/m³, d) hitrost prehoda ultrazvoka, količina agregata v betonu 1850 kg/m³.

Figure 7.2/2. Influence of aggregate content on the development of concrete compressive strength and ultrasonic pulse velocity, c) compressive strength, amount of aggregate 1850 kg/m³, d) ultrasonic pulse velocity, amount of aggregate 1850 kg/m³.



Slika 7.2/3. Vpliv v/c razmerja na razvoj tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda ultrazvoka skozi betone, e) tlačne trdnosti, količina agregata v betonu 2130 kg/m^3 , f) hitrost prehoda ultrazvoka, količina agregata v betonu 2130 kg/m^3

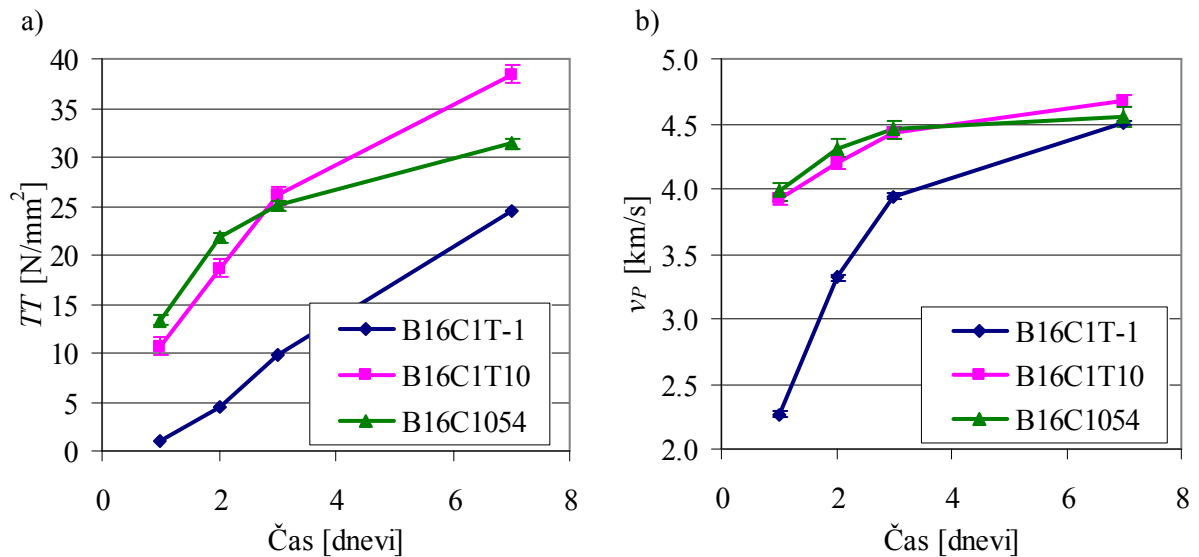
Figure 7.2/3. Influence of aggregate content on the development of concrete compressive strength and ultrasonic pulse velocity, e) compressive strength, amount of aggregate 2130 kg/m^3 , f) ultrasonic pulse velocity, amount of aggregate 2130 kg/m^3 .

Za ugotavljanje vpliva v/c razmerja smo uporabili mešanice z oznakami B16C1040, B16C1045, B16C1050, B16C1054, B16C1065 (količina agregata v betonu 1850 kg/m^3), B16C1KA2040, B16C1KA2, B16C1KA2065 (količina agregata v betonu 1500 kg/m^3) ter B16C1KA3040, B16C1KA3 in B16C1KA3065 (količina agregata v betonu 2130 kg/m^3). Pričakovano so v vseh primerih tlačne trdnosti najvišje v primeru najnižjega v/c razmerja in obratno (Mehta 1986, van Breugel 1991, Abo Qudais 2004).

Hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov je bila v vseh primerih najvišja v primeru najnižjega v/c razmerja in obratno (poglavje 6.2.3).

7.2.3 Vpliv temperature okolice

Vpliv temperature okolice na razvoj tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda ultrazvoka skozi betone je razviden iz slike 7.3. Tu smo uporabili mešanice z oznakami B16C1T-1, B16C1T10 in B16C1054. Pričakovano so tako začetne tlačne trdnosti betona kot hitrost prehoda ultrazvoka skozi beton najvišje v primeru najvišje temperature okolice in obratno. Sčasoma se ta razlika manjša, po približno treh dneh pa so tlačne trdnosti in hitrost prehoda ultrazvoka skozi beton, ki je bil izpostavljen temperaturi okolice 10°C , celo višje kot v primeru betona, ki je bil vseskozi izpostavljen temperaturi okolice 20°C . Ta fenomen je v strokovni literaturi znan pod imenom "cross-over effect" (Schindler 2002, Emborg 1989, van Breugel 1991, Korhonen 2002) in je posledica bolj umerjene hidratacije in gostejših hidratacijskih produktov v primeru nižje temperature okolice (van Breugel 1991, Hewlett 2004). Podoben efekt je opazen tudi pri zasledovanju procesa formiranja strukture cementne paste z metodo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov in z metodo odboja strižnih ultrazvočnih valov (poglavje 6.2.3, slika 6.12) ter pri merjenju procesa hidratacije z adiabatno kalorimetrijo (poglavje 10).

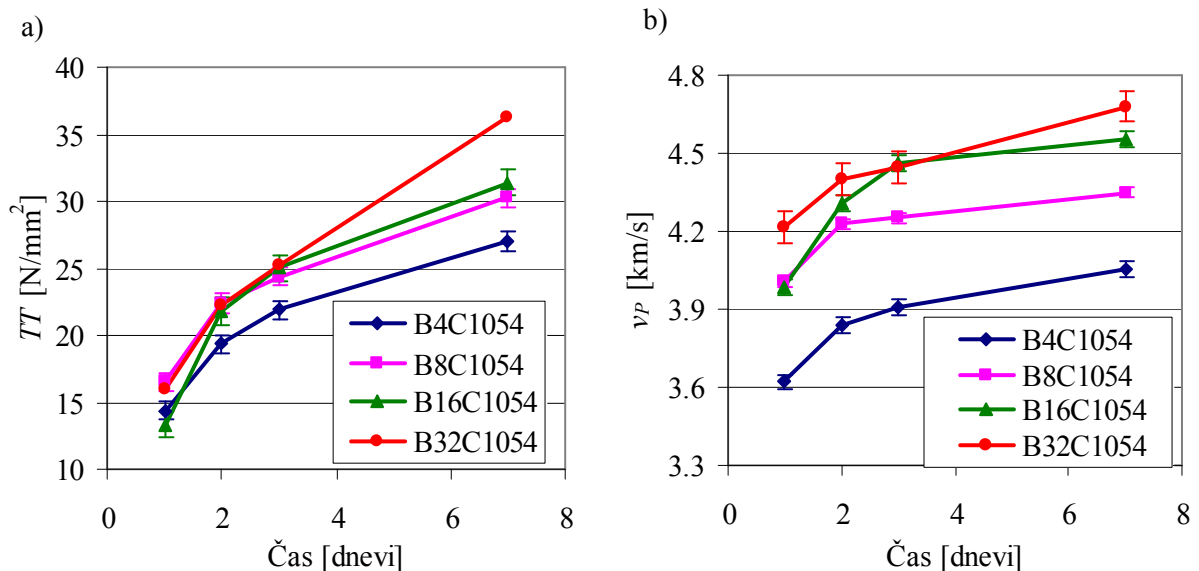


Slika 7.3 Vpliv temperature okolice na razvoj a) tlačnih trdnosti betona, b) hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton.

Figure 7.3 Influence of curing temperature on the development of a) concrete compressive strength, b) ultrasonic pulse velocity.

7.2.4 Vpliv velikosti maksimalnega zrna agregata

Slika 7.4 prikazuje vpliv velikosti maksimalnega zrna agregata na razvoj tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton. Tu smo uporabili mešanice z oznakami B4C1054, B8C1054, B16C1054 in B32C1054. Tlačne trdnosti betona so višje v primeru največjega zrna agregata in obratno. Do podobnih ugotovitev sta prišla tudi Zhou s sodelavci (1995) in Suwanvitaya s sodelavci (2006). Rezultat ni presenetljiv, saj je pri enaki volumski vsebnosti agregata v betonu skupna stična površina med cementno pasto in agregatnimi zrni v primeru manjšega zrna agregata večja kot v primeru večjih agregatnih zrn.



Slika 7.4 Vpliv velikosti maksimalnega zrna agregata na a) razvoj tlačnih trdnosti betona, b) razvoj hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton.

Figure 7.4 Influence of maximum nominal aggregate size on the development of a) concrete compressive strength, b) ultrasonic pulse velocity.

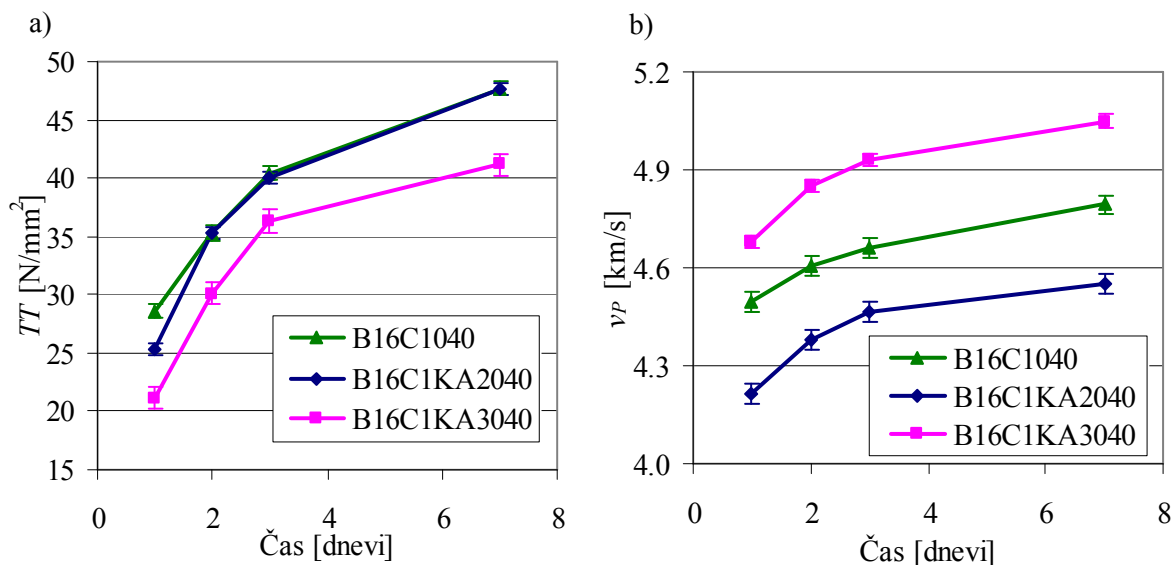
Ker je stična površina med agregatom in cementno pasto najšibkejša komponenta v betonu, je temu primerna tlačna trdnost betona nižja v primeru manjših zrn agregata v betonu (Mehta 1986). V neposredni bližini agregatnih zrn je poroznost cementne paste lokalno precej visoka, vodo/cementno razmerje pa bistveno višje kot v primeru cementne paste med agregatnimi zrni. Ta fenomen je najbolj opazen v

območju prvih 15-20 μm oddaljenosti od agregatnih zrn in je posledica neenakomerne razporeditve cementnih zrn v bližini večjih agregatnih zrn (Schriener 2004) ter izcejanja vode ob agregatnih zrnih zaradi vibriranja betonske mešanice.

Podobno je hitrost prehoda ultrazvoka večja v primeru večjih agregatnih zrn v betonu in obratno (poglavje 6.3.2).

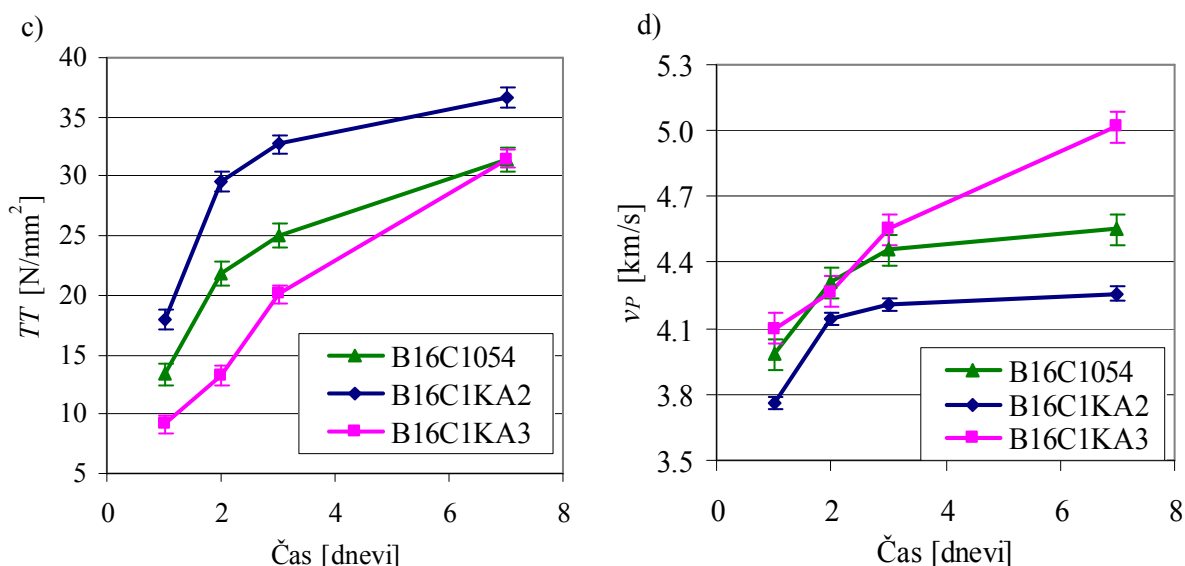
7.2.5 Vpliv količine agregata

Vpliv količine agregata na razvoj tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton je razviden iz slik 7.5.



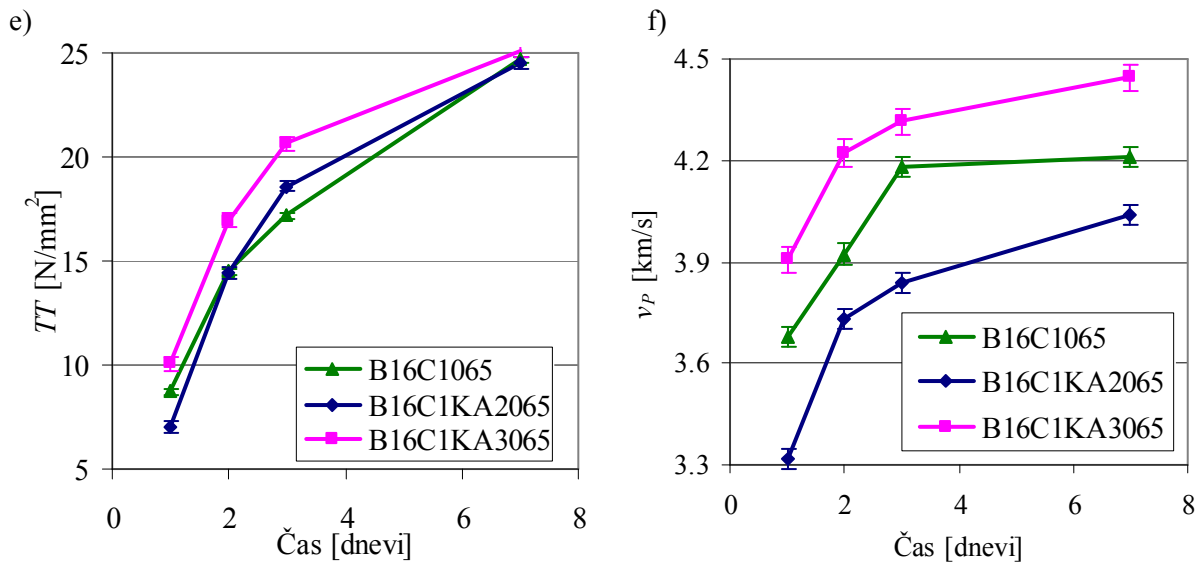
Slika 7.5/1 Vpliv količine agregata v betonu na razvoj tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton, a) tlačne trdnosti, $w/c = 0.40$, b) hitrost prehoda ultrazvoka, $w/c = 0.40$.

Figure 7.5/1 Influence of amount of aggregate on the development of concrete compressive strength and ultrasonic pulse velocity, a) compressive strength, $w/c = 0.40$, b) ultrasonic pulse velocity, $w/c = 0.40$.



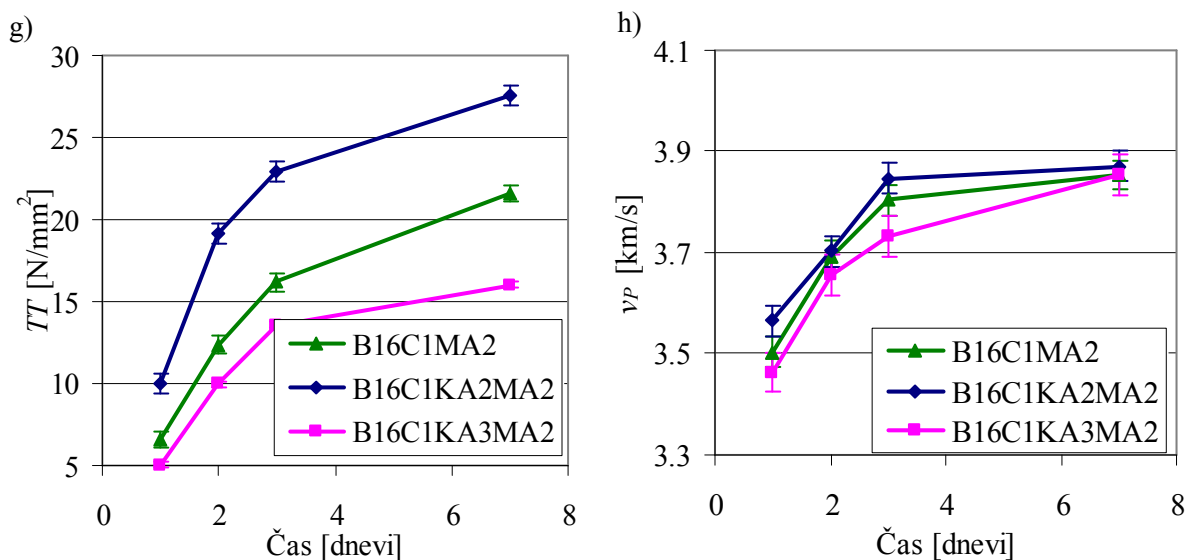
Slika 7.5/2. Vpliv količine agregata v betonu na razvoj tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton, c) tlačne trdnosti, $w/c = 0.54$, d) hitrost prehoda ultrazvoka, $w/c = 0.54$.

Figure 7.5/2. Influence of amount of aggregate on the development of concrete compressive strength and ultrasonic pulse velocity, c) compressive strength, $w/c = 0.54$, d) ultrasonic pulse velocity, $w/c = 0.54$.



Slika 7.5/3. Vpliv količine agregata v betonu na razvoj tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton, e) tlačne trdnosti, $w/c = 0.65$, f) hitrost prehoda ultrazvoka, $w/c = 0.65$.

Figure 7.5/3. Influence of amount of aggregate on the development of concrete compressive strength and ultrasonic pulse velocity, e) compressive strength, $w/c = 0.65$, f) ultrasonic pulse velocity, $w/c = 0.65$.



Slika 7.5/4. Vpliv količine agregata v betonu na razvoj tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton, g) tlačne trdnosti, agregat kvarcinitno karbonatnega izvora, h) hitrost prehoda ultrazvoka, agregat kvarcinitno karbonatnega izvora.

Figure 7.5/4. Influence of amount of aggregate on the development of concrete compressive strength and ultrasonic pulse velocity, g) compressive strength, quartzite carbonate aggregate, h) ultrasonic pulse velocity, quartzite carbonate aggregate.

Vpliv količine agregata smo ugotavljali pri treh različnih vodo/cementnih razmerjih in dveh vrstah agregata v betonu, pri čemer smo uporabili mešanice z oznakami B16C1040, B16C1KA2040 in B16C1KA3040 (v/c razmerje 0.40), B16C1054, B16C1KA2 in B16C1KA3 (v/c razmerje 0.54), B16C1065, B16C1KA2065 in B16C1KA3065 (v/c razmerje 0.65) in B16C1KA2MA2, B16C1MA2, B16C1KA3MA2.

Zanimivo je bil vpliv količine agregata na razvoj tlačnih trdnosti najizrazitejši v primeru vodo/cementnega razmerja $v/c = 0.54$. Tu so bile tlačne trdnosti najvišje pri mešanici B16KA2054, ki je vsebovala najmanjši delež agregata v betonu, in najnižje pri mešanici B16KA3054, pri kateri je bil delež agregata v betonu največji. Rezultat je pričakovan, saj manjša vsebnost agregata v betonu posledično

pomeni večji delež cementa v betonu, kar pripomore k višjim tlačnim trdnostim betona. Prav tako je skupna stična površina med cementno pasto in betonom manjša v primeru nižje vsebnosti agregata v betonu, kar prav tako rezultira v višjih tlačnih trdnostih betona (Mehta 1986). Pričakovano so bile pri v/c razmerju 0.65 tlačne trdnosti betona višje v primeru višje vsebnosti agregata v betonu. Vpliv količine agregata na tlačno in natezno trdnost betona je analiziral Suwanvitaya s sodelavci (2006), pri čemer je ugotovil, da se v primeru vsebnosti agregata v betonu nad 60 % z nadaljnjim večanjem količine agregata v betonu tlačna trdnost betona malenkostno povečuje, ne glede na velikost vodo/cementnega razmerja.

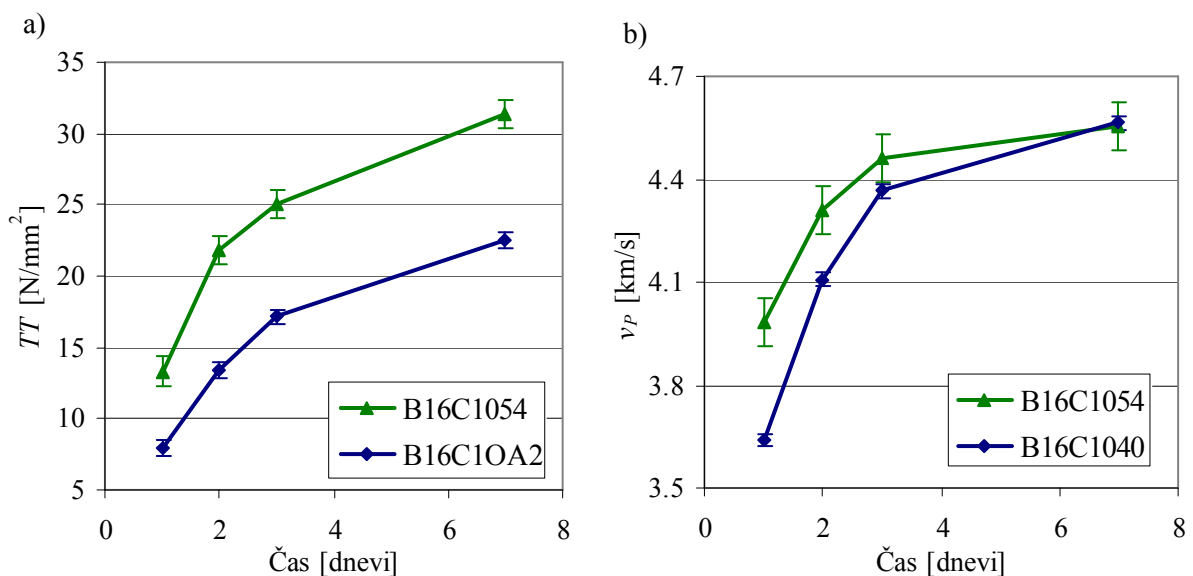
V primeru uporabe agregata kvarcitrno karbonatnega izvora so bile najvišje trdnosti dosežene pri najmanjši količini agregata v betonu in obratno.

V primeru agregata apnenčevega izvora je bila hitrost prehoda ultrazvoka skozi beton najvišja pri mešanici z največjim deležem agregata v betonu, ne glede na velikost vodo/cementnega razmerja v betonu. V primeru uporabe agregata kvarcitrno karbonatnega izvora je bila hitrost prehoda ultrazvoka skozi beton najvišja pri najmanjši vsebnosti agregata v betonu in obratno. Ti fenomeni so najverjetneje posledica različne hitrosti prehoda ultrazvoka skozi apnenčevo in kvarcitrno karbonatno kamnino v primerjavi s hitrostjo prehoda ultrazvoka skozi samo cementno pasto (poglavje 5.1.3).

7.2.6 Vpliv oblike agregata v betonu

Slika 7.6 prikazuje vpliv oblike agregata na razvoj tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton, pri čemer je bil pri mešanici z oznako B16C1054 uporabljen drobljen agregat apnenčevega izvora, pri mešanici z oznako B16C10A2 pa prodnat agregat apnenčevega izvora. Razvidno je, da so tlačne trdnosti betona v primeru drobljenega agregata vseskozi višje od tlačnih trdnosti betona, ki je vseboval prodnat agregat. To je predvsem posledica slabše sprijemnosti med cementno pasto in agregatnimi zrn v primeru zaobljenih agregatnih zrn (Mehta 1986).

Vpliv oblike agregata na hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton je manjši kot vpliv oblike agregata na razvoj tlačnih trdnosti in se s časom zmanjšuje.

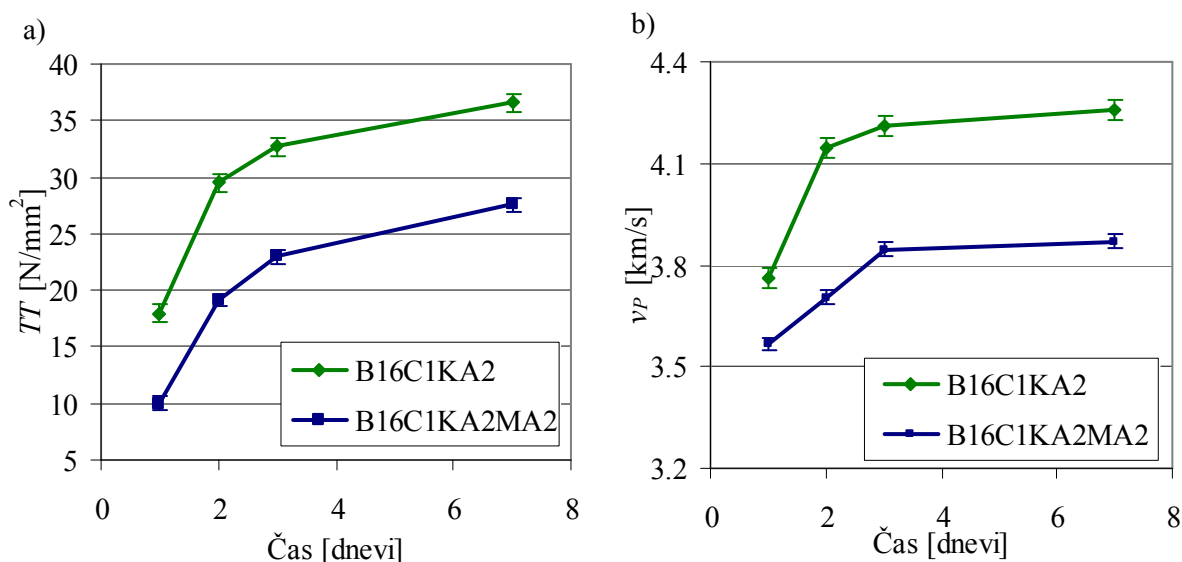


Slika 7.6 Vpliv oblike agregatnih zrn na razvoj a) tlačnih trdnosti betona, b) hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton.

Figure 7.6 Influence of shape of aggregate grains on the development of a) concrete compressive strength, b) ultrasonic pulse velocity.

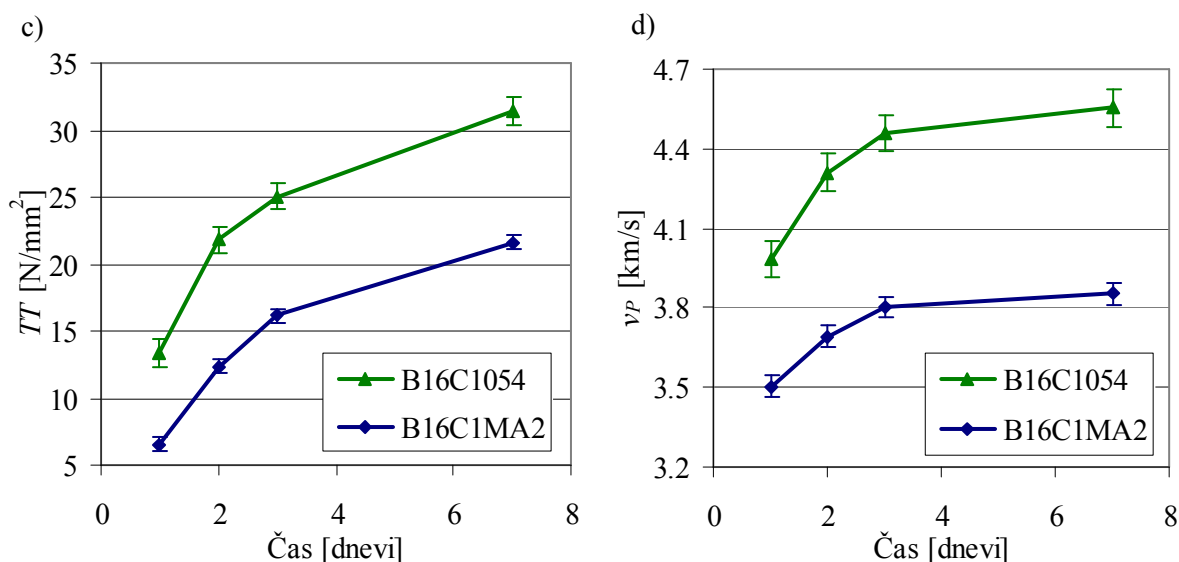
7.2.7 Vpliv vrste agregata

Vpliv vrste agregata na razvoj tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton je prikazan na slikah 7.7, pri čemer je bil ta vpliv analiziran pri treh različnih količinah agregata v betonu. Uporabljena sta bila dva tipa agregata, in sicer agregat apnenčevega izvora in agregat kvarcitrno karbonatnega izvora. Vpliv vrste agregata je bil analiziran pri treh različnih količinah agregata v betonu. Razvidno je, da so bile tlačne trdnosti vseskozi višje v primeru uporabe agregata apnenčevega izvora.



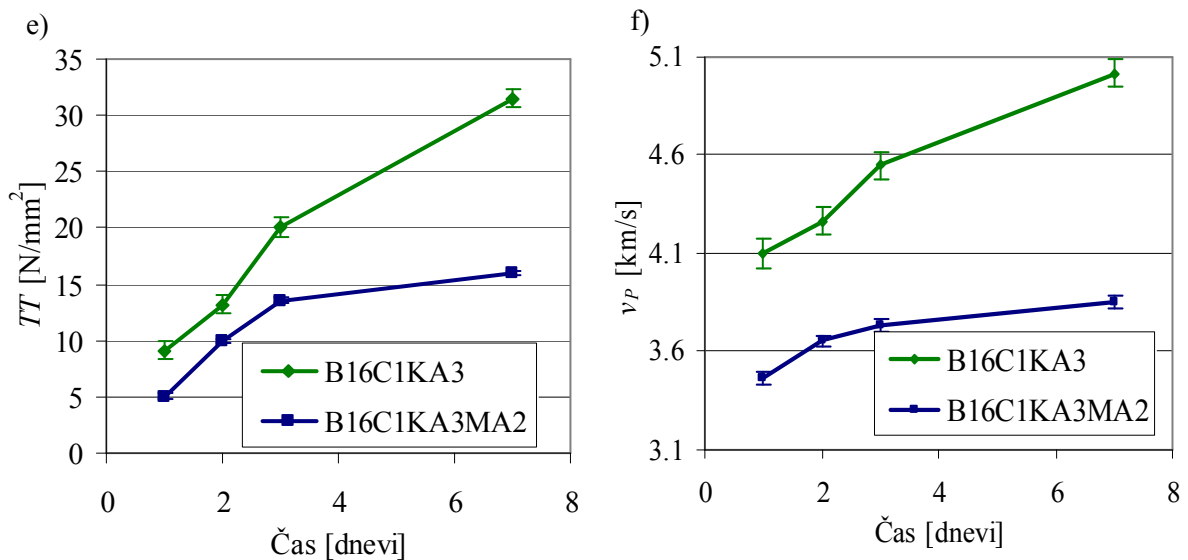
Slika 7.7/1 Vpliv materiala agregata na razvoj tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda ultrazvoka skozi betone, a) tlačne trdnosti, količina agregata 1500 kg/m³, b) hitrost prehoda ultrazvoka, količina agregata 1500 kg/m³.

Figure 7.7/1 Influence of aggregate type on the development of concrete compressive strength and ultrasonic pulse velocity, a) compressive strength, amount of aggregate 1500 kg/m³, b) ultrasonic pulse velocity, amount of aggregate 1500 kg/m³.



Slika 7.7/2. Vpliv materiala agregata na razvoj tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda ultrazvoka skozi betone, c) tlačne trdnosti, količina agregata 1850 kg/m³, d) hitrost prehoda ultrazvoka, količina agregata 1850 kg/m³.

Figure 7.7/2. Influence of aggregate type on the development of concrete compressive strength and ultrasonic pulse velocity, c) compressive strength, amount of aggregate 1850 kg/m³, d) ultrasonic pulse velocity, amount of aggregate 1850 kg/m³.



Slika 7.7/3. Vpliv materiala agregata na razvoj tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda ultrazvoka skozi betone, e) tlačne trdnosti, količina agregata 2130 kg/m³, f) hitrost prehoda ultrazvoka, količina agregata 2130 kg/m³.

Figure 7.7/3. Influence of aggregate type on the development of concrete compressive strength and ultrasonic pulse velocity, e) compressive strength, amount of aggregate 2130 kg/m³, f) ultrasonic pulse velocity, amount of aggregate 2130 kg/m³.

Vpliv vrste agregata v betonu na velikost tlačne in upogibne trdnosti betona sta analizirala tudi Ozturan in Cecen (1997), pri čemer sta ugotovila, da so tlačne trdnosti betonov visokih trdnosti (nad 90 N/mm²) višje v primeru uporabe bazaltne agregata kot v primeru uporabe agregata apnenčevega izvora. Nasprotno pa so bile v primeru betonov običajnih trdnosti tlačne trdnosti betona z agregatom apnenčevega izvora najvišje. Lorenzi s sodelavci (2007) je primerjal vpliv agregata bazaltne, granitne in apnenčevega izvora na tlačne trdnosti betona, pri čemer so bile tlačne trdnosti betona največje v primeru uporabe agregata apnenčevega izvora.

Podobno so tudi hitrosti prehoda ultrazvoka višje v primeru uporabe agregata apnenčevega izvora, kar izhaja iz same sestave kamnin (poglavje 5.1.3).

8. UPORABA ULTRAZVOČNE METODE ZA OCENO ČASA VEZANJA MATERIALOV S CEMENTNIM VEZIVOM

8.1 UVOD

Začetni in končni čas vezanja cementa se določa s t.i. Vicatovo metodo skladno s standardom SIST EN 196-3:2005 (2005), sama metoda določanja začetnega in končnega časa vezanja pa je opisana v poglavju 3.3.3. Čas vezanja betona se določa z metodo penetrometra skladno s standardom ASTM C 403-88 (1988) in je opisana v poglavju 3.3.4.

Glavna slabost omenjenih dveh metod je v tem, da ne omogočata neprekinjenega zasledovanja spreminjanja agregatnega stanja materiala – samo meritev namreč izvajamo v posameznih diskretnih časovnih intervalih. Poleg tega sta metodi odvisni tudi od same natančnosti merjenja oziroma natančnosti in izkušenj osebe, ki preskus izvaja.

V zadnjih letih je predvsem hiter razvoj tako na področju računalniške tehnologije kot tudi na področju samih merilnih inštrumentov prispeval k razvoju, napredku in izboljšavam različnih (ultrazvočnih) metod zasledovanja hidratacijskega procesa materialov s cementnim vezivom. Nekateri avtorji tako analizirajo možnost uporabe teh metod za oceno časov vezanja materialov s cementnim vezivom. Chotard s sodelavci (2001) je predlagal določitev pomembnih karakterističnih točk v fazi hidratacijskega procesa s presečiščem treh tangent na krivuljo hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov. Reinhardt in Grosse (2003, 2004) ter Voigt s sodelavci (2005) so čas začetka vezanja betona povezovali z maksimumom prvega odvoda krivulje hitrosti prehoda ultrazvočnih valov skozi betone, čas konca vezanja pa naj bi sovpadal s časom, pri katerem hitrost ultrazvočnega valovanja preseže vrednost 1500 m/s. Lee s sodelavci (2004) je kot začetek vezanja običajnih betonov predlagal čas, ko hitrost vzdolžnega ultrazvočnega valovanja doseže vrednost med 800-900 m/s, v primeru betonov visokih trdnosti pa naj bi ta interval znašal med 920-1070 m/s.

Valič s sodelavci (1998) je analiziral možnost uporabe metode odboja strižnih ultrazvočnih valov za oceno začetka in časa vezanja na dveh različnih cementnih pastah ter ugotovil, da je s primerno kalibracijo USWR inštrumenta za vsako cementno pasto posebej možno zadovoljivo oceniti začetni in končni čas vezanja cementne paste. Podobne študije je izvajal tudi Rapoport s sodelavci (2000), pri čemer je začetni čas vezanja poskušal povezovati s časom, pri katerem začne vrednost odbojnega koeficienta padati. Pokazal je, da obstaja linearna povezava med začetnim časom vezanja, določenim na osnovi merjenja temperature in časom začetka padanja vrednosti odbojnega koeficienta.

Skoraj vsi raziskovalci poudarjajo pomembnost nadaljnjih preiskav pri določanju začetka in konca vezanja materialov s cementnim vezivom z ultrazvočnimi metodami (npr. Robeyst s sodelavci 2008).

8.2 CEMENTNA PASTA

Možnost uporabe metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov za oceno časa vezanja cimente paste je bila analizirana na cementnih pastah z oznakami C1035, C1040, C1050, C2, C3, C4, CT26, CT32, CF3, CC3A3, C2040 in C4040, možnost uporabe metode odboja strižnih ultrazvočnih valov pa na cementnih pastah z oznakami C1030, C1040, C1050, C160, C165, C2, C3, C4, CT11, CT26, CT32, CT11060, CT26060, CT32060, CF3, CC3A3, C2040, C3040 in C4040. Ob tem sta bila začetni in končni čas vezanja pri vseh cementnih pastah določena tudi z Vicatovo metodo, skladno s standardom SIST EN 196-3:2005 (2005). Karakteristike vseh cementnih past so prikazane v preglednici 5.6.

8.2.1 Določitev začetnega in končnega časa vezanja z Vicatovo metodo

Slike 8.1 - 8.5 prikazujejo vrednosti globine prodora Vicatove igle v posamezne cementne paste s časom ter vpliv posameznega parametra sestave cementne paste na začetni in končni čas vezanja. Pri tem je z d_v [mm] označena razdalja med spodnjo površino vzorca in koncem Vicatove igle. S časom se globina

prodora Vicatove igle v vzorec cementne paste zmanjšuje, razdalja d_V pa temu primerno povečuje. Začetek vezanja cemente paste $t_{z,V}$ je v skladu s standardom SIST EN 196-3:2005 (2005) definiran kot čas, pri katerem razdalja d_V znaša $d_V = (6 \pm 3)$ mm. Oznaki $t_{z,V,3}$ in $t_{z,V,9}$ tako označujeta čas, pri katerem vrednost d_V znaša 3 mm in 9 mm. Končni čas vezanja $t_{k,V}$ je v skladu s standardom SIST EN 196-3:2005 (2005) definiran kot čas, pri katerem je penetracija manjša od 1 mm.

Odvisnost vrednosti $t_{z,V,3}$, $t_{z,V,9}$ in $t_{k,V}$ od vrednosti v/c razmerja najboljše opišejo nelinearni regresijski modeli (8.1) – (8.3). Pričakovano nižje v/c razmerje pospeši proces vezanja cementne paste (poglavje 6.2.3).

$$t_{z,V,3} = 7.2835 \log(v/c) + 11.949, \quad R^2 = 0.996 \quad (8.1)$$

$$t_{z,V,9} = 8.1451 \log(v/c) + 10.081, \quad R^2 = 0.998 \quad (8.2)$$

$$t_{k,V} = 10.185 \log(v/c) + 16.164, \quad R^2 = 0.989. \quad (8.3)$$

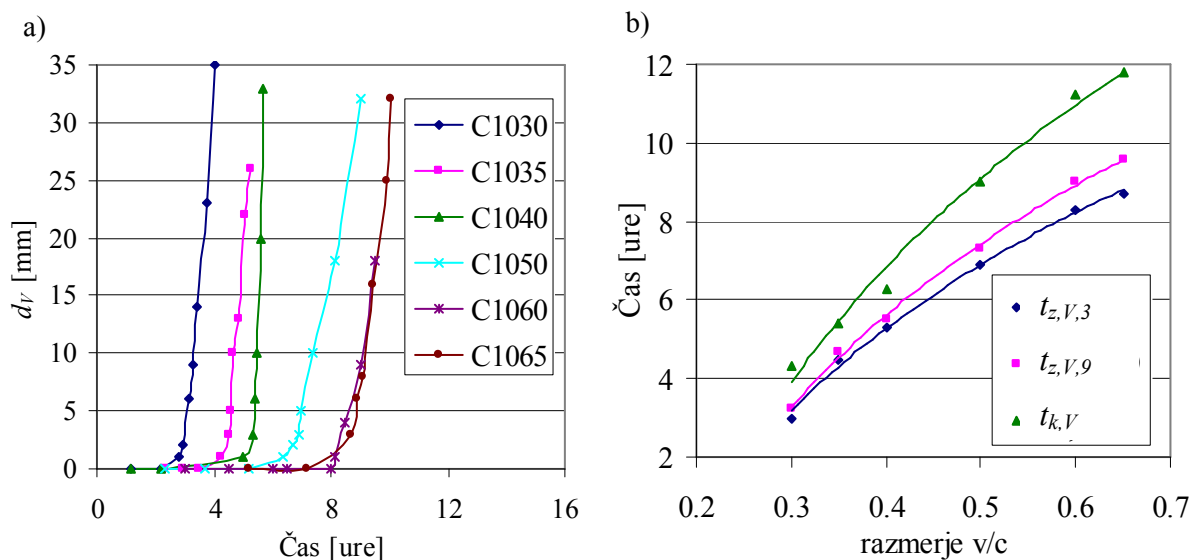
Pričakovano je bil proces vezanja cementne paste najhitrejši v primeru uporabe cementa CEM I 52,5R (C4) in najpočasnejši v primeru uporabe cementa CEM I 42,5 N SR (C3).

