

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:

Branko Bandelj

Reološke lastnosti vlaknastih betonov

Doktorska disertacija št. 206

Mentor:

izr. prof. dr. Franc Saje

Ljubljana, 30. 8. 2010

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 539.37:691.32(043.3)

Mentor: izr. prof. dr. Franc Saje

Naslov: Reološke lastnosti vlaknastih betonov

Obseg in oprema: 192 str., 36 pregl., 133 sl., 58 en.

Ključne besede: jeklena vlakna, polipropilenska vlakna, vlaknasti beton, lezenje vlaknastega betona, krčenje vlaknastega betona

Izvleček

Največji del doktorskega dela predstavljajo eksperimentalne preiskave krčenja in lezenja betonov normalne in visoke trdnosti z različnimi vsebnostmi jeklenih in polipropilenskih vlaken. V primeru uporabe polipropilenskih vlaken smo raziskovali vpliv suhih in tudi predhodno navlaženih vlaken na krčenje vlaknastega betona. S preiskavami smo ugotovili vpliv dolžine uporabljenih vlaken na reološke lastnosti obravnavanega kompozita. Opravljeni eksperimenti se nanašajo tako na raziskavo avtogenega krčenja kakor tudi na krčenje vlaknastega betona zaradi sušenja. Poleg raziskav vpliva posameznih vrst vlaken na lastnosti vlaknastega betona so bili opravljeni tudi poskusi vpliva kombinacije jeklenih in polipropilenskih vlaken na časovni potek in velikost krčenja kompozita. Na podlagi analize rezultatov meritev krčenja in lezenja obravnavanih kompozitov disertacija vsebuje tudi ustrezno prirejen predlog numeričnega modeliranja časovnega poteka krčenja in lezenja kompozita iz literature. Iz rezultatov raziskav sledi, da vsebina vlaknaste armature v betonu zmanjšuje tako avtogeno krčenje kakor tudi krčenje kompozita zaradi sušenja. Pri tem je vpliv navlaženih polipropilenskih vlaken zlasti na zmanjšanje avtogenega krčenja kompozita največji. Vpliv dodanih vlaken na lezenje vlaknastega betona pa je sorazmerno majhen.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

- UDC:** 539.37:691.32(043.3)
- Author:** Branko Bandelj
- Supervisor:** Assoc. Prof. Franc Saje, Ph.D.
- Title:** Rheological behaviour of fibre reinforced concrete
- Notes:** 192 pp., 36 tab., 133 fig., 58 eq.
- Keywords:** steel fibres, polypropylene fibres, fibre reinforced concrete, creep of concrete, creep of fibre reinforced concrete, shrinkage of fibre reinforced concrete

Abstract:

The largest part of the doctoral thesis comprises experimental tests investigating shrinkage and creep of normal and high strength concretes with different contents of steel and polypropylene fibres. For the case of using polypropylene fibres we investigated the influence of dry as well as previously moistened fibres on shrinkage of fibre reinforced concrete. The investigations showed that the length of used fibres influences the rheological properties of the analysed composite. The performed experimental tests are related to the research of autogenous shrinkage as well as shrinkage of fibre concrete due to drying. Apart from the investigation of the influence of individual types of fibres on the properties of fibre reinforced concrete, also tests investigating the influence of the combination of steel and polypropylene fibres on the time development and size of composite shrinkage were carried out. Based on the analysis of the results obtained from the measurements of composite shrinkage and creep the doctoral thesis also presents adequately adapted proposal for the numerical modelling of the time development of composite shrinkage and creep from literature. The results of experimental investigations show that the contents of the fibre reinforcement in concrete reduce autogenous shrinkage as well as shrinkage of composite due to drying. In this respect the influence of moistened polypropylene fibres, especially on the reduction of autogenous shrinkage of the composite, is the largest. However, the influence of added fibres on creep of fibre reinforced concrete is relatively small.

Vzpodbujala sta me, se veselila mojih uspehov in mi stala ob strani v vseh težkih trenutkih, ko sem vaju potreboval. Nesebično sta se razdajala in me usmerjala na poti življenja. Zato to delo posvečam očetu Mirku in mami Mari.

ZAHVALA

Doktorska disertacija je rezultat raziskovalnega dela soizvajalca Katedre za masivne in lesene konstrukcije Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani in izvajalca raziskovalne skupine podjetja Primorje, d. d., iz Ajdovščine. Raziskavo delno financira Evropska unija, in sicer iz Evropskega socialnega sklada. Raziskava poteka v okviru Operativnega programa razvoja človeških virov za obdobje 2007–2013, 1. razvojne prioritete: Spodbujanje podjetništva in prilagodljivosti, prednostne usmeritve 1.1.: Strokovnjaki in raziskovalci za konkurenčnost podjetij.

Bil je nemogoč cilj, ki je postal mogoč z vašo vero in mojim delom. Le malo vas je verjelo, ampak verjeli ste. Hvala mentorju iz podjetja, dr. Petru Kanteju, gospe Jelici Čotar, predsedniku upravnega odbora mag. Dušanu Črnigoju, hvala sodelavcem in drugim v vodstvu podjetja Primorje, d. d., za podporo in izkazano zaupanje.