Odvisnost vrednosti $t_{z,V,3}$, $t_{z,V,9}$ in $t_{k,V}$ od temperature okolice najboljše opišejo linearni regresijski modeli (8.4) – (8.6). Pričakovano višje temperature okolice pospešijo proces vezanja cementne paste (poglavje 6.2.3).

$$t_{z,V,3} = -0.1785 (To) + 10.447, \quad R^2 = 0.998 \quad (8.4)$$

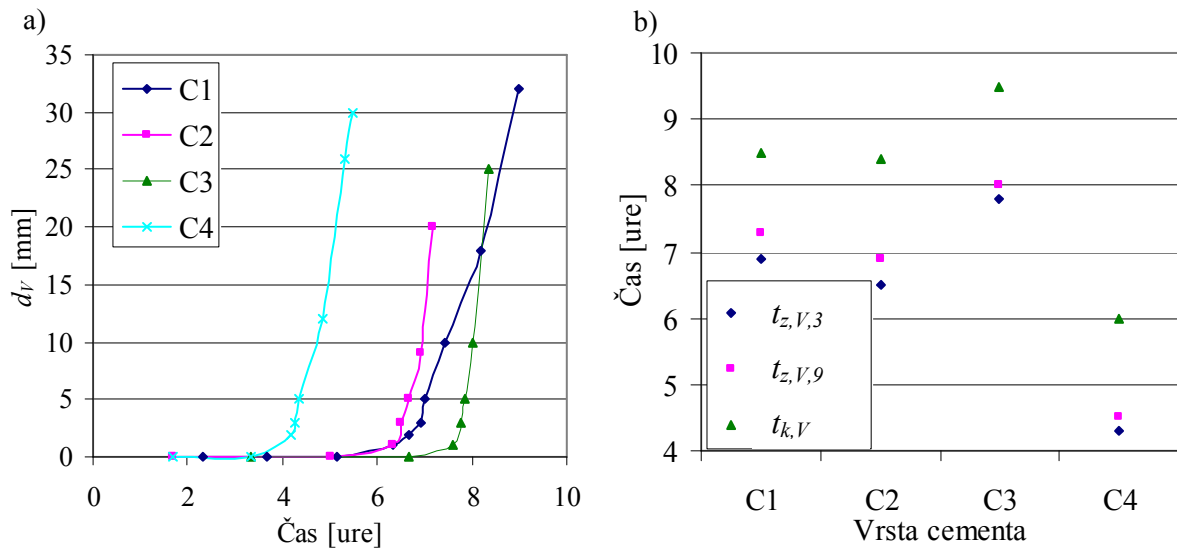
$$t_{z,V,9} = -0.1916 (To) + 11.188, \quad R^2 = 0.981 \quad (8.5)$$

$$t_{k,V} = -0.2978 (To) + 14.926, \quad R^2 = 0.976. \quad (8.6)$$



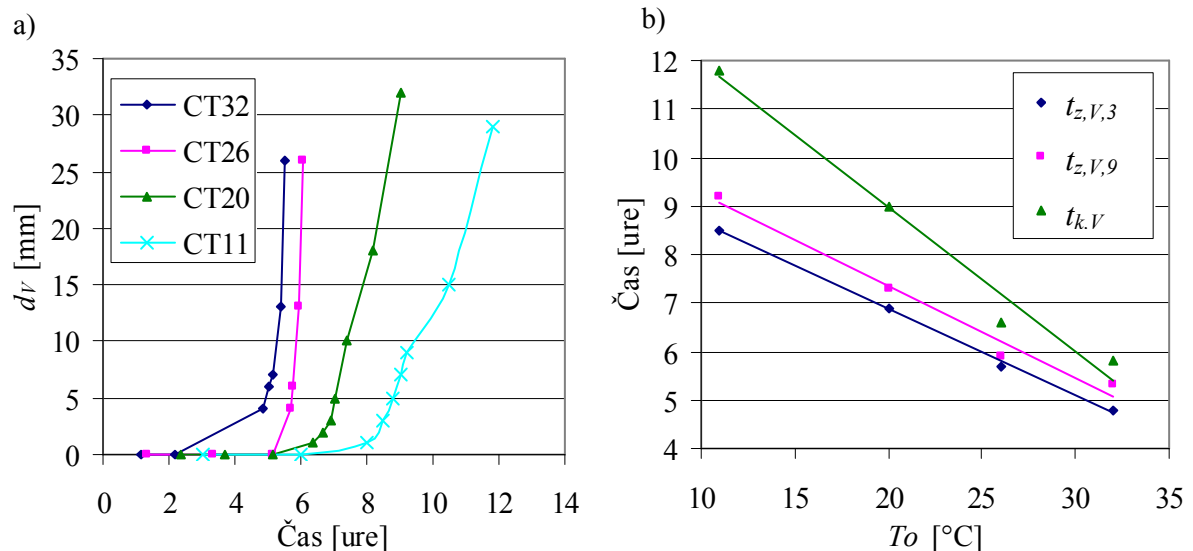
Slika 8.1 Vpliv vodo/cementnega razmerja na a) potek globine penetracije Vicatove igle v cementno pasto, b) začetni in končni čas vezanja cementne paste.

Figure 8.1 Influence of the water/cement ratio on the a) penetration of Vicat needle into the cement paste, b) initial and final setting time of cement paste.



Slika 8.2 Vpliv vrste cementa na a) potek globine penetracije Vicatove igle v cementno pasto, b) začetni in končni čas vezanja cementne paste.

Figure 8.2 Influence of cement type on the a) penetration of Vicat needle into the cement paste, b) initial and final setting time of cement paste.



Slika 8.3 Vpliv temperature okolice na a) potek globine penetracije Vicatove igle v cementno pasto, b) začetni in končni čas vezanja cementne paste.

Figure 8.3 Influence of curing temperature on the a) penetration of Vicat needle into the cement paste, b) initial and final setting time of cement paste.

Odvisnost vrednosti $t_{z,V,3}$, $t_{z,V,9}$ in $t_{k,V}$ od finosti mletja cementa najboljše opišejo nelinearni regresijski modeli (8.7) – (8.9). Pričakovano višja specifična površina cementa SP pospeši proces vezanja cementne paste (poglavje 6.2.3).

$$t_{z,V,3} = 5268.9 (SP)^{-0.8518}, \quad R^2 = 0.983 \quad (8.7)$$

$$t_{z,V,9} = 6968.2 (SP)^{-0.8795}, \quad R^2 = 0.989 \quad (8.8)$$

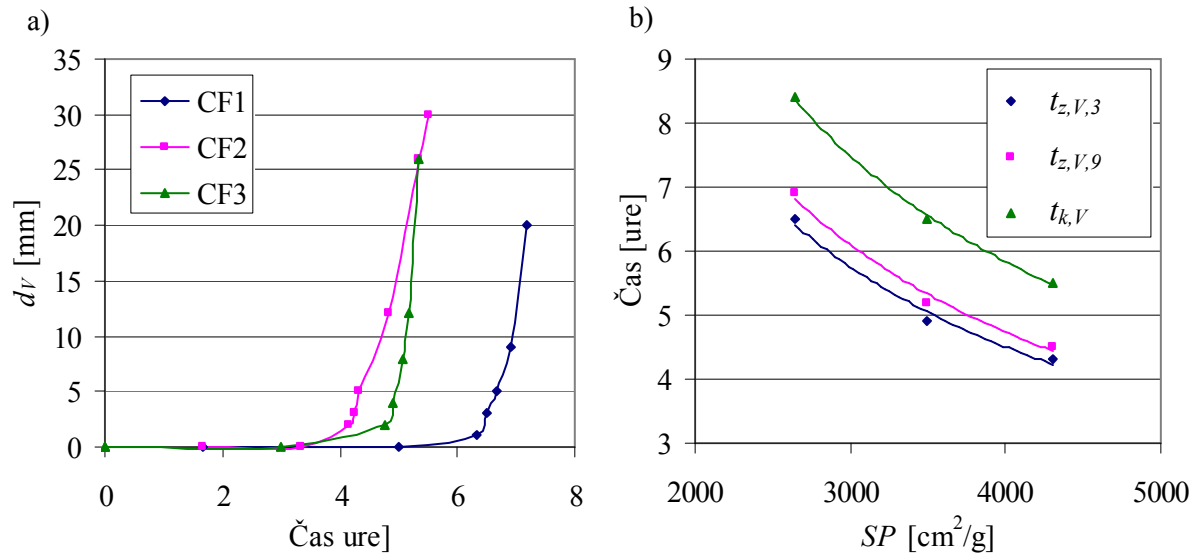
$$t_{k,V} = 7733.4 (SP)^{-0.8668}, \quad R^2 = 0.998. \quad (8.9)$$

Odvisnost vrednosti $t_{z,V,3}$, $t_{z,V,9}$ in $t_{k,V}$ od deleža minerala C_3A v cementnem klinkerju najboljše opišejo linearni regresijski modeli (8.10) – (8.12). Pričakovano višji delež minerala C_3A pospeši proces vezanja cementne paste (poglavje 6.2.3).

$$t_{z,V,3} = -0.2651 (C_3A) + 8.4305, \quad R^2 = 0.997 \quad (8.10)$$

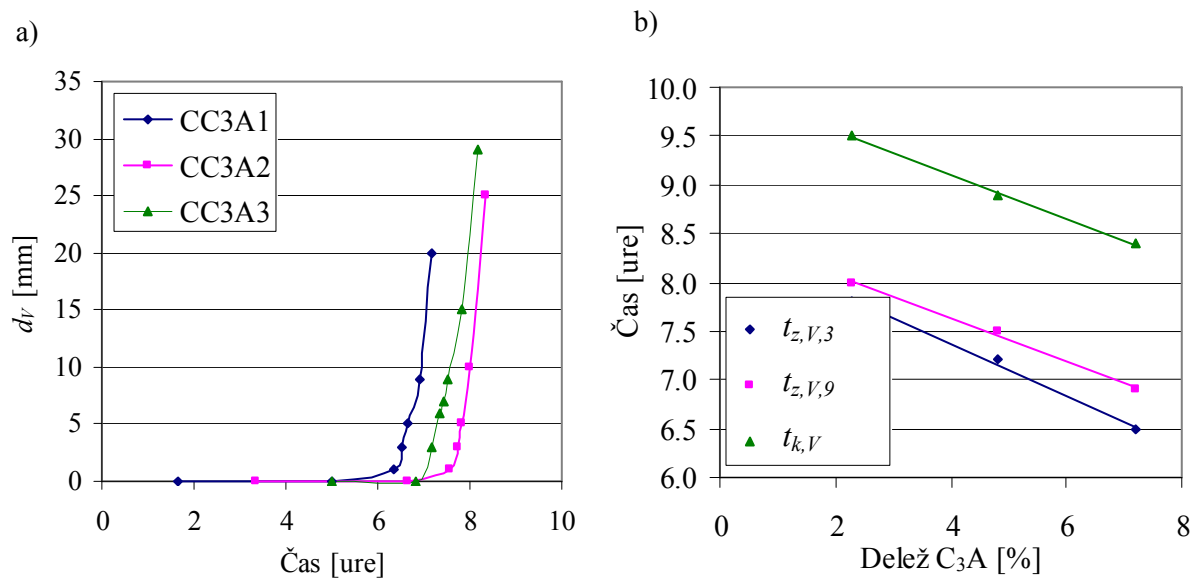
$$t_{z,V,9} = -0.2243 (C_3A) + 8.5359, \quad R^2 = 0.996 \quad (8.11)$$

$$t_{k,V} = -0.2246 (C_3A) + 10.004, \quad R^2 = 0.998. \quad (8.12)$$



Slika 8.4 Vpliv finosti mletja cementa na a) potek globine penetracije Vicatove igle v cementno pasto, b) začetni in končni čas vezanja cementne paste.

Figure 8.4 Influence of cement fineness on the a) penetration of Vicat needle into the cement paste, b) initial and final setting time of cement paste.



Slika 8.5 Vpliv deleža minerala C_3A na a) potek globine penetracije Vicatove igle v cementno pasto, b) začetni in končni čas vezanja cementne paste.

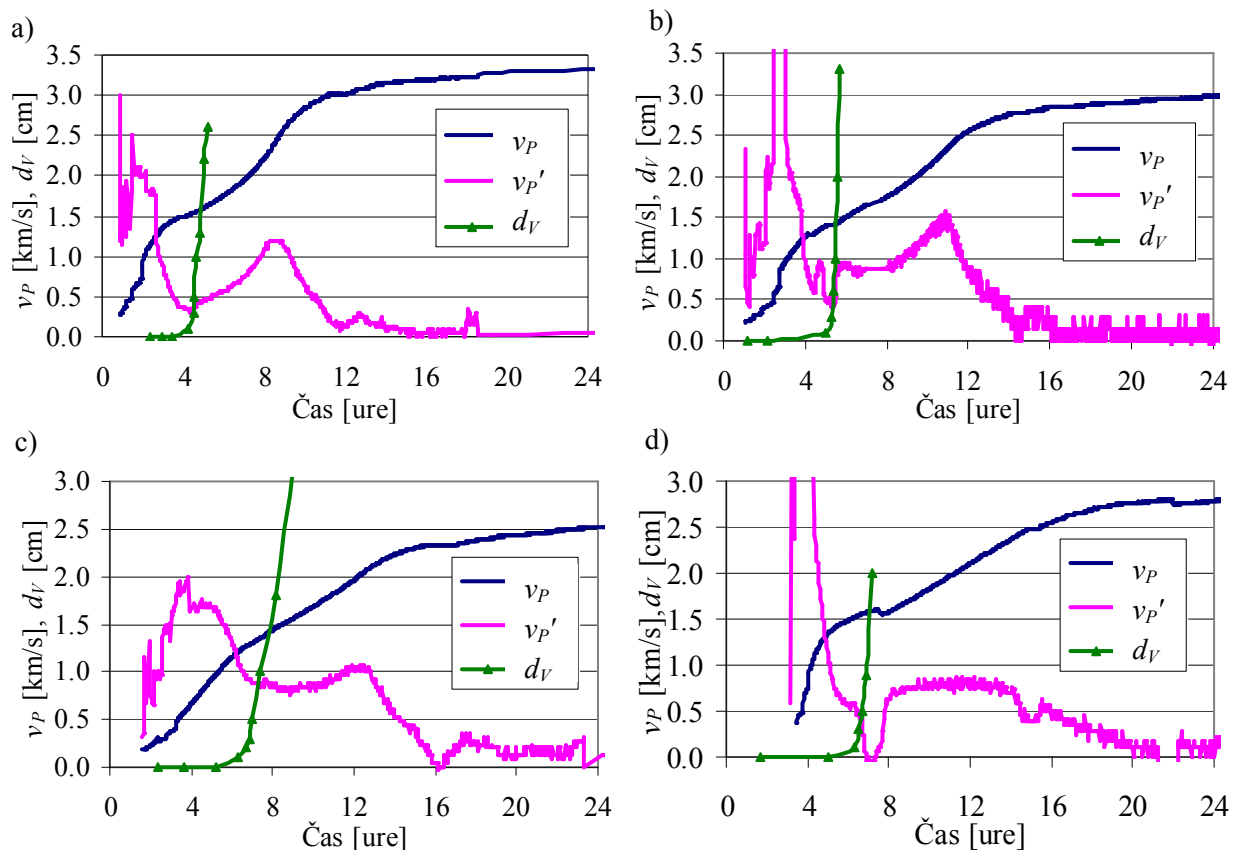
Figure 8.5 Influence of amount of C_3A on the a) penetration of Vicat needle into the cement paste, b) initial and final setting time of cement paste.

8.2.2 Ocena časa vezanja z metodo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov

Slike 8.6 prikazujejo povezavo med hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi cementne paste v_P (modre krivulje) in prodorom Vicatove igle v cemente paste d_V (zeleni krivulje). Vijolične krivulje predstavljajo numerične odvode krivulj hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov po času v_P' .

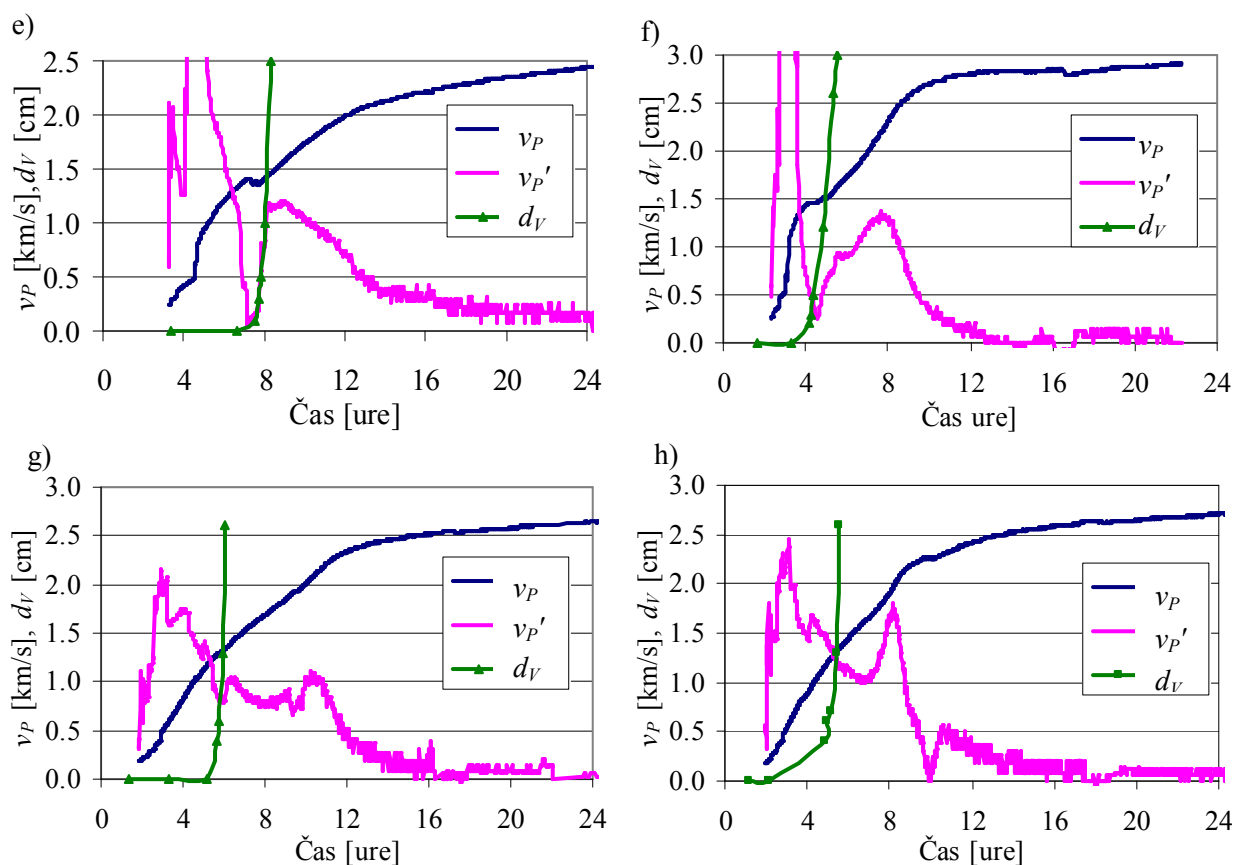
Vidno je, da časa $t_{z,V,3}$ in $t_{z,V,9}$ precej dobro sovpadata s časom pojava prve prevojnne točke t_{PT1} na posamezni krivulji v_P-t . Ta fenomen je še bolj razviden iz slik 8.7, ki prikazujejo vpliv vodo/cementnega razmerja, temperature okolice, vrste cementa, finosti mletja cementa in deleža vpliva minerala C_3A na povezavo med časom t_{PT1} in časovnim intervalom $t_{z,V,i}$, katerega spodnja in zgornja meja sta vrednosti $t_{z,V,3}$ in $t_{z,V,9}$. Oznaka t_v predstavlja čas, pri katerem hitrost prehoda ultrazvoka skozi cementno pasto doseže vrednost $v_P = 1430$ m/s, ki predstavlja hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi vodo (slika 6.3, poglavje 6.2.1). Iz slik je razvidno, da tudi vrednost t_v relativno dobro sovpada tako z intervalom $t_{z,V,i}$ kot z vrednostjo t_{PT1} .

Vrednosti posameznih omenjenih karakterističnih točk za vse obravnavane cemente paste so prikazane v preglednici 8.1. Pri tem oznake $v_{P,3}$, $v_{P,9}$ in $v_{P,PT1}$ predstavljajo vrednosti hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi cementne paste pri časih $t_{z,V,3}$, $t_{z,V,9}$ in t_{PT1} .



Slika 8.6/1 Povezava med krivuljo v_P-t in prodorom Vicatove igle d_V , a) pasta C1035, b) pasta C1040, c) pasta C1050 (C1, CT21), d) pasta C2 (CF1, CC3A1).

Figure 8.6/1 Relationship between v_P-t curve and penetration of Vicat needle d_V , a) paste C1035, b) paste C1040, c) paste C1050 (C1, CT21), d) paste C2 (CF1, CC3A1).



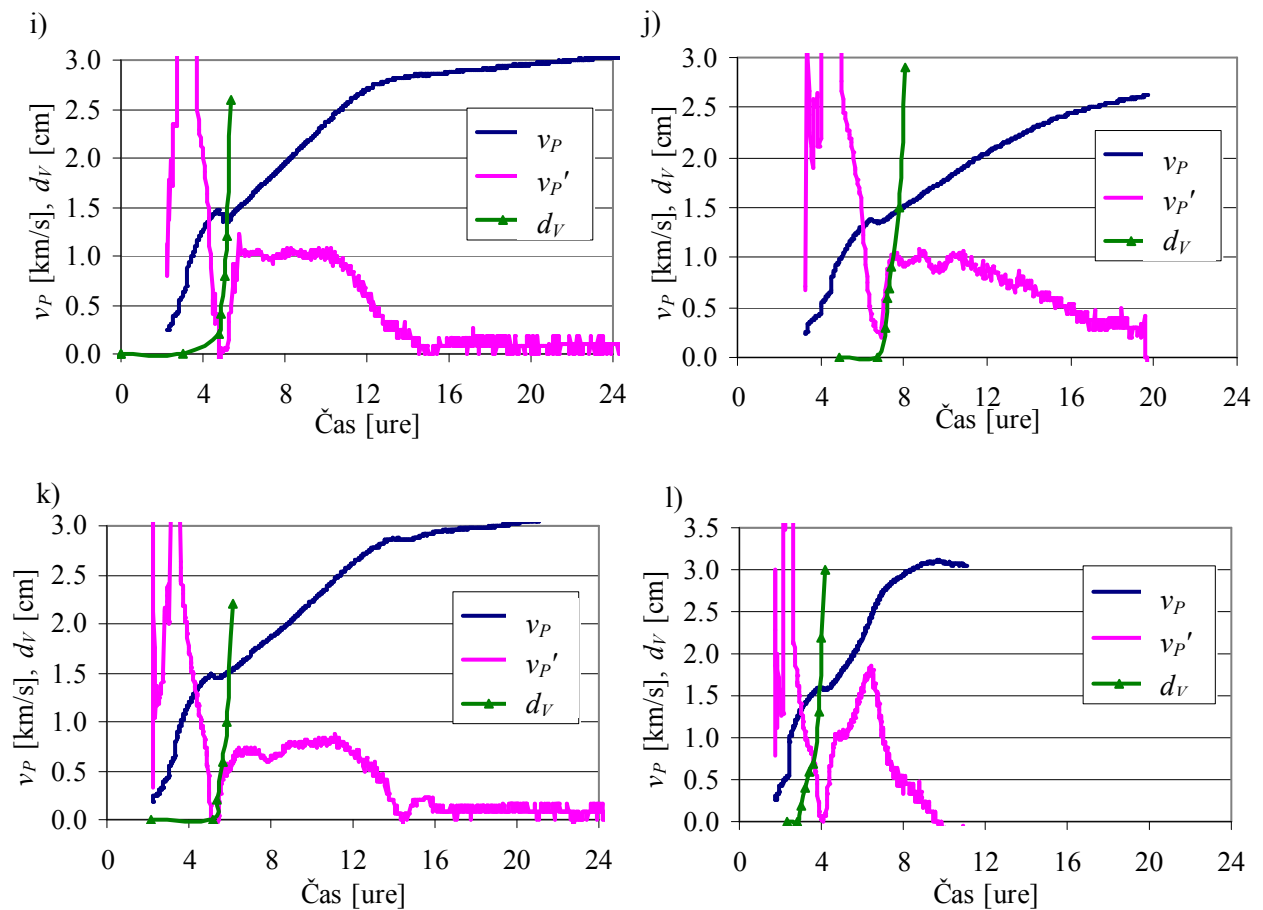
Slika 8.6/2. Povezava med krivuljo v_p-t in prodorom Vicatove igle d_V , e) pasta C3 (CC3A2), f) pasta C4 (CF2), g) pasta CT26, h) pasta CT32.

Figure 8.6/2. Relationship between v_p-t curve and penetration of Vicat needle d_V , e) paste C3 (CC3A2), f) paste C4 (CF2), g) paste CT26, h) paste CT32.

Preglednica 8.1 Karakteristični podatki za vse cementne paste.

Table 8.1 Characteristic data for all cement pastes.

oznaka mešanice	karakteristične točke [ure]				vrednost v_p [m/s]		
	$t_{z,V,3}$	$t_{z,V,9}$	t_{PT1}	t_v	$v_{P,3}$	$v_{P,9}$	$v_{P,PT1}$
C1035	4.5	4.7	4.3	4.2	1510	1520	1490
C1040	5.3	5.5	5.3	5.4	1420	1435	1420
C1050, C1, CT21	6.9	7.3	7.2	7.2	1390	1450	1430
C2, CF1, CC3A1	6.5	6.9	6.7	6.3	1498	1550	1520
C3, CC3A2	7.8	8.0	7.7	8.1	1380	1410	1370
C4, CF2	4.3	4.5	4.5	4.2	1450	1454	1450
CT26	5.7	5.8	5.8	6.0	1320	1350	1320
CT32	4.8	5.3	5.1	5.4	1280	1390	1350
CF3	4.9	5.2	4.9	5.1	1400	1450	1400
CC3A3	7.2	7.5	7.1	7.4	1380	1440	1370
C2040	5.4	5.8	5.4	5.4	1440	1480	1440
C4040	3.0	3.4	3.2	3.3	1350	1480	1410



Slika 8.6/3. Povezava med krivuljo v_p-t in prodorom Vicatove igle d_V , i) pasta CF3, j) pasta CC3A3, k) pasta C2040, l) pasta C4040.

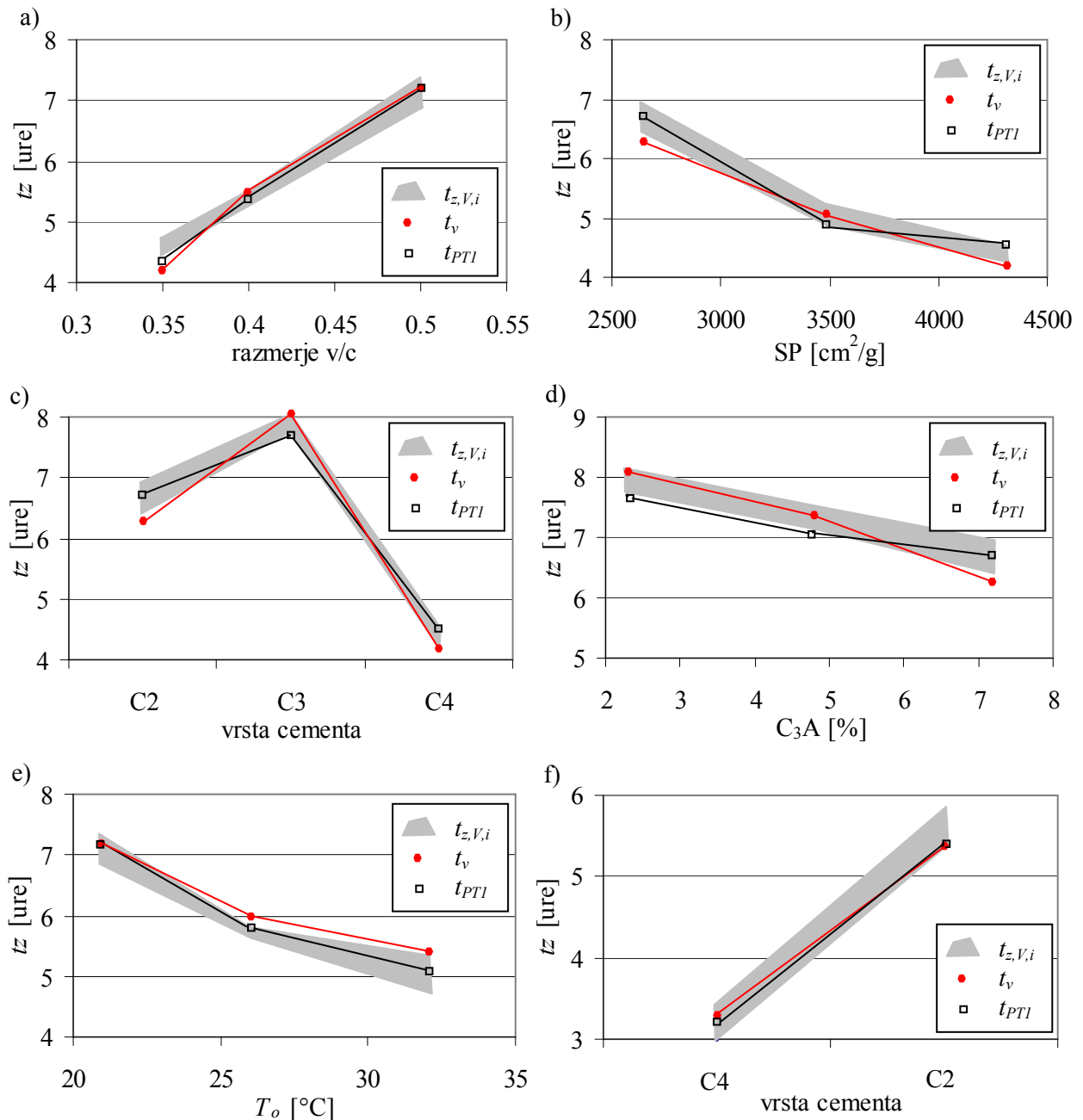
Figure 8.6/3. Relationship between v_p-t curve and penetration of Vicat needle d_V , i) paste CF3, j) paste CC3A3, k) paste C2040, l) paste C4040.

Vidimo, da so vrednosti hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi cementne paste za izbrane karakteristične točke za vse analizirane cementne paste podobne. Povprečna vrednost hitrosti $v_{P,3}$ znaša $v'_{P,3} = 1401.5$ m/s, povprečna vrednost hitrosti $v_{P,9}$ znaša $v'_{P,9} = 1450.7$ m/s, povprečna vrednost hitrosti $v_{P,PT1'}$ pa znaša $v'_{P,PT1'} = 1414.2$ m/s.

Na osnovi navedenih ugotovitev lahko torej začetek vezanja poljubne cementne paste definiramo s časom pojava prve prevojne točke na krivulji v_p-t . Alternativno lahko začetek časa vezanja poljubne cementne paste zadovoljivo ocenimo s časom znotraj časovnega intervala, katerega spodnja in zgornja meja ustrežata časoma, pri katerih hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi cementno pasto doseže vrednosti 1400 m/s in 1450 m/s oziroma s časom, pri katerem hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi cementno pasto doseže vrednost hitrosti prehoda vzdolžnega ultrazvočnega valovanja skozi vodo.

Dodatno je bila analizirana možnost ocene časa konca vezanja $t_{k,V}$ na osnovi hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi posamezne cementne paste. V preglednici 8.2 so prikazane vrednosti omenjene hitrosti prehoda $v_{P,K}$ pri končnem času vezanja $t_{k,V}$. Iz preglednice 8.2 je razvidno, da so vrednosti hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi cementne paste pri času konca vezanja podobne v vseh analiziranih primerih. Podobno kot pri oceni začetnega časa vezanja (preglednica 8.1) tudi v tem primeru nekoliko odstopajo vrednosti $v_{P,K}$ za mešanice, izpostavljene različnim temperaturam okolice med procesom hidratacije, kjer se hitrost $v_{P,K}$ pri času $t_{k,V}$ z večanjem temperature okolice zmanjšuje.

Povprečna vrednost hitrosti $v_{P,K}$ za vse analizirane mešanice skupaj znaša $v_{P,K}' = 1607$ m/s, povprečna vrednost hitrosti $v_{P,K}$ brez upoštevanja mešanic CT26 in CT32 pa $v_{P,K}' = 1639$ m/s. V skladu z rezultati, prikazanimi v preglednici 8.2, lahko končni čas vezanja cementne paste pri temperaturi $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ocenimo s časom, pri katerem hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov doseže vrednost med 1600 m/s in 1650 m/s.



Slika 8.7 Vpliv obravnavanih parametrov na vrednosti $t_{z,V,i}$, t_v in t_{PT1} , a) vpliv razmerja v/c, b) vpliv finosti mletja cementa, c) vpliv vrste cementa, d) vpliv deleža minerala C₃A, e) vpliv temperature okolice, f) vpliv vrste cementa, v/c = 0.40.

Figure 8.7 Influence of discussed parameters on the $t_{z,V,i}$, t_v , and t_{PT1} values, a) influence of w/c ratio, b) influence of cement fineness, c) influence of cement type, d) influence of amount of C₃A, e) influence of curing temperature, f) influence of cement type, w/c = 0.40.

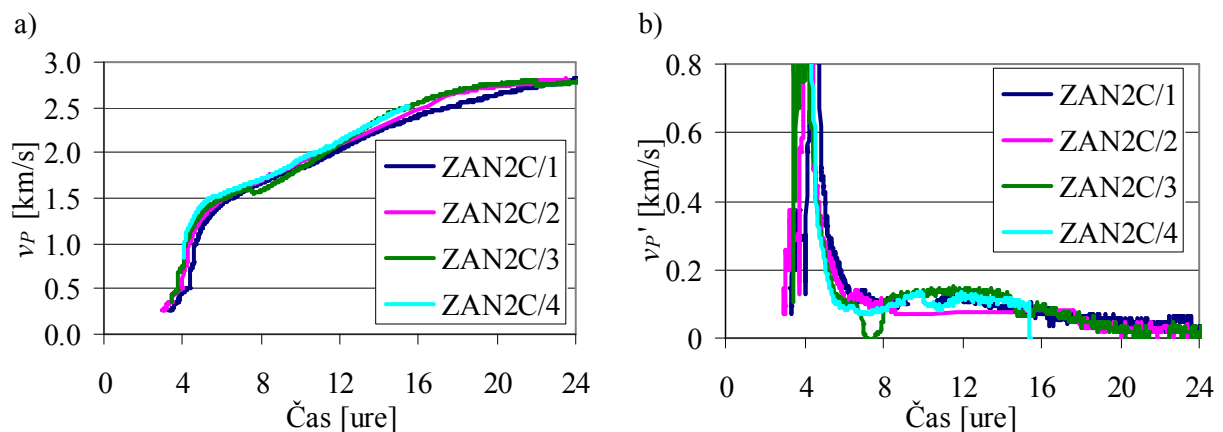
Preglednica 8.2 Časi konca vezanja posameznih cementnih past in pripadajoče hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov.

Table 8.2 Final setting times and corresponding values of ultrasonic pulse velocity of longitudinal waves.

oznaka mešanice	$t_{k,V}$ [ure]	$v_{p,K}$ [m/s]
C1035	5.5	1630
C1040	6.8	1640
C1050, C1, CT21	9.0	1600
C2, CF1, CC3A1	8.4	1680
C3, CC3A2	9.5	1660
C4, CF2	5.5	1680
CT26	6.6	1480
CT32	5.8	1420
CF3	6.5	1630
CC3A3	8.9	1640
C2040	6.6	1620
C4040	4.4	1610

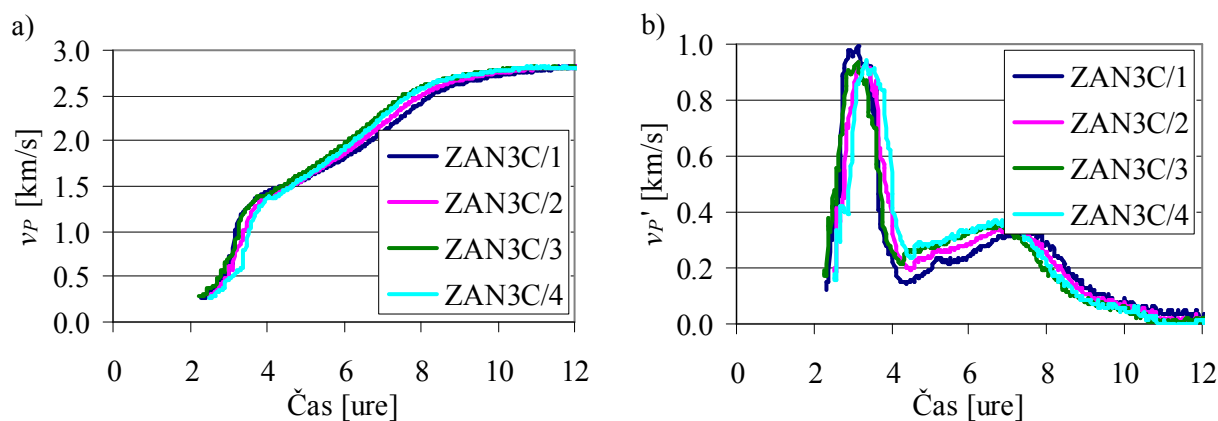
8.2.3 Analiza zanesljivosti določitve časa vezanja poljubne cementne paste z metodo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov

Za kontrolo zanesljivosti ocene začetnega časa vezanja poljubne cementne paste z metodo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov so bile meritve za določne cementne paste izvedene večkrat. Meritev na cementni pasti C1035 (oznaka ZANC) je bila izvedena 7×, meritve na cementnih pastah C2 (ZAN2C) in C4 (ZAN3C) pa po 4×. Krivulje za cementno pasto C1035 so prikazane na sliki 6.23, krivulje za cementne paste C2 in C4 pa na slikah 8.8 in 8.9. Cementni pasti C2 in C4 sta bili izbrani na osnovi časa pojava prve prevojne točke t_{PT1} , pri čemer je čas t_{PT1} za cementno pasto C4 precej podoben času t_{PT1} za cementno pasto C1035, čas t_{PT1} za cementno pasto C2 pa se od časa t_{PT1} za cementno pasto C1035 precej razlikuje (preglednica 8.1). Preglednica 8.3 prikazuje karakteristične vrednosti za vse cementne paste, uporabljene v okviru analize zanesljivosti določitve začetnega časa vezanja na osnovi metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov.



Slika 8.8 Ponovljivost metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov, cementne paste C2, a) krivulje v_p-t , b) odvodi krivulj v_p-t .

Figure 8.8 Reproducibility of the ultrasonic wave transmission method, cement pastes C2, a) v_p-t curves, b) numerical derivatives of v_p-t curves.



Slika 8.9 Ponovljivost metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov, cementne paste C4, a) krivulje v_p-t , b) odvodi krivulj v_p-t .

Figure 8.9 Reproducibility of the ultrasonic wave transmission method, cement pastes C4, a) v_p-t curves, b) numerical derivatives of v_p-t curves.

Preglednica 8.3 Analiza natančnosti uporabe metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov za oceno časov vezanja cementnih past.

Table 8.3 Sensitivity analysis of the ability of ultrasonic wave transmission method to estimate the setting times of cement pastes.

oznaka	t_{PT1}	t_v	$v_{P,3}$	$v_{P,9}$	$v_{P,PT1}$	$v_{P,K}$
mešanice	[ure]	[ure]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
ZANC/1	4.3	4.2	1510	1520	1490	1630
ZANC/2	4.2	4.1	1510	1525	1480	1630
ZANC/3	4.3	3.8	1540	1570	1530	1640
ZANC/4	4.3	4.1	1530	1558	1515	1670
ZANC/5	4.5	4.2	1540	1550	1540	1640
ZANC/6	4.5	4.1	1580	1590	1580	1670
ZANC/7	4.4	4.1	1560	1570	1550	1660
ZAN2C/1	6.6	6.4	1510	1550	1520	1700
ZAN2C/2	6.9	6.2	1540	1580	1590	1730
ZAN2C/3	6.7	6.3	1500	1550	1520	1680
ZAN2C/4	6.9	6.3	1580	1600	1610	1730
ZAN3C/1	4.5	4.2	1450	1450	1450	1680
ZAN3C/2	4.5	4.2	1430	1480	1480	1700
ZAN3C/3	4.4	4.2	1460	1510	1500	1780
ZAN3C/4	4.5	4.4	1400	1470	1470	1740
povprečne vrednosti						
ZANC	4.4	4.1	1540	1560	1530	1650
ZAN2C	6.8	6.3	1530	1570	1560	1710
ZAN3C	4.5	4.3	1440	1480	1470	1730
standardne deviacije						
ZANC	0.113	0.135	25.448	25.277	34.727	17.728
ZAN2C	0.150	0.082	36.551	24.495	45.894	24.495
ZAN3C	0.050	0.100	26.458	21.915	18.875	44.347

Statistična analiza zanesljivosti ocene začetnega časa vezanja z metodo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov je bila izvedena z analizo variance v skladu s postopkom, opisanim v poglavju 4.3.2.3. V tem primeru ničelno in alternativno domnevo zapišemo kot:

$H_0: \alpha_i = 0$; za vse $i = 1, \dots, a \rightarrow$ struktura cementne paste ne vpliva na začetni čas vezanja

$H_0: \alpha_i \neq 0$; za vsaj en $i = 1, \dots, a \rightarrow$ struktura cementne paste vpliva na začetni čas vezanja.

Analizo smo izvedli za spremenljivke t_{PT1} in t_V , pri čemer smo pri vsaki spremenljivki uporabili dva primera vzorca. V prvem primeru smo analizirali celoten vzorec spremenljivk t_{PT1} oziroma t_V , v drugem primeru pa vzorec spremenljivk t_{PT1} oziroma t_V iz skupin ZANC in ZAN3C, katerih vrednosti so si precej podobne.

Preglednica 8.4 predstavlja preglednico ANOVA za celoten vzorec vrednosti t_{PT1} iz preglednice 8.3, pri čemer je vrednost F_{krit} določena za 1 % tveganje in znaša $F_{krit} = 6.9266$. Statistika F v tem primeru znaša $F = 653.9061$ in je torej bistveno večja od vrednosti F_{krit} . To pomeni, da ničelno hipotezo zavrnemo in trdimo, da je vpliv parametra na spremenljivko t_{PT1} statistično značilen z 1 % tveganjem oziroma, da struktura cementne paste statistično značilno vpliva na začetni čas vezanja t_{PT1} .

Preglednica 8.4 Preglednica ANOVA za celoten vzorec t_{PT1} .

Table 8.4 ANOVA table for the whole t_{PT1} sample.

vir	vsota	prostostne	povprečni	statistika
odstopanj	kvadratov	stopnje	kvadrati	F
A	16.5812	2	8.2906	653.9061
E	0.1521	12	0.0127	
T	16.7333	14		

Preglednica 8.5 predstavlja preglednico ANOVA za vrednosti t_{PT1} le za cementne paste ZANC/1 – ZANC/7 in ZAN3C/1 – ZAN3C/4. Razvidno je, da je v tem primeru statistika F manjša od vrednosti F_{krit} , določene z 1 % tveganjem, ki znaša $F_{krit} = 10.5615$. Inverzna analiza pokaže, da je vrednost F večja od vrednosti F_{krit} šele pri tveganju 9 %.

Preglednica 8.5 Preglednica ANOVA za vrednosti t_{PT1} za cementne paste ZANC in ZAN3C.

Table 8.5 ANOVA table for t_{PT1} values for cement pastes ZANC in ZAN3C.

vir	vsota	prostostne	povprečni	statistika
odstopanj	kvadratov	stopnje	kvadrati	F
A	0.0353	1	0.0353	3.7595
E	0.0846	9	0.0094	
T	0.1200	10		

Preglednica 8.6 predstavlja preglednico ANOVA za celoten vzorec vrednosti t_V iz preglednice 8.3. Vrednost F_{krit} , določena s stopnjo tveganja 1 %, znaša v tem primeru $F_{krit} = 6.9266$, vrednost F pa $F = /517.8270$. To pomeni, da ničelno hipotezo zavrnemo in trdimo, da je vpliv parametra na spremenljivko

t_V statistično značilen z 1 % tveganjem oziroma da struktura cementne paste vpliva na oceno začetnega časa vezanja t_V .

Preglednica 8.6 Preglednica ANOVA za celoten vzorec t_V

Table 8.6 ANOVA table for the whole t_V sample.

vir odstopanj	vsota kvadratov	prostostne stopnje	povprečni kvadrati	statistika F
A	13.6854	2	6.8427	517.8270
E	0.1586	12	0.0132	
T	13.8440	14		

Preglednica 8.7 predstavlja preglednico ANOVA za vrednosti t_V le za cementne paste ZANC/1 – ZANC/7 in ZAN3C/1 – ZAN3C/4. Razvidno je, da je v tem primeru statistika F manjša od vrednosti F_{krit} , določene z 1 % tveganjem, ki znaša $F_{krit} = 10.5615$. Inverzna analiza pokaže, da je vrednost F večja od vrednosti F_{krit} za vrednost tveganja 7 %.

Preglednica 8.7 Preglednica ANOVA za vrednosti t_V za cementne paste ZANC in ZAN3C.

Table 8.7 ANOVA table for t_V values for cement pastes ZANC in ZAN3C.