Za koristne nasvete in pomoč pri raziskovalnem delu ter za vero v »nemogoč« cilj se zahvaljujem mentorju, izr. prof. dr. Francu Sajetu.

Pri eksperimentalnih raziskavah mi je s svojim znanjem, izkušnjami in koristnimi nasveti nesebično pomagal asist. dr. Drago Saje.

Hvala Ani, ker mi je v teh zadnjih dveh letih stala ob strani.

Sodelavcu Matjažu Jelušiču se zahvaljujem za pomoč pri pripravi in spremljanju eksperimentalnih raziskav.

Zahvaljujem se zaposlenim na Katedri za masivne in lesene konstrukcije, ki so mi s svojim prijateljskim odnosom polepšali vsak delovni dan v teh dveh težkih letih.

Nazadnje se zahvaljujem staršem in sestri z družino, ker so me ves čas spodbujali in mi stali ob strani.

»Upanje umre zadnje ...«

Vsem najlepša hvala.

KAZALO

1	UVOD.....	1
2	SPLOŠNO O VLAKNASTIH BETONIH	4
2.1	LASTNOSTI VLAKNASTEGA BETONA	4
2.2	VRSTA IN LASTNOSTI UPORABLJENIH VLAKEN V KOMPOZITU	9
2.3	NAPOTKI ZA DOLOČITEV PRIMERNEGA PROSTORNINSKEGA DELEŽA VLAKEN V BETONSKEMU KOMPOZITU	11
3	REOLOŠKE LASTNOSTI VLAKNASTIH BETONOV	13
3.1	KRČENJE VLAKNASTIH BETONOV	13
3.2	LEZENJE VLAKNASTEGA BETONA	21
4	EKSPERIMENTALNE RAZISKAVE	23
4.1	ZASNOVA EKSPERIMENTALNIH RAZISKAV	23
4.2	UPORABLJENI MATERIALI IN NJIHOVI DELEŽI V VLAKNASTIH BETONIH.....	23
4.3	MERJENJE AVTOGENEGA IN CELOTNEGA KRČENJA VLAKNASTIH BETONOV VISOKE TRDNOSTI.....	33
4.4	MERJENJE CELOTNEGA KRČENJA VLAKNASTIH BETONOV NORMALNE TRDNOSTI	36
4.5	REZULTATI MERITEV AVTOGENEGA IN CELOTNEGA KRČENJA BETONOV VISOKE TRDNOSTI	37
4.6	REZULTATI MERITEV AVTOGENEGA IN CELOTNEGA KRČENJA VLAKNASTEGA BETONA VISOKE TRDNOSTI Z JEKLENIMI VLAKNI	37
4.7	REZULTATI IN ANALIZA MERITEV AVTOGENEGA IN CELOTNEGA KRČENJA BETONOV VISOKE TRDNOSTI Z DODANIMI POLIPROPILENSKIMI VLAKNI	66
4.8	REZULTATI IN ANALIZA MERITEV CELOTNEGA IN AVTOGENEGA KRČENJA VLAKNASTIH BETONOV NORMALNE TRDNOSTI Z DODANIMI JEKLENIMI VLAKNI.....	98
4.9	LEZENJE VLAKNASTIH BETONOV NORMALNE TRDNOSTI.....	122
5	NUMERIČNO MODELIRANJE CELOTNEGA KRČENJA VLAKNASTIH BETONOV NORMALNE IN VISOKE TRDNOSTI	132
5.1	PREDLOGI NUMERIČNEGA MODELIRANJA CELOTNEGA KRČENJA VLAKNASTEGA BETONA Z JEKLENIMI VLAKNI	132
5.2	RAZVOJ NUMERIČNEGA MODELA ZA NAPOVEDOVANJE CELOTNEGA KRČENJA BETONA NORMALNE TRDNOSTI Z DODANIMI JEKLENIMI VLAKNI	139
5.3	NUMERIČNO MODELIRANJE CELOTNEGA KRČENJA VLAKNASTEGA BETONA VISOKE TRDNOSTI Z DODANIMI JEKLENIMI VLAKNI	147
5.4	RAZVOJ IZBOLJŠANEGA NUMERIČNEGA POSTOPKA ZA NAPOVEDOVANJE CELOTNEGA KRČENJA VLAKNASTEGA BETONA VISOKE TRDNOSTI Z DODANIMI JEKLENIMI VLAKNI.....	151
6	NUMERIČNO MODELIRANJE LEZENJA VLAKNASTIH BETONOV NORMALNE TRDNOSTI	166
6.1	RAČUNSKI MODELI ZA NAPOVEDOVANJE LEZENJA VLAKNASTIH BETONOV.....	166
6.2	MODELIRANJE EKSPERIMENTALNO DOBLJENIH REZULTATOV PREISKAV LEZENJA BETONA NORMALNE TRDNOSTI Z DODANIMI JEKLENIMI VLAKNI Z OBSTOJEČIMI NUMERIČNIMI POSTOPKI	169

6.3 RAZVOJ NUMERIČNEGA MODELA ZA NAPOVEDOVANJE LEZENJA BETONA NORMALNE TRDNOSTI Z DODAJANJEM RAZLIČNEGA DELEŽA KRAJŠIH JEKLENIH VLAKEN.....	172
7 ZAKLJUČEK.....	181
8 POVZETEK	184
9 SUMMARY	186
VIRI	188

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Različni tipi jeklenih vlaken (Balaguru in Shah, 1992)	9
Slika 3.1: Izguba vode in krčenje cementne malte kot posledica relativne vlage.....	15
nizka stopnja hidratacije visoka stopnja hidratacije.....	17
Slika 3.2: Shematični prikaz prečnega prereza hidratizirane cementne paste (Weiss idr., 1999).....	17
Slika 4.1: Uporabljena jeklena vlakna (levo IRI 50/16 (VJ1) in desno IRI 50/30 (VJ2)).....	27
Slika 4.2: Uporabljena polipropilenska vlakna.....	27
Slika 4.3: Shematičen prikaz merjenja avtogenega krčenja vlaknasto-betonskega preskušanca	34
Slika 4.4: Elektronsko merjenje avtogenega krčenja kompozita oziroma betona	35
Slika 4.5: Časovno spreminjanje temperaturnega razteznostnega koeficienta betona oziroma kompozita	35
Slika 4.6: Meritev celotnega krčenja z nasadnim deformatrom	36
Slika 4.7: Časovni potek merjenega krčenja in temperature preskušancev visokotrdnega betona KVJ1 brez dodane vlaknaste armature.	40
Slika 4.8: Časovni potek izmerjenega avtogenega krčenja in temperature visokotrdnega vlaknastega betona KVJ2 z 0,25 % jeklenih vlaken IRI 50/16.	40
Slika 4.9: Časovni potek izmerjenega avtogenega krčenja in temperature visokotrdnega vlaknastega betona KVJ3 z 0,50 % jeklenih vlaken IRI 50/16.	40
Slika 4.10: Časovni potek izmerjenega avtogenega krčenja in temperature visokotrdnega vlaknastega betona KVJ4 z 0,75 % jeklenih vlaken IRI 50/16.	40
Slika 4.11: Časovni potek izmerjenega avtogenega krčenja in temperature visokotrdnega vlaknastega betona KVJ5 z 1,00 % jeklenih vlaken IRI 50/16.	41
Slika 4.12: Časovni potek izmerjenega avtogenega krčenja in temperature preskušancev visokotrdnega vlaknastega betona KVJ6 z 1,50 % jeklenih vlaken IRI 50/16.....	41
Slika 4.13: Časovni potek izmerjenega avtogenega krčenja in temperature visokotrdnega vlaknastega betona KVJ7 z 2,00 % jeklenih vlaken IRI 50/16.	41
Slika 4.14: Časovni potek izmerjenega avtogenega krčenja in temperature visokotrdnega vlaknastega betona KVJ8 z 0,25 % jeklenih vlaken IRI 50/30.	41
Slika 4.15: Časovni potek izmerjenega avtogenega krčenja in temperature visokotrdnega vlaknastega betona KVJ9 z 0,50 % jeklenih vlaken IRI 50/30.	42
Slika 4.16: Časovni potek izmerjenega avtogenega krčenja in temperature visokotrdnega vlaknastega betona KVJ10 z 0,75 % jeklenih vlaken IRI 50/30.	42
Slika 4.17: Časovni potek izmerjenega avtogenega krčenja in temperature visokotrdnega vlaknastega betona KVJ11 z 1,00 % jeklenih vlaken IRI 50/30.	42
Slika 4.18: Časovni potek izmerjenega avtogenega krčenja in temperature preskušancev visokotrdnega vlaknastega betona KVJ12 z 1,50 % jeklenih vlaken IRI 50/30.....	42