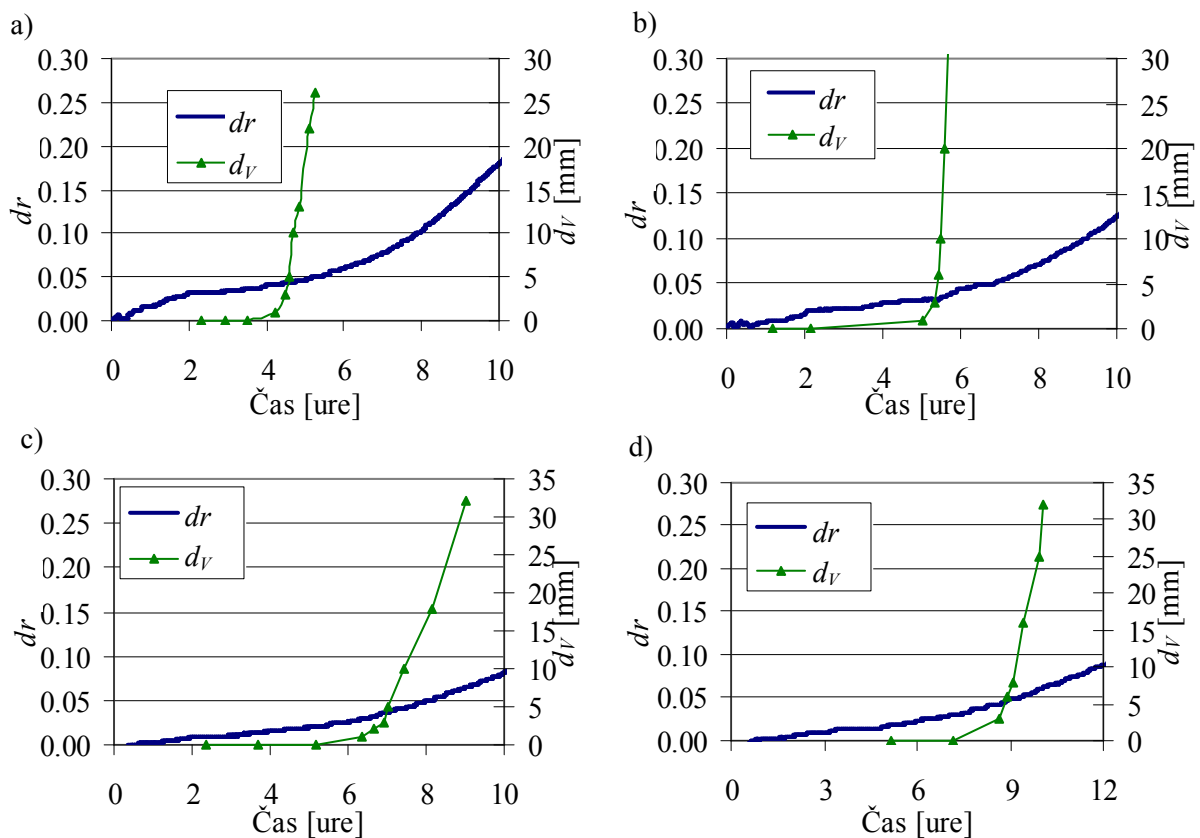
vir odstopanj	vsota kvadratov	prostostne stopnje	povprečni kvadrati	statistika F
A	0.0687	1	0.0687	4.4620
E	0.1386	9	0.0154	
T	0.2073	10		

8.2.4 Ocena časa vezanja z metodo odboja strižnih ultrazvočnih valov

Dodatno je bila analizirana možnost ocene časa vezanja poljubne cementne paste z metodo odboja strižnih ultrazvočnih valov. V ta namen smo primerjali razvoj globine penetracije Vicatove igle s časom d_V-t in spremembo vrednosti strižnega odbojnega koeficienta s časom $dr-t$ za vse cementne paste, navedene v preglednici 5.6. Ker je v splošnem opazna hipna sprememba oziroma skok vrednosti strižnega odbojnega koeficienta dr na samem začetku merjenja, je bil pri korelaciji med d_V-t in $dr-t$ uporabljen relativni potek krivulje $dr-t$.

Zaradi prevelikega števila vseh meritev (skupno 20) je na sliki 8.10 prikazanih le nekaj primerov korelacije med d_V-t in $dr-t$, medtem ko so v preglednici 8.8 prikazani karakteristični podatki za vse analizirane cementne paste. Podobno kot v primeru korelacije med d_V-t in v_p-t (poglavje 8.2.2) tudi v tem primeru oznaki dr_3 in dr_9 pomenita vrednosti strižnega odbojnega koeficienta pri časih $t_{z,V,3}$ in $t_{z,V,9}$.

Povprečna vrednost strižnega odbojnega koeficienta pri času $t_{z,V,3}$ za vse analizirane cementne paste je znašala $dr_3' = 0.0452$, povprečna vrednost strižnega odbojnega koeficienta pri času $t_{z,V,9}$ pa $dr_9' = 0.0513$. Opazimo lahko, da se je z višanjem temperature okolice, ki ji je bila cementna pasta izpostavljena med procesom hidratacije, vrednost strižnega odbojnega koeficienta dr_3 in dr_9 povečevala.



Slika 8.10 Povezava med krivuljo $dr-t$ in prodorom Vicatove igle d_V , a) pasta C1035, b) pasta C1040, c) pasta C1050, d) pasta C1065.

Figure 8.10 Relationship between $dr-t$ curve and penetration of Vicat needle d_V , a) paste C1035, b) paste C1040, c) paste C1050, d) paste C1065.

Preglednica 8.8 Povezava med krivuljo $dr-t$ in prodorom Vicatove igle d_V - karakteristične vrednosti za vse analizirane cementne paste.

Table 8.8 Relationship between $dr-t$ curve and penetration resistance of Vicat needle d_V – characteristic values for all cement pastes used.

oznaka mešanice	začetni čas vezanja [ure]		vrednost dr	
	$t_{z,V,3}$	$t_{z,V,9}$	dr_3	dr_9
C1030	3.0	3.3	0.040	0.042
C1035	4.5	4.7	0.044	0.045
C1040	5.3	5.5	0.032	0.036
C1050	6.9	7.3	0.035	0.040
C1060	8.3	9.0	0.049	0.057
C1065	8.7	9.6	0.044	0.054
C2	6.5	6.9	0.065	0.075
C3	7.8	8.0	0.036	0.038
C4	4.3	4.5	0.040	0.046
CT11	8.5	9.2	0.033	0.035
CT26	5.7	5.8	0.065	0.068
CT32	4.8	5.3	0.066	0.083
CT11060	9.5	10.8	0.030	0.039
CT26060	6.8	7.2	0.057	0.065
CT32060	5.5	5.7	0.055	0.065
CF3	4.9	5.2	0.047	0.052
CC3A3	7.2	7.5	0.056	0.061
C2040	5.4	5.8	0.043	0.044
C3040	6.6	6.9	0.040	0.044
C4040	3.0	3.4	0.032	0.042

V skladu z rezultati, prikazanimi v preglednici 8.8, lahko začetni čas vezanja cementne paste približno ocenimo kot čas, pri katerem sprememba vrednosti strižnega odbojnega koeficienta dr znaša med 0.0350 in 0.0650.

8.2.5 Ocena časa vezanja s kombinacijo ultrazvočnih metod

Iz slik 6.17, ki prikazujejo neposredno primerjavo med vrednostmi v_p in dr v določenem času, je razvidno, da lahko posamezne krivulje v_p-dr smiselno razdelimo na tri območja (poglavje 6.2.4). Pomen druge in tretje točke na krivuljah v_p-dr je razložen v poglavju 6.2.4.

Prva točka na krivuljah v_p-dr predstavlja vrednost hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov in strižnega odbojnega koeficienta pri začetnem času vezanja $t_{z,V}$, določenem s standardno Vicatovo metodo. Čas $t_{z,V}$ je določen v skladu z enačbo:

$$t_{z,V} = \frac{t_{z,V,3} + t_{z,V,9}}{2}. \quad (8.13)$$

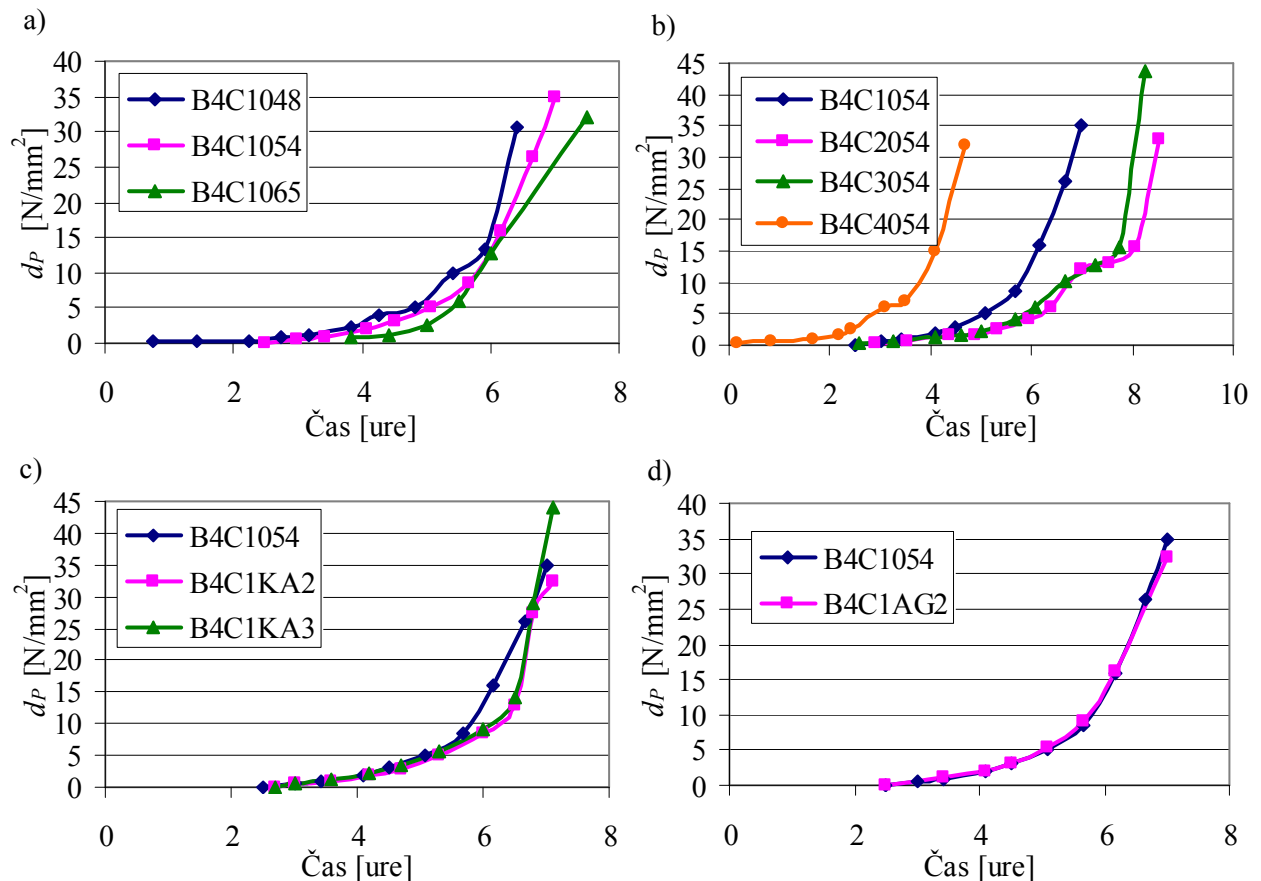
Razvidno je, da ta točka v vseh primerih dobro sovпада s koncem prvega območja na krivuljah v_p-dr . S kombinacijo metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov in metode odboja strižnih ultrazvočnih valov lahko torej začetek vezanja poljubne cementne paste enostavno definiramo s koncem prvega linearnega območja na krivulji v_p-dr .

8.3 BETON

V skladu s standardom ASTM C 403-88 (poglavje 3.3.4) se začetni in končni čas vezanja betona določa na betonskih mešanica z maksimalnim zrnom agregata 4 mm. Tako smo možnost uporabe metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov za oceno začetnega in končnega časa vezanja betona analizirali za betonske mešanice z oznakami B4C1054 (osnovna), B4C1048, B4C1065, B4C1KA2, B4C1KA3, B4C2054, B4C3054, B4C4054 in B4C1AG2 (poglavji 5.3 in 6.3.1).

8.3.1 Določitev začetnega in končnega časa vezanja s penetrometrsko metodo

Slika 8.11 prikazuje vpliv obravnavanih parametrov na časovni potek velikosti napetosti d_p , potrebne za prodor penetracijske igle do globine 25 mm.



Slika 8.11 Prikaz časovnega razvoja odpornosti na penetracijo d_p za posamezne betonske mešanice, a) vpliv v/c razmerja, b) vpliv vrste cementa, c) vpliv količine agregata, d) vpliv vrste agregata.

Figure 8.11 A plot of penetration resistance d_p versus elapsed time for each concrete mixture, a) influence of w/c ratio, b) influence of cement type, c) influence of amount of aggregate, d) influence of aggregate type.

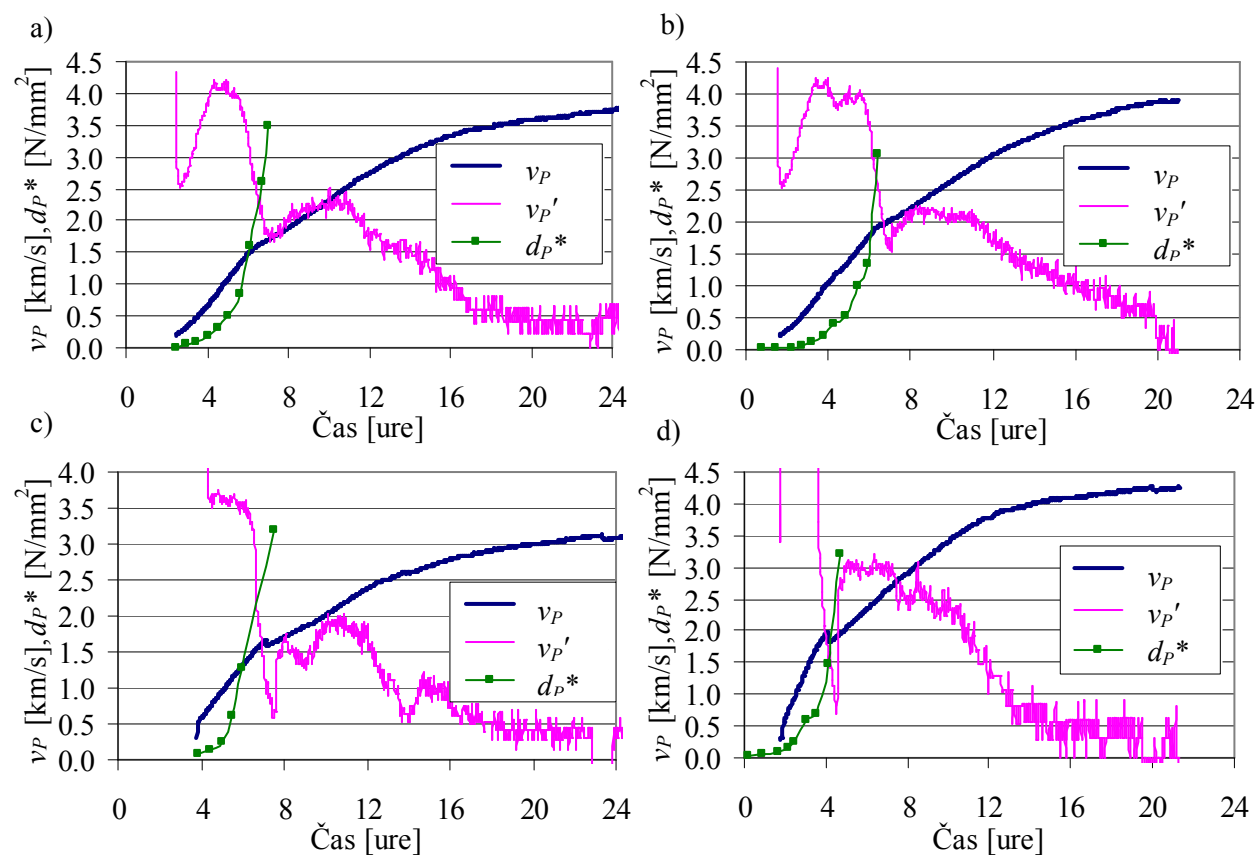
Pričakovano sta tako začetni čas vezanja $t_{z,P}$ kot končni čas vezanja $t_{k,P}$ najkrajša v primeru najnižjega vodo/cementnega razmerja v betonu ter v primeru uporabe cementa CEM I 52,5R. Količina in vrsta agregata v betonu nista bistveno vplivali na začetni in končni čas vezanja betona. Začetni in končni časi vezanja obravnavanih betonskih mešanice so prikazani v preglednici 8.9.

Preglednica 8.9 Vrednosti začetnega in končnega časa vezanja betonskih mešanic.
 Table 8.9 Values of initial and final setting time for all concrete mixtures.

oznaka mešanice	čas vezanja [ure]	
	$t_{z,P}$	$t_{k,P}$
B4C1054	4.6	6.8
B4C1048	4.2	6.2
B4C1065	5.3	7.3
B4C2054	5.6	8.1
B4C3054	5.7	7.9
B4C4054	2.6	4.4
B4C1KA2	5.1	6.8
B4C1KA3	4.8	6.7
B4C1AG2	4.7	6.8

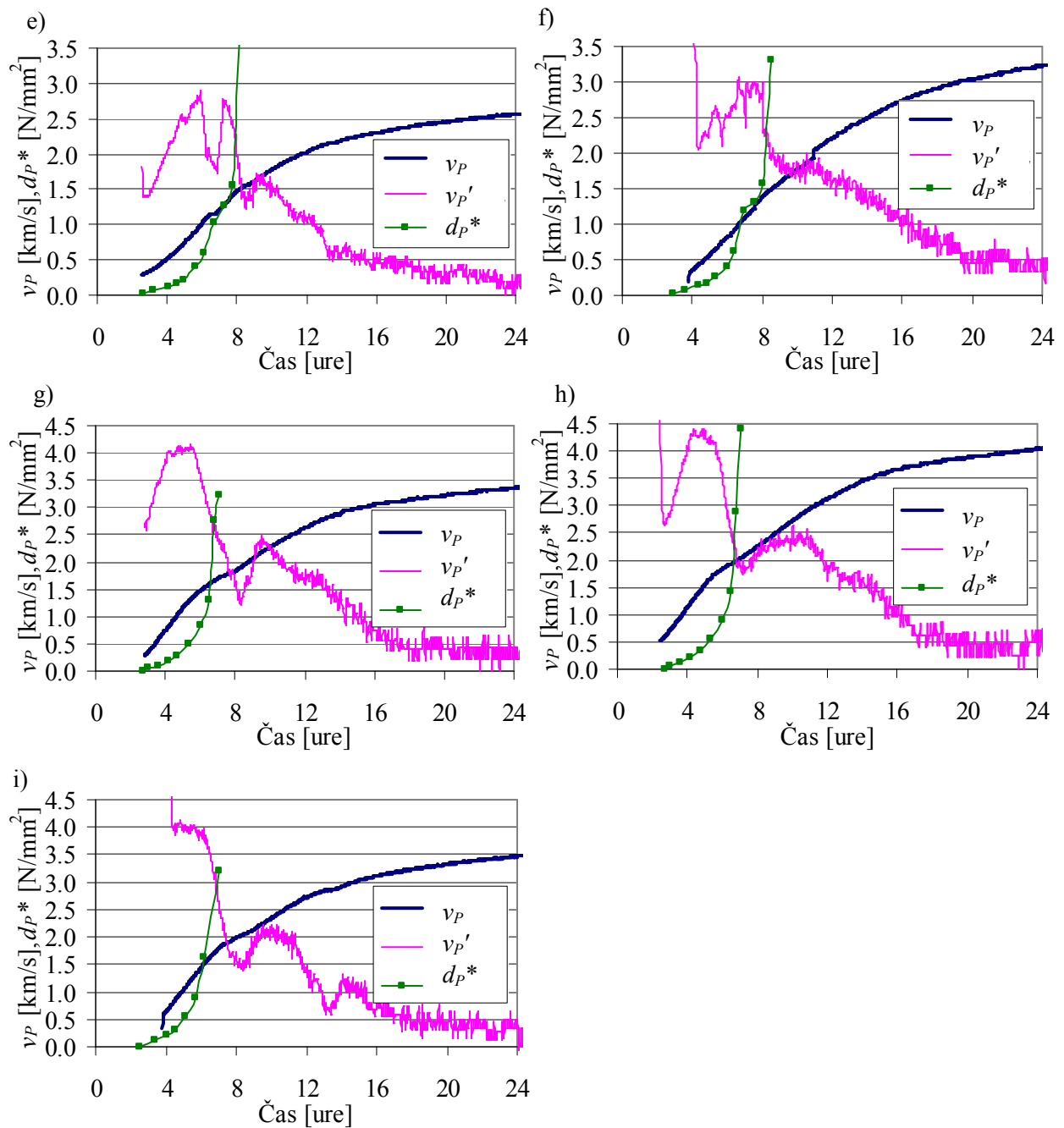
8.3.1 Ocena časa vezanja z metodo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov

Slike 8.12 prikazujejo povezavo med hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov v_p skozi obravnavane betonske mešanice (modre krivulje) in vrednostjo napetosti d_p , ki je potrebna za prodor penetracijske igle do globine 25 mm (zeleni kvadrati).



Slika 8.12/1 Povezava med krivuljo v_p-t in prodorom penetracijske igle v betonske mešanice d_p , a) mešanica B4C1054, b) mešanica B4C1048, c) mešanica B4C1065, d) mešanica B4C4054.

Figure 8.12/1 Relationship between v_p-t curve and penetration of penetrometer needle d_p , a) mixture B4C1054, b) mixture B4C1048, c) mixture B4C1065, d) mixture B4C4054.



Slika 8.12/2. Povezava med krivuljo v_P-t in prodorom penetracijske igle v betonske mešanice d_P , e) mešanica B4C3054, f) mešanica B4C2054, g) mešanica B4C1KA2, h) mešanica B4C1KA3, i) mešanica B4C1AG2.

Figure 8.12/2. Relationship between v_P-t curve and penetration of penetrometer needle d_P , e) mixture B4C3054, f) mixture B4C2054, g) mixture B4C1KA2, h) mixture B4C1KA3, i) mixture B4C1AG2.

Rdeče krivulje predstavljajo numerične odvode krivulj hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov v_P' .

Na slikah 8.12 je vrednost d_P^* definirana kot

$$d_P^* = \frac{d_P}{10}. \quad (8.14)$$

Tako je začetek vezanja definiran s časom, kjer vrednost d_P^* znaša $d_P^* = 0.35 \text{ N/mm}^2$, konec vezanja pa s časom, kjer vrednost d_P^* znaša $d_P^* = 2.76 \text{ N/mm}^2$.

Vidimo lahko, da začne hitrost v_p naraščati približno takrat, ko se pri betonskih mešanica začne pojavljati odpornost proti prodoru penetrometske igle v betonsko strukturo. Začetni čas vezanja betona $t_{z,P}$, določen s penetrometro, precej dobro sovпада s časom prevojne točke t_{PTB} na krivulji v_p-t . Ta fenomen je še boljše razviden iz preglednice 8.10, ki prikazuje čase omenjenih karakterističnih točk in vrednosti hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov pri času začetka (hitrost $v_{P,BZ}$) in konca (hitrost $v_{P,BK}$) vezanja betona. Povprečna vrednost hitrosti $v_{P,BZ}$ znaša $v_{P,BZ}' = 976$ m/s, povprečna vrednost hitrosti $v_{P,BK}$ pa $v_{P,BK}' = 1651$ m/s. Omenjene ugotovitve se zelo dobro ujemajo z ugotovitvami nekaterih drugih raziskovalcev (Reinhardt in Grosse 2003, 2004, Lee s sodelavci 2004, Voigt s sodelavci 2005, Robeyst s sodelavci 2008), ki so opravili prve poskuse korelacije vezanja betona s hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton.

Preglednica 8.10 Karakteristični podatki za vse betonske mešanice.

Table 8.10 Characteristic data for all concrete mixtures.

oznaka mešanice	karakteristične točke [ure]			hitrost ultrazvoka [m/s]	
	$t_{z,P}$	$t_{k,P}$	t_{PTB}	$v_{P,BZ}$	$v_{P,BK}$
B4C1054	4.6	6.8	4.7	910	1650
B4C1048	4.2	6.2	4.1	1106	1820
B4C1065	5.3	7.3	5.4	1065	1610
B4C2054	5.6	8.1	5.6	780	1410
B4C3054	5.7	7.9	5.8	930	1460
B4C4054	2.6	4.4	2.7	1080	1890
B4C1KA2	5.1	6.8	5.0	850	1470
B4C1KA3	4.8	6.7	4.9	1130	1810
B4C1AG2	4.7	6.8	4.8	930	1740

8.4 SKLEPI

V tem poglavju je prikazana možnost uporabe metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov in metode odboja strižnih ultrazvočnih valov za oceno vezanja materialov s cementnim vezivom. Začetek vezanja poljubne cementne paste lahko dovolj zanesljivo ocenimo s časom, ki pripada prvi prevojni točki na krivulji časovnega naraščanja hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi cementno pasto. Ta čas se pojavi približno takrat, ko vrednost hitrosti v_p doseže vrednost hitrosti v_p skozi vodo (1430 m/s). Tako lahko začetni čas vezanja poljubne cementne paste enostavno ocenimo kot čas, pri katerem hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov znaša med 1400 m/s in 1450 m/s.

Konec vezanja cementne paste lahko ocenimo s časom, pri katerem hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov znaša med 1600 m/s in 1650 m/s.

V skladu s predlagano razdelitvijo krivulje v_p-t na pet območij (poglavje 6.2.1) se torej začetek vezanja poljubne cementne paste pojavi po koncu območja 2, konec vezanja pa v prvi polovici območja 3. Te ugotovitve popolnoma ustrezajo definiciji posameznih obdobjih hidratacijskega procesa v skladu s Schindlerjem (slika 2.1, poglavje 2).

Statistična analiza zanesljivosti ocene začetka vezanja poljubne cementne paste na osnovi časov t_{PT1} in t_V je bila izvedena z analizo variance. Rezultati so pokazali, da je vpliv strukture cementne paste na časa t_{PT1} in t_V statistično značilen z 1 % tveganjem.

V skladu z rezultati, prikazanimi v tem poglavju, lahko začetni čas vezanja poljubne cementne paste približno ocenimo kot čas, pri katerem velikost spremembe strižnega odbojnega koeficienta znaša med 0.035 in 0.0650.

Pri uporabi kombinirane ultrazvočne metode lahko začetek vezanja poljubne cementne paste ocenimo s koncem prvega linearnega območja na krivulji $v_p - dr$.

Analiza uporabe metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov za oceno vezanja različnih betonskih mešanic je pokazala, da lahko, podobno kot v primeru čistih cementnih past, tudi začetek vezanja betona dobro ocenimo s časom pojava prve prevojnne točke na krivulji $v_p - t$.

DEL 4 MODELIRANJE

9. NUMERIČNI MODEL ZA OCENO TLAČNE TRDNOSTI BETONA NA PODLAGI HITROSTI PREHODA ULTRAZVOKA SKOZI BETON

9.1 UVOD

Številni raziskovalci poizkušajo korelirati hitrost prehoda ultrazvočnih valov v_p [km/s] skozi beton in tlačno trdnost betona TT [N/mm²]. Elvery in Ibrahim (1976) sta analizirala morebitno sovisnost med tlačno trdnostjo betona TT in hitrostjo prehoda ultrazvočnega valovanja v_p skozi beton ter ugotovila, da količina agregata v betonu pomembno vpliva na sovisnost $TT - v_p$. Elvery in Ibrahim (1976) ter Byfors (1982) so ugotovili bilinearno povezavo med hitrostjo prehoda ultrazvočnih valov skozi beton in logaritmom tlačne trdnosti betona.

Preglednica 9.1 Različne empirične zveze med hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton in tlačno trdnostjo betona.

Table 9.1 Different empirical relationships between the velocity of ultrasonic longitudinal waves through concrete and concrete compressive strength.

regresijski model	enačba	avtor
$TT = 0.060 \exp(1.44 v_p)$	(9.1)	Ravindrajah s sodelavci (Evangelista s sodelavci 2003)
$TT = 0.0133 v_p^{5.543}$	(9.2)	Almeida (Evangelista s sodelavci 2003)
$TT = 0.0110 v_p^{5.654}$	(9.3)	Almeida (Evangelista s sodelavci 2003)
$TT = 0.020 v_{p \times 1000} - 65.4$	(9.4)	Goncalves (Evangelista s sodelavci 2003)
$TT = 36.72 v_p - 129.077$	(9.5)	Qasrawi 2000
$TT = 44.52 v_p - 126.83$	(9.6)	Soshiroda s sodelavci (Evangelista s sodelavci 2003)
$TT = 54.18 v_p - 206.27$	(9.7)	Soshiroda s sodelavci (Evangelista s sodelavci 2003)
$TT = 124.4 v_p - 587.0 + \epsilon$	(9.8)	Phoon s sodelavci (Evangelista s sodelavci 2003)
$TT = 10^{-28} (v_{p \times 1000})^{8.1272}$	(9.9)	Pascale s sodelavci (Evangelista s sodelavci 2003)
$TT = 0.012 \exp(2.27 v_p) \pm 6.4$	(9.10)	Elvery, Ibrahim (Evangelista s sodelavci 2003)
$TT = 0.0259 \exp(1.612 v_p)$	(9.11)	Teodoru (Evangelista s sodelavci 2003)
$TT = 1.19 \exp(0.715 v_p)$	(9.12)	Nash't s sodelavci 2005
$TT = 0.008 \exp(0.002 v_{p \times 1000})$	(9.13)	Demirboga s sodelavci 2004
$TT = 1.146 \exp(0.77 v_p)$	(9.14)	Turgut 2004
$TT = \exp((-5.4 \pm 0.8) + (0.00185 \pm 0.00018) v_{p \times 1000})$	(9.15)	del Rio s sodelavci 2004

Preglednica 9.1 prikazuje različne regresijske modele za oceno tlačne trdnosti betona z metodo prehoda ultrazvočnih valov. Ob uporabi standardnih matematičnih orodij (regresijska analiza, metoda najmanjših kvadratov) je sovisnost med tlačno trdnostjo betona in hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton precej zapletena in nezanesljiva, na kar kažejo relativno nizki koeficienti korelacije R^2 med dejanskimi tlačnimi trdnostmi TT [N/mm²] in tlačnimi trdnostmi TT_{reg} [N/mm²], izračunanimi s predlaganimi regresijskimi modeli. Le-ti znašajo običajno okrog vrednosti 0.60. Razlog za slabo korelacijo je predvsem v neupoštevanju strukture betonov oziroma v neupoštevanju vplivov posameznih vplivnih parametrov sestave betonske mešanice in pogojev okolja ter njihove medsebojne korelacije na zvezo $TT - v_p$. Posamezni parametri namreč ne vplivajo v enaki meri na tlačno trdnost betona na eni in na hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton na drugi strani (Popovics 2007).

V zadnjem času številni raziskovalci analizirajo vpliv sestave betonske mešanice na hitrost ultrazvočnega valovanja skozi beton, pri čemer uporabljajo različne komercialne inštrumente, s katerimi določajo hitrost prehoda ultrazvoka skozi beton ročno, v posameznih časovnih intervalih. Hernandez s sodelavci (2000) je tako analiziral možnost ugotavljanja poroznosti betona z metodo prehoda ultrazvočnega valovanja skozi beton, pri čemer je ugotovil, da so rezultati zanesljivejši v primeru znane sestave betonske mešanice. Ohdaira in Masuzawa (2000) sta analizirala vpliv deleža porne vode na hitrost vzdolžnega ultrazvočnega valovanja v betonu, pri čemer je delež porne vode v različnih betonskih mešanicah znašal med 0 – 8 %. Ugotovila sta, da se hitrost ultrazvočnega valovanja povečuje linearno z večanjem vsebnosti porne vode v betonu, ne glede na sestavo betona. Do podobnih zaključkov je prišel Berriman s sodelavci (2005), ki je ugotovil, da se z večanjem relativne vlažnosti betona hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov v betonu povečuje. Ugotovil je tudi, da se hitrost ultrazvočnega valovanja povečuje linearno z večanjem vsebnosti agregata v betonu. Abo-Qudais (2004) je analiziral vpliv sestave betonske mešanice na hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov in ugotovil, da se le-ta povečuje s starostjo betona, z nižanjem vodo/cementnega razmerja v betonu in z večanjem velikosti agregata v betonu. Do podobnih ugotovitev je prišel tudi del Rio s sodelavci (2004). Lorenzi s sodelavci (2007) je med drugim analiziral vpliv vrste agregata in vsebnosti zraka v betonu na hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton. Ugotovil je, da vrsta agregata pomembno vpliva na hitrost prehoda ultrazvoka, pri čemer so bile največje vrednosti hitrosti dosežene v primeru apnenčevega agregata. Z večanjem vsebnosti zračnih por v betonu se je hitrost prehoda ultrazvoka zmanjševala.

Popovics (1990, 1992) je izpostavil zapletenost in kompleksnost odnosa med tlačno trdnostjo betona in hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton ter pomembnost podrobne analize vpliva posameznih parametrov betonske mešanice na zvezo $TT - v_p$ (Popovics 2007). Poudaril je pomembnost nadaljnjih študij ter uporabo novih in naprednejših modelov za oceno tlačne trdnosti betona na osnovi hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton.

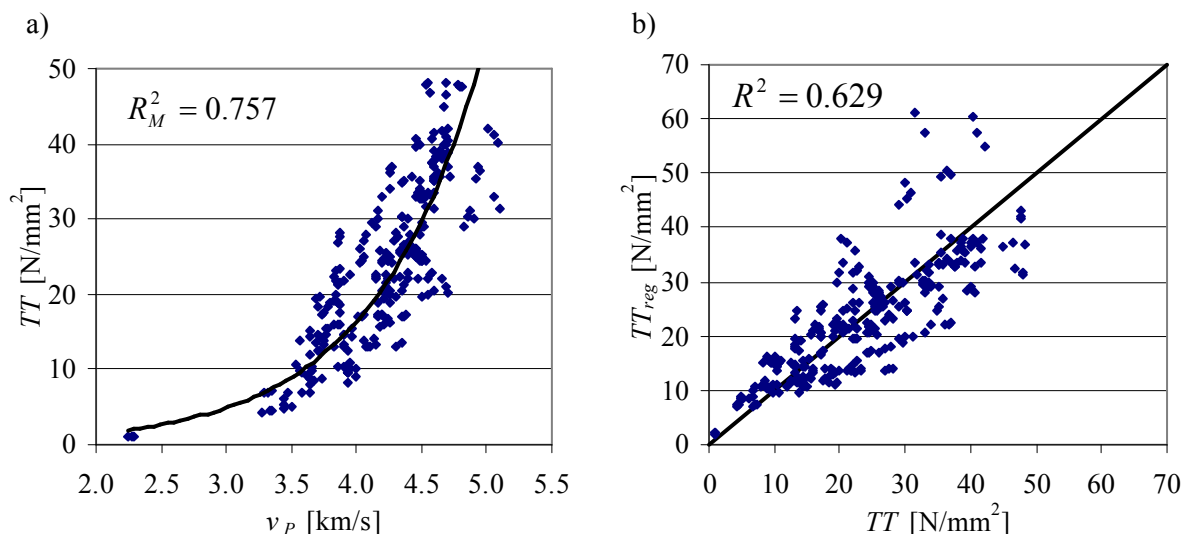
9.2 VPLIV POSAMEZNIH PARAMETROV NA ZVEZO $TT - v_p$

Poglavje 7 prikazuje vpliv različnih parametrov betonske mešanice in pogojev okolja na razvoj hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov in tlačnih trdnosti betona, slika 9.1a pa prikazuje zvezo $TT - v_p$ za vse obravnavane betonske vzorce skupaj (skupaj 288 podatkov). To zvezo najboljše opiše eksponentna funkcija oblike

$$TT_{reg} = 0.1331 \exp(1.2020v_p). \quad (9.16)$$

Korelacija med dejanskimi tlačnimi trdnostmi in tlačnimi trdnostmi, izračunanimi z nelinearnim regresijskim modelom (9.16), je prikazana na sliki 9.1b, pri čemer koeficient korelacije med TT in TT_{reg} znaša $R^2 = 0.629$. Relativno nizek koeficient korelacije pomeni sorazmerno nizko stopnjo zanesljivosti ocene tlačne trdnosti betona na osnovi hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton, sama vrednost koeficienta korelacije pa je primerljiva s koeficienti korelacije pri uporabi modelov, prikazanih v preglednici 9.1.

V preglednici 9.2 so prikazani koeficienti korelacije med dejanskimi tlačnimi trdnostmi vseh betonskih vzorcev in tlačnimi trdnostmi, izračunanimi z nekaterimi regresijskimi modeli, prikazanimi v preglednici 9.1.



Slika 9.1 Zveza $TT - v_p$ za vse betonske preskušance skupaj, a) aproksimacija z najustreznejšim regresijskim modelom (9.16), b) korelacija med dejanskimi in izračunanimi tlačnimi trdnostmi.

Figure 9.1 Relationship $TT - v_p$ for all data, a) approximation with the most appropriate non-linear regression model (Eq. 9.16), b) correlation between actual and calculated compressive strengths.

Preglednica 9.2 Ustreznost različnih regresijskih modelov za oceno tlačne trdnosti betona na osnovi hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton.

Table 9.2 Comparison of different regression models in their ability to estimate the concrete compressive strength on the basis of the velocity of ultrasonic longitudinal waves.

enačba	(9.1)	(9.2)	(9.3)	(9.4)	(9.5)	(9.6)	(9.7)
R^2	0.604	0.612	0.620	0.610	0.610	0.610	0.610
enačba	(9.8)	(9.9)	(9.10)	(9.11)	(9.12)	(9.13)	(9.14)
R^2	-	0.582	-	0.584	0.615	0.534	0.622

Povprečni koeficient korelacije $TT - TT_{reg}$ za obravnavane regresijske modele znaša $R^2 = 0.601$, standardna deviacija pa $\sigma = 0.025$, kar pomeni, da je ocena tlačne trdnosti z vsemi obravnavanimi regresijskimi modeli približno enako zanesljiva.

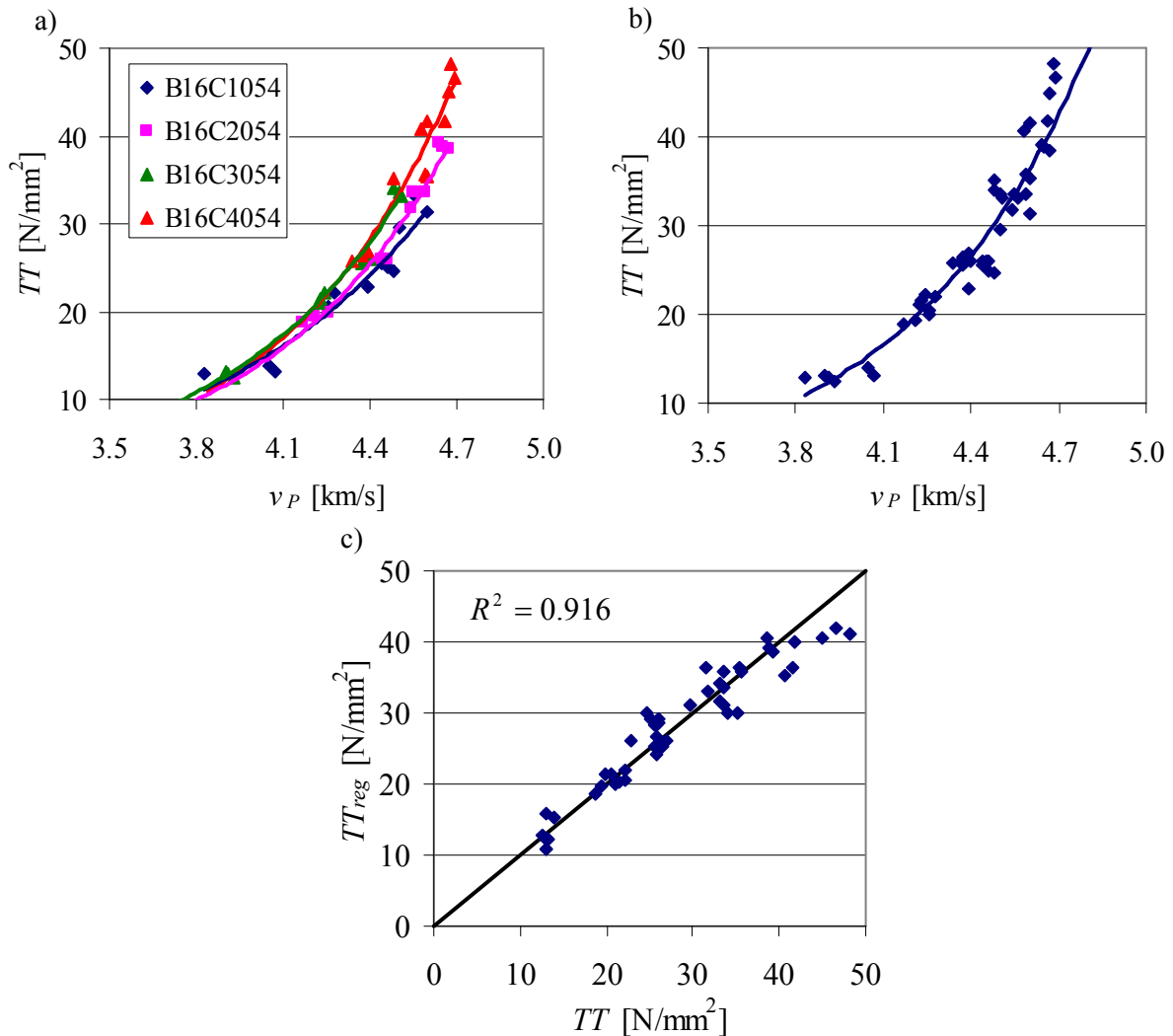
Podrobno poznavanje vpliva posameznih parametrov na odnos $TT - v_p$ in uporaba naprednejših matematičnih tehnik sta torej ključnega pomena za zanesljivejšo oceno tlačne trdnosti betonov poljubne sestave na osnovi hitrosti prehoda ultrazvočnih valov skozi beton.

V nadaljevanju je podrobneje prikazan vpliv posameznih obravnavanih parametrov sestave betonske mešanice in pogojev okolja na sovisnost med tlačno trdnostjo betona TT [N/mm^2] in hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov v_p [km/s] skozi beton.

9.2.1 Vpliv vrste cementa v betonu

Vpliv vrste cementa na razvoj tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton je prikazan v poglavju 7.2.1. Vrsta cementa ima pomemben vpliv tako na tlačno trdnost kot na hitrost prehoda ultrazvočnih valov skozi beton. Slike 9.2 prikazujejo sovisnost med tlačno trdnostjo betonskih preskušancev in hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi betonske preskušance za

mešanice z različnimi vrstami cementa v betonu, pri čemer je na sliki 9.2a sovisnost $TT - v_p$ prikazana za vsako betonsko mešanico posebej, na sliki 9.2b pa za vse obravnavane betonske mešanice skupaj.



Slika 9.2 Vpliv vrste cementa v betonu na razmerje $TT - v_p$, a) posamezni regresijski modeli, b) skupni regresijski model, c) korelacija med dejanskimi in izračunanimi tlačnimi trdnostmi (regresijski model 9.21).

Figure 9.2 Influence of cement type on the $TT - v_p$ relationship, a) individual regression models, b) common regression model, c) correlation between actual and calculated compressive strengths (regression model 9.21).

Preglednica 9.3 Regresijski modeli $TT - v_p$, vpliv vrste cementa v betonu.

Table 9.3 Regression models $TT - v_p$, influence of cement type.

oznaka	regresijski model	št. enačbe	R_M^2
B16C1054	$TT_{reg} = 0.0653 \exp(1.3436v_p)$	(9.17)	0.925
B16C2054	$TT_{reg} = 0.0259 \exp(1.5655v_p)$	(9.18)	0.974
B16C3054	$TT_{reg} = 0.0256 \exp(1.5897v_p)$	(9.19)	0.987
B16C4054	$TT_{reg} = 0.0169 \exp(1.6868v_p)$	(9.20)	0.923
CEMskupaj	$TT_{reg} = 0.0271 \exp(1.5654v_p)$	(9.21)	0.934

Iz koeficientov korelacije R_M^2 , ki opisujejo ustreznost oziroma natančnost izbranega nelinearnega regresijskega modela (preglednica 9.3), je razvidno, da lahko vse štiri obravnavane mešanice dovolj

natančno opišemo z enim samim regresijskim modelom s koeficientom korelacije $R_M^2 = 0.934$ (enačba 9.21, slika 9.2b). Koeficient korelacije med dejanskimi tlačnimi trdnostmi TT in tlačnimi trdnostmi TT_{reg} , izračunanimi z regresijskim modelom (9.21), je relativno visok in znaša $R^2 = 0.91$ (slika 9.2c).