Slika 4.19: Časovni potek izmerjenega avtogenega krčenja in temperature visokotrdnega vlaknastega betona KVJ13 z 2,00 % jeklenih vlaken IRI 50/30.	43
Slika 4.20: Izmerjene deformacije preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z različnimi vsebnostmi krajših jeklenih vlaken (IRI 50/16) v prvih 24 urah po betoniranju.	44
Slika 4.21: Avtogeno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti z različnimi prostorninskimi deleži krajših jeklenih vlaken IRI 50/16.	44
Slika 4.22: Izmerjene deformacije preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z različnimi vsebnostmi daljših jeklenih vlaken (IRI 50/30) v prvih 24 urah po betoniranju.	45
Slika 4.23: Avtogeno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti z različnimi prostorninskimi deleži daljših jeklenih vlaken IRI 50/30.....	46
Slika 4.24: Časovni razvoj avtogenega krčenja zatesnjenih preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0 %, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % in 2,00 % krajših jeklenih vlaken IRI 50/16.	47
Slika 4.25: Časovni razvoj avtogenega krčenja zatesnjenih preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0 %, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % in 2,00 % daljših jeklenih vlaken IRI 50/30.	48
Slika 4.26: Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti s prostorninskimi deleži 0 %, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % in 2,00 % krajših jeklenih vlaken IRI 50/16.	49
Slika 4.27: Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti s prostorninskimi deleži 0 %, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % in 2,00 % daljših jeklenih vlaken IRI 50/30.	50
Slika 4.28: Časovni razvoj krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0 %, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % in 2,00 % krajših jeklenih vlaken IRI 50/16. ..	52
Slika 4.29: Časovni razvoj krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0 %, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % in 2,00 % daljših jeklenih vlaken IRI 50/30....	54
Slika 4.30: Izmerjene deformacije vlaknastih betonov visoke trdnosti z 0,50 % daljših jeklenih vlaken IRI 50/30 in z 0,50 % krajših jeklenih vlaken IRI 50/16 v prvih 24 urah po betoniranju.	55
Slika 4.31: Avtogeno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,50 % daljših (IRI 50/30) oziroma 0,50 % krajših (IRI 50/16) jeklenih vlaken.....	55
Slika 4.32: Izmerjene deformacije vlaknastega betona visoke trdnosti z 2,00 % daljših jeklenih vlaken IRI 50/30 oziroma 2,00 % krajših jeklenih vlaken IRI 50/16.....	56
Slika 4.33: Avtogeno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti z 2,00 % daljših (IRI 50/30) oziroma 2,00 % krajših (IRI 50/16) jeklenih vlaken.....	57
Slika 4.34: Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,50 % daljših (IRI 50/30) oziroma 0,50 % krajših (IRI 50/16) jeklenih vlaken.....	58
Slika 4.35: Časovni razvoj avtogenega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,50 % daljših (IRI 50/30) oziroma 0,50 % krajših jeklenih vlaken (IRI 50/16).....	58

Slika 4.36: Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 2,00 % daljših (IRI 50/30) oziroma 2,00 % krajših jeklenih vlaken (IRI 50/16).	59
Slika 4.37: Časovni razvoj avtogenega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 2,00 % daljših (IRI 50/30) oziroma 2,00 % krajših (IRI 50/16) jeklenih vlaken.	60
Slika 4.38: Časovni razvoj krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,50 % daljših (IRI 50/30) oziroma 0,50 % krajših jeklenih vlaken (IRI 50/16).	61
Slika 4.39: Časovni razvoj krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 2,00 % daljših (IRI 50/30) oziroma 2,00 % krajših jeklenih vlaken (IRI 50/16).	62
Slika 4.40: Potek krčenja vlaknastih betonov visoke trdnosti z 0 %, 1,00 % in 2,00 % vlaken v naših in tujih eksperimentalnih raziskavah.	64
Slika 4.41: Primerjava vpliva 1,00 % in 2,00 % deleža jeklenih vlaken na celotno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti po naših in tujih eksperimentalnih raziskavah.	65
Slika 4.42: Časovni potek izmerjene deformacije in temperature ter avtogenega krčenja preskušancev visokotrdnega betona KVP1 brez dodane vlaknaste armature.	67
Slika 4.43: Časovni potek izmerjenih deformacij in temperature ter avtogenega krčenja preskušancev visokotrdnega vlaknastega betona KVP2 z 0,25 % polipropilenskih vlaken.	67
Slika 4.44: Časovni potek izmerjenih deformacij in temperature ter avtogenega krčenja preskušancev visokotrdnega vlaknastega betona KVP3 z 0,50 % polipropilenskih vlaken.	68
Slika 4.45: Časovni potek izmerjenih deformacij in temperature ter avtogenega krčenja preskušancev visokotrdnega vlaknastega betona KVP4 z 0,75 % polipropilenskih vlaken.	68
Slika 4.46: Časovni potek izmerjenih deformacij in temperature ter avtogenega krčenja preskušancev visokotrdnega vlaknastega betona KVP5 z 0,25 % navlaženih polipropilenskih vlaken.	68
Slika 4.47: Časovni potek izmerjenih deformacij in temperature ter avtogenega krčenja preskušancev visokotrdnega vlaknastega betona KVP6 z 0,50 % navlaženih polipropilenskih vlaken.	68
Slika 4.48: Časovni potek izmerjenih deformacij in temperature ter avtogenega krčenja preskušancev visokotrdnega vlaknastega betona KVP7 z 0,75 % navlaženih polipropilenskih vlaken.	69
Slika 4.49: Izmerjene deformacije preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z različno vsebnostjo suhih polipropilenskih vlaken v prvih 24 urah po betoniranju.	70
Slika 4.50: Avtogeno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti z različnimi prostorninskimi deleži suhih polipropilenskih vlaken v prvih 24 urah po izdelavi preskušancev.	71
Slika 4.51: Izmerjene deformacije preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z različnimi prostorninskimi deleži navlaženih polipropilenskih vlaken v prvih 24 urah po izdelavi preskušancev.	72
Slika 4.52: Avtogeno krčenje preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0 %, 0,25 %, 0,50 % in 0,75 % prostorninskim deležem navlaženih polipropilenskih vlaken v prvih 24 urah po izdelavi preskušancev.	72
Slika 4.53: Časovni razvoj avtogenega krčenja zatesnjenih preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0 %, 0,25 %, 0,50 % in 0,75 % prostorninskim deležem suhih polipropilenskih vlaken v celotnem času izvajanja meritev.	76