9.2.2 Vpliv vodo/cementnega razmerja

Vpliv vodo/cementnega razmerja na razvoj tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton je prikazan v poglavju 7.2.2. Pričakovano ima razmerje v/c pomemben vpliv tako na razvoj tlačnih trdnosti betona kot na razvoj hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton.

Preglednica 9.4 Regresijski modeli $TT - v_p$, vpliv vodo/cementnega razmerja, manj agregata v betonu.

Table 9.4 Regression models $TT - v_p$, influence of water/cement ratio, lower amount of aggregate.

oznaka	regresijski model	št. enačbe	R_M^2
B16C1KA2040	$TT_{reg} = 0.0130 \exp(1.8005v_p)$	(9.22)	0.959
B16C1KA2	$TT_{reg} = 0.1037 \exp(1.3697v_p)$	(9.23)	0.990
B16C1KA2065	$TT_{reg} = 0.0214 \exp(1.7491v_p)$	(9.24)	0.989
KA2skupaj	$TT_{reg} = 0.0647 \exp(1.4576v_p)$	(9.25)	0.955

Preglednica 9.5 Regresijski modeli $TT - v_p$, vpliv vodo/cementnega razmerja.

Table 9.5 Regression models $TT - v_p$, influence of water/cement ratio.

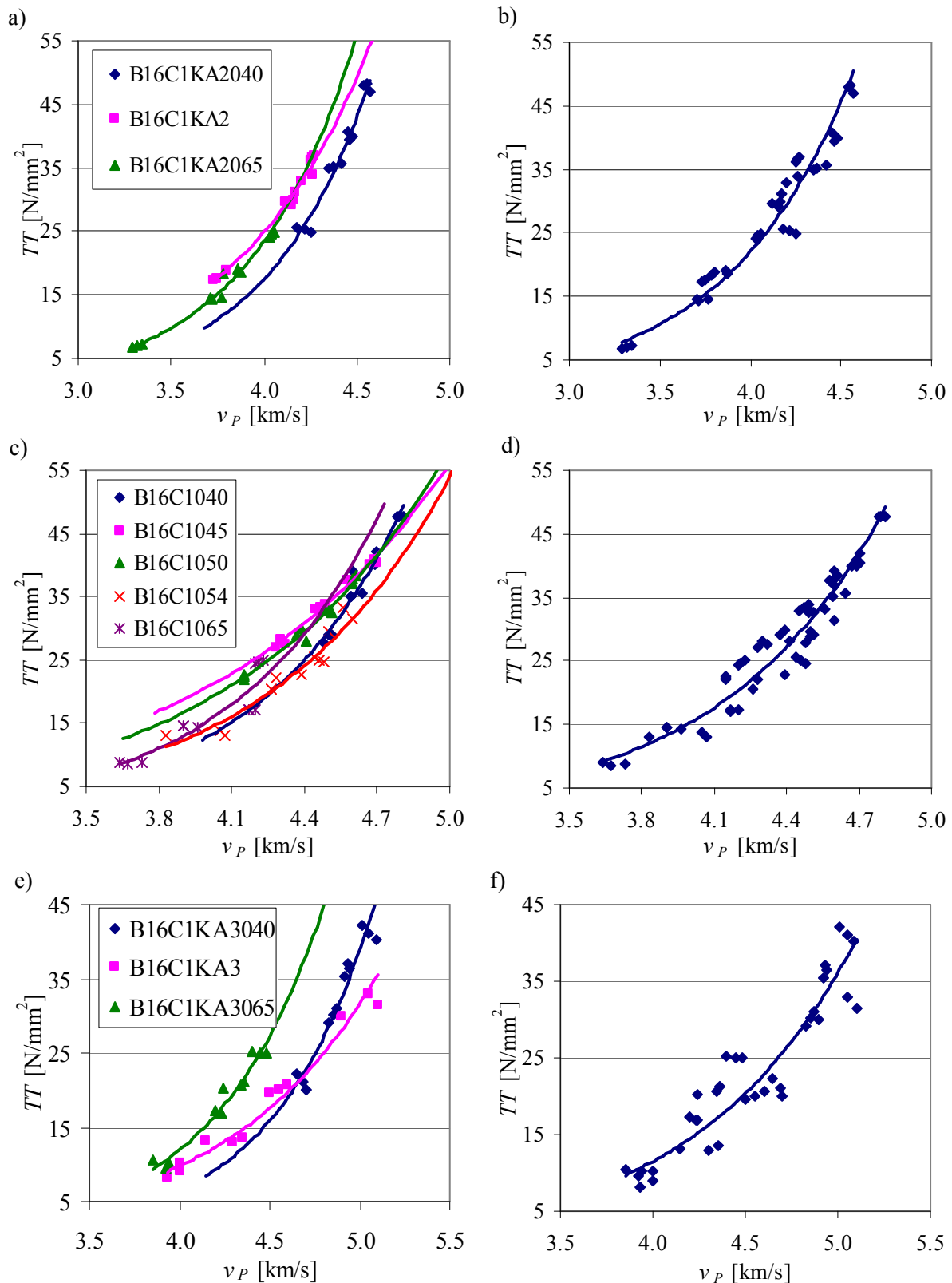
oznaka	regresijski model	št. enačbe	R_M^2
B16C1040	$TT_{reg} = 0.0162 \exp(1.6684v_p)$	(9.26)	0.950
B16C1045	$TT_{reg} = 0.3970 \exp(0.9997v_p)$	(9.27)	0.990
B16C1050	$TT_{reg} = 0.1961 \exp(1.1396v_p)$	(9.28)	0.984
B16C1054	$TT_{reg} = 0.0653 \exp(1.3436v_p)$	(9.29)	0.925
B16C1065	$TT_{reg} = 0.0235 \exp(1.6187v_p)$	(9.30)	0.885
VCskupaj	$TT_{reg} = 0.0481 \exp(1.4408v_p)$	(9.31)	0.930

Preglednica 9.6 Regresijski modeli $TT - v_p$, vpliv vodo/cementnega razmerja, več agregata v betonu.

Table 9.6 Regression models $TT - v_p$, influence of water/cement ratio, higher amount of aggregate.

oznaka	regresijski model	št. enačbe	R_M^2
B16C1KA3040	$TT_{reg} = 0.0050 \exp(1.7907v_p)$	(9.32)	0.929
B16C1KA3	$TT_{reg} = 0.0875 \exp(1.1782v_p)$	(9.33)	0.968
B16C1KA3065	$TT_{reg} = 0.0161 \exp(1.6523v_p)$	(9.34)	0.955
KA3skupaj	$TT_{reg} = 0.1169 \exp(1.1464v_p)$	(9.35)	0.876

Slika 9.3 prikazuje vpliv v/c razmerja na sovisnost med tlačno trdnostjo betona in hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton za betonske mešanice z različnimi vsebnostmi agregata v betonu. Podobno kot v primeru vrste cementa lahko tudi v tem primeru (za vsako količino agregata posebej) sovisnost $TT - v_p$ zadovoljivo opišemo z enim samim regresijskim modelom (preglednice 9.4 – 9.6).

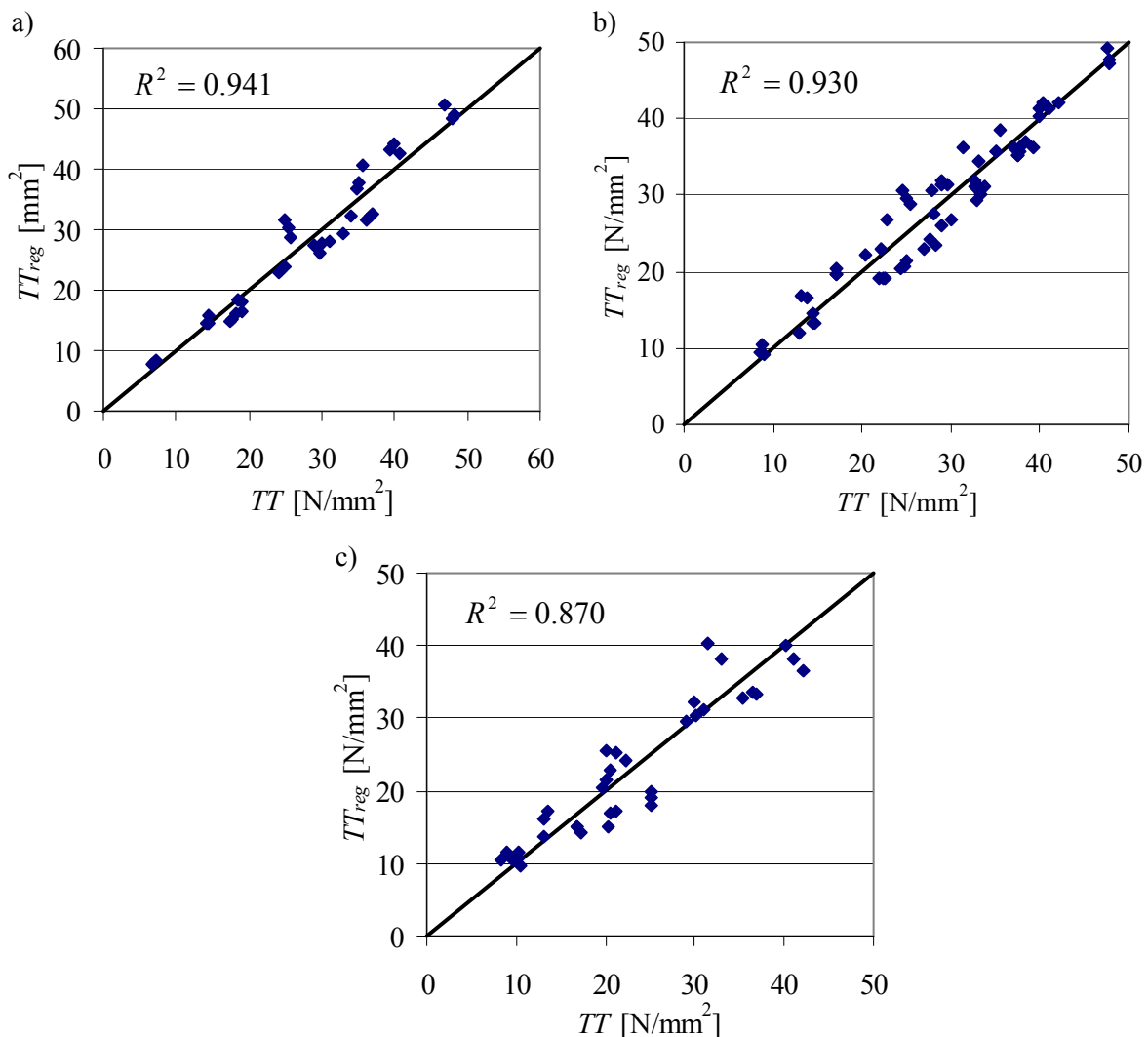


Slika 9.3 Vpliv w/c razmerja na razmerje $TT - v_p$, a) posamezni regresijski modeli, manj agregata, b) skupni regresijski model, manj agregata, c) posamezni regresijski modeli, d) skupni regresijski model, več agregata, e) posamezni regresijski modeli, več agregata, f) skupni regresijski model, več agregata.

Figure 9.3 Influence of w/c ratio on the $TT - v_p$ relationship, a) individual regression models, lower amount of aggregate, b) common regression model, lower amount of aggregate, c) individual regression models, d) common regression model, higher amount of aggregate, e) individual regression models, higher amount of aggregate, f) common regression model, higher amount of aggregate.

Slika 9.4 prikazuje zvezo med dejanskimi tlačnimi trdnostmi in tlačnimi trdnostmi, izračunanimi z regresijskimi modeli (9.25), (9.31) in (9.35). Iz slik 9.4 vidimo, da vrednost koeficienta korelacije R^2 malenkostno pada z večanjem količine agregata v betonu. Tako koeficient korelacije v primeru volumskega deleža agregata v betonu 55.4 % znaša $R^2 = 0.941$, v primeru deleža agregata 66.6 % $R^2 = 0.930$, v primeru deleža agregata 78.6 % pa $R^2 = 0.870$.

Rezultat ni presenetljiv, saj večja količina agregata v betonu oziroma posledično manjši delež cementa prispevata k večji nehomogenosti strukture betona (Mehta 1986). Relativno visoki koeficienti korelacije med dejanskimi tlačnimi trdnostmi betona TT in tlačnimi trdnostmi TT_{reg} , izračunanimi na podlagi nelinearnih regresijskih modelov (9.25), (9.31) in (9.35), kažejo, da velikost vodo/cementnega razmerja v betonu ne vpliva bistveno na sovisnost med tlačno trdnostjo betona in hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton.



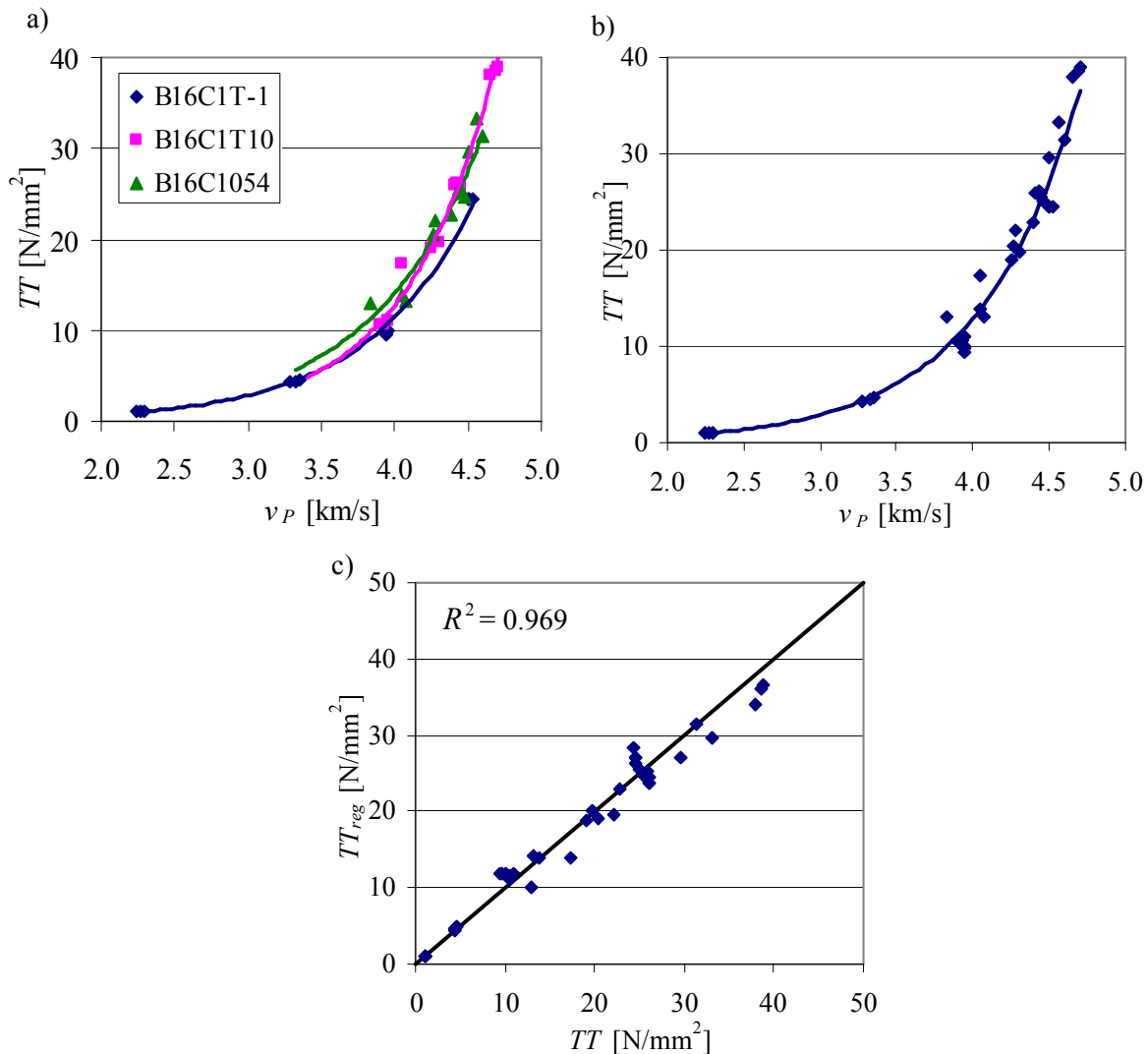
Slika 9.4 Korelacija med dejanskimi in izračunanimi tlačnimi trdnostmi, a) vpliv v/c razmerja, manj agregata, b) vpliv v/c razmerja, c) vpliv v/c razmerja, več agregata.

Figure 9.4 Correlation between actual and calculated compressive strengths, a) influence of w/c ratio, lower amount of aggregate, b) influence of w/c ratio, c) influence of w/c ratio, higher amount of aggregate.

9.2.3 Vpliv temperature okolice

Temperatura okolice, ki ji je beton izpostavljen med samim procesom hidratacije, pomembno vpliva tako na razvoj tlačnih trdnosti betona kot tudi na razvoj hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton (poglavje 7.2.3). Vpliv temperature okolice na sovisnost med tlačnimi trdnostmi betona in hitrostjo prehoda

ultrazvoka je prikazan na sliki 9.5, pri čemer slika 9.5a prikazuje sovisnost $TT - v_p$ za vse analizirane betonske mešanice posebej, slika 9.5b pa sovisnost med $TT - v_p$ za vse tri mešanice skupaj.



Slika 9.5 Vpliv temperature okolice na razmerje $TT - v_p$, a) posamezni regresijski modeli, b) skupni regresijski model, c) korelacija med dejanskimi in izračunanimi tlačnimi trdnostmi (regresijski model 9.39).

Figure 9.5 Influence of curing temperature on the $TT - v_p$ relationship, a) individual regression models, b) common regression model, c) correlation between actual and calculated compressive strengths (regression model 9.39).

Preglednica 9.7 Regresijski modeli $TT - v_p$, vpliv temperature okolice.

Table 9.7 Regression models $TT - v_p$, influence of curing temperature.

oznaka	regresijski model	št. enačbe	R_M^2
B16C1T-1	$TT_{reg} = 0.0431 \exp(1.3939v_p)$	(9.36)	0.998
B16C1T10	$TT_{reg} = 0.0185 \exp(1.6334v_p)$	(9.37)	0.974
B16C1054	$TT_{reg} = 0.0653 \exp(1.3436v_p)$	(9.38)	0.925
Tskupaj	$TT_{reg} = 0.0333 \exp(1.4895v_p)$	(9.39)	0.988

Preglednica 9.7 prikazuje najustreznejše regresijske modele in koeficiente korelacije R_M^2 za posamezne betonske mešanice in regresijski model s koeficientom korelacije R_M^2 za vse obravnavane mešanice

skupaj. Visok koeficient korelacije R^2 med dejanskimi tlačnimi trdnostmi TT in tlačnimi trdnostmi TT_{reg} , izračunanimi z regresijskim modelom (9.39) kaže, da temperatura okolice v obravnavanem temperaturnem območju ne vpliva na sovisnost med hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton in tlačno trdnostjo betona.

9.2.4 Vpliv količine agregata v betonu

Vpliv količine agregata v betonu na razvoj tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton je prikazan v poglavju 7.2.5.

Preglednica 9.8 Regresijski modeli $TT - v_p$, vpliv količine agregata v betonu, $w/c = 0.40$.

Table 9.8 Regression models $TT - v_p$, influence of amount of aggregate, $w/c = 0.40$.

oznaka	regresijski model	št. enačbe	R_M^2
B16C1KA2040	$TT_{reg} = 0.0130 \exp(1.8005v_p)$	(9.40)	0.959
B16C1040	$TT_{reg} = 0.0162 \exp(1.6684v_p)$	(9.41)	0.950
B16C1KA3040	$TT_{reg} = 0.0050 \exp(1.7907v_p)$	(9.42)	0.929
KA040skupaj	$TT_{reg} = 8.7395 \exp(0.2977v_p)$	(9.43)	0.082

Preglednica 9.9 Regresijski modeli $TT - v_p$, vpliv količine agregata v betonu, $w/c = 0.54$

Table 9.9 Regression models $TT - v_p$, influence of amount of aggregate, $w/c = 0.54$.

oznaka	regresijski model	št. enačbe	R_M^2
B16C1KA2	$TT_{reg} = 0.1037 \exp(1.3697v_p)$	(9.44)	0.990
B16C1054	$TT_{reg} = 0.0653 \exp(1.3436v_p)$	(9.45)	0.9250
B16C1KA3	$TT_{reg} = 0.0875 \exp(1.1782v_p)$	(9.46)	0.968
KA054skupaj	$TT_{reg} = 1.2327 \exp(0.6686v_p)$	(9.47)	0.259

Preglednica 9.10 Regresijski modeli $TT - v_p$, vpliv količine agregata v betonu, $w/c = 0.65$.

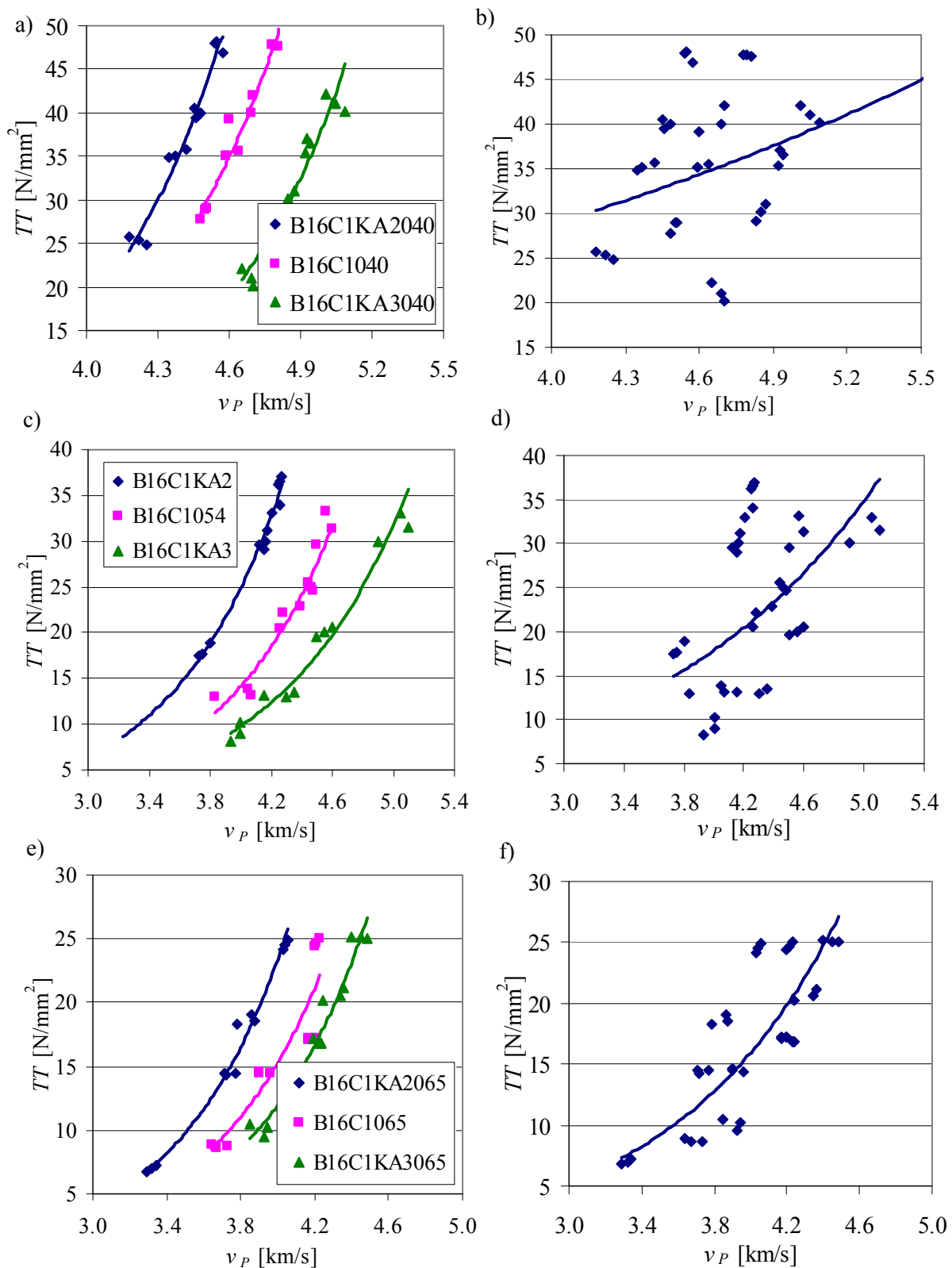
Table 9.10 Regression models $TT - v_p$, influence of amount of aggregate, $w/c = 0.65$.

oznaka	regresijski model	št. enačbe	R_M^2
B16C1KA2065	$TT_{reg} = 0.0214 \exp(1.7491v_p)$	(9.48)	0.990
B16C1065	$TT_{reg} = 0.0235 \exp(1.6187v_p)$	(9.49)	0.885
B16C1KA3065	$TT_{reg} = 0.0161 \exp(1.6523v_p)$	(9.50)	0.955
KA065skupaj	$TT_{reg} = 0.1962 \exp(1.0994v_p)$	(9.51)	0.689

Preglednica 9.11 Regresijski modeli $TT - v_p$, vpliv količine agregata kvarcitrno karbonatnega izvora.

Table 9.11 Regression models $TT - v_p$, influence of amount of quartzite carbonate aggregate.

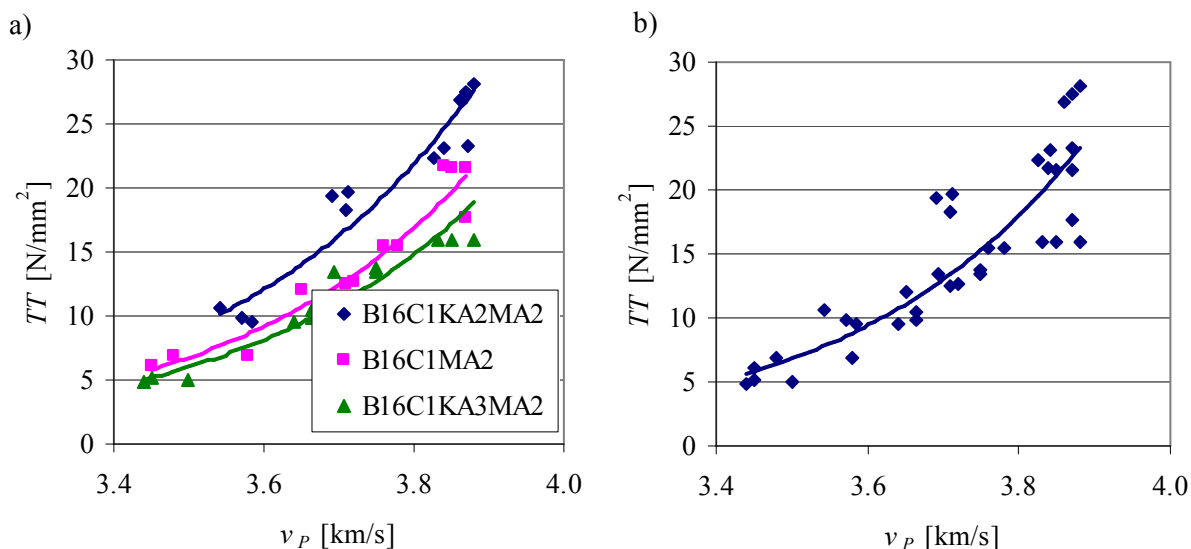
oznaka	regresijski model	št. enačbe	R_M^2
B16C1KA2MA2	$TT_{reg} = 0.0003 \exp(2.9683v_p)$	(9.52)	0.912
B16C1MA2	$TT_{reg} = 0.0002 \exp(3.0582v_p)$	(9.53)	0.941
B16C1KA3MA2	$TT_{reg} = 0.0002 \exp(3.0038v_p)$	(9.54)	0.944
KAMA2skupaj	$TT_{reg} = 0.00008 \exp(3.2496v_p)$	(9.55)	0.846



Slika 9.6 Vpliv količine agregata apnenčevega izvora na razmerje $TT - v_p$, a) posamezni regresijski modeli, $w/c = 0.40$, b) skupni regresijski model, $w/c = 0.40$, c) posamezni regresijski modeli, $w/c = 0.54$, d) skupni regresijski model, $w/c = 0.54$, e) posamezni regresijski modeli, $w/c = 0.65$, f) skupni regresijski model, $w/c = 0.65$.

Figure 9.6 Influence of amount of limestone aggregate on the $TT - v_p$ relationship, a) individual regression models, $w/c = 0.40$, b) common regression model, $w/c = 0.40$, c) individual regression models, $w/c = 0.54$, d)

common regression model, $w/c = 0.54$, e) individual regression models, $w/c = 0.65$, f) common regression model, $w/c = 0.65$.



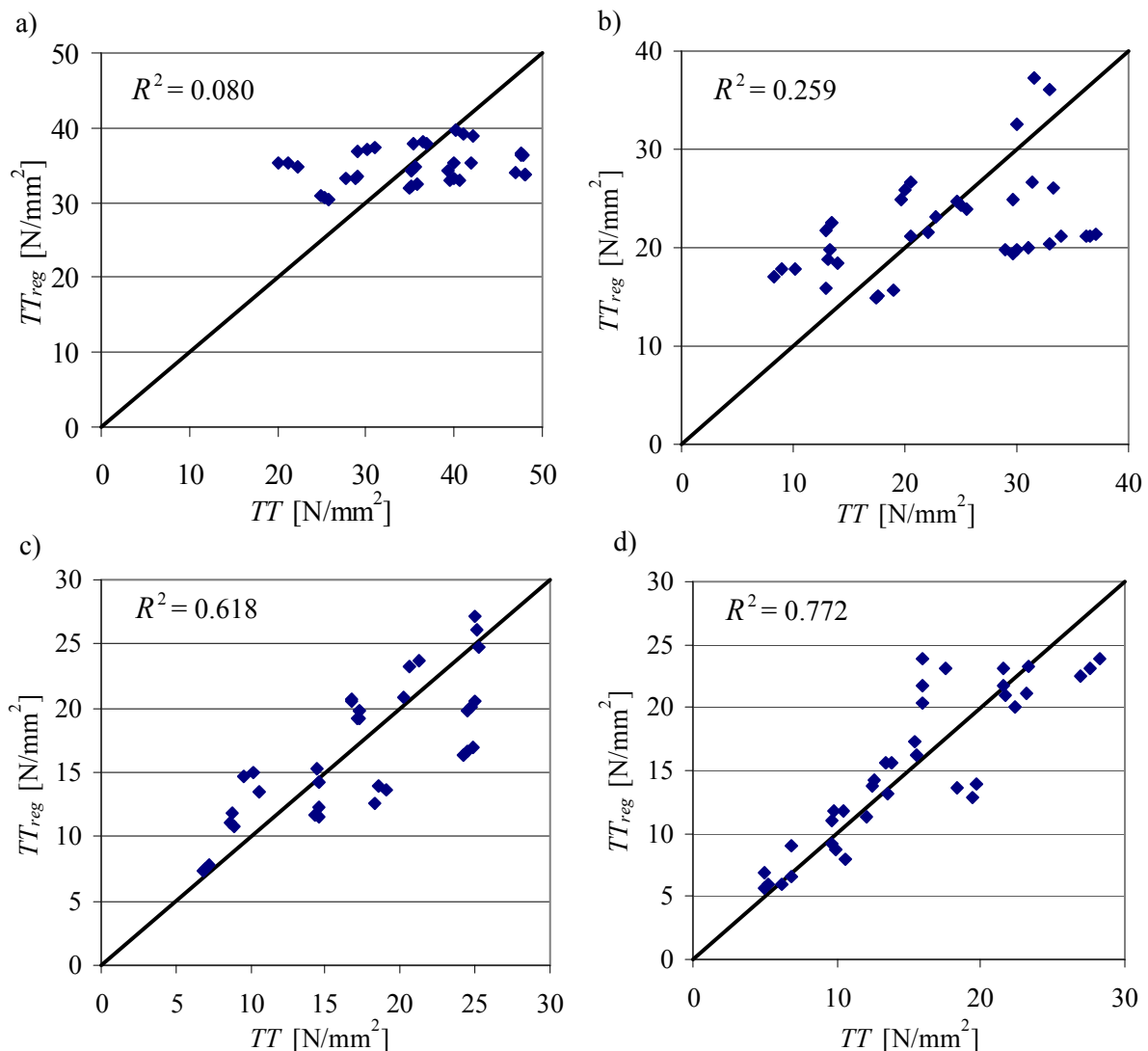
Slika 9.7 Vpliv količine agregata kvarcitrno karbonatnega izvora na razmerje $TT - v_p$, a) posamezni regresijski modeli, b) skupni regresijski model.

Figure 9.7 Influence of amount of quartzite carbonate aggregate on the $TT - v_p$ relationship, a) individual regression models, b) common regression model.

Slike 9.6 prikazujejo vpliv količine agregata v betonu na sovisnost $TT - v_p$ v primeru agregata apnenčevega izvora, ta vpliv pa je analiziran pri treh različnih vodo/cementnih razmerjih. Slika 9.7 prikazuje vpliv količine agregata v betonu na sovisnost $TT - v_p$ v primeru uporabe kvarcitrno karbonatnega agregata.

Slika 9.8 prikazuje zveze med dejanskimi tlačnimi trdnostmi TT in tlačnimi trdnostmi TT_{reg} , izračunanimi z najustrežnejšimi regresijskimi modeli za posamezno skupino betonskih mešanic (enačbe 9.43, 9.47, 9.51, 9.55). Nizke vrednosti koeficientov korelacije R^2 kažejo, da ima količina agregata v betonu pomemben vpliv na razmerje med tlačno trdnostjo betona in hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton. Ta vpliv je tem bolj izrazit, čim nižje je vodo/cementno razmerje v betonu. Pričakovano je vpliv količine agregata v betonu na zvezo $TT - v_p$ močno odvisen tudi od vrste oziroma materiala samega agregata in je tem večji, čim večja je hitrost prehoda vzdolžnega ultrazvočnega valovanja skozi kamnino, ki predstavlja izvor agregata v betonu (poglavje 5.1.3). Vpliv količine agregata v betonu na zvezo $TT - v_p$ je tako bolj izrazit v primeru uporabe agregata apnenčevega izvora kot pa v primeru uporabe agregata kvarcitrno karbonatnega izvora.

Količina agregata v betonu torej ne vpliva v enaki meri na hitrost prehoda vzdolžnega ultrazvočnega valovanja skozi beton in tlačne trdnosti betona. V poglavju 7.2.5 je pokazano, da je ta vpliv celo nasproten - z večanjem količine agregata v betonu se načeloma hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton večja, tlačne trdnosti betona pa se načeloma z večjo količino agregata v betonu manjšajo. Pri enaki hitrosti prehoda vzdolžnega ultrazvočnega valovanja skozi beton ima torej v naših primerih beton z manjšo količino agregata v splošnem večjo tlačno trdnost kot beton z večjo količino agregata in obratno.



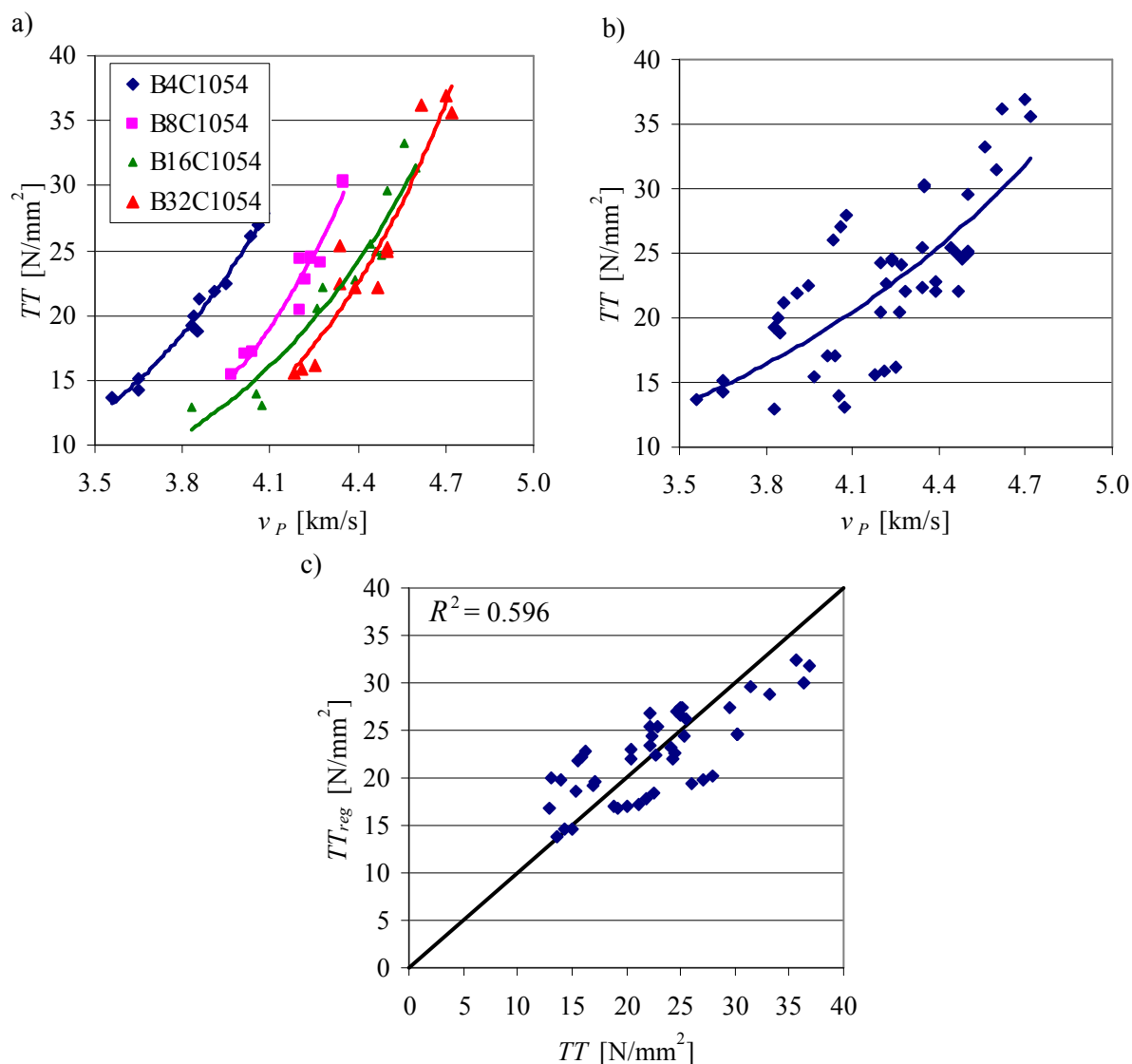
Slika 9.8 Korelacija med dejanskimi in izračunanimi tlačnimi trdnostmi, vpliv količine agregata v betonu, a) $w/c = 0.40$, b) $w/c = 0.54$, c) $w/c = 0.65$, d) agregat kvarcitrno karbonatnega izvora.
Figure 9.8 Correlation between actual and calculated compressive strengths, influence of amount of aggregate, a) $w/c = 0.40$, b) $w/c = 0.54$, c) $w/c = 0.65$, d) quartzite carbonate aggregate.

9.2.5 Vpliv velikosti maksimalnega zrna agregata v betonu

Vpliv velikosti maksimalnega zrna agregata v betonu na razvoj tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton je prikazan v poglavju 7.2.4. Tako tlačna trdnost kot hitrost prehoda ultrazvoka sta višji v primeru večjega maksimalnega zrna agregata v betonu in obratno.

Slike 9.9 prikazujejo vpliv velikosti maksimalnega zrna agregata v betonu na sovisnost med tlačnimi trdnostmi betona in hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton, preglednica 9.12 pa prikazuje najustreznejše regresijske modele in koeficiente korelacije R_M^2 za posamezne betonske mešanice in regresijski model s koeficientom korelacije R_M^2 za vse obravnavane mešanice skupaj. Iz preglednice 9.11 je razvidno, da so koeficienti korelacije R_M^2 tem nižji, čim večja je velikost maksimalnega zrna agregata v betonu. To je po vsej verjetnosti posledica večje nehomogenosti betonske strukture v primeru večjega zrna agregata v betonu (Mehta 1983). Nizka vrednost koeficienta korelacije R^2 med dejanskimi tlačnimi trdnostmi TT in tlačnimi trdnostmi TT_{reg} , izračunanimi z nelinearnim regresijskim modelom (9.60) pomeni, da velikost agregatnih zrn v betonu ne vpliva v enaki meri na tlačne

trdnosti in hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton. Velikost zrn agregata torej pomembno vpliva na zvezo $TT - v_p$.



Slika 9.9 Vpliv velikosti maksimalnega zrna agregata v betonu na razmerje $TT - v_p$, a) posamezni regresijski modeli, b) skupni regresijski model, c) korelacija med dejanskimi in izračunanimi tlačnimi trdnostmi (regresijski model 9.60).

Figure 9.9 Influence of maximum nominal aggregate size on the $TT - v_p$ relationship, a) individual regression models, b) common regression model, c) correlation between actual and calculated compressive strengths (regression model 9.60).

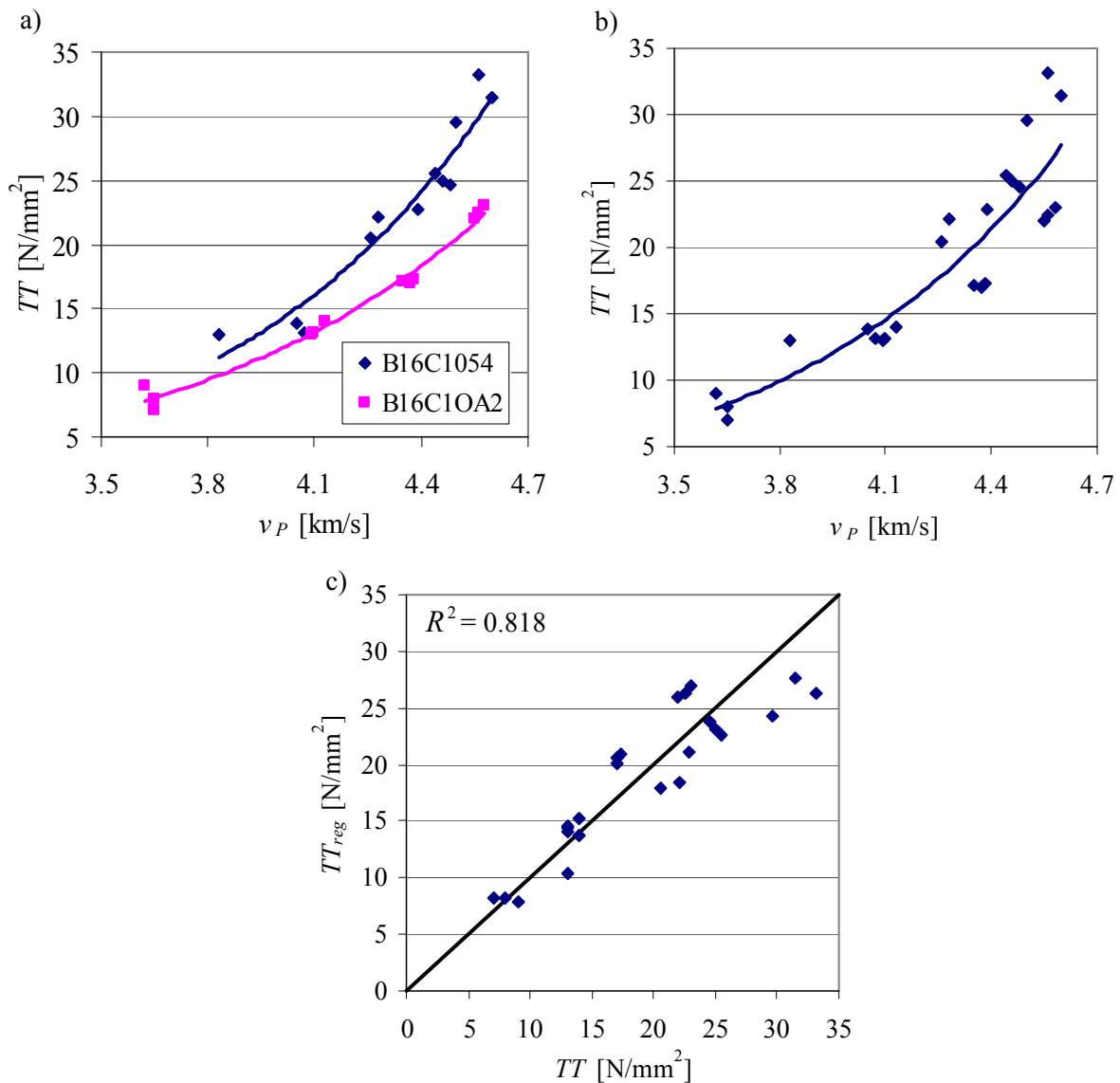
Preglednica 9.12 Regresijski modeli $TT - v_p$, vpliv velikosti maksimalnega zrna agregata.