- Slika 4.54:** Časovni razvoj avtogenega krčenja zatesnjenih preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0 %, 0,25 %, 0,50 % in 0,75 % prostorninskim deležem navlaženih polipropilenskih vlaken v celotnem času izvajanja meritev..... 77
- Slika 4.55:** Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0 %, 0,25 %, 0,50 % in 0,75 % prostorninskim deležem suhih polipropilenskih vlaken. 78
- Slika 4.56:** Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0 %, 0,25 %, 0,50 % in 0,75 % prostorninskim deležem navlaženih polipropilenskih vlaken. .. 79
- Slika 4.57:** Časovni razvoj krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0 %, 0,25 %, 0,50 % in 0,75 % prostorninskim deležem suhih polipropilenskih vlaken. 81
- Slika 4.58:** Časovni razvoj krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0 %, 0,25 %, 0,50 % in 0,75 % prostorninskim deležem navlaženih polipropilenskih vlaken. 82
- Slika 4.59:** Izmerjene deformacije vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % suhih oziroma 0,25 % navlaženih polipropilenskih vlaken. 84
- Slika 4.60:** Avtogeno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % suhih oziroma 0,25 % navlaženih polipropilenskih vlaken. 85
- Slika 4.61:** Izmerjene deformacije vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,75 % navlaženih oziroma 0,75 % suhih polipropilenskih vlaken..... 85
- Slika 4.62:** Avtogeno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,75 % suhih oziroma 0,75 % navlaženih polipropilenskih vlaken. 86
- Slika 4.63:** Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % suhih oziroma 0,25 % navlaženih polipropilenskih vlaken..... 87
- Slika 4.64:** Časovni razvoj avtogenega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % suhih oziroma 0,25 % navlaženih polipropilenskih vlaken..... 87
- Slika 4.65:** Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastih betonov visoke trdnosti z 0,75 % suhih oziroma 0,75 % navlaženih polipropilenskih vlaken..... 88
- Slika 4.66:** Časovni razvoj avtogenega krčenja preskušancev iz vlaknastih betonov visoke trdnosti z 0,75 % suhih oziroma 0,75 % navlaženih polipropilenskih vlaken..... 89
- Slika 4.67:** Časovni razvoj krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastih betonov visoke trdnosti z 0,25 % suhih oziroma 0,25 % navlaženih polipropilenskih vlaken..... 90
- Slika 4.68:** Časovni razvoj krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastih betonov visoke trdnosti z 0,75 % suhih oziroma 0,75 % navlaženih polipropilenskih vlaken..... 91
- Slika 4.69:** Izmerjene deformacije preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % suhih polipropilenskih, 0,25 % jeklenih oziroma 0,25 % kombinacije jeklenih in suhih polipropilenskih vlaken ter izmerjene deformacije primerjalnega visokotrdnega betona brez vlaken..... 93
- Slika 4.70:** Avtogeno krčenje preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % suhih polipropilenskih, 0,25 % jeklenih oziroma 0,25 % kombinacije jeklenih in suhih polipropilenskih vlaken ter avtogeno krčenje primerjalnega visokotrdnega betona brez vlaken. 94

Slika 4.71: Časovni potek celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % polipropilenskih, 0,25 % jeklenih oziroma 0,25 % kombinacije suhih polipropilenskih in krajših jeklenih vlaken ter celotnega krčenja primerjalnega visokotrdnega betona brez vlaknaste mikroarmature.	95
Slika 4.72: Časovni potek avtogenega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % suhih polipropilenskih, 0,25 % krajših jeklenih oziroma 0,25 % kombinacije suhih polipropilenskih in krajših jeklenih vlaken ter avtogeno krčenje primerjalnega betona brez dodane vlaknaste mikroarmature.	96
Slika 4.73: Časovni potek krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % suhih polipropilenskih, 0,25 % krajših jeklenih oziroma 0,25 % kombinacije suhih polipropilenskih in krajših jeklenih ter krčenje zaradi sušenja primerjalnega betona brez dodane vlaknaste armature.	97
Slika 4.74: Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona normalne trdnosti z 0 %, 0,50 %, 1,00 % in 2,00 % prostorninskim deležem krajših jeklenih vlaken IRI 50/16....	99
Slika 4.75: Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona normalne trdnosti z 0 %, 0,50 %, 1,00 % in 2,00 % prostorninskim deležem daljših jeklenih vlaken IRI 50/30.	100
Slika 4.76: Časovni razvoj avtogenega krčenja zatesnjenih preskušancev iz vlaknastega betona normalne trdnosti z 0 %, 0,50 %, 1,00 % in 2,00 % prostorninskim deležem krajših jeklenih vlaken v celotnem času izvajanja meritev.	101
Slika 4.77: Časovni razvoj avtogenega krčenja zatesnjenih preskušancev iz vlaknastega betona normalne trdnosti z 0 %, 0,50 %, 1,00 % in 2,00 % prostorninskim deležem daljših jeklenih vlaken IRI 50/30 v celotnem času izvajanja meritev.	102
Slika 4.78: Časovni razvoj krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastega betona normalne trdnosti z 0 %, 0,50 %, 1,00 % in 2,00 % prostorninskim deležem krajših jeklenih vlaken IRI 50/16.	103
Slika 4.79: Časovni razvoj krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastega betona normalne trdnosti z 0 %, 0,50 %, 1,00 % in 2,00 % prostorninskim deležem daljših jeklenih vlaken IRI 50/30.	104
Slika 4.80: Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastih betonov normalne trdnosti z 0,50 % daljših oziroma krajših jeklenih vlaken.	106
Slika 4.81: Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastih betonov normalne trdnosti z 2,00 % daljših oziroma krajših jeklenih vlaken.	106
Slika 4.82: Časovni razvoj avtogenega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona normalne trdnosti z 0,50 % daljših oziroma krajših jeklenih vlaken.	107
Slika 4.83: Časovni razvoj avtogenega krčenja preskušancev vlaknastega betona normalne trdnosti z 2,00 % daljših oziroma krajših jeklenih vlaken.	108
Slika 4.84: Časovni razvoj krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastega betona normalne trdnosti z 0,50 % daljših oziroma krajših jeklenih vlaken.	110
Slika 4.85: Časovni razvoj krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastega betona normalne trdnosti z 2,00 % daljših in 2,00 % krajših jeklenih vlaken.	111

- Slika 4.86:** Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona normalne trdnosti z 0 %, 0,50 %, 1,00 %, 1,50 % in 2,00 % prostorninskimi deleži krajših jeklenih vlaken IRI 50/16. 112
- Slika 4.87:** Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona normalne trdnosti z 0 %, 0,50 %, 1,00 %, 1,50 % in 2,00 % prostorninskimi deleži daljših vlaken IRI 50/30. 113
- Slika 4.88:** Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona normalne trdnosti z 0,50 % daljših oziroma krajših jeklenih vlaken. 114
- Slika 4.89:** Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona normalne trdnosti z 2,00 % daljših oziroma krajših jeklenih vlaken. 115
- Slika 4.90:** Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz betona normalne trdnosti naših (KNJ1) in tujih (TKN1 in S1) eksperimentalnih raziskav. 118
- Slika 4.91:** Potek celotnega krčenja vlaknastih betonov normalne trdnosti z 0,50 % jeklenih vlaken in primerjalnega betona brez vlaken po tujih in naših eksperimentalnih raziskavah. 118
- Slika 4.92:** Potek celotnega krčenja vlaknastih betonov normalne trdnosti z 1,00 % vlaken in primerjalnega betona brez vlaken po tujih in naših eksperimentalnih raziskavah. 119
- Slika 4.93:** Potek celotnega krčenja vlaknastih betonov normalne trdnosti z 2,00 % vlaken in primerjalnega betona brez vlaken po tujih in naših eksperimentalnih raziskavah. 119
- Slika 4.94:** Vpliv 0,50 %, 1,00 % in 2,00 % deleža jeklenih vlaken na zmanjšanje celotnega krčenja kompozita normalne trdnosti po naših in tujih eksperimentalnih raziskavah. 121
- Slika 4.95:** Prizme iz vlaknastega betona, vpete v jeklene jarme za preiskavo lezenja vlaknastega betona. 123
- Slika 4.96:** Časovni razvoj lezenja vlaknastega betona normalne trdnosti z 0 %, 0,50 %, 1,00 % 1,50 % oziroma 2,00 % prostorninskim deležem krajših jeklenih vlaken IRI 50/16. 125
- Slika 4.97:** Časovni razvoj lezenja preskušancev vlaknastega betona normalne trdnosti z 0 %, 0,50 %, 1,00 % 1,50 % oziroma 2,00 % prostorninskim deležem daljših jeklenih vlaken IRI 50/30. 127
- Slika 4.98:** (a) Vz dolžni horizontalni prerez betonskega preskušanca, ki vsebuje daljša jeklena vlakna IRI 50/30, (b) in prečni prerez betonskega preskušanca, ki vsebuje krajša jeklena vlakna IRI 50/16. 128
- Slika 4.99:** Časovni razvoj lezenja vlaknastega betona normalne trdnosti z 0 %, 1,00 % in 2,00 % prostorninskim deležem jeklenih vlaken po naših oziroma z enakimi deleži karbonskih vlaken po tujih eksperimentalnih raziskavah. 130
- Slika 5.1:** Prikaz izmerjenega časovnega poteka celotnega krčenja vlaknastega betona normalne trdnosti z majhnim (0,50 %) deležem krajših jeklenih vlaken in numeričnih simulacij. 138
- Slika 5.2:** Prikaz izmerjenega časovnega poteka celotnega krčenja vlaknastega betona normalne trdnosti z velikim (2,00 %) deležem krajših jeklenih vlaken in numeričnih simulacij. 139
- Slika 5.3:** Celotno krčenje vlaknastega betona normalne trdnosti z 0,50 % daljših jeklenih vlaken (KNJ2), določeno eksperimentalno oziroma s predlaganim računskim modelom. 145
- Slika 5.4:** Celotno krčenje vlaknastega betona normalne trdnosti z 1,00 % daljših jeklenih vlaken (KNJ3), določeno eksperimentalno oziroma s predlaganim računskim modelom. 145