Table 9.12 Regression models $TT - v_p$, influence of maximum nominal aggregate size.

oznaka	regresijski model	št. enačbe	R_M^2
B4C1054	$TT_{reg} = 0.0818 \exp(1.4278v_p)$	(9.56)	0.983
B8C1054	$TT_{reg} = 0.0161 \exp(1.7265v_p)$	(9.57)	0.958
B16C1054	$TT_{reg} = 0.0653 \exp(1.3436v_p)$	(9.58)	0.925
B32C1054	$TT_{reg} = 0.0195 \exp(1.6033v_p)$	(9.59)	0.898
MAXskupaj	$TT_{reg} = 1.0004 \exp(0.7362v_p)$	(9.60)	0.555

9.2.6 Vpliv oblike agregata v betonu

Vpliv oblike agregatnih zrn v betonu na razvoj tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda vzdolžnega ultrazvočnega valovanja skozi beton je prikazan v poglavju 7.2.6. Oblika agregata ima precejšen vpliv na tlačne trdnosti betona in nekoliko manjši na hitrost prehoda ultrazvoka skozi beton. Tako oblika agregatnih zrn v betonu pomembno vpliva na sovisnost med tlačnimi trdnostmi betona in hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton, kar je razvidno predvsem iz relativno nizkega koeficienta korelacije med dejanskimi tlačnimi trdnostmi TT in tlačnimi trdnostmi TT_{reg} , izračunanimi z nelinearnim regresijskim modelom (9.63), prikazanim v preglednici 9.13.



Slika 9.10 Vpliv oblike zrn agregata v betonu na razmerje $TT - v_p$, a) posamezni regresijski modeli, b) skupni regresijski model, c) korelacija med dejanskimi in izračunanimi tlačnimi trdnostmi (regresijski model 9.63).

Figure 9.10 Influence of shape of aggregate grains on the $TT - v_p$ relationship, a) individual regression models, b) common regression model, c) correlation between actual and calculated compressive strengths (regression model 9.63).

Iz slike 9.10a je razvidno, da je pri enakem nivoju hitrosti prehoda vzdolžnega ultrazvočnega valovanja skozi beton tlačna trdnost betona z okroglimi agregatnimi zrnji nižja kot tlačna trdnost betona z drobljenim agregatom. Rezultat je pričakovan in je posledica nižjih tlačnih trdnosti betona v primeru zaobljenih agregatnih zrn zaradi slabše prijemnosti med agregatnimi zrnji in cementno pasto (Mehta 1983).

Preglednica 9.13 Regresijski modeli $TT - v_p$, vpliv oblike agregatnih zrn v betonu.

Table 9.13 Regression models $TT - v_p$, influence of shape of aggregate.

oznaka	regresijski model	št. enačbe	R_M^2
B16C1054	$TT_{reg} = 0.0653 \exp(1.3436v_p)$	(9.61)	0.925
B16C10A2	$TT_{reg} = 0.1434 \exp(1.1026v_p)$	(9.62)	0.974
skupaj	$TT_{reg} = 0.0769 \exp(1.2795v_p)$	(9.63)	0.879

9.2.7 Vpliv vrste agregata v betonu

Vpliv vrste agregata v betonu na razvoj tlačnih trdnosti in hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton je prikazan v poglavju 7.2.7, sliki 9.11 in 9.12 pa prikazujeta vpliv vrste agregata na zvezo $TT - v_p$. Vpliv vrste agregata je analiziran pri treh različnih vsebnostih agregata v betonu, relativno nizki koeficienti korelacije R^2 med dejanskimi tlačnimi trdnostmi TT in tlačnimi trdnostmi TT_{reg} , izračunanimi z regresijskimi modeli (9.66), (9.69) in (9.72), prikazanimi v preglednicah 9.14, 9.15 in 9.16, pa pomenijo, da ima vrsta agregata v betonu pomemben vpliv na sovisnost med tlačno trdnostjo betona in hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton, ne glede na količino agregata v betonu.

Preglednica 9.14 Regresijski modeli $TT - v_p$, vpliv vrste agregata v betonu, manj agregata.

Table 9.14 Regression models $TT - v_p$, influence of aggregate type, lower amount of aggregate.

oznaka	regresijski model	št. enačbe	R_M^2
B16C1KA2	$TT_{reg} = 0.1037 \exp(1.3697v_p)$	(9.64)	0.990
B16C1KA2MA2	$TT_{reg} = 0.0003 \exp(2.9683v_p)$	(9.65)	0.912
skupaj	$TT_{reg} = 0.0673 \exp(1.4878v_p)$	(9.66)	0.829

Preglednica 9.15 Regresijski modeli $TT - v_p$, vpliv vrste agregata v betonu.

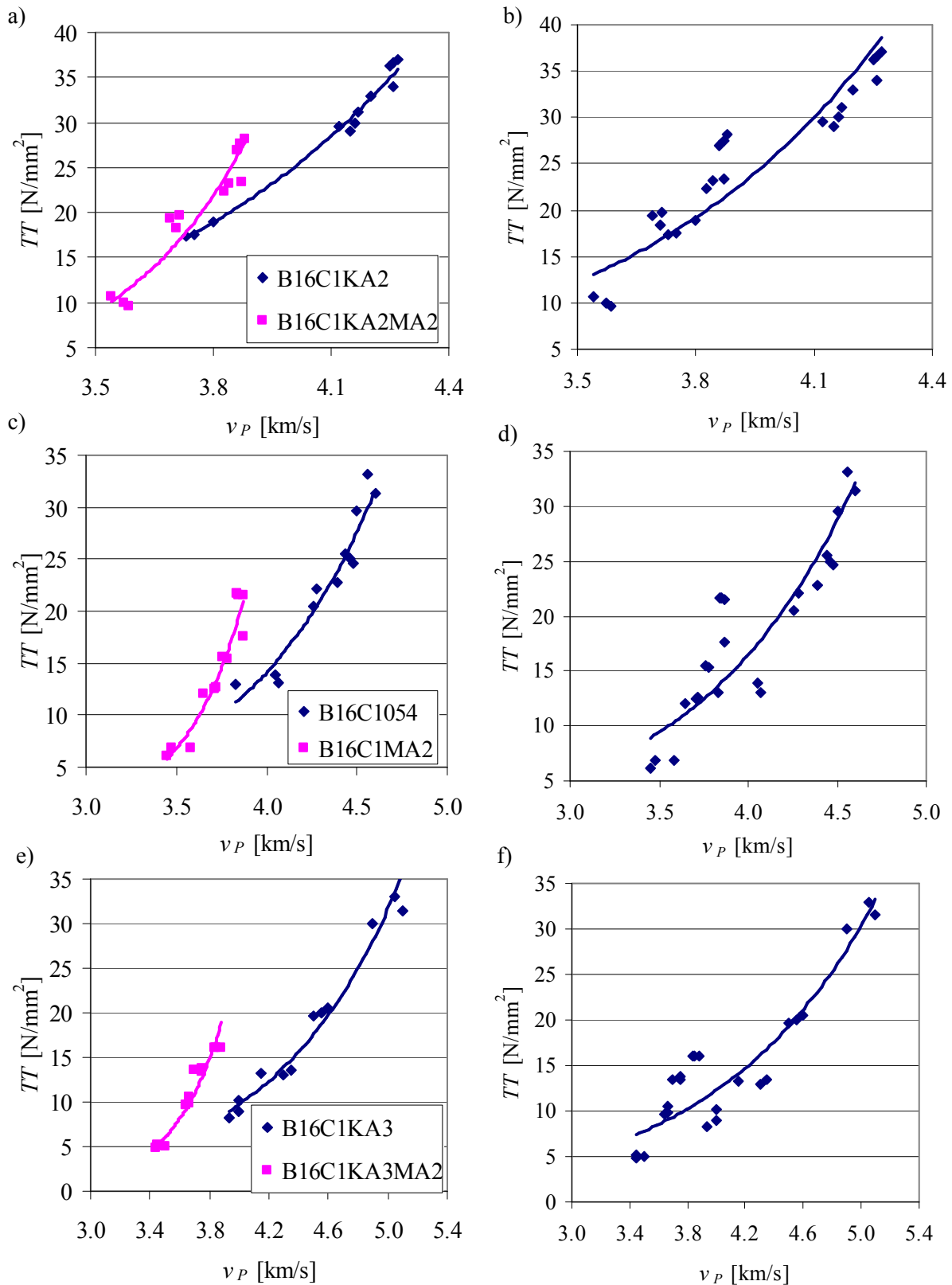
Table 9.15 Regression models $TT - v_p$, influence of aggregate type.

oznaka	regresijski model	št. enačbe	R_M^2
B16C1054	$TT_{reg} = 0.0653 \exp(1.3436v_p)$	(9.67)	0.925
B16C1MA2	$TT_{reg} = 0.0002 \exp(3.0582v_p)$	(9.68)	0.941
skupaj	$TT_{reg} = 0.1897 \exp(1.1158v_p)$	(9.69)	0.747

Preglednica 9.16 Regresijski modeli $TT - v_p$, vpliv vrste agregata v betonu, več agregata

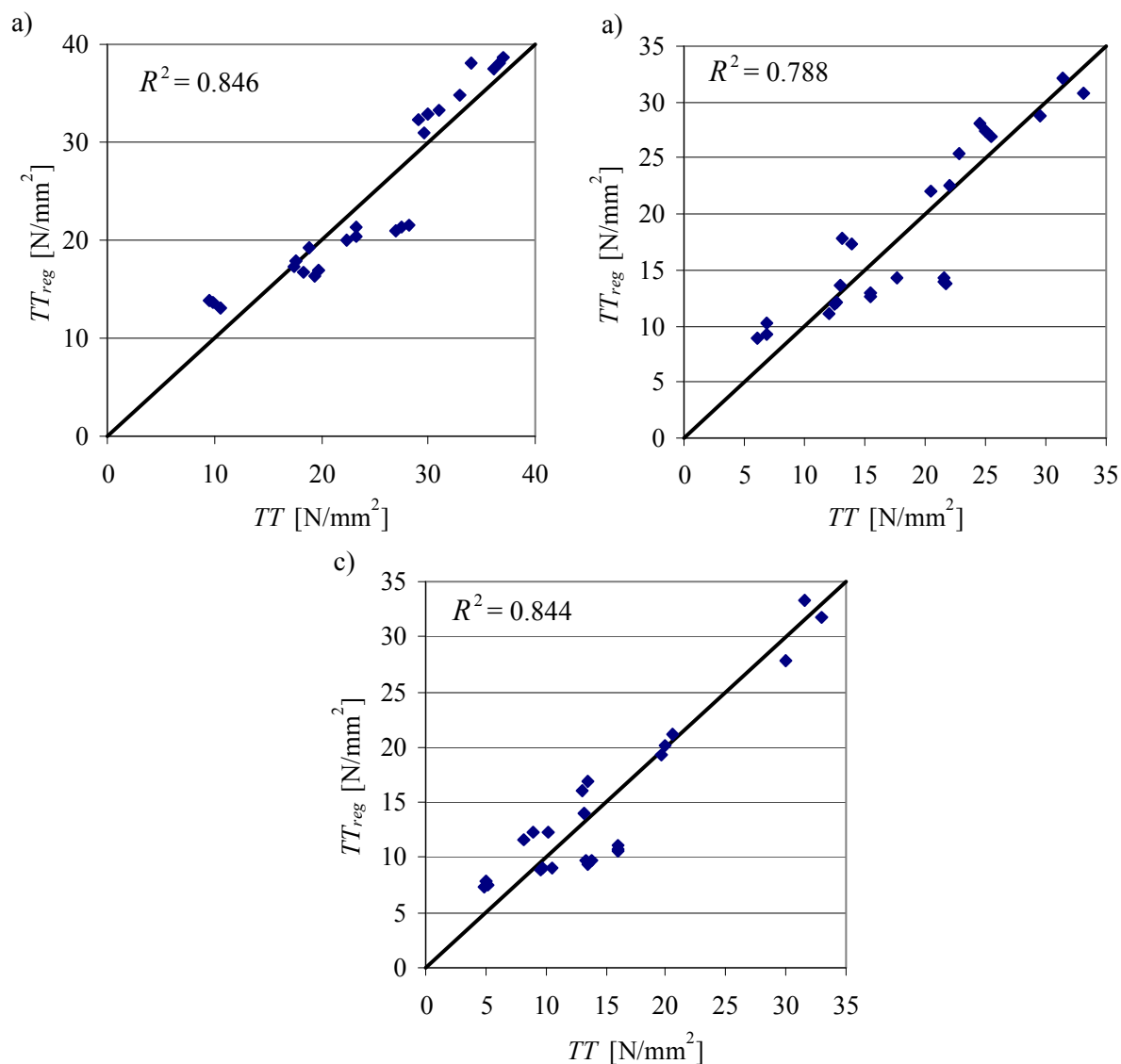
Table 9.16 Regression models $TT - v_p$, influence of aggregate type, higher amount of aggregate.

oznaka	regresijski model	št. enačbe	R_M^2
B16C1KA3	$TT_{reg} = 0.0875 \exp(1.1782v_p)$	(9.70)	0.968
B16C1KA3MA2	$TT_{reg} = 0.0002 \exp(3.0038v_p)$	(9.71)	0.944
skupaj	$TT_{reg} = 0.3278 \exp(0.9059v_p)$	(9.72)	0.731



Slika 9.11 Vpliv vrste agregata na razmerje $TT - v_P$, a) posamezni regresijski modeli, količina agregata 1500 kg/m^3 , b) skupni regresijski model, količina agregata 1500 kg/m^3 , c) posamezni regresijski modeli, količina agregata 1850 kg/m^3 , d) skupni regresijski model, količina 1850 kg/m^3 , e) posamezni regresijski modeli, količina agregata 2130 kg/m^3 , f) skupni regresijski model, količina agregata 2130 kg/m^3 .

Figure 9.11 Influence of aggregate type on the $TT - v_P$ relationship, a) individual regression models, amount 1500 kg/m^3 , b) common regression model, amount 1500 kg/m^3 , c) individual regression models, amount 1850 kg/m^3 , d) common regression model, amount 1850 kg/m^3 , e) individual regression models, amount 2130 kg/m^3 , f) common regression model, amount 2130 kg/m^3 .



Slika 9.12 Korelacija med dejanskimi in izračunanimi tlačnimi trdnostmi, vpliv vrste agregata, a) količina agregata 1500 kg/m^3 , b) količina agregata 1850 kg/m^3 , c) količina agregata 2130 kg/m^3 .
Figure 9.12 Correlation between actual and calculated compressive strengths, influence of aggregate type a) amount of aggregate 1500 kg/m^3 , b) amount of aggregate 1850 kg/m^3 , c) amount of aggregate 2130 kg/m^3 .

9.2.8 Analiza zanesljivosti meritev

Za kontrolo ponovljivosti zvez $TT - v_p$ je bila osnovna betonska mešanica B16C1054 pripravljena šestkrat (skupno 54 podatkov). Slika 9.13 prikazuje rezultate meritev, pri čemer so na sliki 9.13a prikazane zveze $TT - v_p$ za vse mešanice posebej, na sliki 9.13b pa je zveza $TT - v_p$ prikazana za vse mešanice skupaj. Skupno zvezo najboljše opiše nelinearni regresijski model, določen z enačbo

$$TT_{reg} = 0.0188 \exp(1.6353v_p), \quad (9.73)$$

pri čemer koeficient korelacije znaša $R_M^2 = 0.945$. Analiza ponovljivosti zvez $TT - v_p$ je bila opravljena v skladu s proceduro, prikazano v poglavju 4.3.2.2. Ker so zveze $TT - v_p$ nelinearne, smo jih v skladu s postopkom

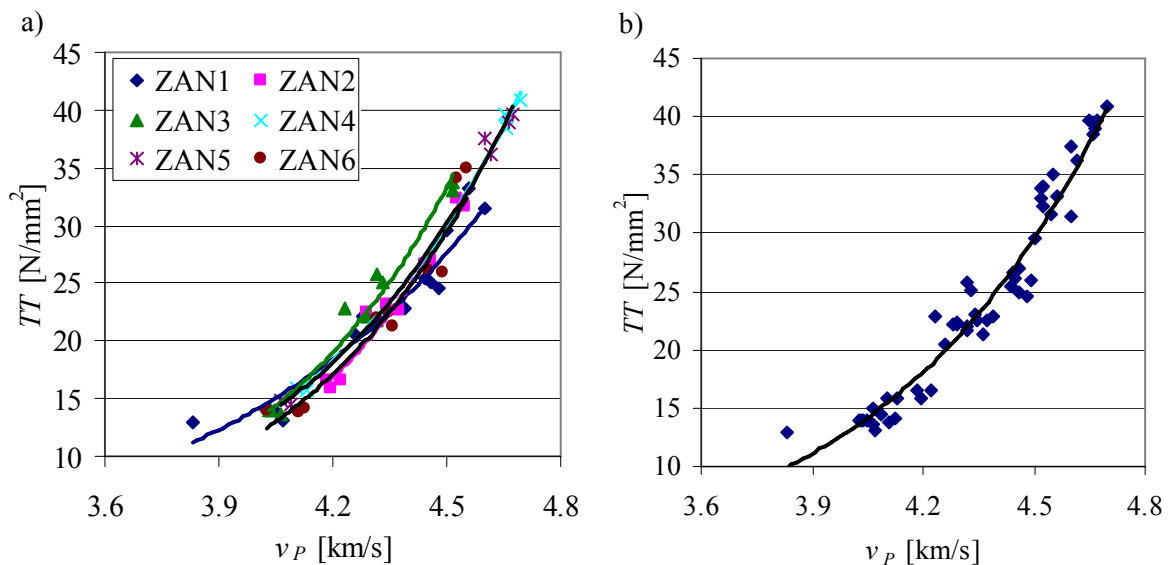
$$Y = a \exp(bX) \xrightarrow{\ln Y} \ln Y = \ln a + Xb \rightarrow Z = A + bX$$

prevedli na linearno obliko. Za vsako od šestih zvez ZANj; $j = 1, \dots, 6$, so bile postavljene ničelne in alternativne domneve:

$$H_{0,j} : A_j = A_0 \text{ oziroma } H_{0,j} : b_j = b_0$$

$$H_{1,j} : A_j \neq A_0 \text{ oziroma } H_{1,j} : b_j \neq b_0,$$

kjer velja $A_0 = -3.9725$ in $b_0 = 1.6353$. Vrednosti statistik T_A in T_b ter pripadajoča kritična vrednost T_{krit} za vseh šest ponovitev zvez $TT - v_p$ so prikazane v preglednici 9.17, pri čemer so bile vrednosti T_{krit} v vseh primerih izračunane s stopnjo zaupanja 1 %. Razvidno je, da v vseh primerih velja $|T_A| < T_{krit}$ in $|T_b| < T_{krit}$, kar pomeni, da ničelne hipoteze ne moremo zavrni in lahko rečemo, da A_j , $j = 1, \dots, 6$ ni statistično značilno različen od A_0 in podobno b_j , $j = 1, \dots, 6$ ni statistično značilno različen od b_0 . Ponovljivost posameznih meritev je torej v tem primeru zelo dobra.



Slika 9.13 Analiza ponovljivosti zvez $TT - v_p$, a) posamezni regresijski modeli, b) skupni regresijski model.

Figure 9.13 Reproducibility analysis of the $TT - v_p$ relationships, a) separate regression models, b) common regression model.

Preglednica 9.17 Analiza ponovljivosti zvez $TT - v_p$.

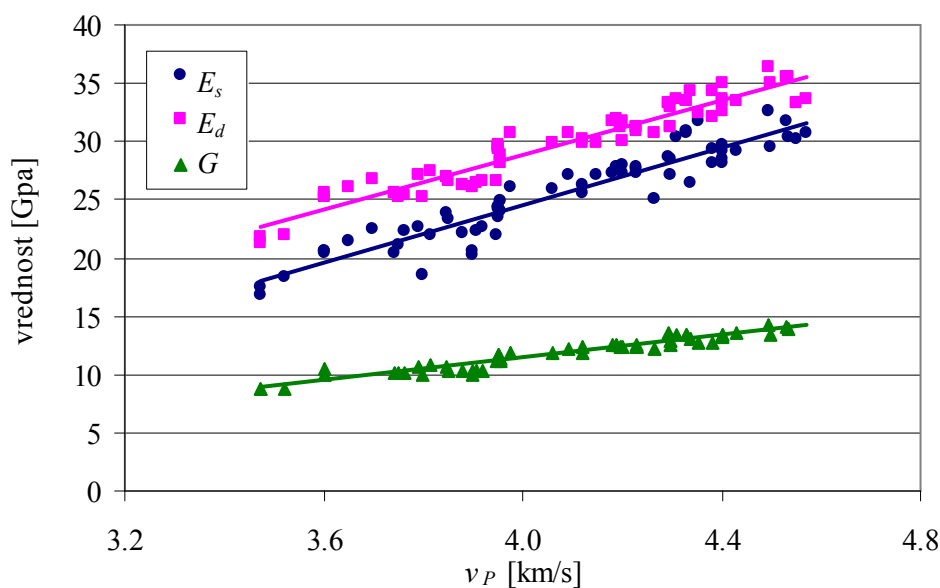
Table 9.17 Reproducibility analysis of $TT - v_p$ relationships.

parameter	ZAN1	ZAN2	ZAN3	ZAN4	ZAN5	ZAN6
T_A	2.3704	-2.1959	-1.5940	-0.7172	-0.8080	-1.2535
T_b	-2.4095	-1.3566	1.7077	0.798	0.8732	1.2043
T_{krit}	3.1930	3.3554	3.3554	4.6041	4.6041	3.3554

9.3 VPLIV POSAMEZNIH PARAMETROV NA ZVEZO $E_s - v_p$ (E_d, G)

Slika 9.14 prikazuje sovisnost med statičnim elastičnim modulum E_s , dinamičnim elastičnim modulum E_d in strižnim modulum G ter hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton. Hitrosti prehoda ultrazvoka so bile določene na betonskih vzorcih, uporabljenih za preiskavo omenjenih treh fizikalnih veličin.

Razvidno je, da so sovisnosti $E_s - v_p$, $E_d - v_p$ in $G - v_p$ praktično linearne in precej bolj natančne od zvez $TT - v_p$. Posamezni regresijski modeli in pripadajoči korelacijski koeficienti so prikazani v preglednici 9.18.



Slika 9.14 Sovisnosti med E_s , E_d in G ter v_p .

Figure 9.14 Relationships between E_s , E_d , and G and v_p .

Preglednica 9.18 Regresijski modeli $E_s - v_p$, $E_d - v_p$ in $G - v_p$ ter pripadajoči koeficienti korelacije.

Table 9.18 Regression models $E_s - v_p$, $E_d - v_p$ and $G - v_p$ and corresponding correlation coefficients.

regresijski model	enačba	R^2
$E_s = 12.435 v_p - 25.04$	(9.74)	0.890
$E_d = 11.796 v_p - 18.31$	(9.75)	0.916
$G = 4.840 v_p - 7.94$	(9.76)	0.929

9.4 RAZVOJ NUMERIČNEGA MODELA ZA OCENO TLAČNE TRDNOSTI BETONA IZ HITROSTI PREHODA ULTRAZVOKA SKOZI BETON

9.4.1 Uvod

V poglavju 9.2 je prikazan vpliv različnih parametrov sestave betonske mešanice in pogojev okolja na sovisnost med tlačno trdnostjo betona TT in hitrostjo prehoda ultrazvoka skozi beton v_p . Zaradi različnih vplivov posameznih parametrov in njihove medsebojne korelacije na razvoj tlačne trdnosti betona na eni in razvoj hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton na drugi strani je korelacija $TT - v_p$ precej zapletena in ob uporabi klasičnih regresijskih modelov nenatančna. Boljša in zanesljivejša ocena tlačnih trdnosti betona tako zahteva uporabo naprednejših numeričnih matematičnih orodij, ki omogočajo upoštevanje vpliva posameznih parametrov sestave betonske mešanice in pogojev okolja na sovisnost $TT - v_p$.

V nadaljevanju je prikazana možnost uporabe umetnih nevronske mreže za oceno tlačne trdnosti betona neposredno iz znane hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton. V model so ustrezno vključeni vplivi vseh pomembnih parametrov sestave betonske mešanice in pogojev okolja na sovisnost $TT - v_p$, ki so bili določeni na podlagi eksperimentalnih rezultatov (poglavje 9.2).

Podrobnejši opis metode umetnih nevronske mreže je prikazan v poglavju 4.1. Nagel razvoj računalniške opreme je v zadnjih letih omogočil uporabo umetnih nevronske mreže tudi pri modeliranju različnih lastnosti betona. Tako je Graham s sodelavci (2006) prikazal možnost uporabe umetnih nevronske mreže pri modeliranju transporta oziroma dostave pripravljene mešanice svežega betona. Nekateri raziskovalci so uporabili metodo umetnih nevronske mreže pri modeliranju tlačne trdnosti betona na osnovi različnih materialnih parametrov betonske mešanice (Lai in Serra 1997, Guang in Zong 2000, Lee 2003), Hola in Schabowicz (2005a, 2005b) pa sta uporabila metodo umetnih nevronske mreže pri oceni tlačne trdnosti betona na osnovi kombiniranja različnih nedestruktivnih metod, pri čemer sestava betonske mešanice ni bila upoštevana. Ji s sodelavci (2006) je uporabil metodo umetnih nevronske mreže za modeliranje sestave sveže betonske mešanice. Nekateri raziskovalci so metodo umetnih nevronske mreže uporabljali tudi za modeliranje hidratacijskega procesa (Park s sodelavci 2005) in mehanskih lastnosti same cementne paste (Baykasoglu 2004).

9.4.2 Določitev vplivnih parametrov

V prvi fazi priprave modela je bilo potrebno določiti parametre sestave betonske mešanice in pogojev okolja, ki v največji meri vplivajo na sovisnost med tlačno trdnostjo betona in hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton. Le-ti so bili določeni na osnovi rezultatov obsežnega eksperimentalnega dela, in sicer na podlagi vrednosti koeficientov korelacije R^2 med dejanskimi tlačnimi trdnostmi TT in tlačnimi trdnostmi TT_{reg} , izračunanimi neposredno iz ustreznih nelinearnih regresijskih modelov (poglavje 9.2). Preglednica 9.19 prikazuje vrednosti koeficientov korelacije R^2 in faktorja $\hat{\sigma}$ za posamezne skupine analiziranih betonskih mešanic. Ocena standardne deviacije napake $\hat{\sigma}$ je bila določena v skladu z enačbo

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2} \quad (9.77)$$

kjer je n število vseh podatkov, ε_i pa razlika, določena z enačbo

$$\varepsilon_i = TT - TT_{reg} . \quad (9.78)$$

Kot merodajni so bili izbrani tisti parametri, pri katerih je bil koeficient korelacije med TT in TT_{reg} nižji od $R^2 = 0.85$. Na osnovi tega kriterija so bili kot vplivni parametri tako določeni:

- količina agregata v betonu KA,
- vrsta agregata v betonu MA,
- maksimalno zrno agregata v betonu MAX in
- oblika agregata v betonu OA.

Vrsta cementa v betonu, velikost vodo/cementnega razmerja in temperatura okolice niso pomembneje vplivali na sovisnost $TT - v_p$ in tako niso bili vključeni v numerični model.

Te ugotovitve so razvidne tudi iz slike 9.15, ki prikazuje sovisnost med tlačno trdnostjo betona in hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton ter korelacijo med dejanskimi tlačnimi trdnostmi in tlačnimi trdnostmi, izračunanimi neposredno iz nelinearnih regresijskih modelov (9.79) in (9.80), za mešanice z vplivnimi in nevlivnimi parametri.

Korelacija med hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov in tlačnimi trdnostmi betona za mešanice z različnimi vsebnostmi agregata v betonu, obliko agregata, tipom agregata in velikostjo maksimalnega zrna agregata v betonu (mešanice B16C1054, B16C1KA2040, B16C1KA3040, B16C1KA2, B16C1KA3, B16C1KA2065, B16C1KA3065, B16C1KA2MA2, B16C1MA2, B16C1KA3MA2, B4C1054, B8C1054,

B32C1054, B16C10A2) je prikazana na sliki 9.15a, to korelacijo pa najbolje opiše nelinearni regresijski model v obliki

$$TT_{reg} = 0.4497 \exp(0.5653v_p) \quad (9.79)$$

s koeficientom korelacije $R_M^2 = 0.565$. Korelacija med dejanskimi tlačnimi trdnostmi TT in tlačnimi trdnostmi TT_{reg} , izračunanimi z modelom (9.79), je prikazana na sliki 9.15b, nizek koeficient korelacije R^2 med TT in TT_{reg} pa potrjuje, da količina agregata v betonu, velikost maksimalnega agregatnega zrna, oblika agregata in vrsta agregata v betonu pomembno vplivajo na zvezo $TT - v_p$.

Korelacija med tlačnimi trdnostmi betona in hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov za mešanice z različno vrsto cementa, različnim vodo/cementnim razmerjem in različno temperaturo okolice (mešanice B16C1054, B16C2054, B16C3054, B16C4054, B16C1040, B16C1045, B16C1050, B16C1065, B16C1T-1, B16C1T10) je prikazana na sliki 9.15c, to korelacijo pa najbolje opiše nelinearni regresijski model v obliki

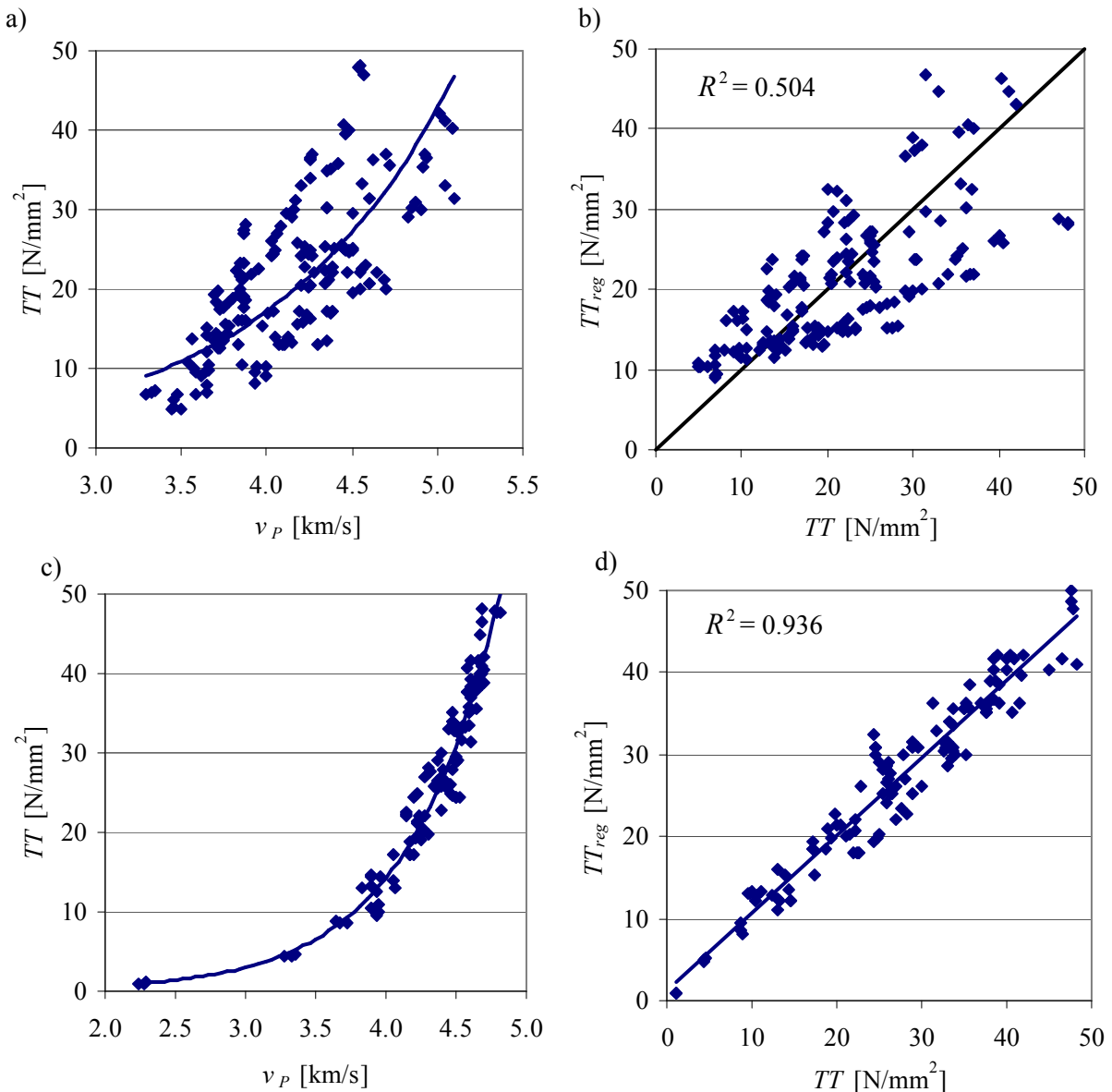
$$TT_{reg} = 0.0289 \exp(1.5504v_p) \quad (9.80)$$

s koeficientom korelacije $R_M^2 = 0.971$. Korelacija med dejanskimi tlačnimi trdnostmi TT in tlačnimi trdnostmi TT_{reg} , izračunanimi z modelom (9.80), je prikazana na sliki 9.15d, visok koeficient korelacije R^2 med TT in TT_{reg} pa potrjuje, da vrsta cementa v betonu, velikost vodo/cementnega razmerja in temperatura okolice ne vplivajo bistveno na zvezo $TT - v_p$.

Preglednica 9.19 Vrednosti R^2 in $\hat{\sigma}$ za posamezne skupine betonskih mešanic.

Table 9.19 R^2 and $\hat{\sigma}$ values for several groups of concrete mixtures.

skupina	podskupina	R^2	$\hat{\sigma}$
vrsta cementa	-	0.916	2.8064
razmerje v/c	KA = 1500 kg/m ³	0.941	2.6892
	KA = 1800 kg/m ³	0.930	2.9636
	KA = 2130 kg/m ³	0.870	3.6649
temperatura okolice	-	0.969	2.0040
količina agregata	v/c = 0.40	0.080	7.9346
	v/c = 0.54	0.259	8.0316
	v/c = 0.65	0.618	3.8388
	Kvarcit karbonat	0.772	3.2391
maksimalno zrno agregata	-	0.596	4.0408
oblika agregata	-	0.818	3.1803
vrsta agregata	KA = 1500 kg/m ³	0.847	3.3385
	KA = 1800 kg/m ³	0.788	3.6930
	KA = 2130 kg/m ³	0.844	3.0859



Slika 9.15 a) Zveza $TT - v_p$ za vse mešanice z vplivnimi parametri, b) korelacija med TT in TT_{reg} za vse mešanice z vplivnimi parametri, c) zveza $TT - v_p$ za vse mešanice z nevpilivnimi parametri, d) korelacija med TT in TT_{reg} za vse mešanice z nevpilivnimi parametri.

Figure 9.15 a) $TT - v_p$ relationship for all concrete mixtures with influential parameters, b) correlation between TT and TT_{reg} for all concrete mixtures with influential parameters, c) $TT - v_p$ relationship for all concrete mixtures with non-influential parameters, d) correlation between TT and TT_{reg} for all concrete mixtures with non-influential parameters.

9.4.3 Struktura umetne nevronske mreže

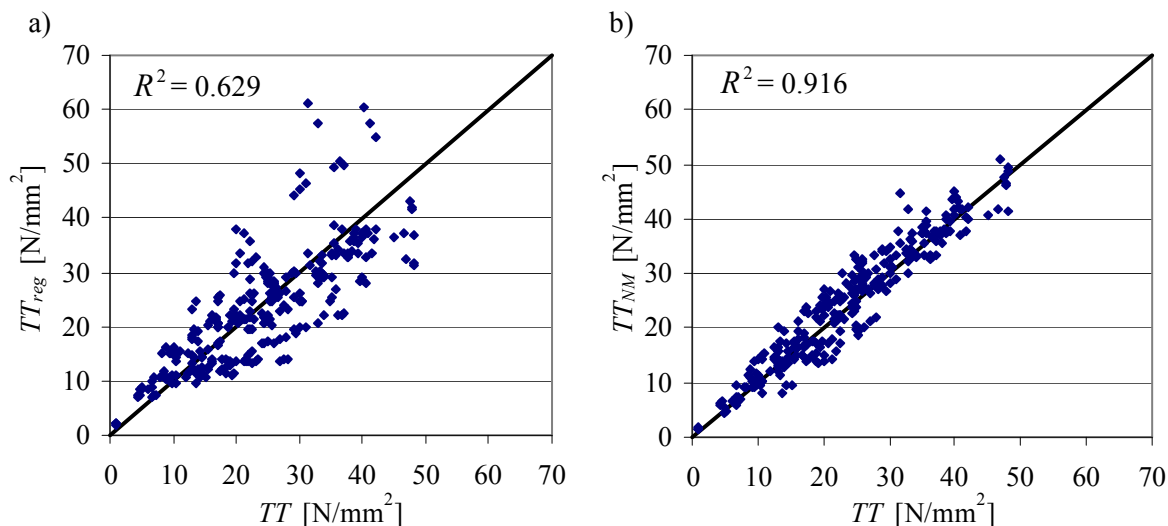
Pri določanju optimalne strukture umetne nevronske mreže je bilo analiziranih več različnih struktur, na koncu pa smo izbrali nevronske mrežo tipa 5-30-30-1. V vhodnem sloju je bilo tako pet vhodnih nevronov oziroma parametrov modela (neodvisne spremenljivke), in sicer količina agregata v betonu (KA), velikost maksimalnega zrna agregata v betonu (MAX), oblika agregata v betonu (OA), vrsta agregata v betonu (MA) in hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton (v_p). V strukturi umetne nevronske mreže sta bila dva skrita sloja nevronov s po tridesetimi nevroni v vsakem sloju, v

izhodnem sloju pa je bil en izhodni nevron, ki je predstavljal vrednost tlačne trdnosti betona TT_{NM} [N/mm²].

70 % vhodno-izhodnih parov je bilo vključenih v učenje umetne nevronske mreže, preostalih 30 % pa je bilo uporabljenih za testiranje uspešnosti učenja umetne nevronske mreže. Koeficient korelacije med dejanskimi tlačnimi trdnostmi TT , ki niso bile vključene v proces učenja in tlačnimi trdnostmi TT_{NM} , izračunanimi z umetno nevronske mreže, je znašal $R^2 = 0.995$, kar pomeni, da je bil proces učenja umetne nevronske mreže uspešen. Na osnovi tako dobljenih vrednosti uteži med posameznimi nevroni je bil v programskem okolju Matlab pripravljen program za oceno tlačne trdnosti betona poljubne sestave na osnovi znane hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton.

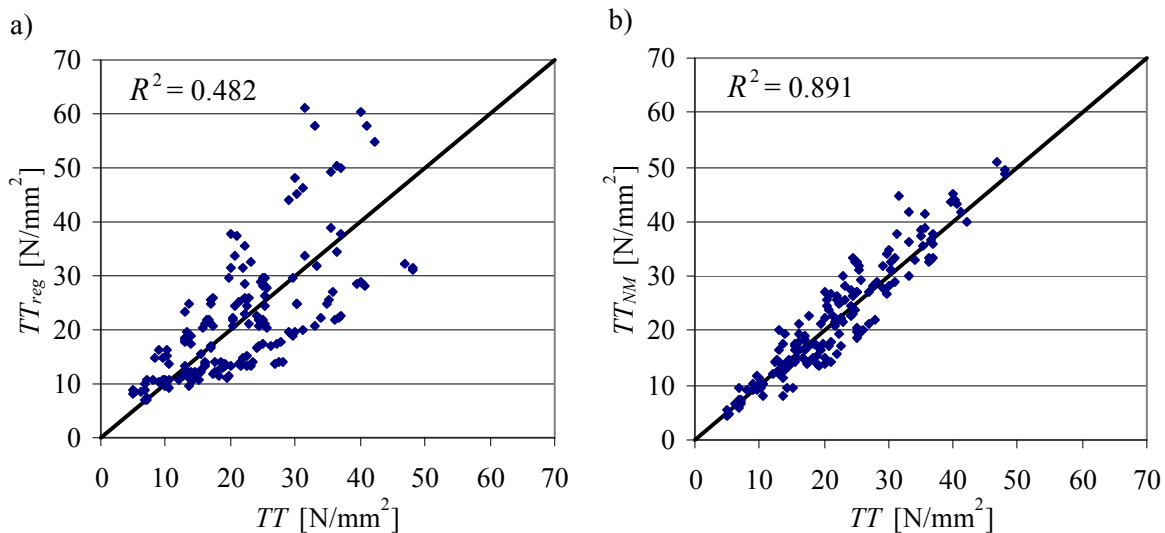
9.4.4 Uspešnost in natančnost predlaganega numeričnega modela

Slika 9.16 prikazuje primerjavo med dejanskimi tlačnimi trdnostmi TT in tlačnimi trdnostmi TT_{reg} , določenimi z nelinearnim regresijskim modelom (9.16), ter med dejanskimi tlačnimi trdnostmi TT in tlačnimi trdnostmi TT_{NM} , določenimi s predlaganim numeričnim modelom za vse obravnavane betonske vzorce. Koeficient korelacije med TT in TT_{NM} je precej večji od koeficienta korelacije med TT in TT_{reg} , kar pomeni, da je ocena tlačne trdnosti na podlagi predlaganega numeričnega modela precej zanesljivejša in natančnejša v primerjavi z oceno, dobljeno na podlagi klasičnega nelinearnega regresijskega modela. Ta ugotovitev je še bolj razvidna iz slike 9.17, ki prikazuje korelacijo med dejanskimi tlačnimi trdnostmi TT in tlačnimi trdnostmi TT_{reg} , določenimi z nelinearnim regresijskim modelom (9.16) ter med dejanskimi tlačnimi trdnostmi TT in tlačnimi trdnostmi TT_{NM} , določenimi s predlaganim numeričnim modelom, le za mešanice z različnimi vsebnostmi agregata v betonu, obliko agregata, tipom agregata in velikostjo maksimalnega zrna agregata v betonu (mešanice B16C1054, B16C1KA2040, B16C1KA3040, B16C1KA2, B16C1KA3, B16C1KA2065, B16C1KA3065, B16C1KA2MA2, B16C1MA2, B16C1KA3MA2, B4C1054, B8C1054, B32C1054, B16C1OA2).



Slika 9.16 Korelacija med dejanskimi in izračunanimi tlačnimi trdnostmi, vsi vzorci, a) korelacija $TT - TT_{reg}$, b) korelacija $TT - TT_{NM}$.

Figure 9.16 Correlation between actual and calculated compressive strengths, all data, a) correlation $TT - TT_{reg}$, b) correlation $TT - TT_{NM}$.



Slika 9.17 Korelacija med dejanskimi in izračunanimi tlačnimi trdnostmi, mešanice z vplivnimi parametri, a) korelacija $TT - TT_{reg}$, b) korelacija $TT - TT_{NM}$.

Figure 9.17 Correlation between actual and calculated compressive strengths, mixtures with influential parameters, a) correlation $TT - TT_{reg}$, b) correlation $TT - TT_{NM}$.

9.4.5 Možnost uporabe predlaganega numeričnega modela

Ocena tlačne trdnosti betona poljubne sestave

Kontrola uporabnosti predlaganega numeričnega modela za oceno tlačne trdnosti betona na osnovi znane hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton je bila opravljena na posebej za ta namen pripravljenih betonskih vzorcih v obliki kocke s stranico 150 mm. Pripravljenih je bilo šest različnih mešanic betona s po šestimi preskušanci v vsaki mešanici. Sestava teh mešanic je bila različna od mešanic, ki so bile vključene v proces učenja umetne nevronske mreže. Preiskave hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi betonske vzorce in preiskave tlačnih trdnosti betonskih preskušancev so bile opravljene pri naključnih starostih betonskih vzorcev, od 1 do 7 dni. Karakteristike dodatnih betonskih mešanic so prikazane v preglednici 9.20, zveza $TT - v_p$ pa je prikazana na sliki 9.18.