Slika 5.5: Celotno krčenje vlaknastega betona normalne trdnosti z 2,00 % daljših jeklenih vlaken (KNJ4), določeno eksperimentalno oziroma s predlaganim računskim modelom.....	145
Slika 5.6: Celotno krčenje vlaknastega betona normalne trdnosti z 0,50 % krajših jeklenih vlaken (KNJ5), določeno eksperimentalno oziroma s predlaganim računskim modelom.....	146
Slika 5.7: Celotno krčenje vlaknastega betona normalne trdnosti z 1,00 % krajših jeklenih vlaken (KNJ6), določeno eksperimentalno oziroma s predlaganim računskim modelom.....	146
Slika 5.8: Celotno krčenje vlaknastega betona normalne trdnosti z 2,00 % krajših jeklenih vlaken (KNJ7), določeno eksperimentalno oziroma s predlaganim računskim modelom.....	146
Slika 5.9: Eksperimentalno določen in z obstoječimi numeričnimi metodami modeliran časovni potek celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % krajših jeklenih vlaken.....	148
Slika 5.10: Eksperimentalno določen in z obstoječimi numeričnimi metodami modeliran časovni potek celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti z 1,00 % daljših jeklenih vlaken.	149
Slika 5.11: Eksperimentalno določen in z obstoječimi numeričnimi metodami modeliran časovni potek celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti z 2,00 % krajših jeklenih vlaken.....	150
Slika 5.12: Prikaz eksperimentalno in z izboljšanim našim numeričnim postopkom določeno celotno krčenje betona visoke trdnosti.....	152
Slika 5.13: Časovna poteka celotnega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z 0,25 % krajših jeklenih vlaken (KVJ2), določena z meritvami oziroma s predlaganim računskim postopkom numerične simulacije.....	160
Slika 5.14: Časovna poteka celotnega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z 0,50 % krajših jeklenih vlaken (KVJ3), določena z meritvami oziroma s predlaganim računskim postopkom numerične simulacije.....	160
Slika 5.15: Časovna poteka celotnega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z 0,75 % krajših jeklenih vlaken (KVJ4), določena z meritvami oziroma s predlaganim računskim postopkom numerične simulacije.....	161
Slika 5.16: Časovna poteka celotnega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z 1,00 % krajših jeklenih vlaken (KVJ5), določena z meritvami oziroma s predlaganim računskim postopkom numerične simulacije.....	161
Slika 5.17: Časovna poteka celotnega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z 1,50 % krajših jeklenih vlaken (KVJ6), določena z meritvami oziroma s predlaganim računskim postopkom numerične simulacije.....	162
Slika 5.18: Časovna poteka celotnega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z 2,00 % krajših jeklenih vlaken (KVJ7), določena z meritvami oziroma s predlaganim računskim postopkom numerične simulacije.....	162
Slika 5.19: Časovna poteka celotnega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z 0,25 % daljših jeklenih vlaken (KVJ8), določena z meritvami oziroma s predlaganim računskim postopkom numerične simulacije.....	163