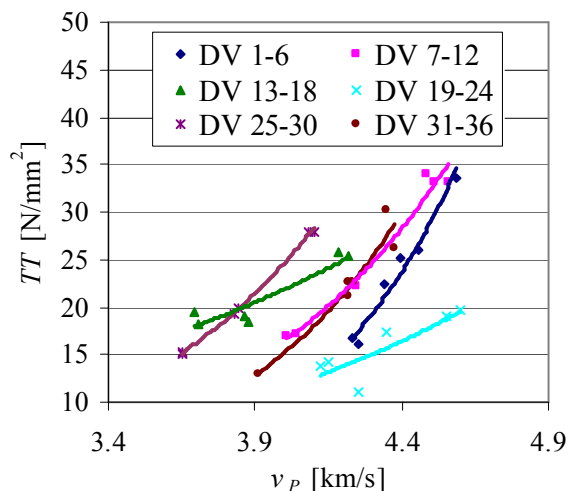
Preglednica 9.20 Osnovne karakteristike dodatnih betonskih vzorcev.

Table 9.20 Basic characteristics of additionally prepared concrete specimens.

številka vzorca	količina agregata [kg/m ³]	vrsta agregata	maksimalno zrno [mm]	oblika agregata	v/c razmerje	vrsta cementa
DV 1-6	1750	apnenec	32	drobljen	0.45	CEM I 42,5N
DV 7-12	1530	apnenec	8	drobljen	0.45	CEM I 42,5N
DV 13-18	1804	kvarcit karb.	4	drobljen	0.6	CEM I 52,5R
DV 19-24	2000	kvarcit karb.	32	prodnat	0.6	CEM I 42,5N
DV 25-30	1530	apnenec	4	prodnat	0.5	CEM II/A-S 42,5R
DV 31-36	2000	apnenec	8	drobljen	0.5	CEM I 42,5 N SR

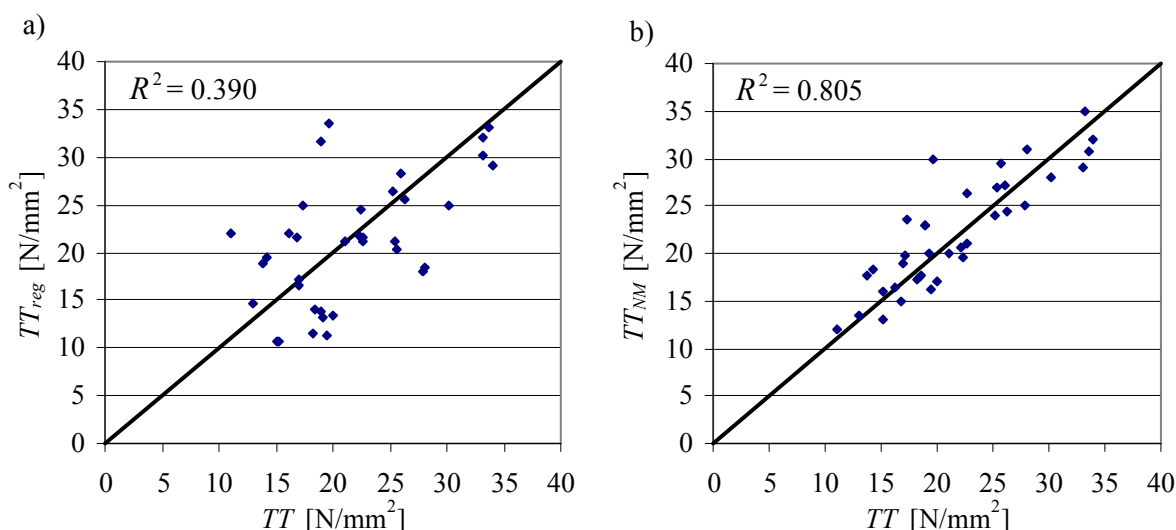
Slika 9.19a prikazuje zvezo med dejanskimi tlačnimi trdnostmi TT in tlačnimi trdnostmi TT_{reg} , izračunanimi na podlagi najustrežnejšega nelinearnega regresijskega modela (9.16), na sliki 9.19b pa je prikazana zveza med dejanskimi tlačnimi trdnostmi TT in tlačnimi trdnostmi TT_{NM} , izračunanimi s predlaganim numeričnim modelom. Vidimo, da je koeficient korelacije med $TT - TT_{NM}$ precej večji kot koeficient korelacije med $TT - TT_{reg}$. To pomeni, da je bila ocena tlačne trdnosti betona na podlagi

znane hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton v primeru uporabe predlaganega numeričnega modela bistveno zanesljivejša.



Slika 9.18 Zveze $TT - v_p$ za dodatno pripravljene betonske mešanice.

Figure 9.18 $TT - v_p$ relationships for additionally prepared concrete mixtures.



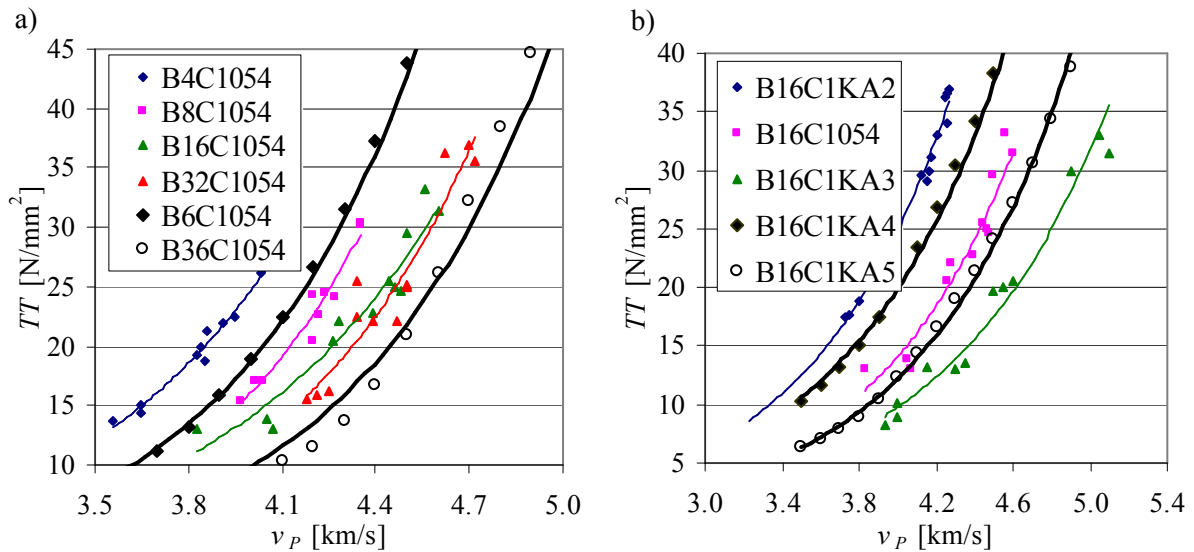
Slika 9.19 Korelacija med dejanskimi in izračunanimi tlačnimi trdnostmi, dodatni vzorci, a) korelacija med TT in TT_{reg} , b) korelacija med TT in TT_{NM} .

Figure 9.19 Correlation between actual and calculated compressive strengths, additionally prepared concrete specimens, a) correlation $TT - TT_{reg}$, b) correlation $TT - TT_{NM}$.

Možnost napovedovanja nove korelacijske krivulje $TT - v_p$

S predlaganim numeričnim modelom lahko enostavno napovemo korelacijsko krivuljo, ki predstavlja sovisnost med tlačno trdnostjo betona in hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton poljubne sestave. Slika 9.20a prikazuje zveze $TT - v_p$ v odvisnosti od velikosti maksimalnega zrna agregata v betonu, pri čemer sta poleg eksperimentalno določenih zvez kot primer prikazani tudi izračunani korelaciji med v_p in TT za betonski mešanici z maksimalnim zrnom agregata 6 mm in 36 mm. Podobno so na sliki 9.20b prikazane zveze $TT - v_p$ v odvisnosti od količine agregata v betonu, pri čemer sta poleg eksperimentalno določenih zvez kot primer prikazani tudi izračunani korelaciji med v_p

in TT za betonski mešanici z deležem agregata v betonu 1700 kg/m^3 (mešanica B16C1KA4) in 2000 kg/m^3 (mešanica B16C1KA5).



Slika 9.20 Možnost uporabe numeričnega modela za napovedovanje nove korelacijske krivulje $TT - v_p$, a) vpliv maksimalnega zrna agregata v betonu, b) vpliv količine agregata v betonu.

Figure 9.20 Ability of the proposed numerical model to predict some new correlation curves $TT - v_p$, a) influence of maximum nominal aggregate size, b) influence of amount of aggregate.

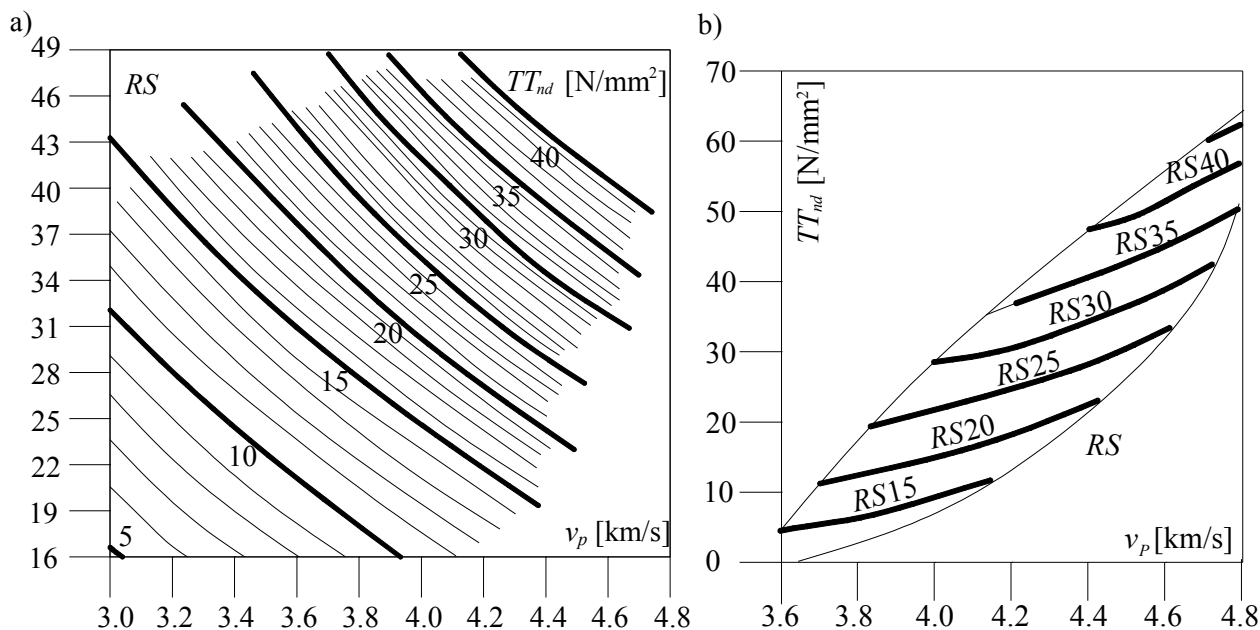
9.5 NUMERIČNI MODEL ZA OCENO TLAČNE TRDNOSTI BETONA Z MEŠANO NEDESTRUKTIVNO METODO

9.5.1 Uvod

Najbolj znana in največkrat uporabljena nedestruktivna metoda ocene tlačne trdnosti betona je nedvomno metoda sklerometričnega indeksa, opisana v standardu SIST EN 12504-2:2002 (poglavje 3.3.6). Za natančnejšo nedestruktivno oceno tlačne trdnosti betona so bile razvite številne t.i. mešane nedestruktivne metode, od katerih je najbolj znana kombinacija sklerometriške in ultrazvočne metode.

V svetu sta se uveljavili predvsem dve metodi, ki temeljita na oceni tlačne trdnosti betona na osnovi sklerometričnega indeksa in hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton, in sicer metoda SONREB in metoda Samarin-Smorchevsky. SONREB metoda temelji na definiciji referenčne betonske mešanice, za katero je pripravljen šop krivulj enakih tlačnih trdnosti (slika 9.21a). Če sestava betona ne ustreza referenčnemu betonu, se pri določitvi tlačne trdnosti upoštevajo ustrezni korelacijski koeficienti. Metoda Samarin-Smorchevsky je bila razvita v zgodnjih 70-ih letih, sovisnost med tlačno trdnostjo ter hitrostjo prehoda ultrazvoka in vrednostjo sklerometričnega indeksa pa je določena za posamezno betonsko mešanico v odvisnosti od tipa agregata v betonu in starosti betona (slika 9.21b).

Številni raziskovalci si še vedno niso enotni, ali kombinacija teh dveh metod dejansko izboljša oceno tlačne trdnosti betona v konstrukciji (Idrissou 2006). Različni avtorji predlagajo različne zveze med vrednostjo odboja RS , hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton v_p [km/s] in tlačno trdnostjo betona $TT_{nd,reg}$ [N/mm²] (preglednica 9.21). Regresijski modeli, prikazani v preglednici 9.21, so bili določeni na podlagi betonskih vzorcev, odvzetih neposredno iz konstrukcije. Idrissou (2006) poudarja pomembnost laboratorijsko pripravljenih betonskih vzorcev za izboljšanje analize natančnosti ocene tlačne trdnosti betona na osnovi kombinacije sklerometričnega indeksa in hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton.



Slika 9.21 a) Krivulje enakih trdnosti za referenčno betonsko mešanico, metoda SONREB (Samarin 2004), b) Monogram za beton z določenim tipom agregata pri določeni starosti (Samarin 2004).

Figure 9.21 a) ISO-strength curves for reference concrete in SONREB method (Samarin 2004), b) Monogram for concrete of a particular aggregate type and age (Samarin 2004).

Preglednica 9.21 Različni regresijski modeli za oceno tlačne trdnosti betona z mešano nedestruktivno metodo.

Table 9.21 Various multiple regression models suggested by different researchers to estimate the compressive strength of concrete.

zveza	enačba	avtor
$TT_{nd,reg} = k_0 + k_1 RS + k_2 v_p$	(9.81)	McLeod (Samarin 2004)
$TT_{nd,reg} = k_0 + k_1 v_p + k_2 v_p^2$	(9.82a)	Knaze, Beno (Samarin 2004)
$TT_{nd,reg} = a_0 + a_1 RS + a_2 RS^2$	(9.82b)	Knaze, Beno (Samarin 2004)
$TT_{nd,reg} = k_0 + k_1 RS^3 + k_2 v_p$	(9.83)	Bellander (Samarin 2004)
$\text{Log}_e TT_{nd,reg} = k_0 + k_1 RS + k_2 v_p$	(9.84)	Weibinga (Samarin 2004)
$TT_{nd,reg} = k_0 RS^n v_p^m$	(9.85)	Schickert (Samarin 2004), Dolce in Ferrini 2006
$TT_{nd,reg} = k_0 + k_1 RS + k_2 v_p^4$	(9.86)	Samarin s sodelavci 2004
$TT_{nd,reg} = v_p (a_0 + a_1 RS + a_2 RS^2 + a_3 RS^3)$	(9.87)	Tanigawa s sodelavci (Samarin 2004)
$TT_{nd,reg} = a_0 RS^{a_1} \exp(a_2 v_p)$	(9.88)	Nash s sodelavci (2005)
$TT_{nd,reg} = a_0 \exp(a_1 RS) a_2 \exp(a_3 v_p)$	(9.89)	Trtnik s sodelavci (2007)

9.5.2 Eksperimentalno delo in rezultati

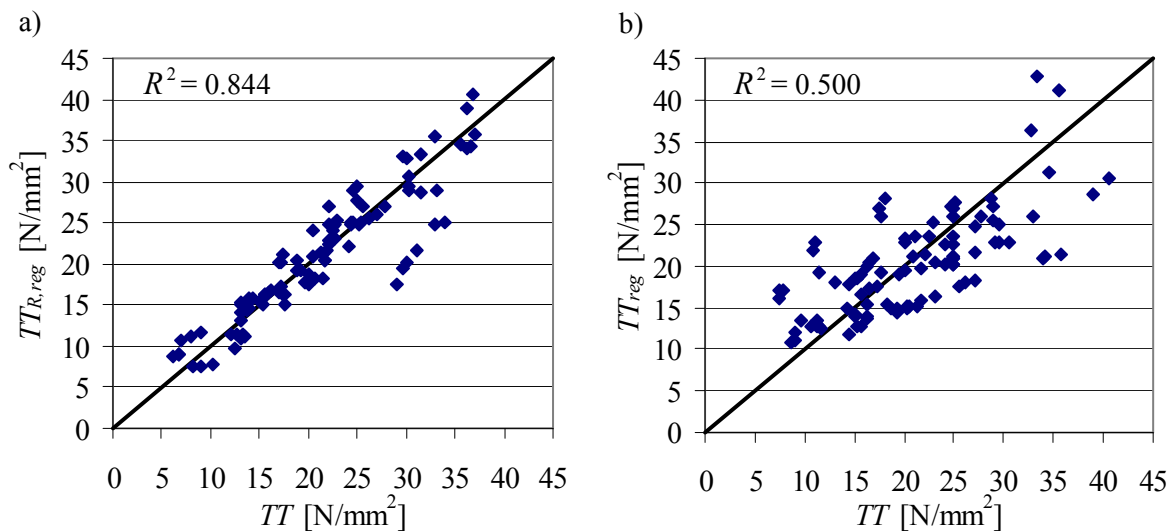
Za ugotavljanje natančnosti ocene tlačne trdnosti betona z mešano nedestruktivno metodo smo uporabili betonske mešanice z oznakami B4C1054, B8C1054, B16C1054, B32C1054, B16C1KA2, B16C1KA3, B16C1OA2 in B16C1MA2 (mešanice z vplivnimi parametri). Na vsakem preskušancu smo pred porušno preiskavo tlačne trdnosti poleg hitrosti prehoda ultrazvoka skozi beton določili vrednost sklerometričnega indeksa v skladu z veljavnim standardom SIST EN 12504-2 (poglavje 3.3.6).

Slika 9.22 prikazuje korelacijo med dejanskimi tlačnimi trdnostmi TT in tlačnimi trdnostmi TT_{reg} , izračunanimi na osnovi hitrosti prehoda ultrazvoka skozi betonske vzorce (regresijski model 9.90) in

korelacijo med dejanskimi tlačnimi trdnostmi TT in tlačnimi trdnostmi $TT_{R,reg}$, izračunanimi na osnovi vrednosti sklerometričnega indeksa za navedene betonske mešanice. Pričakovano je koeficient korelacije R^2 za zvezo $TT - TT_{reg}$ nizek oziroma precej nižji od koeficienta korelacije $TT - TT_{R,reg}$. Vrednosti $TT_{R,reg}$ so izračunane z regresijskim modelom (9.91), ki za obravnavane podatke najbolje opiše zvezo $RS - TT_{R,reg}$.

$$TT_{reg} = 0.6061 \exp(0.8348v_p) \quad (9.90)$$

$$TT_{R,reg} = 2.9351 \exp(0.0714RS) \quad (9.91)$$



Slika 9.22 Zveza med dejanskimi in izračunanimi tlačnimi trdnostmi, a) Zveza $TT - TT_{R,reg}$, b) Zveza $TT - TT_{reg}$.

Figure 9.22 Relationship between actual and calculated compressive strengths, a) relationship $TT - TT_{R,reg}$, b) relationship $TT - TT_{reg}$.

V preglednici 9.22 so prikazani koeficienti korelacije med dejanskimi tlačnimi trdnostmi in tlačnimi trdnostmi, izračunanimi z mešano nedestruktivno metodo, za posamezne regresijske modele, navedene v preglednici 9.21.

Preglednica 9.22 Koeficienti korelacije za zvezo $TT - TT_{nd,reg}$.

Table 9.22 Correlation coefficients, correlation $TT - TT_{nd,reg}$

regresijski model	enačba	R^2
$TT_{nd,reg} = -18.727 + 1.2314RS + 1.7326v_p$	(9.92)	0.827
$TT_{nd,reg} = 5.9691 + 0.00064RS^3 + 0.4174v_p$	(9.93)	0.842
$TT_{nd,reg} = 0.05349RS^{1.8373} / v_p^{0.0539}$	(9.94)	0.846
$TT_{nd,reg} = -13.3936 + 1.2464RS + 0.0047v_p^4$	(9.95)	0.827
$TT_{nd,reg} = v_p(2.9838 - 0.2868RS + 0.0190RS^2 - 0.00021RS^3)$	(9.96)	0.817
$TT_{nd,reg} = 3.8624 \exp(0.0684RS - 0.0490v_p)$	(9.97)	0.847

Razvidno je, da se te vrednosti koeficientov R^2 ne razlikujejo bistveno od vrednosti koeficienta korelacije med dejanskimi tlačnimi trdnostmi in tlačnimi trdnostmi, izračunanimi le na osnovi vrednosti sklerometričnega indeksa (slika 9.22a). V tem primeru torej uporaba mešane nedestruktivne metode ni izboljšala ocene tlačne trdnosti betona.

Dodatno je bila analizirana možnost uporabe umetnih nevronske mreže za oceno tlačne trdnosti betona iz vrednosti sklerometričnega indeksa in hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton. Analiza je bila opravljena z različnimi strukturami nevronske mreže, koeficient korelacije R^2 med dejanskimi tlačnimi trdnostmi TT in tlačnimi trdnostmi $TT_{nd,NM}$, izračunanimi z nevronske mreže, pa v nobenem primeru ni bil večji od vrednosti $R^2 = 0.817$. Tako tudi v primeru uporabe metode umetnih nevronske mreže mešana nedestruktivna metoda ni izboljšala ocene tlačne trdnosti betona.

9.6 SKLEPI

Predlagani regresijski modeli za oceno tlačne trdnosti betona na osnovi znane hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton do sedaj niso bili posebej uspešni, na kar kažejo relativno nizki koeficienti korelacije med dejanskimi tlačnimi trdnostmi TT in tlačnimi trdnostmi TT_{reg} , izračunanimi s temi regresijskimi modeli. Razlog za slabo korelacijo je nehomogena struktura betona. Posamezni parametri betonske mešanice namreč ne vplivajo v enaki meri na hitrost v_p in tlačno trdnost TT , njihove medsebojne interakcije pa so zapletene in kompleksne. Podrobna študija vpliva posameznih parametrov na sovisnost $TT - v_p$ je tako ključnega pomena za bolj zanesljivo oceno tlačne trdnosti betona na osnovi hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton.

V tem poglavju so prikazani rezultati obsežnega eksperimentalnega dela, katerega cilj je bil analizirati vpliv posameznih parametrov betonske mešanice in pogojev okolja na sovisnost $TT - v_p$. Ugotovili smo, da na sovisnost $TT - v_p$ najpomembneje vpliva agregat v betonu (količina, vrsta, velikost in oblika). V skladu z eksperimentalnimi rezultati je bil pripravljen numerični model na osnovi umetnih nevronske mreže. Z uporabo predlaganega numeričnega modela je ocena tlačne trdnosti betona v primerjavi s prejšnjimi regresijskimi modeli bistveno zanesljivejša, omogoča pa tudi enostavno določitev novih korelacijskih krivulj $TT - v_p$ v odvisnosti od sestave betonske mešanice.

Analiza ponovljivosti zvez $TT - v_p$ je pokazala, da zveze $TT - v_p$ za enake betonske mešanice niso statistično značilno različne.

Eksperimentalni rezultati so pokazali, da je v primeru neznane sestave betona metoda sklerometričnega indeksa bolj natančna od metode prehoda ultrazvoka skozi beton. Kombinacija obeh metod ni izboljšala ocene tlačne trdnosti betona.

10. NUMERIČNI MODEL ZA DOLOČITEV ADIABATNE KRIVULJE POLJUBNE BETONSKE MEŠANICE IN NJEGOVA APLIKACIJA

10.1 UVOD

Hidratacija cementa v betonu je eksotermna reakcija, pri kateri se sprošča določena količina hidrationske toplote ter nastajajo hidrationski produkti, ki poleg agregata tvorijo trdno fazo v strukturi materialov s cementnim vezivom (poglavje 2). V prejšnjih poglavjih je prikazana možnost spremljanja nastajanja hidrationskih produktov in posameznih pojavov, povezanih z razvojem trdne faze, z ultrazvočnimi metodami, standardni način zasledovanja hidrationskega procesa pa temelji na merjenju temperature materialov med potekom procesa hidrationske, od katerih metoda adiabatsne kalorimetrije najkvalitetneje opiše razvoj hidrationskega procesa.

V adiabatsnih razmerah ni izmenjave hidrationske toplote s toploto iz okolice (poglavje 2.3). Rezultat adiabatsne kalorimetrije je krivulja naraščanja temperature s časom $T_a(t)$, ki jo imenujemo adiabatsna krivulja. Medtem ko lahko z ultrazvočno metodo zasledujemo proces formiranja strukture materialov s cementnim vezivom (poglavje 6) ter ocenimo čas vezanja (poglavje 8) in tlačno trdnost (poglavje 9) materiala, je adiabatsna krivulja med drugim pomembna za določitev razvoja temperaturnega polja v betonskih konstrukcijah, zlasti v zgodnjem obdobju.

Adiabatsna krivulja je naraščajoča krivulja z značilno sigmoidno obliko. V literaturi obstaja več enačb, ki opisujejo adiabatsne krivulje. Ammar (Ammar 1973) je predlagal enačbo v obliki

$$T_a(t) = a + b \exp\left(-\left(\frac{c}{t}\right)^d\right), \quad (10.1)$$

Tanabe (1985) enačbo v obliki

$$T_a(t) = K(1 - \exp(-at)), \quad (10.2)$$

Carslaw in Jaeger (1959) pa enačbo v obliki

$$T_a(t) = a - b \exp(-ct). \quad (10.3)$$

Morabito (Morabito 2001) je uporabljal enačbo

$$T_a(t) = \frac{t}{n + m t}. \quad (10.4)$$

V enačbah (10.1-10.4) so a, b, c, d, m, K in n koeficienti, določeni po metodi najmanjših kvadratov. Glavna pomanjkljivost navedenih enačb je v tem, da morajo biti koeficienti v teh enačbah določeni za vsako betonsko mešanico posebej. Tako je potrebno za vsako betonsko mešanico posebej adiabatsno krivuljo določiti eksperimentalno, kar je precej zamudno in drago. Razvoj modela za določitev adiabatsne krivulje poljubne betonske mešanice bi tako znatno pripomogel k udobnejšemu in hitrejšemu napovedovanju razvoja temperaturnega polja v betonskih konstrukcijah.

Z razvojem računalniške opreme se v zadnjem obdobju razvijajo numerični programi, s katerimi lahko na osnovi podatkov o materialu izračunamo adiabatsno krivuljo (van Breugel 1991, Bentz 1997). Kljub temu je v teh programih potrebno posamezne parametre "umetno" določiti tako, da se izračunana adiabatsna krivulja najbolje prilega eksperimentalno določeni adiabatsni krivulji. Evsukoff s sodelavci (2006) je predstavil možnost uporabe mehke logike pri modeliranju adiabatsnih krivulj.

10.2 RAZVOJ MODELA

10.2.1 Eksperimentalno delo

Glavni namen opravljenih eksperimentalnih preiskav je bila priprava numeričnega modela za izračun adiabatne krivulje poljubne betonske mešanice na osnovi eksperimentalno določenih adiabatnih krivulj. Pri pripravi modela smo se odločili za uporabo metode umetnih nevronske mreže. Vse adiabatne krivulje, uporabljene v modelu, so bile izmerjene v adiabatnem kalorimetru inštituta IGMAT d.d.

Adiabatni kalorimeter Inštituta za gradbene materiale IGMAT d.d. uporablja kot izolacijski medij zrak. Sestavni deli kalorimetra so hladilna in grelna naprava, ventilator, osebni računalnik, merilna kartica in temperaturni senzorji oziroma termočleni. S temperaturnimi senzorji, merilno kartico in računalnikom lahko nadzorujemo pravilno delovanje kalorimetra ter beležimo temperature v betonskem vzorcu in okolici. Ustrezno klimo v notranjosti kalorimetra dosežemo z grelno in hladilno napravo ter ventilatorja, ki jih ustrezno nastavimo s posebej izdelanim računalniškim programom. Na sliki 10.1a je prikazana notranjost adiabatnega kalorimetra, v kateri se nahajajo preizkušanci za preiskavo tlačne trdnosti, prehoda ultrazvoka ter valj s termočleni. Slika 10.1b kaže računalniško podporo za merjenje v adiabatnem kalorimetru.

a)



b)

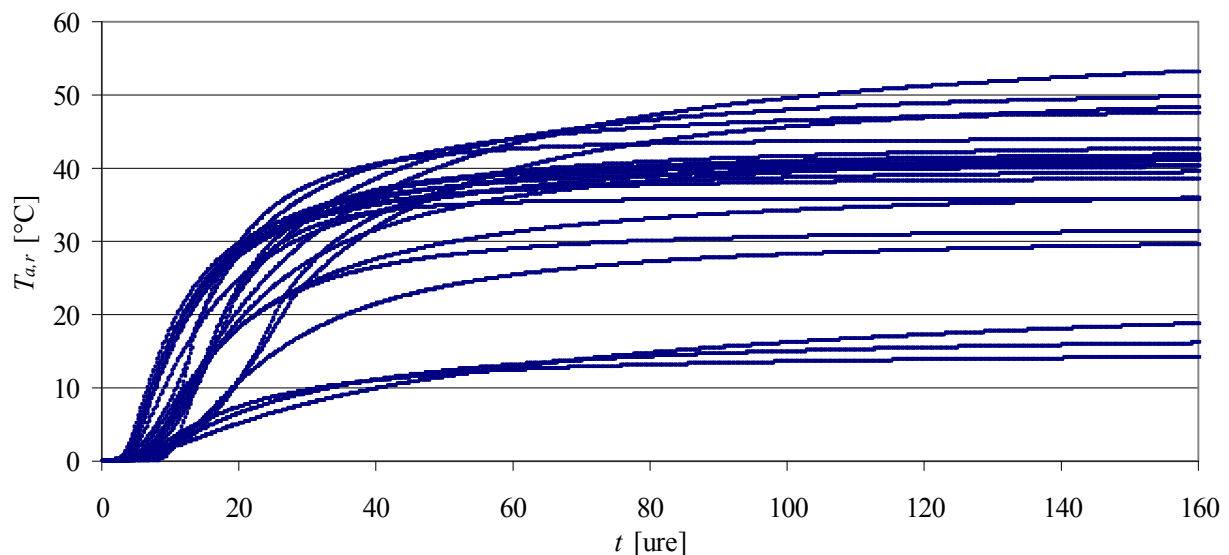


Slika 10.1 a) Uporabljen adiabatni kalorimeter, b) pripadajoča merilna oprema.
Figure 10.1 a) Adiabatic calorimeter, used in this study, b) suitable PC equipment.

V model je bilo vključenih 24 adiabatnih krivulj, določenih na osnovi lastnih eksperimentov in podatkov iz literature (Kavčič 2000, Trtnik 2004). Posamezne betonske mešanice so se med seboj razlikovale glede začetne temperature betona pri adiabatnem preskusu T_0 , vrste cementa v betonu TC, količine cementa v betonu KC, vrste kemijskega dodatka KD in vodo/cementnega razmerja v/c. Karakteristike posameznih uporabljenih betonskih mešanic so prikazane v preglednici 10.1, adiabatne krivulje pa so prikazane na sliki 10.2.

Preglednica 10.1 Karakteristike vseh uporabljenih adiabatnih krivulj.
Table 10.1 Characteristics of all adiabatic hydration curves, used in this study

oznaka		vplivni parametri				oznaka		vplivni parametri			
krivulje	TC	v/c	KC [kg/m ³]	KD	T ₀ [°C]	Krivulje	TC	v/c	KC [kg/m ³]	KD	T ₀ [°C]
A1	CT1	0.70	180	1	20.0	A13	CT3	0.47	360	2	7.2
A2	CT1	0.70	180	1	25.0	A14	CT3	0.50	350	1	23.8
A3	CT1	0.70	180	1	29.0	A15	CT3	0.50	360	1	24.9
A4	CT1	0.42	380	1	22.9	A16	CT3	0.50	360	1	26.2
A5	CT2	0.43	350	1	25.3	A17	CT3	0.54	370	1	17.4
A6	CT3	0.45	350	1	19.9	A18	CT3	0.54	370	1	13.1
A7	CT4	0.45	350	1	26.5	A19	CT3	0.54	370	1	7.9
A8	CT1	0.65	280	1	23.0	A20	CT3	0.50	370	3	18.5
A9	CT3	0.50	360	1	18.7	A21	CT3	0.50	370	3	12.8
A10	CT3	0.50	360	1	21.3	A22	CT3	0.50	370	3	7.9
A11	CT3	0.47	360	2	20.7	A23	CT3	0.52	370	4	19.0
A12	CT3	0.45	330	2	12.6	A24	CT4	0.52	370	4	11.0



Slika 10.2 Adiabatne krivulje, uporabljene pri pripravi numeričnega modela.

Figure 10.2 Adiabatic hydration curves, used to develop numerical model.

Računalnik je adiabatno temperaturo zapisoval vsakih 10 minut, kar pomeni, da je bilo pri vsaki adiabatni krivulji na voljo okrog 900 podatkov $t_i - T_{a,r,i}$, kjer je $T_{a,r,i}$ relativna sprememba adiabatne temperature v času t_i .

10.2.2 Priprava modela

Zaradi relativno velikega števila vplivnih parametrov (preglednica 10.1) in njihove zapletene medsebojne korelacije na razvoj adiabatnih krivulj, smo se pri pripravi modela adiabatne krivulje poljubne betonske mešanice odločili za uporabo umetnih nevronske mreže. V fazi razvoja modela je bilo analiziranih več struktur umetne nevronske mreže, nazadnje pa smo uporabili nevronske mreže tipa 6-30-30-30-1. V vhodnem sloju je bilo tako 6 vhodnih nevronov (neodvisnih spremenljivk), in sicer začetna temperatura pri adiabatnem preskusu, vrsta cementa v betonu, količina cementa v betonu, vrsta kemijskega dodatka v

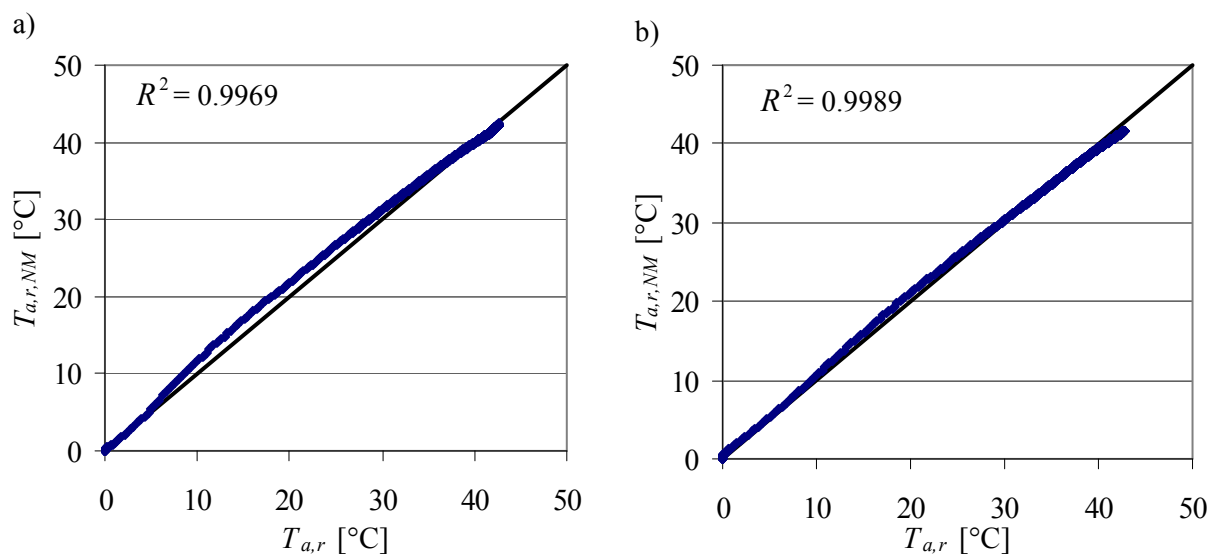
betonu, velikost vodo/cementnega razmerja in čas. Izhodni nevron je predstavljala vrednost relativne adiabatne temperature pri času t $T_{a,r}(t)$.

Približno 75 % vseh podatkovnih parov $T_{a,r,i}-t_i$ je bilo vključenih v učenje umetne nevronske mreže, preostalih 25 % pa je bilo namenjeno testiranju umetne nevronske mreže. Krivulja A10 ni bila vključena v učenje umetne nevronske mreže (poglavje 10.2.3). Koeficient korelacije R^2 med dejanskimi $T_{a,r}$ in izračunanimi $T_{a,r,NM}$ vrednostmi je znašal $R^2=0.999$, kar pomeni, da je bil proces učenja umetne nevronske mreže zelo uspešen.

10.2.3 Natančnost modela

Krivulja A10 ni bila vključena v učenje umetne nevronske mreže in je bila uporabljena za testiranje uspešnosti umetne nevronske mreže pri napovedovanju nove adiabatne krivulje. V ta namen sta bili opravljene dve analizi.

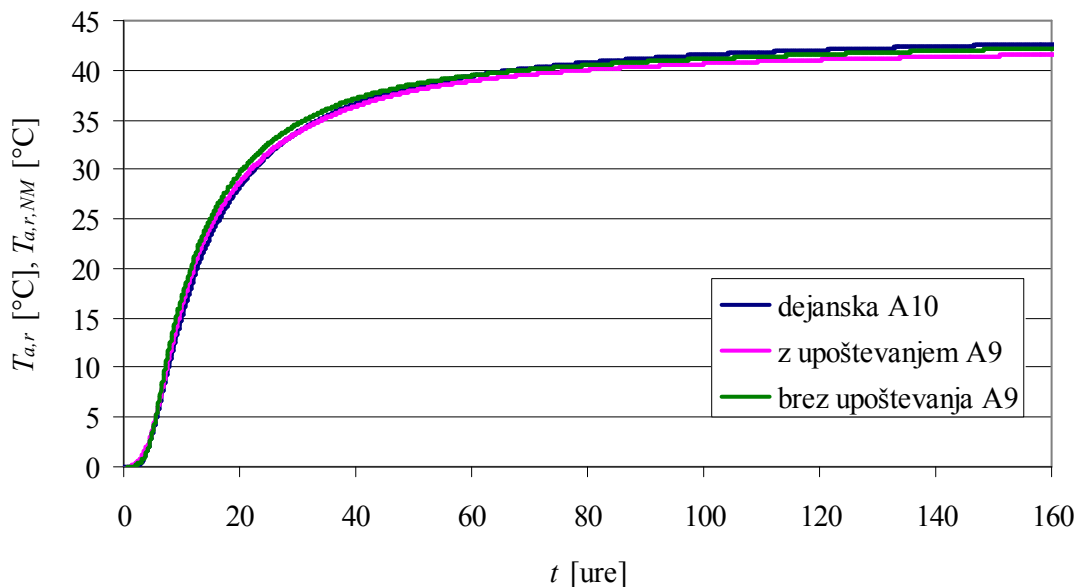
V prvi fazi krivulja A9 (poleg krivulje A10) ni bila vključena v proces učenja umetne nevronske mreže. To pomeni, da je imela krivulja A10 v tem primeru ekstremno vrednost začetne temperature z ozirom na druge mešanice z enakimi ostalimi začetnimi parametri (mešanice A14, A15 in A16). Koeficient korelacije med dejanskimi in izračunanimi vrednostmi relativne adiabatne temperature pri določenem času je v tem primeru znašal $R^2 = 0.997$ (slika 10.3a).



Slika 10.3 Primerjava med dejanskimi in izračunanimi vrednostmi relativne adiabatne temperature, a) brez krivulje A9, b) s krivuljo A9.

Figure 10.3 Comparison between actual and calculated values of relative adiabatic temperature, a) without A9 curve, b) with A9 curve.

V naslednji fazi je bila krivulja A9 vključena v proces učenja umetne nevronske mreže, kar pomeni, da noben parameter pri mešanici A10 ni zajemal ekstremne vrednosti z ozirom na druge mešanice z enakimi ostalimi začetnimi parametri. Koeficient korelacije med dejanskimi in izračunanimi vrednostmi adiabatne temperature pri določenem času je bil v tem primeru malenkost višji in je znašal $R^2 = 0.9989$ (slika 10.3b). To pomeni, da so umetne nevronske mreže v primeru interpolacije podatkov nekoliko natančnejše kot v primeru ekstrapolacije, a je bila ta razlika v tem primeru zanemarljiva. Slika 10.4 prikazuje dejansko in obe izračunani adiabatni krivulji A10.



Slika 10.4 Primerjava dejanske in izračunanih relativnih adiabatnih krivulj A10.

Figure 10.4 Comparison between actual and calculated relative adiabatic hydration curves A10.

Slabša sposobnost numeričnega modela za napovedovanje adiabatnih krivulj v primeru ekstrapolacije začetnih parametrov zahteva stalno širitev območja adiabatnih krivulj, potrebnih za učenje umetne nevronske mreže. V tem smislu je torej predlagani numerični model sposoben korektno izračunati adiabatno krivuljo "kvazi" poljubne betonske mešanice, torej betonske mešanice, katere podatki "ustrezajo" podatkom za adiabatne krivulje, vključene v proces učenja umetne nevronske mreže. Dodajanje novih eksperimentalno določenih adiabatnih krivulj omogoča enostavno širitev območja, znotraj katerega zadovoljivo napovemo adiabatno krivuljo nove betonske mešanice.

Preglednica 10.2 prikazuje natančnost predlaganega numeričnega modela za aproksimacijo krivulj, ki so bile vključene v proces učenja umetne nevronske mreže. V ta namen je bilo izbranih 12 naključnih adiabatnih krivulj. Za primerjavo je prikazana tudi natančnost posameznih regresijskih modelov (enačbe 10.1 – 10.4) za aproksimacijo istih adiabatnih krivulj. Pri tem je potrebno poudariti, da so bili v primeru uporabe regresijskih modelov koeficienti določeni po metodi najmanjših kvadratov za vsako analizirano adiabatno krivuljo posebej, v primeru uporabe predlaganega numeričnega modela pa so bile seveda vse krivulje aproksimirane z istim modelom. Ocena standardne deviacije je bila določena v skladu z enačbo (9.76), vrednost SSE pa po enačbi:

$$SSE = \sum_{i=1}^N (T_{a,r,i} - T_{a,r,NM,i})^2 \quad (10.5)$$

Število naključno določenih podatkov $T_{a,r,i} - t_i$ pri vsaki adiabatni krivulji je znašalo $N = 25$.

Preglednica 10.2 Statistične analize regresijskih modelov in modela NM.

Table 10.2 Statistical analysis of the regression models and ANN model.

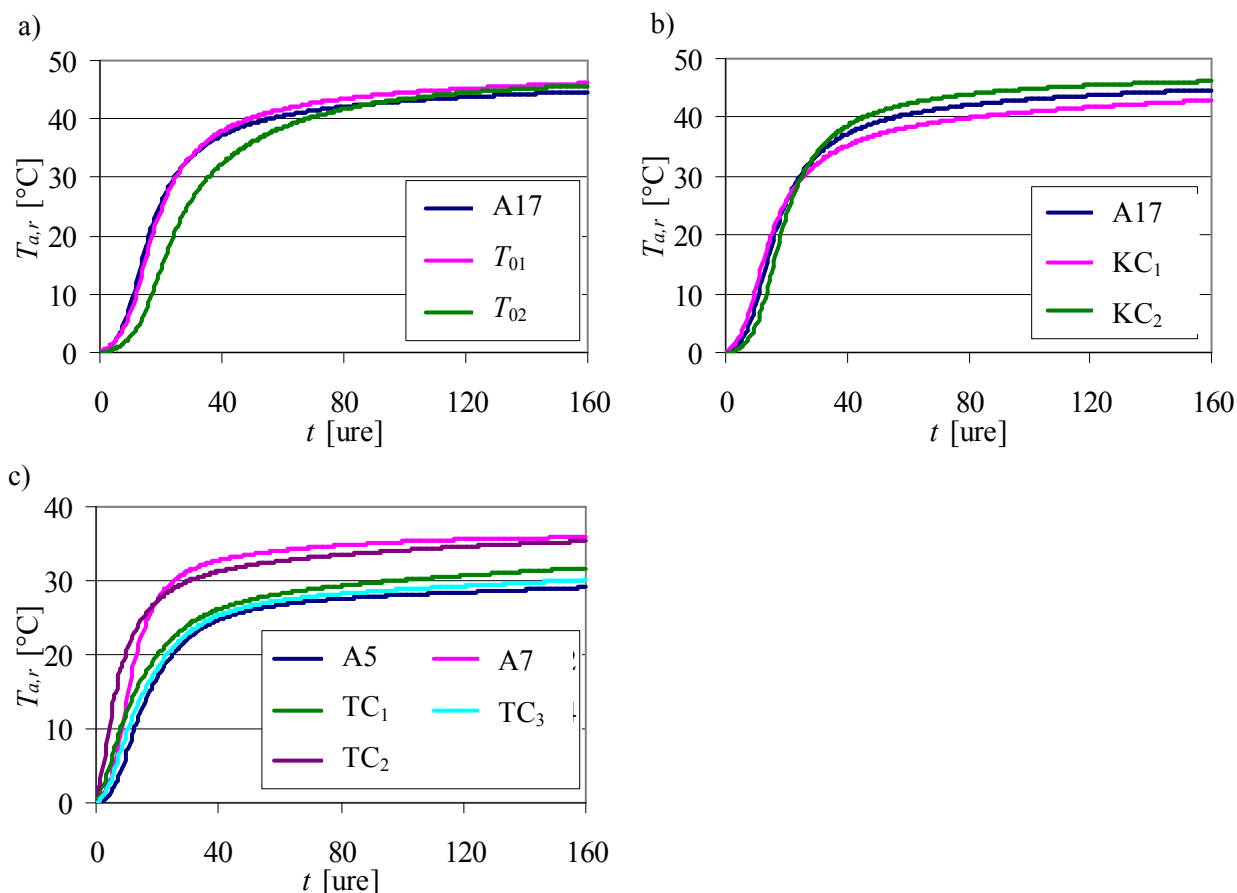
parameter	enačba (10.1)	enačba (10.2)	enačba (10.3)	enačba (10.4)	model NM
R^2	0.999	0.940	0.968	0.917	0.999
SSE	7.95	412.78	222.31	559.48	20.31
σ	0.57	4.10	3.04	4.82	0.72

Iz preglednice 10.2 je razvidno, da je bila aproksimacija adiabatnih krivulj s predlaganim numeričnim modelom zelo natančna. Adiabatne krivulje je najbolje opisal regresijski model, določen z enačbo (10.1), medtem ko so bili regresijski modeli, določeni z enačbami (10.2), (10.3) in (10.4), manj natančni.

Rezultat ni presenetljiv, saj ti trije modeli ne opisujejo oblike sigmoidne funkcije, ki je značilna za adiabatsne krivulje.

10.3 UPORABA MODELA

Slika 10.5 prikazuje praktični primer uporabe prikazanega numeričnega modela za določitev adiabatsne krivulje nove betonske mešanice.



Slika 10.5 Možnost napovedovanja nove adiabatsne krivulje s prikazanim numeričnim modelom, a) vpliv začetne temperature, b) vpliv količine cementsa, c) vpliv vrste cementsa.

Figure 10.5 Ability of the proposed numerical model to predict new adiabatic hydration curves, a) influence of the initial temperature, b) influence of the cement content, c) influence of the cement type.

Na sliki 10.5a je viden vpliv začetne temperature betona pri adiabatsnem preskusu na potek relativne adiabatsne temperature. Adiabata A17 z začetno temperaturo $T_0 = 17.4^\circ\text{C}$ je bila določena eksperimentalno (preglednica 10.1), ostali dve adiabatsni krivulji pa sta bili izračunani s prikazanim numeričnim modelom. Sestava vseh treh betonskih mešanice je bila popolnoma enaka, razlikovale so se le v vrednosti začetne temperature betona pri adiabatsnem preskusu. Začetna temperatura mešanice T_{01} je znašala $T_0 = 15^\circ\text{C}$, začetna temperatura mešanice T_{02} pa $T_0 = 10^\circ\text{C}$. V skladu s pričakovanji je pri mešanici z najnižjo začetno temperaturo (zeleno krivuljo) adiabatsna temperatura naraščala najpočasneje. V kasnejši fazi adiabatsna krivulja mešanice z začetno temperaturo $T_0 = 10^\circ\text{C}$ seka adiabatsno krivuljo mešanice z začetno temperaturo $T_0 = 15^\circ\text{C}$, do podobnega pojva pa bi najverjetneje prišlo tudi pri krivulji z začetno temperaturo $T_0 = 17.4^\circ\text{C}$. Adiabatsna krivulja mešanice z začetno temperaturo 15°C seka adiabatsno krivuljo A17 že po približno enem dnevu. Ti fenomeni so v svetovni literaturi dobro znani (van Breugel 1991, Hewlett 2004, Trtnik s sodelavci 2008f) in so posledica nastanka gostejših hidratacijskih produktov zaradi enakomernejšega in bolj umirjenega hidratacijskega procesa pri nekoliko nižjih temperaturah

(Mehta 1986, Hewlett 2004). Podoben fenomen je opazen tudi pri zasledovanju formiranja strukture cementnih past z ultrazvočnimi metodami (poglavje 6.2.3) in pri razvoju tlačnih trdnosti betona (poglavje 7.2.3).

Slika 10.5b prikazuje vpliv količine cementa na potek relativne adiabatne temperature, pri čemer je bila adiabatna krivulja mešanice A17 določena eksperimentalno. Sestava in začetna temperatura betona sta enaki pri vseh obravnavanih mešanicah, razlikujejo se le v vsebnosti cementa v betonu. Količina cementa v mešanici KC_1 je znašala $KC = 350 \text{ kg/m}^3$, količina cementa v mešanici KC_2 pa 390 kg/m^3 . Pričakovano znižanje deleža cementa v betonu zniža maksimalno vrednost adiabatne temperature in obratno.

Na sliki 10.5c je prikazan vpliv vrste cementa na potek relativne spremembe adiabatne temperature. V primeru modeliranja adiabatnih krivulj smo vrsto cementa opisali z velikostjo teoretično maksimalne možne sproščene toplote posamezne vrste cementa Q_{\max} [J/g], izračunane iz kemijske sestave cementa (enačba 10.29, poglavje 10.4.5), pri čemer so bili deleži posameznih klinkerskih mineralov ocenjeni z enačbami Boguea (enačbe 2.1-2.4, poglavje 2.2.1). Vrednost maksimalne možne sproščene hidratacijske toplote je ena izmed osnovnih karakteristik cementa, njena napoved pa je razmeroma nezanesljiva. Te vrednosti se gibljejo med 350 J/g in 530 J/g , pri čemer so nizke vrednosti značilne za cemente, ki se uporabljajo pri masivnih gradnjah, visoke vrednosti pa za cemente, ki se uporabljajo v proizvodnji montažnih elementov ali pri betoniranju v hladnem.

Preglednica 10.3 prikazuje izračunane vrednosti maksimalne sproščene hidratacijske toplote za posamezne uporabljene vrste cementa.

Preglednica 10.3 Izračunane vrednosti maksimalne možne hidratacijske toplote za posamezne uporabljene vrste cementa.

Table 10.3 Calculated maximum heat of hydration values for different cement types used.

oznaka cementa	vrsta cementa	Q_{\max} [J/g]
CT1	Salodur NM 50z 10p 35	400
CT2	CEM I 42,5 LH	370
CT3	CEM II/A-S 42,5R	435
CT4	CEM II B-M 42,5	430

Krivulji A5 in A7 na sliki 10.5 sta bili določeni eksperimentalno, ostale tri adiabatne krivulje pa so bile izračunane s prikazanim numeričnim modelom. Vrednost Q_{\max} za mešanico TC_1 je znašala $Q_{\max} = 390 \text{ J/g}$, za mešanico TC_2 $Q_{\max} = 380 \text{ J/g}$, za mešanico TC_3 pa $Q_{\max} = 420 \text{ J/g}$. Skladno s pričakovanji se je z večanjem vrednosti maksimalne sproščene hidratacijske toplote večala tudi maksimalna adiabatna temperatura posamezne betonske mešanice.

Iz slik 10.5 je razvidno, da je prikazan numerični model korektno upošteval vpliv vhodnih parametrov betona na potek izračunanih adiabatnih krivulj.

10.4 PRIPRAVA PROGRAMA ZA DOLOČITEV RAZVOJA TEMPERATURNEGA POLJA V BETONSKIH KONSTRUKCIJAH

10.4.1 Uvod

Zaradi relativno nizke toplotne prevodnosti betona se toplota, ki nastane kot posledica hidratacije, dolgo zadržuje v betonskih elementih. Ta problem je še toliko bolj izrazit v primeru konstrukcij iz masivnega betona. To ščasoma privede do velikih temperaturnih gradientov v betonskem elementu in posledično do oblikovanja nateznih razpok v betonski strukturi.

Razvoj temperature v betonskih elementih v zgodnjem obdobju opisuje znana Fourierjeva enačba, ki jo pišemo v obliki:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q. \quad (10.6)$$

V enačbi (10.6) predstavlja ρ [kg/m³] gostoto betona, c_p [J/kgK] specifično toploto betona, člen Q [J/g] pa predstavlja notranji vir toplote, ki ga v primeru betonskih konstrukcij predstavlja hidratacijska toplota. $T(x, y, z, t)$ predstavlja temperaturo v specifični točki pri času t . Osnovno enačbo (10.6) rešujemo ob različnih predpisanih robnih in začetnih pogojih, npr.

$$kT_j n_i + h(T - T_A) = 0 \quad (10.7)$$

$$T^A = T^B \quad (10.8)$$

$$T(x_i, 0) = T_z(x_i), \quad (10.9)$$

kjer je k koeficient prevodnosti betona, h [J/m²s°C] je prestopni koeficient, T^A [°C] in T^B [°C] sta temperaturi na robu dveh mejnih medijev A in B , T_A [°C] pa predstavlja temperaturo okolice. Robni pogoj (10.7) predstavlja predpisan toplotni pretok na robu betonskega elementa, robni pogoj (10.8) pa predpisano temperaturo na robu betonskega elementa. Začetni pogoj (10.9) predstavlja predpisano temperaturo v točki x_i v začetnem času.

V svetu obstaja veliko število numeričnih modelov, s katerimi lahko napovemo razvoj temperature v poljubni točki betonskega elementa. S temi programi rešujemo osnovno enačbo (10.6) po metodi končnih diferenc (Ballim 2004) ali po metodi končnih elementov (Tanabe s sodelavci 1985, Turk 1987, Isgor in Razaqpur 2004, Faria s sodelavci 2006). Glavna pomankljivost teh programov je, da je potrebno adiabatsno krivuljo, ki je potrebna za določitev notranjega vira toplote (člen Q v enačbi 10.6) določiti eksperimentalno za vsako betonsko mešanico posebej.

V nadaljevanju je prikazana možnost vključitve prikazanega numeričnega modela za napovedovanje adiabatsnih krivulj v program za račun temperaturnega polja v betonskih konstrukcijah.

10.4.2 Vključitev modela za določitev adiabatsne krivulje in kratek opis programa

Sam program je sestavljen iz dveh delov. Pri delu programa je namenjen izračunu adiabatsne krivulje betonske mešanice s predlaganim numeričnim modelom na osnovi umetnih nevronske mreže glede na podatke o betonski mešanici (poglavje 10.2). Tako izračunana krivulja služi kot vhodni podatek za glavni program, ki z metodo končnih elementov izračuna temperaturo v poljubni točki betonskega elementa v poljubnem času. Glavni program je narejen po vzoru predhodnega programa HEATC (Turk 1987), celoten program pa je narejen v programskem okolju Matlab.

Poleg avtomatskega generiranja adiabatsne krivulje je v program vključenih tudi več modelov za izračun specifične toplote betona c_p :

1. $c_p = 804$ J/kgK (Lura in van Breugel 2001) - vrednost specifične toplote betona je konstantna med potekom hidratacije betona. Ta vrednost velja za svež beton.
2. $c_p = 902$ J/kgK (Lura in van Breugel) - vrednost specifične toplote betona je konstantna med potekom hidratacije betona. Ta vrednost velja za strjen beton.
3. $c_p = 1000$ J/kgK (standard Evrokod 2) - vrednost specifične toplote betona je konstantna med potekom hidratacije in velja tako za svež kot za strjen beton.

4. $c_p = 900$ J/kgK (Turk 1987) - vrednost specifične toplote betona je konstantna med potekom hidratacije in velja tako za svež kot za strjen beton.
5. Specifična toplota betona ni konstantna med potekom hidratacije in je določena z enačbo (Lura in van Breugel 2001)

$$c_p = (KC c_{cem} + (K_{agf} + K_{agg}) c_{ag} + K_v c_v - KC \alpha C_v), \quad (10.10)$$

kjer je KC [kg/m³] količina cementa v betonu, K_{agf} [kg/m³] in K_{agg} [kg/m³] količina finega in grobega agregata v betonu, K_v [kg/m³] količina vode v betonu, α stopnja hidratacije in c_v koeficient, ki upošteva vpliv kemijsko vezane vode na specifično toplotu. Tu so c_{cem} , c_{ag} in c_v specifične toplote cementa, agregata in vode, določene po enačbah

$$c_{cem} = 0.1812 \sqrt{T} + 2.618 T + 431 \text{ [J/kgK]} \quad (10.11)$$

$$c_{ag} = 0.0604 \sqrt{T} + 0.468 T + 662 \text{ [J/kgK]} \quad (10.12)$$

$$c_v = 4186 \text{ [J/kgK]}. \quad (10.13)$$

6. Specifična toplota betona ni konstantna med potekom hidratacije in je določena z enačbo (Schleich 2006)

$$c_p = 890 + 56.2 (T/100) - 3.40 (T/100). \quad (10.14)$$

Kim s sodelavci (2003) je izvedel eksperimentalno študijo, katere rezultati so pokazali, da imata na toplotno prevodnost betona največji vpliv delež agregata v betonu in vlažnost betona. V skladu s temi rezultati toplotna prevodnost betona ni odvisna od starosti in temperature betona, zato je v programu upoštevana konstantna vrednost toplotne prevodnosti betona.

Količino notranjega vira toplote $Q(t)$ v času t določimo na osnovi avtomatsko generirane adiabatne krivulje, pri čemer upoštevamo relativno obliko adiabatne krivulje $T_{a,r}(t)$. Sproščeno toploto v adiabatnih razmerah tako določimo v skladu z enačbo

$$Q_a(t) = T_{a,r}(t) \rho c_p. \quad (10.14)$$

Kot večina kemijskih reakcij je tudi hidratacija cementa močno odvisna od temperature in vlažnostnih pogojev. Tako seveda hidratacija v adiabatnih (laboratorijskih) pogojih ne poteka enako hitro kot hidratacija enake betonske mešanice v naravnem okolju. Vpliv temperature in časa na razvoj hidratacije cementa je zajet v t.i. zrelostni funkciji $f_A(T, Q_a)$. Različni avtorji predlagajo različne oblike zrelostnih funkcij, v program pa je trenutno vgrajena zrelostna funkcija Arrheniusa, ki jo zapišemo v obliki

$$f_A(T, Q_a) = \exp \left(- \frac{E_A}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{\left(\frac{Q_a}{\rho c_p} \right) + T_0} \right) \right), \quad (10.15)$$

kjer je R znana plinska konstanta in znaša $R = 8135$ J/(molK), E_A [J/mol] pa je t.i. aktivacijska energija, ki je odvisna od temperature in stopnje hidratacije. Različni avtorji predlagajo različne vrednosti aktivacijske energije, ki znašajo od $E_A = 27600$ J/mol do $E_A = 67000$ J/mol, odvisno od sestave betonske mešanice (Schindler 2002). Aktivacijska energija (v [kJ/mol]) je največkrat podana z enačbo (Morabito 2001)

$$E_A = 33.5 + 1.47 (293 - T) \quad T < 293\text{K} \quad (10.16a)$$

$$E_A = 33.5 \quad T \geq 293\text{K}, \quad (10.16b)$$

pri čemer sestava betonske mešanice ni upoštevana. Možnost avtomatskega generiranja adiabatne krivulje v predstavljenem računskem modelu omogoča določitev vrednosti aktivacijske energije E_A v skladu s proceduro, ki jo je predlagal Morabito (2001). Na ta način aktivacijsko energijo za specifično betonsko mešanico enostavno določimo na osnovi dveh adiabatnih krivulj obravnavane betonske mešanice z različnima začetnima temperaturama.

Stopnjo notranjega vira toplote nato določimo v skladu z enačbo

$$Q = f_A Q_a. \quad (10.17)$$

Enačba (10.6) je parcialna diferencialna enačba II. reda, ki jo za reševanje po metodi končnih elementov pišemo v obliki

$$(\mathbf{K} + \mathbf{H})\mathbf{t} + \mathbf{C}\mathbf{t}_t = \mathbf{f}, \quad (10.18)$$

kjer so \mathbf{K} , \mathbf{H} , \mathbf{C} in \mathbf{f} globalna prevodnostna matrika, globalna matrika toplotne prehodnosti, globalna kapacitetna matrika in globalni obtežni vektor. Člen \mathbf{t}_t predstavlja vektor odvoda temperatur po času. Matrika \mathbf{K} je sestavljena iz prevodnostnih matrik posameznih končnih elementov $\mathbf{K}_{e_i}, i = 1 \dots N$, kjer je N število končnih elementov v konstrukciji. Podobno sta matriki \mathbf{H} in \mathbf{C} sestavljeni iz ustreznih matrik posameznega končnega elementa $\mathbf{H}_{e_i}, i = 1 \dots N$ in $\mathbf{C}_{e_i}, i = 1 \dots N$. Velja

$$\mathbf{K}_{e_i} = \int_{V_e} \mathbf{B}^T k \mathbf{B} dV, \quad (10.19)$$

$$\mathbf{H}_{e_i} = \int_{S_e} \mathbf{N}^T h \mathbf{N} dS, \quad (10.20)$$

$$\mathbf{H}_{e_i} = \int_{V_e} \mathbf{N}^T \rho c_p \mathbf{N} dV. \quad (10.21)$$

kjer matrika \mathbf{B} predstavlja odvode matrike oblikovnih funkcij \mathbf{N} po posameznih kartezijskih koordinatah. Obtežni vektor \mathbf{f} zapišemo kot

$$\mathbf{f} = \mathbf{r}_q + \mathbf{r}_Q + \mathbf{r}_h, \quad (10.22)$$

kjer so vektorji \mathbf{r}_q , \mathbf{r}_Q in \mathbf{r}_h globalni vektorji, ki predstavljajo radiacijo, notranji vir toplote in konvekcijo. Vektor \mathbf{r}_q je sestavljen iz vektorjev radiacije posameznih končnih elementov \mathbf{r}_{qe_i} , vektor \mathbf{r}_Q je sestavljen iz vektorjev notranjega vira toplote \mathbf{r}_{Qe_i} posameznih končnih elementov, vektor \mathbf{r}_h pa je sestavljen iz vektorjev konvekcije posameznih elementov $\mathbf{r}_{he_i}, i = 1, \dots, N$. Velja

$$\mathbf{r}_{qe_i} = \int_{S_e} \mathbf{N}^T q_B dS, \quad (10.23)$$

$$\mathbf{r}_{Qe_i} = \int_{V_e} \mathbf{N}^T Q dV, \quad (10.24)$$

$$\mathbf{r}_{he_i} = \int_{V_e} \mathbf{N}^T h T_f dV. \quad (10.25)$$

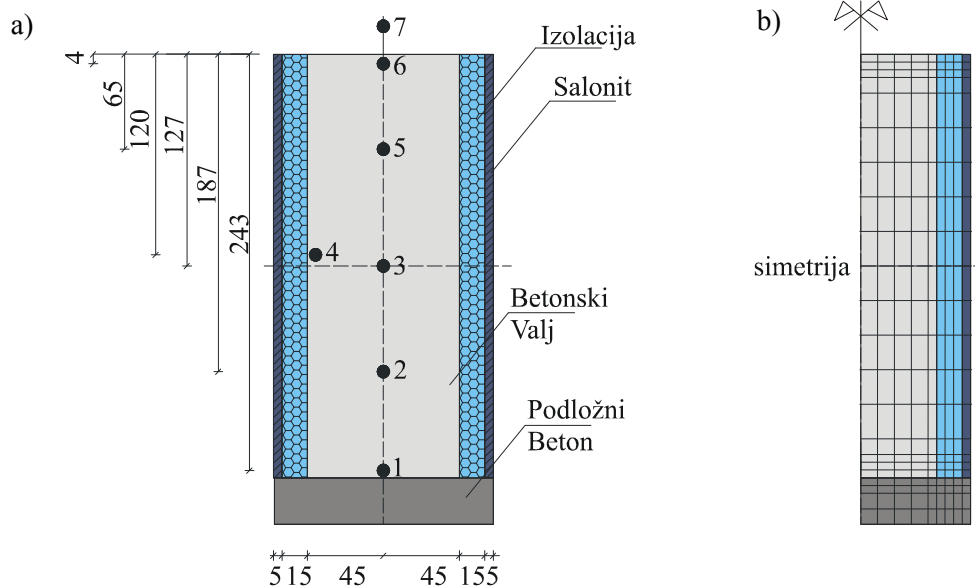
V zgornjih enačbah predstavljata q_B in T_f predpisan toplotni tok v smeri normale na telo [J/m^2s] ter temperaturo okolice [$^{\circ}C$].

10.4.3 Validacija programa

Kontrola ustreznosti in natančnosti programa pri napovedovanju temperature v betonskih elementih je bila narejena na betonskem valju višine 250 cm in premera 90 mm. Podroben opis samega eksperimenta je prikazan v literaturi (Kavčič 1990).

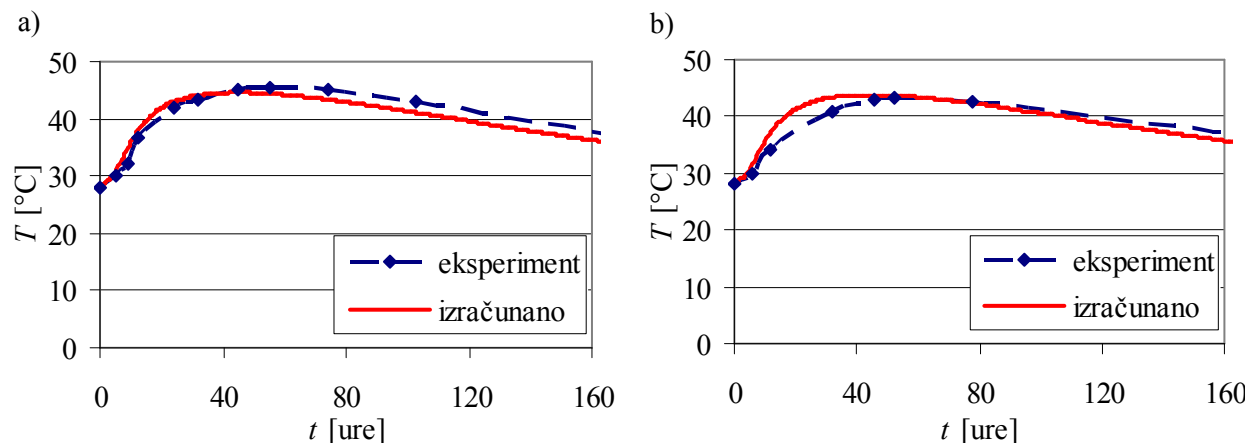
Slika 10.6a prikazuje geometrijo obravnavanega betonskega elementa ter točke, v katerih je bila merjena temperatura v betonu med potekom hidratacije. Meritve so potekale neprekinjeno z zajemanjem podatkov vsakih 15 minut. Na sliki 10.6b je prikazana mreža končnih elementov, uporabljena pri računu temperatur s prikazanim numeričnim programom. Ker je obravnavan primer osno simetričen, je bila pri računu upoštevana le polovica betonskega valja.

Pri eksperimentu je bil uporabljen beton z naslednjimi karakteristikami: količina cementsa v betonu $KC = 180 \text{ kg/m}^3$, tip cementsa $TC = CT1$, razmerje $v/c = 0.67$, kemijski dodatek $KD = 1$ in začetna temperatura betona $T_z = 28^\circ\text{C}$. Tip cementsa $CT1$ predstavlja cement z razmeroma nizko toploto hidratacije (preglednica 10.3), ki se pri betoniranju velikih betonskih elementov pogosto uporablja. Razmerje v/c je relativno visoko, kar je za betoniranje masivnih betonskih elementov prav tako značilno.



Slika 10.6 Geometrija betonskega valja in položaj nameščenih termočlenov v notranjosti elementa, b) mreža končnih elementov (upoštevana osna simetrija).

Figure 10.6 Showing a) the geometry of the concrete test cylinder with the side insulation and locations of the thermal probes inside the concrete element, b) finite element mesh (axial symmetry).

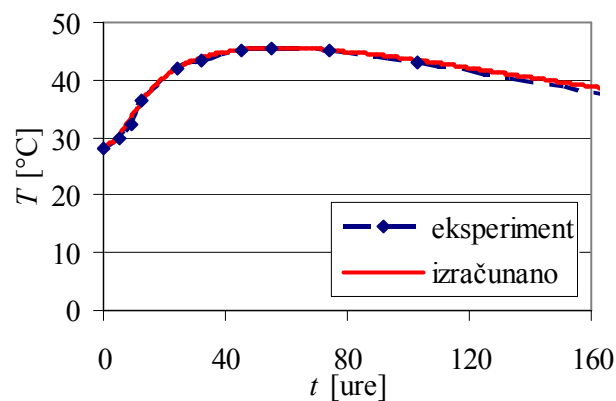


Slika 10.7 Primerjava med eksperimentalno izmerjenim in izračunanim potekom temperature s časom, a) točka 3, b) točka 4.

Figure 10.7 Comparison between experimentally determined and calculated temperature development, a) point 3, b) point 4.

Ker v okviru eksperimenta adiabatega preizkusa ni bilo mogoče izvesti, je bila adiabatsna krivulja izračunana s predlaganim numeričnim modelom na osnovi umetnih nevronske mreže. Slika 10.7 prikazuje potek izmerjene in izračunane temperature v točkah 3 in 4.

Vidimo, da vrednosti izmerjene in izračunane temperature v obeh obravnavanih točkah precej dobro sovpadata, maksimalna razlika pa znaša okrog 2°C. To pomeni, da je program precej natančno izračunal tako adiabatsno krivuljo za betonsko mešanico, uporabljeno pri betoniranju betonskega stebra, kot tudi sam razpored temperature v obravnavanem betonskem elementu. Malenkostno odstopanje v eksperimentalno določenih in izračunanih temperaturah je po vsej verjetnosti posledica določene nenatančnosti pri izračunu adiabatsne krivulje, kar je razvidno iz slike 10.8. Ta slika prikazuje potek temperature v točki 3, pri čemer je bila adiabatsna krivulja malenkost popravljena. V tem primeru so eksperimentalno določene in izračunane temperature v točki 3 praktično enake.



Slika 10.8 Dejanski in izračunan potek temperature s časom v točki 3 po majhnih korekcijah adiabatsne krivulje.
Figure 10.8 Actual and calculated temperature development at point 3 after minor corrections of adiabatic hydration curve.

10.4.4 Primer praktične uporabe programa

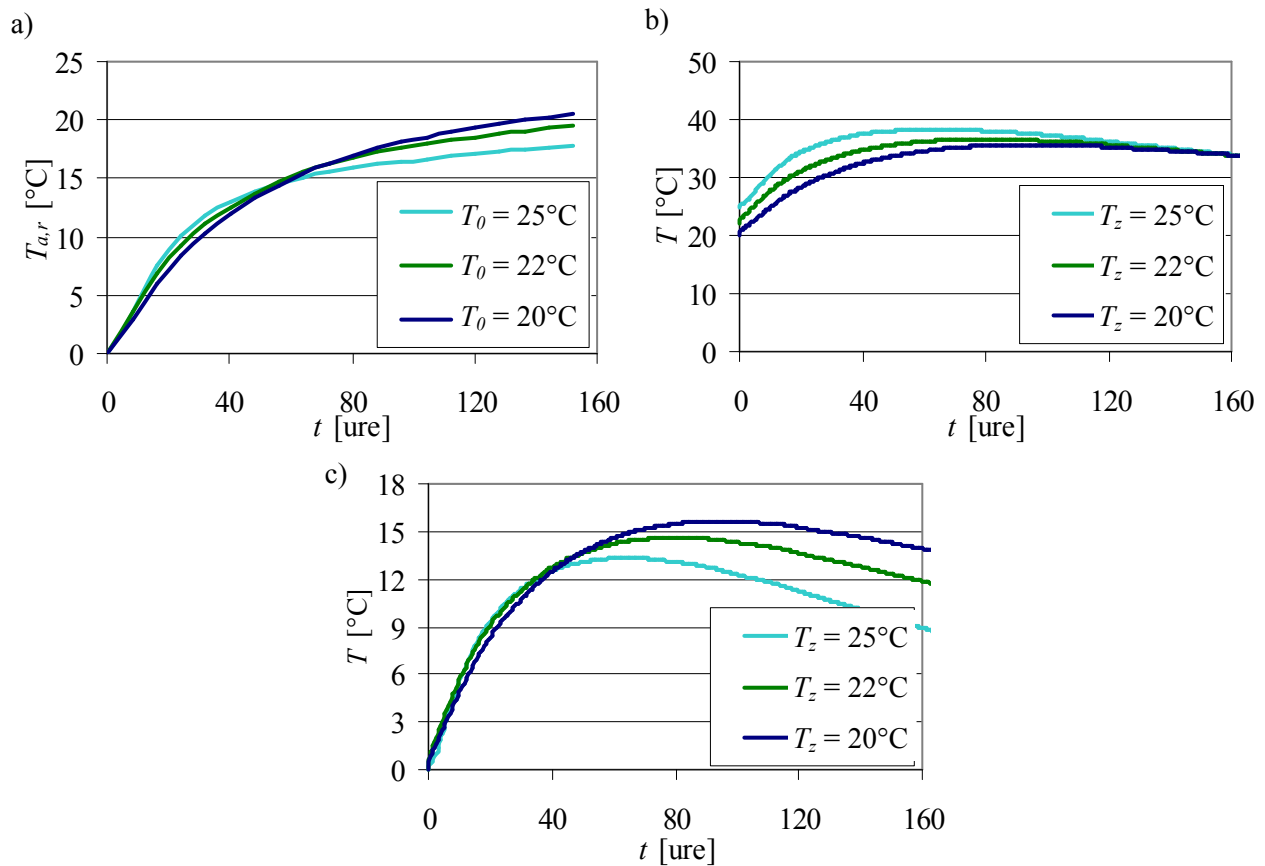
Glavno prednost prikazanega numeričnega programa predstavlja avtomatsko generiranje adiabatsne krivulje v odvisnosti od vhodnih parametrov oziroma sestave sveže betonske mešanice. Na ta način lahko enostavno analiziramo vpliv raznih parametrov sestave sveže betonske mešanice na razvoj temperaturnega polja v betonski konstrukciji.

Na sliki 10.7 a je prikazan razvoj temperature s časom za betonsko mešanico, uporabljeno pri dejanskem eksperimentu, slika 10.9 pa prikazuje potek izračunanih adiabatsnih krivulj ter pripadajoče absolutne in relativne temperature, izračunane v točki 3, za različne druge betonske mešanice. Sestava teh betonskih mešanic je enaka kot pri mešanici, uporabljeni pri eksperimentu, mešanice pa se med seboj razlikujejo le v začetni temperaturi betona T_z .

Račun pokaže, da bi bile v začetni fazi v primeru nižje začetne temperature betona absolutne temperature v točki 3 pričakovano nižje kot v primeru dejanske mešanice, uporabljene v okviru eksperimenta. Zaradi t.i. "cross-over" efekta (poglavje 10.3) pa se ta razlika s časom zmanjšuje, kar je še posebej razvidno iz relativnega poteka temperatur v obravnavani točki. Razvidno je, da je relativni prirast temperature celo višji v primeru nižje začetne temperature betona in obratno, prav tako pa se v primeru nižje začetne temperature betona temperature v točki 3 počasneje zmanjšujejo.

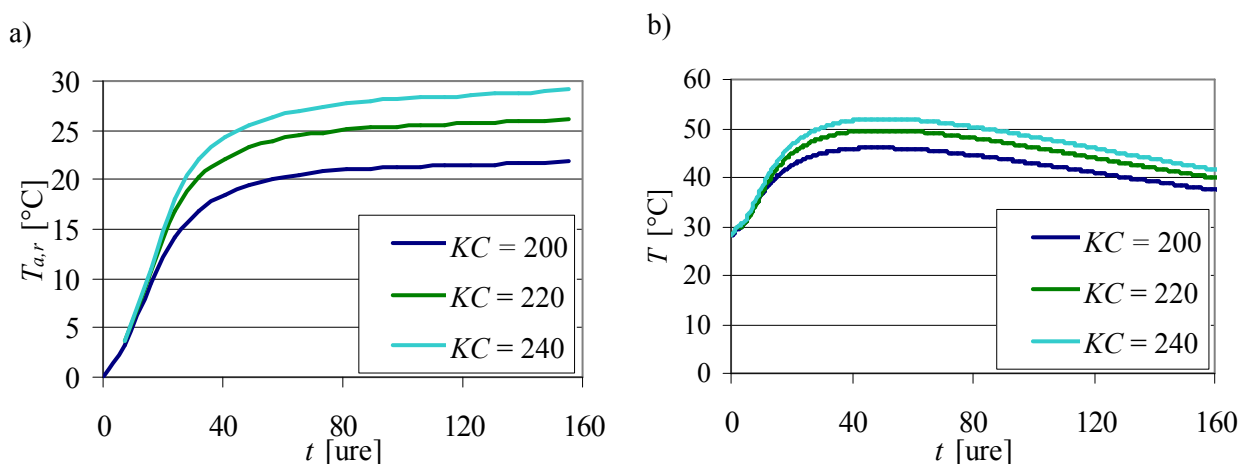
Slika 10.10 prikazuje vpliv količine cementa v betonu na razvoj adiabatsnih krivulj in pripadajoče temperature v točki 3. Pričakovano bi bile temperature v obravnavani točki v primeru višje vsebnosti cementa v betonu vseskozi višje v primerjavi z eksperimentalno določenimi temperaturami. V tem primeru količina cementa v betonu ni bistveno vplivala na čas maksimalne vrednosti temperature v

obravnavani točki, kar pomeni, da količina cementsa v betonu ni vplivala na samo hitrost razvoja hidratacijskega procesa. Do podobne ugotovitve sta prišla tudi Sandberg in Roberts (2005).



Slika 10.9 Vpliv začetne temperature na potek a) adiabatske krivulje, b) absolutne temperature v točki 3, c) relativne temperature v točki 3.

Figure 10.9 Influence of the initial temperature on the development of a) adiabatic hydration curve, b) absolute temperature at point 3, c) relative temperature at point 3.



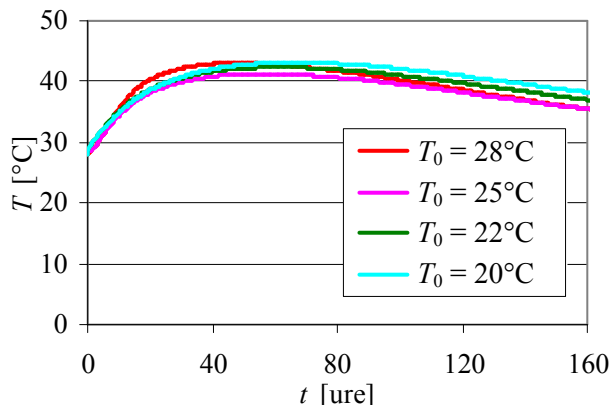
Slika 10.10 Vpliv količine cementsa v betonu na potek a) adiabatske krivulje, b) absolutne temperature v točki 3.

Figure 10.10 Influence of cement content on the development of a) adiabatic hydration curve, b) absolute temperature at point 3.

Slika 10.11 prikazuje vpliv različnih začetnih temperatur pri adiabatskem preskusu T_0 na potek temperature v točki 3 obravnavanega betonskega valja. V vseh primerih je bila sestava betonske mešanice popolnoma enaka, vključno z začetno temperaturo betona T_z . Pričakovano začetna temperatura T_0 ni

bistveno vplivala na sam potek temperature v točki 3, kar je posledica zrelostne funkcije f_A (enačba 10.15), katere naloga je zajeti vpliv temperature na potek hidratacijskega procesa. Ta primer predstavlja validacijo metode, saj bi teoretično vrednosti pri različnih T_0 morale biti enake. Velja namreč

$$\begin{aligned} T_z > T_0 &\rightarrow f_A > 1 \\ T_z = T_0 &\rightarrow f_A = 1 \\ T_z < T_0 &\rightarrow f_A < 1 \end{aligned} \quad (10.26)$$



Slika 10.11 Vpliv začetne temperature pri adiabatem preizkusu na razvoj temperature v točki 3.

Figure 10.11 Influence of the initial temperature at the adiabatic hydration test on the development of the temperature at point 3.

10.4.5 Možnost uporabe prikazanega numeričnega modela za oceno tlačne trdnosti betona

Številni raziskovalci predlagajo različne empirične formule za oceno tlačne trdnosti betona, katere lahko smiselno razdelimo v tri skupine (Mikulić s sodelavci 2008):

1. Modeli, s katerimi napovemo tlačno trdnost betona pri starosti 28 dni oziroma maksimalno doseženo tlačno trdnost betona. Ti modeli temeljijo na količini osnovnih materilov v betonski strukturi (cement, agregat, voda, zrak).
2. Modeli, s katerimi napovemo razvoj tlačne trdnosti betona s časom. V teh modelih je predpostavljena homogena struktura betona, večinoma pa temeljijo na teoriji zrelosti betona.
3. Modeli, v katerih tlačno trdnost betona napovemo v odvisnosti od sestave betona in stopnje hidratacije cementa v betonu.

Stopnja hidratacije cementa v betonu $\alpha(t)$ je časovno odvisen brezdimenzijski parameter, ki opisuje delež hidratiziranega cementa do časa t . Obstaja več definicij stopnje hidratacije (van Breugel 2001), osnovna definicija pa izhaja neposredno iz same filozofije stopnje hidratacije in jo lahko zapišemo s formulo

$$\alpha(t) = \frac{KC_t}{KC_{tot}} \quad (10.27)$$

kjer je KC_t količina hidratiziranega cementa v času t , KC_{tot} pa celotna količina cementa v betonu. Ker je količino hidratiziranega cementa sorazmerno težko zanesljivo določiti, stopnjo hidratacije največkrat določimo kot razmerje med sproščeno toploto $Q(t)$ [J/g] do časa t in maksimalno možno sproščeno toploto Q_{max} [J/g] za obravnavano betonsko mešanico

$$\alpha(t) = \frac{Q(t)}{Q_{max}} \quad (10.28)$$

Maksimalno možno sproščeno toploto lahko ocenimo na osnovi kemijske sestave cementa v skladu z enačbo (van Breugel 1991)

$$Q_{\max} = q_1 (C_3S) + q_2 (C_2S) + q_3 (C_3A) + q_4 (C_4AF) + q_5 (C) + q_6 (MgO), \quad (10.29)$$

kjer so $q_1 \dots q_6$ [J/g] členi, ki predstavljajo količino sproščene toplote za posamezne minerale porland cementnega klinkerja. Različni avtorji podajajo različne vrednosti sproščene toplote posameznih klinkerskih mineralov (van Breugel 1991).

Ker se v praksi popolna hidratacija skoraj nikoli ne izvrši (Hewlett 2004), stopnjo hidratacije velikokrat definiramo v relativni obliki v skladu z enačbo

$$\alpha_d(t) = \frac{Q(t)}{Q_{\max,d}}, \quad (10.30)$$

kjer je $\alpha_d(t)$ stopnja hidratacije, izračunana glede na dejansko doseženo maksimalno vrednost sproščene toplote za posamezno betonsko mešanico $Q_{\max,d}$. Pri adiabatih razmerah količino sproščene toplote v času t enostavno izračunamo z enačbo

$$Q(t) = \frac{T_{a,r}(t) \rho_c c_{pc}}{KC_{tot}}, \quad (10.31)$$

kjer je ρ_c [kg/m³] gostota cementa, c_{pc} [kJ/K kg] pa specifična toplota cementa. Z upoštevanjem enačbe (10.29) in (10.31) v enačbi (10.28) lahko stopnjo hidratacije v primeru adiabatih razmer za poljubno betonsko mešanico enostavno izračunamo s prikazanim numeričnim modelom.

V primeru neadiabatnih razmer količino sproščene toplote $Q(t)$ izračunamo v skladu s proceduro, opisano v literaturi (van Breugel 2001). Ker je v primeru neadiabatnih razmer temperatura v določeni točki betonskega elementa odvisna od položaja te točke, se vrednost sproščene toplote v betonskem elementu spreminja tako v odvisnosti od sestave betonske mešanice kot v odvisnosti od položaja v betonskem elementu. Avtomatsko generiranje adiabate krivulje tako omogoča enostavno določitev stopnje hidratacije za poljubno betonsko mešanico tudi v primeru neadiabatnih razmer.

Na osnovi izračunane stopnje hidratacije lahko tlačno trdnost betona v poljubni točki betonskega elementa izračunamo v skladu z enačbo Fagerlunda (1987), kjer je trdnost betona f_b [N/mm²] odvisna od trdnosti same cementne paste f_{cem} [N/mm²] in volumskega deleža agregata v betonu $V_{agregat}$ [%]. Trdnost cementne paste je odvisna od v/c razmerja, stopnje hidratacije in referenčne trdnosti cementne paste f_0 , za katero velja $f_0 = 390$ N/mm². V skladu s Fagerlundom tlačno trdnost betona v odvisnosti od stopnje hidratacije zapišemo z enačbo

$$f_b = f_{cem} (1 - 0.73 V_{agregat}), \quad (10.32)$$

tlačno trdnost cementne paste pa kot

$$f_{cem} = f_0 b (\alpha/\alpha_0 - 1), \quad (10.33)$$

kjer je b konstanta, odvisna od v/c razmerja in deleža zraka v betonu, α_0 pa referenčna vrednost stopnje hidratacije.

V skladu z Rostasy-jem (2001) lahko tlačno trdnost betona v odvisnosti od stopnje hidratacije izračunamo z enačbo

$$f_b = f_{b1} \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right)^n, \quad (10.34)$$

kjer je f_{b1} [N/mm²] tlačna trdnost betona pri popolni hidrataciji, n pa koeficient, določen na osnovi eksperimentov.

10.5 SKLEPI

V tem poglavju je prikazan numerični model za določitev adiabatsne krivulje poljubne betonske mešanice. Program je narejen z metodo umetnih nevronske mreže na osnovi široke baze eksperimentalno določenih adiabatsnih krivulj z različnimi vhodnimi parametri sveže betonske mešanice (začetna temperatura betona, vrsta cementa v betonu, količina cementa v betonu, vrsta kemijskega dodatka v betonu, vodo/cementno razmerje). S posameznimi primeri je pokazano, da lahko s prikazanim modelom enostavno določimo potek adiabatsne krivulje kvazi-poljubne betonske mešanice, pri čemer je korektno upoštevan vpliv posameznih vhodnih parametrov na potek adiabatsne krivulje. Model omogoča enostavno dodajanje novih eksperimentalno določenih adiabatsnih krivulj, s čimer večamo območje, znotraj katerega model korektno napove adiabatsno krivuljo nove betonske mešanice.

Model napovedovanja adiabatsne krivulje je v obliki predprocesorja vključen v numerični model, s katerim z metodo končnih elementov izračunamo potek temperaturnega polja v betonski konstrukciji ob upoštevanju raznih robnih pogojev. V program je vključenih več modelov za določitev specifične toplote betona, avtomatsko generiranje adiabatsnih krivulj pa omogoča določitev vrednosti aktivacijske energije specifično za vsako betonsko mešanico.

Dobro ujemanje eksperimentalno izmerjenih temperatur v betonskem valju in izračunanih temperatur pomeni, da je numerični model korektno izračunal tako adiabatsno krivuljo kot sam razpored temperature v betonskem valju.

Prikazan numerični model omogoča študijo vpliva posameznih parametrov sveže betonske mešanice na potek adiabatsnih krivulj in razpored temperaturnega polja v betonskih konstrukcijah v zgodnjem obdobju, kar je ključnega pomena za projektiranje predvsem konstrukcij iz masivnega betona.

DEL 5 ZAKLJUČKI

11. ZAKLJUČKI IN PRIPOROČILA ZA NADALJNJE DELO

11.1 ZAKLJUČKI

Namen doktorske disertacije je bil na osnovi obsežnih eksperimentalnih preiskav prikazati možnost uporabe metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov in metode odboja strižnih ultrazvočnih valov za analizo razvoja hidratacijskega procesa in formiranja strukture materialov s cementnim vezivom pri zgodnji starosti. Posebno pozornost smo posvetili možnosti ocene začetnega in končnega časa vezanja materialov s cementnim vezivom ter možnosti ocene tlačne trdnosti betona z metodo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov. Eden izmed glavnih ciljev je bil tudi matematični model za določitev adiabatne krivulje poljubne betonske mešanice ter vgraditi ta model v numerični model za določitev razvoja temperaturnega polja v betonski konstrukciji v zgodnjem obdobju.

Pomembnejši zaključki disertacije so naslednji:

- Ob ustrezni eksperimentalni opremi in pripadajoči računalniški podpori lahko tako z metodo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov kot z metodo odboja strižnih ultrazvočnih valov korektno zasledujemo proces hidratacije in formiranja strukture materialov s cementnim vezivom. Pri tem je bistvenega pomena popolna avtomatizacija metode, ki omogoča zapis meritev v vnaprej predpisanih poljubno majhnih časovnih intervalih. Obe metodi korektno upoštevata vpliv različnih parametrov sestave materiala in pogojev okolja na potek formiranja strukture materiala med hidratacijskim procesom.
- Krivuljo hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov s časom v_p-t lahko v primeru cementne paste razdelimo na pet območij, ki popolnoma ustrezajo definiciji obdobja hidratacijskega procesa, ki jih podaja literatura (Schindler 2002). Zapis posameznih meritev v dovolj majhnih časovnih intervalih pokaže pojav dveh izrazitih prevojnih točk na krivulji hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov s časom.
- Metodo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov odlikuje velika ponovljivost, kar je pomembna karakteristika vsake uporabne eksperimentalne metode.
- Podobno kot krivuljo v_p-t lahko tudi krivuljo spreminjanja strižnega odbojnega koeficienta s časom $dr-t$ razdelimo na pet območij, se pa značilni obliki obeh krivulj precej razlikujeta, kar je posledica same fizikalne narave obeh vrst ultrazvočnega valovanja. Medtem ko se vrednost strižnega odbojnega koeficienta v prvi fazi hidratacijskega procesa ne spreminja bistveno, začne hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi materiale s cementnim vezivom naraščati že kmalu po začetku merjenja. V nadaljevanju se hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov umiri precej pred umiritvijo vrednosti strižnega odbojnega koeficienta. Neposredna primerjava krivulj v_p-t in $dr-t$ pokaže, da lahko krivuljo v_p-dr razdelimo na tri značilna območja. Na krivulji $dr-t$ je opazna le ena prevojna točka.
- Z metodo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov lahko korektno ocenimo začetni čas vezanja cementne paste. Eksperimentalni rezultati so pokazali, da začetni čas vezanja poljubne cementne paste dobro sovпада s časom pojava prve prevojne točke t_{pT1} na krivulji v_p-t . Alternativno lahko začetni čas vezanja poljubne cementne paste ocenimo tudi s časom t_V , pri katerem hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov doseže vrednost med 1400 in 1450 m/s, kar ustreza hitrosti

prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi vodo. Končni čas vezanja cementne paste lahko dovolj zanesljivo ocenimo kot čas, pri katerem hitrost prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov doseže vrednost med 1600 in 1650 m/s.

- Zanesljivost ocene začetnega časa vezanja poljube cementne paste z metodo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov je bila opravljena z analizo variance. Rezultati so pokazali, da je vpliv strukture cementne paste na spremenljivki t_{PT1} in t_V statistično značilen.
- Z metodo odboja strižnih ultrazvočnih valov lahko začetni čas vezanja poljubne cementne paste približno ocenimo kot čas, pri katerem vrednost spremembe strižnega odbojnega koeficienta znaša med 0.035 in 0.065. Relativno velik interval kaže na nekoliko slabšo korelacijo med vrednostjo strižnega odbojnega koeficienta in začetkom vezanja poljubne cementne paste.
- Z uporabo kombinacije obeh ultrazvočnih metod lahko začetni čas vezanja poljubne cementne paste definiramo s koncem prvega linearnega območja na krivulji $v_p - dr$.
- Na osnovi metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov lahko začetni čas vezanja betona definiramo kot čas pojava prevojne točke na krivulji $v_p - t$. Povprečni vrednosti hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov pri začetnem in končnem času vezanja betona sta znašali 976 m/s in 1651 m/s, kar je v skladu z ugotovitvami nekaterih drugih raziskovalcev (Reinhardt in Grosse 2003, 2004, Lee s sodelavci 2004, Voigt s sodelavci 2005, Robeyst s sodelavci 2008).
- Rezultati obsežne eksperimentalne analize vpliva posameznih parametrov sestave betonske mešanice in pogojev okolja na sovisnost med tlačno trdnostjo betona TT in hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov v_p so pokazali, da imajo na zvezo $TT - v_p$ največji vpliv količina, velikost, oblika in material agregata v betonu, medtem ko vrsta cementa, vodo/cementno razmerje in temperatura okolice niso bistveno vplivali na omenjeno zvezo. V skladu s temi ugotovitvami je bil pripravljen numerični model na osnovi umetnih nevronske mreže, s katerim lahko z veliko mero zanesljivosti ocenimo tlačno trdnost betona na podlagi izmerjene hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton. Koeficienti korelacije med dejanskimi tlačnimi trdnostmi TT in tlačnimi trdnostmi TT_{NM} , izračunanimi s predlaganim numeričnim modelom, so v povprečju za okrog 25 % večji od koeficientov korelacije med tlačnimi trdnostmi TT in trdnostmi TT_{reg} , izračunanimi z različnimi nelinearnimi regresijskimi modeli, prikazanimi v literaturi.
- Statistična analiza ponovljivosti zveze $TT - v_p$ je pokazala dobro ponovljivost omenjene zveze.
- V primeru neznanе sestave betona lahko z mešano nedestruktivno metodo zadovoljivo ocenimo tlačno trdnost betona. Ugotavljamo, da uporaba mešane nedestruktivne metode bistveno ne izboljša ocene tlačne trdnosti betona v primerjavi z uporabo metode sklerometričnega indeksa.
- Na podlagi širokega spektra eksperimentalno določenih adiabatnih krivulj je bil pripravljen matematični model na osnovi umetnih nevronske mreže, s katerim lahko v odvisnosti od različnih vhodnih parametrov napovemo adiabatno krivuljo nove betonske mešanice. Model omogoča enostavno vključevanje novih eksperimentalno določenih adiabatnih krivulj, s čimer večamo območje, znotraj katerega model korektno napove adiabatno krivuljo nove betonske mešanice.
- Numerični model za določitev adiabatne krivulje je vključen v nov numerični model za določitev temperaturnega polja v betonski konstrukciji v zgodnjem obdobju. Prikazan numerični model omogoča študijo vpliva posameznih parametrov sveže betonske mešanice na potek adiabatnih krivulj in razpored temperaturnega polja v betonskih konstrukcijah v zgodnjem obdobju, kar je ključnega pomena za projektiranje predvsem konstrukcij iz masivnega betona.

11.2 PRIPOROČILA ZA NADALJNJE DELO

Na osnovi izkušenj in spoznanj, nastalih v okviru doktorske disertacije, se so pojavile tudi mnoge nove ideje in izzivi, ki bi jim bilo pri nadaljnjem delu na področju obravnavane problematike zanimivo posvetiti posebno pozornost.

- Nedvomno bi bilo potek hidratacijskega procesa oziroma strukture materialov s cementnim vezivom z ultrazvočnimi metodami zanimivo spremljati v adiabatih pogojih. Na ta način bi izključili vpliv pogojev okolja na potek formiranja strukture materialov.
- Zanimivo bi bilo analizirati možnost uporabe metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov za kontrolo razvoja strukture materialov s cementnim vezivom v obdobju pred začetkom vezanja.
- Zaradi nekoliko slabše korelacije med vrednostjo strižnega odbojnega koeficienta in začetnim časom vezanja poljubne cementne paste bi bile nadaljne eksperimentalne meritve spreminjanja strižnega odbojnega koeficienta s časom vsekakor priporočljive.
- Razvoj strukture različnih cementnih past bi bilo poleg spreminjanja vrednosti strižnega odbojnega koeficienta zanimivo spremljati tudi na osnovi spreminjanja faznega kota. USWR aparat, prikazan v disertaciji, merjenje faznega kota že omogoča, je pa predvsem iz tehničnega vidika ta meritev nekoliko zahtevnejša, saj je spremembna faznega kota izrazito občutljiva na pogoje okolja in kot taka zahteva veliko temperaturno stabilnost med samo meritvijo. Zanimiva bi bila predvsem korelacija faznega kota in viskoznosti cementne paste v zgodnjem hidratacijskem obdobju.
- V numerični model za določitev tlačne trdnosti betona poljubne sestave na podlagi hitrosti prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov skozi beton bi bilo koristno vključiti tudi vpliv poroznosti in vlažnosti betona. Prav tako bi bilo koristno analizirati vpliv armature v betonu na korelacijo med tlačno trdnostjo betona in hitrostjo prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov.
- Dodatne eksperimentalno določene adiabatske krivulje bi povečale območje, znotraj katerega predlagani numerični model za določitev adiabatske krivulje "kvazi" poljubne betonske mešanice korektno napove adiabatsko krivuljo nove betonske mešanice.
- Zanimivo bi bilo podrobneje analizirati možnost uporabe prikazanega numeričnega modela za oceno tlačne trdnosti betona in ga po potrebi ustrezno nadgraditi.

12 SUMMARY

Numerous researchers have observed that cement hydration is a complex physical and chemical process. When cement is mixed with water, hydration reactions occur and the water-cement suspension ultimately converts into a rigid porous material, which serves as a matrix phase for different cement based materials, such as mortar and concrete.

The objective of this work was to show the possibility of using different ultrasonic methods in their ability to monitor the setting and hardening process of different cement based materials. Therefore, two ultrasonic methods, namely ultrasonic wave transmission method (USWT) and ultrasonic wave reflection method (USWR) were used. The ability of both USWT and USWR methods to estimate the initial and final setting time of different cement based materials was studied in detail and the ability of using USWT method to estimate the concrete compressive strength was also analyzed. As an addition, a numerical program was prepared, which can predict an adiabatic hydration curve of an arbitrary concrete mixture.

Two commercially available ultrasonic instruments were adequately electronically modified to measure the velocity of ultrasonic longitudinal waves (USWT method) v_p automatically with any pre-selectable time intervals after casting. This fully automated determination of the initial onset of the signal is of special significance to routine industrial application. The apparatus consist of a waveform generator board and two broadband ultrasonic transducers (Tx, Rx) of central frequency of 20 - 54 kHz and 25 - 51 mm in diameters. The unit was connected to a PC computer and special software was prepared in order to collect the velocity v_p data with time. The v_p measurements started immediately after casting and continued for 30 hours. The results were recorded at 1 min intervals.

A model of an apparatus using the pulse USWR method has been already described by Valič (Valič 2000). In the exploration studies of the method and in particular of the apparatus several ideas for improvements came out. The corresponding modifications were implemented in a new apparatus, USWR-4 Hardening meter. Its basic components are: main frame box with transmitter/receiver electronics, A/D converter board and power supply, measuring heads, and PC computer with suitable software. Measuring head is of rugged construction and consists of a cylindrical aluminium body ($\Phi = 30$, $l = 40$ mm) in which a very pure fused quartz rod of rectangular cross-section ($a = 10$, $b = 16$ mm) and length $l = 50$ mm is rigidly fastened. The two end surfaces of the quartz rod are flat, very parallel and highly polished. On one end (bottom) a PZE ultrasound transducer, acting as a transmitter and receiver, is hard bonded. On the other end (top), with a measuring surface of 2 cm^2 , the sample to be tested is smeared.

Hydration/hardening process quite often last very long and the multitude/complexity from the influential parameters is high. For this reason, USWR-4 Hardening meter is constructed in a multi-head version with four measuring heads operating simultaneously. For temperature hydration/hardening dependence studies the measuring head as a whole could be inserted in a variable temperature oven.

Within the present study all shear wave reflection coefficient dr (USWR method) measurements started immediately after casting and continued for at least 30 hours. The results were recorded at 1 min intervals.

It was shown that both USWT and USWR methods are able to reliably monitor the hydration process and formation of structure of an arbitrary cement paste. Measurements with both USWT and USWR methods conducted on cement pastes with different composition and hydration kinetics, evaluated on a qualitative basis, yield similar results. However, direct relationship between the velocity of ultrasonic longitudinal waves v_p and shear wave reflection coefficient dr values reveals that the two ultrasonic methods monitor the setting process of cement pastes in different ways. Two inflection points were observed on the v_p - t curves and only one on the dr - t curves. Next, the maximum rate in v_p evolution appears earlier than the maximum rate of evolution of dr . The experimentally determined v_p - dr diagrams can be easily simplified into three characteristic phases. Almost a horizontal line during the phase 1 indicates that v_p is very sensitive to the internal structure of the cement paste at the very beginning of the hydration process, even before the initial setting time. On the contrary, the differences in the internal structure of the cement paste do not seem to influence the initial values of the shear wave reflection coefficient. When the amount of

the solid phase reaches a certain value, the rate of v_p increase slows down. However, at this point the dr values keep on increase even more.

For the discussed variable data set, the proposed USWT and USWR methods appeared to be appropriate and effective for a quick and reliable estimation of the initial setting time of an arbitrary cement paste mixture. Using the USWT method, the initial setting time can be defined very accurately by the first inflection point on the v_p - t curve. Alternatively, one can also estimate the initial setting time by the time when the ultrasonic pulse velocity of the longitudinal waves reaches a selected value within the suggested narrow interval, close to the value of the velocity of longitudinal ultrasonic waves in water (1450 m/s). The later estimate is strongly less accurate. The ability of using the USWT method to estimate the initial setting time of different concrete mixture has shown, that the proposed USWT method can be also used quite effectively to predict the initial setting time of different concrete mixtures. Using the USWT method, the initial setting time of an arbitrary cement paste can be defined by the time, when the values of dr start to increase rapidly. Using combined USWT-USWR ultrasonic method, the beginning of the setting process of an arbitrary cement paste can be determined by the end of the first (horizontal) phase on the dr - v_p curve. A detailed description of the ability of using the proposed USWT method to estimate the initial setting time of cement paste can be found in ref (Trtnik et al 2008f).

Numerous attempts to use ultrasonic pulse velocity as a measure of compressive strength of concrete has been made on the basis of conventional computational techniques like multiple regression analysis. Most of these studies did not consider, or failed to evaluate the effect of concrete mix parameters on the ultrasonic pulse velocity - compressive strength relationship. The present work utilizes artificial neural network (ANN) to predict compressive strength of young concrete based on ultrasonic pulse velocity and some concrete mix parameters. The influence of the amount of aggregate, nominal maximum aggregate size, type of aggregate, shape of aggregate, type of cement, initial concrete temperature, environmental temperature, and w/c ratio on the strength - velocity relationship, was studied, based on our own experiments. It was shown that the influence of aggregate is very important and cannot be neglected for accurate prediction of compressive strength of concrete based on ultrasonic pulse velocity. The prediction of concrete compressive strength with the proposed numerical model, which was established within Matlab programming environment, showed a good degree of coherency with experimentally estimated compressive strength. Thus, the present study shows that the determination of concrete compressive strength, based on ultrasonic pulse velocity alone, can be predicted very accurately if properly considered. With this model, one can easily and accurately determine the compressive strength of arbitrary concrete only by knowing the ultrasonic pulse velocity and some concrete mix characteristics. It does not need a specific equation that differs from traditional prediction models. Also, this model can continuously re-train new data, so that it can conveniently adapt to new data in order to expand the range of suitability of ANN. This become available with new experiments. A detailed description of the ability of using the USWT method to estimate the concrete compressive strength can be found in ref (Trtnik et al 2009a).

As an addition, the idea of modeling adiabatic temperature rise during concrete hydration with the use of artificial neural networks is also introduced and numerical program is developed, which can be used to predict the adiabatic hydration curve of an arbitrary concrete mixture. This model is implemented into the numerical procedure, based on finite element method, for calculation of temperature profile of early age concrete structures. With the proposed ANN program, a very good agreement of calculated adiabatic hydration curves and adiabatic hydration curves, obtained by our experiments in a suitable adiabatic calorimeter was achieved. It was shown that the learning data are very important and meaningful for the accurate prediction of adiabatic hydration curves. Therefore, these data have to be selected properly and have to be well distributed over the predetermined ranges of variability. To overcome this inconvenience, new experimentally determined hydration curves can be easily included in this model in order to expand the range of suitability of ANN model to predict the adiabatic hydration curves. A detailed description of the ability of using the proposed ANN model to predict new adiabatic hydration curves can be found in ref (Trtnik et al 2008g).

With the temperature prediction program developed in this study, the effect of some concrete initial parameters on the development of the temperature at an arbitrary point in the concrete element can be easily studied. This can allow concrete structure designers and contractors to quantify and evaluate the effect of various controllable and uncontrollable parameters on the temperature development in situ.

VIRI

UPORABLJENI VIRI

Abo-Qudais, S.A. 2004. Effect of concrete mixing parameters on propagation of ultrasonic waves. *Construction and Building Materials* 19, 4: 257-263.

Akkaya, Y., Voigt, T., Subramaniam, K.V., Shah, S.P. 2003. Nondestructive measurement of concrete strength gain by an ultrasonic wave reflection method. *Materials and Structures* 36: 507-514.

Ammar, C., Dutron, P., Motteu, H., Dubois, J. 1973. La progression des betons et des mortiers par basses temperatures. C.S.T.C. – C.R.I.C. – SECO, Bruxelles.

ASTM C 403-88, standard test method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance. American society for testing and materials, 1988.

Ballim Y. 2004. A numerical model and associated calorimeter for predicting temperature profiles in mass concrete. *Cement and Concrete Composites* 26, 5: 695-703.

Baykasoglu, A., Dereli, T., Tanig, S. 2004. Prediction of cement strength using soft computing techniques. *Cement and Concrete Research* 34, 11: 2083-2090.

Bentz, D.P. 1997. CEMHYD3D: Three-dimensional computer simulation of Portland cement hydration and microstructure development. *Journal of the American Ceramic Society* 80, 1: 3-21.

Berriman, J., Purnell, P., Hutchins, D.A., Neild, A. 2005. Humidity and aggregate content correction factors for air-coupled ultrasonic evaluation of concrete. *Ultrasonics* 43, 4: 211-217.

Beton - Određivanje statičkog modula elastičnosti pritiskom, septembar, 1982.

Blaine, R.L. 1943. *ASTM-Bull*, 123: 51-55.

Bogue, R.H. 1929. Calculation of the Components in Portland Cement. *Industry Engineering Chemistry* 1: 192-197.

Byfors, J. 1982. Pulse velocity measurements for indication of the compressive strength at early ages. *RILEM International Conference on Concrete of Early Ages*, 1: 117-122.

Carino, N.J., Jennings, H.J.M, Snell, L.M. 1989. Properties of concrete at early ages. *Cement, Concrete and Aggregates* 11, 2: 129-131.

Carslaw, H.S., Jaeger, J.C. 1959. *Conduction of heat in solids*. Oxford University, Clarendon Press, Oxford.

Chotard, T., Gimet-Brert, N., Smith, A., Fargeto, D., Bonnet, J. P., Gault, C. 2001. Application of ultrasonic testing to describe the hydration of calcium aluminate cement at the early age. *Cement and Concrete Research* 31, 3: 405-412.

D'Angelo, R., Plona, T.J., Schwartz, L.M., Coveney, P. 1995. Ultrasonic measurements on hydrating cement slurries - Onset of shear wave propagation. *Advanced Cement Based Materials* 2, 1: 8-14.

del Rio, L.M., Jimenez, A., Lopez, F., Rosa, F.J., Rufo, M.M., Paniaqua, J.M. 2004. Characterization and hardening of concrete with ultrasonic testing. *Ultrasonics* 42: 527-530.

- Demirboga, R., Turkmen, I., Karakos, M.B. 2004. Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete. *Cement and Concrete Research*, 34: 2329-2336.
- Dolce, M., Masi, A., Ferrini, M. 2006. Estimation of the Actual In-Place Concrete Strength in Assessing Existing RC Structures. *Proceedings of the 2nd International Congress, Neapelj*.
- Domone, P.L., Thirairatnam, H. 1990. The relationship between early age property measurements on cement pastes. *Rheology of Fresh Cement and Concrete: Proceedings of the International Conference organized by the British Society of Rheology, New York*, 181-191.
- Elvery, R.H., Ibrahim, L.A.M. 1976. Ultrasonic assessment of concrete strength at early ages. *Magazine of Concrete Research* 28, 97: 181-190.
- Emborg, M. 1989. *Thermal Stress in Concrete Structures at Early Ages*. Doktorska disertacija, Tehnična Univerza Lulea.
- EN 196-3:2005, *Methods of testing cement - Part 3: Determination of setting times and soundness*. April 2005.
- EUROCODE 2: *Design of concrete structures - Part 1-2: General Rules - Structural Fire Design*, 2000.
- Evangelista, A.C., Shehata, I., Shehata, L. 2003. Parameters that influence the results of non-destructive test methods for concrete strength, *International Symposium: Non-Destructive Testing in Civil Engineering*. <http://www.ultrasonic.de/article/ndtce03/papers/p029/p029.htm>.
- Faria, R., Azenha, M., Figueiras, JA. 2006. Modelling of concrete at early ages: Application to an externally restrained slab. *Cement and Concrete Composites* 28, 6: 572-585.
- Feylesoufi, A., Cohen Tenoudji F., Morin, V., Richard, P. 2001. Early ages shrinkage mechanisms of ultra-high-performance cement-based materials. *Cement and Concrete Research* 31, 11: 1573-1579.
- Frederick, J.R. 1965. *Ultrasonic Engineering*, Inc. USA, John Wiley and Sons.
- Garboczi, F.J., Bentz D.P., Frohnsdorff, G.J. 2000. The Past, Present, and Future of Computational Materials Science of Concrete. v: J. Francis Young Symposium Materials Science of Concrete Workshop, Lake Shelbyville, IL, 1-10.
- Graham, L.D., Forbes, D.R., Smith, S.D. 2006. Modeling the ready mixed concrete delivery system with neural networks. *Automation in Construction* 15, 5: 656-663.
- Grosse, C.U., Herb, T. 2000. Ultrasonic monitoring of setting and hardening of cement mortar - A new device. *Materials and Structures*, 33, 233: 581-583.
- Grosse, C.U., Reinhardt H.W., Kruger, M., Beutel, R. 2006. Ultrasound through-transmission techniques for quality control of concrete during setting and hardening. *Workshop on Advanced testing of fresh cementitious materials*, Stuttgart, avgust 2006.
- Grosse, C.U., Reinhardt, H.W. 2003. New developments in quality control of concrete using ultrasound. *International Symposium on Non-Destructive testing in Civil Engineering*, Berlin.
- Hernandez, M.G., Anaya, J.J., Ullate, L.G., Ibanez, A. 2004. Effect of the fluid in the inclusions of cement paste on the ultrasonic velocity. *Ultrasonics* 42, 1-9: 865-869.
- Hernandez, M.G., Izquierdo, M.A.G., Ibanez, A., Anaya, J.J., Ullate, L.G. 2000. Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDE. *Ultrasonics* 38, 1-8: 531-533.

- Hewlett, P. C. 2004. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Elsevier, Burlington MA.
- Hola, J., Schabowicz, K. 2005a. Application of artificial neural networks to determine concrete compressive strength based on non-destructive tests. *Journal of Civil Engineering and Management* 11, 1: 23-32.
- Hola, J., Schabowicz, K. 2005b. New technique of nondestructive assessment of concrete strength using artificial intelligence. *NDT&E International* 38, 4: 251-259.
- Hong-Guang, H., Ji-Zong, W. 2000. Prediction of compressive strength of concrete by neural networks. *Cement and Concrete Research* 30, 8: 1245-1250.
- Idrissou, M.M. 2006. Reliability in interpreting non-destructive testing (NDT) results of concrete structures. Magistrska naloga, Malezija.
- Isgor, O.B., Razaqpur, A.G. 2004. Finite element modelling of coupled heat transfer, moisture transport and carbonation processes in concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, 26, 1: 57-73.
- ISO 6784, Concrete - Determination of Static Modulus of Elasticity in Compression, julij 1982.
- Jenings, H.M., Johnson, S.K. 1986. Simulation of microstructure development during the hydration of a cement compound. *Journal of American Ceramic Society* 69: 790-795.
- Ji, T., Lin, T., Lin, X. 2006. A concrete mix proportion design algorithm based on artificial neural networks. *Cement and Concrete Research* 36, 7: 1399-1408.
- Kamada, T., Uchida, S., Rokugo, K. 2005. Nondestructive Evaluation of Setting and Hardening of Cement Paste Based on Ultrasonic Propagation Characteristics. *Journal of Advanced Concrete Technology* 3, 3: 343-353.
- Kavčič, F. 1990. Eksperimenta v letu 1989 v okviru razvojne naloge UNIDO – masivni betoni, SCT tehnični informator 25: 21 – 26.
- Kavčič, F. 2000. Hidratacija cementa v betonu pri adiabatnih razmerah, magistrska naloga, Ljubljana.
- Keating, J., Hannant, D.J. 1998. Correlation between cube strength, ultrasonic pulse velocity and volume change for oil well cement slurries. *Cement and concrete Research* 19, 5: 715-726.
- Kim, K.H., Jeon S.E., Kim, J.K., Yang S. 2003. An experimental study on thermal conductivity of concrete. *Cement and Concrete Research* 33, 3: 363-371.
- Koenders, E.A.B. 1997. Simulation of volume changes in hardening cement-based materials. Doktorska disertacija, TU Delft.
- Korhonen C.J. 2002. Off-the Shelf Antifreeze Admixtures. Cold Region Research and Engineering Laboratory, April 2002.
- Krauss, M., Hariri, K. 2006. Determination of initial degree of hydration for improvement of early-age properties of concrete using ultrasonic wave propagation. *Cement and Concrete Composites* 28, 4: 299-306.
- Kruml, F. 1996. Setting process of concrete, Properties of fresh concrete: Proceedings of the colloquium organized on behalf of the Coordinating Committee for Concrete Technology of RILEM, New York, 10-16.

-
- Lai, S., Serra M. 1997. Concrete strength prediction by means of neural networks. *Construction and Building Materials* 11, 2: 93-98.
- Lee, H. K., Lee, K. M., Kim, Y. H., Yim, H., Bae, D. B. 2004. Ultrasonic in-situ monitoring of setting process of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research* 34, 4: 631-640.
- Lee, S.C. 2003. Prediction of concrete strength using artificial neural networks. *Engineering Structures* 25, 7: 849-857.
- Lochorst, S.J. 1998. Deformational behaviour of concrete influenced by hydration related changes of the microstructure. Raziskovalno poročilo, TU Delft.
- Lorenzi, A., Tiesbierek, F.T., da Silva Filho, L.C.P. 2007. Ultrasonic Pulse velocity analysis in Concrete Specimens. IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires.
- Lura P., van Breugel K. 2001. Thermal Properties of Concrete: sensitivity studies IPACS REPORT. May 2001.
- Maekava, K., Chaube, R., Kishi T. 1999. Modelling of Concrete Performance Hydration, Microstructure Formation and Transport. London: E and F SPON.
- Mehta, P.K. 1986. Concrete structure, properties and materials. NJ: Prentice-Hall.
- Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. 1993. Concrete: Structure, properties and methods. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 2nd edition, 548 pp.
- Mikulić, D., Gabrijel, I., Milovanović, B. 2008. Prediction of concrete compressive strength. International RILEM Symposium on Concrete Modelling – CONMOD '08, Delft.
- Morabito, P. 2001. Apparent Activation Energy - An example for determination from adiabatic hydration tests. IPACS report, BE96-3043/2001, 19-2.
- Nash't, I.H., A'bour, S.H., Sadoon, A.A. 2005. Finding an unified relationship between crushing strength of concrete and non-destructive tests. Middle East Nondestructive Testing Conference and Exhibition, Bahrain.
- Navi, P., Pignat, C. 1996. Simulation of cement hydration and the connectivity of the capillary pore soace. *Advanced Cement Based Materials* 4: 58-67.
- Neisecke, J. 1974. A three parameter, complex ultrasonic test method for nondestructive testing of materials in civil engineering. Doktorska disertacija, Technische Universitat Braunschweig, Braunschweig.
- Ohdaira, E., Masuzawa, N. 2000. Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete - the possibility of NDE. *Ultrasonics* 38, 1-8: 546-552.
- Ozturan, T., Cecen, C. 1997. Effect of Coarse Aggregate Type on Mechanical Properties of Concretes with Different Strengths. *Cement and Concrete Research* 27, 2: 165-170.
- Ozturk, T., Rapoport, J.R., Popovics, J.S., Shah, S.P. 1999. Monitoring the setting and hardening of cement-based materials with ultrasound. *Concrete Science and Engineering* 1, 2: 83-91.
- Park, K.-B., Noguchi, T., Plawsky, J. 2005. Modeling of hydration reactions using neural networks to predict the average properties of cement paste. *Cement and Concrete Research* 35, 9: 1676-1684.

- Pešič T., Reščič L. 1999. Cementi z nizko toplo hidratacije za masivne betone. Zbornik referatov "Hidrotehnični betoni", Slovenski kolokvij o betonih '99, Ljubljana.
- Popovics, S. 2007. Analysis of the concrete strength versus ultrasonic pulse velocity relationship. American Society for Nondestructive Testing.
- Popovics, S., Popovics, J.S. 1992. A critique of the ultrasonic pulse velocity method for testing concrete. Nondestructive Testing of Concrete Elements in Structures, v: F. Ansari, S. Sutre, Engineering Division of ASCE, San Antonio, Texas, 94-103.
- Popovics, S., Rose, J.L., Popovics, J.S. 1990. The behaviour of ultrasonic pulses in concrete. Cement and Concrete Research 20, 2: 259-270.
- Popovics, S., Silva-Rodrigues, R., Popovics, J.S. 1994. V. Martucci, Behavior of ultrasonic pulses in fresh concrete. New experimental techniques for evaluating concrete material and structural performance, ACI Special Publication SP-143, American Concrete Institute, Detroit, 207-225.
- Powers, T.C., Brownyard, T.L. 1947. Studies of the physical properties of hardened portland cement paste. journal of the American Concrete Institute 18, 7.
- Quasrawi, H.Y. 2000. Concrete strength by combined nondestructive methods – simply and reliably predicted. Cement and Concrete Research 30: 739-746,
- Rapoport, J.R., Popovics, J.S., Subramaniam, K.V., Shah, S.P. 2000. Using ultrasound to monitor stiffening process of concrete with admixtures. ACI Materials Journal 97, 6: 675-683.
- Reinhardt, H.W. 1991. Relevance of testing during construction, V: Reinhardt, H.W. (ur), Proceedings of the International Workshop on Testing During Concrete Construction. Champman and Hall, London, New York, RILEM Proceedings PRO 11, 3-7.
- Reinhardt, H.W., Grosse, C.U. 2004. Continuous monitoring of setting and hardening of mortar and concrete. Construction and Building Materials 18, 3: 145-154.
- Reinhardt, H.W., Grosse, C.U. 1996. Setting and hardening of concrete continuously monitored by elastic waves. V: J.P.M. Bartos, D.L. Marrs, D.J. Cleland: Production methods and workability of concrete, Proceedings of the International RILEM Conference, Paisley, 415-425.
- Reinhardt, H.W., Grosse, C.U., Weiler, B., Bohnert, J., Windisch, N. 1996. P-wave propagation in setting and hardening concrete. Otto-Graf-Journal 7: 181-189.
- Robeyst, N., Gruyaert, E., Grosse, C.U., De Belie, N. 2008. Monitoring the setting of concrete containing blast-furnace slag by measuring the ultrasonic p-wave velocity. Cement and Concrete Research, doi:10.1016/j.cemconres.2008.04.006.
- Rosin P. 1933. Zement (8), 427-433.
- Rostasy, F., Gutsch, A., Krauss, M. 2001. Computation of stresses and cracking criteria for early age concrete – Methods of Ibmb. IPACS Report BE96-3843/2001:35-4.
- Rumelhart, D.E., McClelland, J.L. 1986. Paralel Distributed Processing, Explorations in the Microstructure of Cognition. Vol. 1: Foundations, Cambridge, MIT Press.
- Samarin, A., Combined Methods, v: Malhotra, V.M., Carino, N.J., (ur). 2004. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete. West Conshohocken: CRC Press, 9/1-9/12.

Sandberg, P.J., Roberts, L.R. 2005. Cement admixture interactions related to aluminate control. *J. ASTM Inter.* 2, 6: 1-14.

Sayer, C.M, Dahlin, A. 1993. Propagation of ultrasound through hydrating cement pastes at early times. *Advance Cement Based Materials* 1, 1: 12-21.

Schindler, A.K., Dossey, T., McCullough, B.F. 2002. Temperature control during construction to improve the long term performance of portland cement concrete pavements. Texas Department of Transportation, Research project No. 0-1700-2, Austin, The University of Texas at Austin.

Schleich, J.B. 2006. Fire Safety in Buildings, Suite of nine lectures.

Schrivener, K.L., Crumbie, A.K., Laugesen, P. 2004. The Interfacial Transition Zone (ITZ) Between Cement Paste and Aggregate in Concrete. *Interfacial science* 12: 411-421.

SIST EN 197-1:2002. Cement – 1. del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente, april 2002.

SIST EN 932-3:1999. Preskusi splošnih lastnosti agregatov – 3.del: Postopek in izrazje poenostavljenega petrografskega opisa, junij, 1999.

SIST EN 1008. Voda za pripravo betona - Zahteve za vzorčenje, preskušanje in ugotavljanje primernosti vode za pripravo betona, vključno vode, pridobljene iz procesov v industriji betona, januar 2003.

SIST EN 12390-1:2001. Preskušanje strjenega betona – 1.del: Oblika, mere in druge zahteve za vzorce in kalupe, april, 2001.

SIST EN 12390-2:2001. Preskušanje strjenega betona – 2.del: Izdelava in nega vzorcev za preskus trdnosti, april, 2001.

SIST EN 12390-3:2002. Preskušanje strjenega betona – 3.del: Tlačna trdnost preskušancev, maj, 2002.

SIST EN 12504-2:2002. Preskušanje betona v konstrukcijah – 2.del:Neporušitveno preskušanje–Določevanje sklerometričnega indeksa, julij, 2002.

SIST EN 12504-4:2004. Preskušanje betona – 4.del: Določevanje hitrosti prehoda ultrazvoka, december, 2004.

SIST EN 196-3:2005. Metode preskušanja cementa – 3.del: Določanje časa vezanja in prostorninske obstojnosti, april, 2005.

SIST EN 197-1:2002. Cement – 1.del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente, april 2002.

Stepišnik, J., Lukač, M., Kocuvan, I. 1981. Measurement of cement hydration by ultrasonics. *American Ceramic Society Bulletin* 60, 4: 481-483.

Sun, Z., Voigt, T., Shah, S.P. 2006. Rheometric and ultrasonic investigations of viscoelastic properties of fresh portland cement pastes. *Cement and Concrete Research* 36, 2: 278-287.

Suwanvitaya, P., Jiravetaku, S., Vanichavetin, C. 2006. Effect of Aggregate Fraction on Concrete Strength. Symposium on Infrastructure Development and the Environment, Seameo-Innotech, Diliman, University of Philippines.

Tanabe, T., Kawasumi, M. and Yamashita M. 1985. Thermal stress analysis of massive concrete. Proceedings of the Seminar for Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures. Tokyo.

- Turgut, P. 2004. Evaluation of the ultrasonic pulse velocity data coming on the field, 4th international conference on NDE in relation to structural Integrity for nuclear and pressurised components, London.
- Turk, G. 1987. Programska oprema za račun nelinearnega in nestacionarnega prevajanja toplote z upoštevanjem raznih robnih pogojev in notranjega vira toplote zaradi hidratacije cementa. Diplomski naloga, Ljubljana.
- Valič, M.I. 2000. Hydration of cementitious materials by pulse echo USWR. Method, apparatus and application examples. *Cement and Concrete Research*, 30, 10: 1633-1640.
- Valič, M.I., Stepišnik, J. 1998. A study of hydration of cement pastes by reflection of ultrasonic shear waves. Part I: Apparatus, experimental method and application examples. *Kovine, Zlitine, Tehnologije* 32, 6: 551-560.
- Valič, M.I., Stepišnik, J. 1999. Application of pulsed USWR method for materials studies. *Kovine, Zlitine, Tehnologije* 33, 5: 341-344.
- Valič, M.I., Stepišnik, J., Gabrijelčič, M., Vuk, T., Reščič, L. 1998. Setting time measurements of portland cements with pulsed USWR method. *Kovine, Zlitine, Tehnologije* 33, 1-2: 83-86.
- Valič, M.I., Vuk, T. 2000. A study of the influence of additives and admixtures on the hydration of cement with the pulsed USWR method. *Materiali in Tehnologije* 34, 5: 249-255.
- van Breugel, K. 2001. Hydration of Cement Based Systems, Aspects of hydration of cement based systems and possibilities to quantify the evolution of hydration processes. poročilo IPACS BE96-3843/2001:17-6, Delft.
- van Breugel, K. 1991. Simulation of hydration and formation of structure of hardening cement-based materials. doktorska disertacija, Tehnična univerza Delft, Delft.
- Van Breugel, K. 2001. Hydration of cement-based systems: Aspects of hydration of cement-based systems and possibilities to quantify the evolution of hydration process. IPACS Report 2.1-T1.
- Voigt, T. 2004. The Application of an Ultrasonic Shear Wave Reflection Method for Nondestructive Testing of Cement-Based Materials at Early Ages. Doktorska disertacija, Leipzig.
- Voigt, T., Grosse, C. U., Sun, Z., Shah, S. P., Reinhardt, H. W. 2005. Comparison of ultrasonic wave transmission and reflection measurements with P- and S-waves on early age mortar and concrete. *Materials and Structures* 38: 729-738.
- Voigt, T., Malonn, T., Shah, S.P. 2006. Green and early age compressive strength of extruded cement mortar monitored with compression tests and ultrasonic techniques. *Cement and Concrete Research* 36: 858-867.
- Voigt, T., Sun, Z., Shah, S.P. 2006. Comparison of ultrasonic wave reflection method and maturity method in evaluating early-age compressive strength of mortar. *Cement and Concrete Composites* 28: 307-316.
- Yaman, I.O. 2000. Finite element simulation of wave propagation in concrete for the evaluation of ultrasonic testing procedures. Doktorska disertacija, Wayne State University, Detroit, Michigan.
- Ye, G. 2003. Experimental study and numerical simulation of the development of the microstructure and permeability of cementitious materials. Doktorska disertacija. Delft University of Technology, Delft.
- Zhou, F.P., Lydon, F.D., Barr, B.I.G. 1995. Effect of Coarse Aggregate on Elastic Modulus and Compressive Strength of High Performance Concrete. *Cement and Concrete Research* 25, 1: 177-186.

LASTNI PRISPEVKI, NASTALI V OKVIRU DISERTACIJE

Trtnik, G., Kavčič, F., Turk, G. 2005. Obnašanje betona v različnih temperaturnih razmerah ob uporabi pospeševal vezanja in strjevanja. V: Saje, F. (ur), Lopatič, J. (ur), Zbornik 27. zborovanja gradbenih konstrukterjev Slovenije, 203-210, Bled, oktober 2005.

Trtnik, G., Kavčič, F., Turk, G. 2006a. Določanje lastnosti mladega betona z ultrazvočno metodo. V: Saje, F. (ur), Lopatič, J. (ur), Zbornik 28. zborovanja gradbenih konstrukterjev Slovenije, 207-216, Bled, oktober 2006.

Trtnik, G., Kavčič, F., Turk, G. 2006b. Vpliv nizkih temperatur okolice na vezanja in strjevanje betona. V: Gostinčar, A. (ur), 8. slovenski kongres o cestah in prometu, Zbornik referatov, 887-894, Portorož, oktober 2006.

Čas, B., Trtnik, G., Saje, M., Turk, G., Planinc, I. 2006c. Shear strain and buckling of plane timber trusses. V: WCTE, conference proceedings, 1-8, Portland, 2006.

Trtnik, G., Kavčič, F., Turk, G. 2007a. Možnost uporabe ultrazvočne, sklerometriške in mešane nedestruktivne metode za oceno tlačne trdnosti mladega betona. V: Saje, F. (ur), Lopatič, J. (ur), Markelj, V. (ur), Zbornik 29. zborovanja gradbenih konstrukterjev Slovenije, 249-255, Bled, oktober 2007.

Trtnik, G., Kavčič, F., Turk, G. 2007b. Razvoj hitrosti ultrazvočnega valovanja skozi beton v obdobju vezanja in strjevanja. V: Zbornik referatov ZBS: Združenje za beton Slovenije, 17-25, Lipica, marec 2007.

Trtnik, G., Kavčič, F., Turk, G. 2007c. Numerični model za določanje tlačne trdnosti mladega betona z ultrazvočno metodo. *Gradbeni Vestnik* 56: 226-234.

Kavčič, F., Trtnik, G., Turk, G. 2008a. Influence of low temperatures and cement accelerators on setting and hardening process of concrete. *Proceedings of the International Conference Concrete: Construction Sustainable Option*, Dundee, julij 2008.

Trtnik, G. 2008b. Študija primernosti metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov za spremljanje procesa vezanja cementnih materialov. V: Saje, F. (ur), Lopatič, J. (ur), Markelj, V. (ur), Zbornik 30. zborovanja gradbenih konstrukterjev Slovenije, Bled, oktober 2008.

Trtnik, G., Kavčič, F., Valič, M.I. 2008c. Primerjava dveh ultrazvočnih metod in njune aplikacije za oceno vezanja materialov na bazi cementa. V: Gostinčar, A. (ur), 9. slovenski kongres o cestah in prometu, Zbornik referatov, Portorož, oktober 2008.

Trtnik, G., Kavčič, F., Turk, G. 2008d. Nova programska oprema za določitev temperaturnega razporeda v betonskih konstrukcijah. V: Zbornik referatov ZBS: Združenje za beton Slovenije, 77-85, Lipica, maj 2008.

Trtnik, G., Kavčič, F., Turk, G. 2008e. Modeling adiabatic temperature rise during concrete hydration with the use of artificial neural networks. *International RILEM Symposium on Concrete Modelling – CONMOD '08*, Delft, maj 2008.

Trtnik, G., Turk, G., Kavčič, F., Bokan-Bosiljkov, V. 2008f. Possibilities of using the ultrasonic wave transmission method to estimate initial setting time of cement paste. *Cement and Concrete Research* 38, 11: 1336-1342.

Trtnik, G., Kavčič, F., Turk, G. 2008g. The use of artificial neural networks in adiabatic curves modeling. *Automation in Construction* 18, 1: 10-15.

Trtnik, G., Kavčič, F., Turk, G. 2009a. Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks. *Ultrasonics* 49, 1: 53-60.

Ilc, A., Trtnik, G., Planinc, I., Turk, G. 2009b. Temperaturna analiza postopne gradnje masivnih betonskih konstrukcij. *Gradbeni Vestnik*. Sprejeto v objavo.

Trtnik, G., Kavčič, F., Turk, G. 2009c. Uporaba metode prehoda vzdolžnih ultrazvočnih valov za analizo vezanja in strjevanja materialov s cementnim vezivom. V: Zbornik referatov ZBS: Združenje za beton Slovenije, Lipica, marec 2009. Sprejeto v objavo.

Ilc, A., Turk, G., Kavčič, F., Trtnik, G. 2009d. New numerical procedure for prediction of temperature development in early age concrete structures. *Automation in Construction*. V fazi revizije.

Trtnik, G., Valič, M.I., Kavčič, F., Turk, G. 2009e. Comparison between two ultrasonic methods in their ability to monitor the setting process of cement pastes. *Cement and Concrete Research*. V fazi revizije.