- Slika 5.20:** Časovna poteka celotnega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z 0,50 % daljših jeklenih vlaken (KVJ9), določena z meritvami oziroma s predlaganim računskim postopkom numerične simulacije..... 163
- Slika 5.21:** Časovna poteka celotnega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z 0,75 % daljših jeklenih vlaken (KVJ10), določena z meritvami oziroma s predlaganim računskim postopkom numerične simulacije..... 164
- Slika 5.22:** Časovna poteka celotnega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z 1,50 % daljših jeklenih vlaken (KVJ12), določena z meritvami oziroma s predlaganim računskim postopkom numerične simulacije..... 164
- Slika 5.23:** Časovna poteka celotnega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z 2,00 % daljših jeklenih vlaken (KVJ13), določena z meritvami oziroma s predlaganim računskim postopkom numerične simulacije..... 165
- Slika 6.1:** Eksperimentalno določeno in z numeričnima postopkoma simulirano lezenje vlaknastega betona normalne trdnosti z 0,50 % krajših jeklenih vlaken..... 170
- Slika 6.2:** Eksperimentalno določeno in z numeričnima postopkoma simulirano lezenje vlaknastega betona normalne trdnosti z 1,50 % krajših jeklenih vlaken..... 171
- Slika 6.3:** Eksperimentalno določeno in z numeričnima postopkoma simulirano lezenje vlaknastega betona normalne trdnosti z 2,00 % krajših jeklenih vlaken..... 171
- Slika 6.4:** Eksperimentalno določeno in s predlaganim računskim postopkom simulirano lezenje betona normalne trdnosti..... 174
- Slika 6.5:** Eksperimentalno in s predlaganim numeričnim postopkom določeno lezenje vlaknastega betona z 0,50 % krajših jeklenih vlaken (KNVJ6)..... 179
- Slika 6.6:** Eksperimentalno in s predlaganim numeričnim postopkom določeno lezenje vlaknastega betona z 1,00 % krajših jeklenih vlaken (KNVJ7)..... 179
- Slika 6.7:** Eksperimentalno in s predlaganim numeričnim postopkom določeno lezenje vlaknastega betona z 1,50 % krajših jeklenih vlaken (KNVJ8)..... 180
- Slika 6.8:** Eksperimentalno in s predlaganim numeričnim postopkom določeno lezenje vlaknastega betona z 2,00 % krajših jeklenih vlaken (KNVJ9)..... 180

LIST OF FIGURES

Figure 2.1: Different types of steel fibre (Balaguru and Shah, 1992)	9
Figure 3.1: Loss of water and shrinkage of cement mortar as a function of relative moisture loss	15
Figure 3.2: Schematic view of cross section of hydrate cement paste (Weiss et al., 1999)	17
Figure 4.1: Used steel fibres (IRI 50/16 (VJ1) on left and IRI 50/30 (VJ2) on right)	27
Figure 4.2: Used polypropylene fibres	27
Figure 4.3: Schematic view of measuring autogenous shrinkage of fibre reinforced concrete.....	34
Figure 4.4: Electronic measure of autogenous shrinkage of composite or concrete	35
Figure 4.5: Time dependent temperature extension coefficient of concrete or composite.....	35
Figure 4.6: Measurement of total shrinkage with inset deformeter	36
Figure 4.7: Time development of temperature and measured shrinkage of high performance concrete specimens KVJ1 without fibres.....	40
Figure 4.8: Time development of temperature and measured autogenous shrinkage of high performance concrete KVJ2 with 0,25 % of steel fibres IRI 50/16.	40
Figure 4.9: Time development of temperature and measured autogenous shrinkage of high performance concrete KVJ3 with 0,50 % of steel fibres IRI 50/16.	40
Figure 4.10: Time development of temperature and measured autogenous shrinkage of high performance concrete KVJ4 with 0,75 % of steel fibres IRI 50/16.	40
Figure 4.11: Time development of temperature and measured autogenous shrinkage of high performance concrete KVJ5 with 1,00 % of steel fibres IRI 50/16.	41
Figure 4.12: Time development of temperature and measured autogenous shrinkage of high performance concrete KVJ6 with 1,50 % of steel fibres IRI 50/16.	41
Figure 4.13: Time development of temperature and measured autogenous shrinkage of high performance concrete KVJ7 with 2,00 % of steel fibres IRI 50/16.	41
Figure 4.14: Time development of temperature and measured autogenous shrinkage of high performance concrete KVJ8 with 0,25 % of steel fibres IRI 50/30.	41
Figure 4.15: Time development of temperature and measured autogenous shrinkage of high performance concrete KVJ9 with 0.50 % of steel fibres IRI 50/30.	42
Figure 4.16: Time development of temperature and measured autogenous shrinkage of high performance concrete KVJ10 with 0.75 % of steel fibres IRI 50/30.	42
Figure 4.17: Time development of temperature and measured autogenous shrinkage of high performance concrete KVJ11 with 1,00 % of steel fibres IRI 50/30.....	42
Figure 4.18: Time development of temperature and measured autogenous shrinkage of high performance concrete KVJ12 with 1,50 % of steel fibres IRI 50/30.	42
Figure 4.19: Time development of temperature and measured autogenous shrinkage of high performance concrete KVJ13 with 2,00 % of steel fibres IRI 50/30.	43

Figure 4.20: Measured deformations of specimens with fibre reinforced high performance concrete containing various amount of shorter steel fibres within 24 hours after concreting.....	44
Figure 4.21: Autogenous shrinkage of fibre reinforced high performance concrete containing various volume parts of shorter steel fibres within 24 hours after concreting.....	44
Figure 4.22: Measured deformations of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing various amount of longer steel fibres (IRI 50/30) within 24 hours after concreting.	45
Figure 4.23: Autogenous shrinkage of fibre reinforced high performance concrete with different contents of longer steel fibre (IRI 50/30) within 24 hours after concreting.	46
Figure 4.24: Time development of autogenous shrinkage of sealed test specimens made of fibre reinforced high performance concrete containing 0 %, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % and 2,00 % of shorter steel fibres IRI 50/16.....	47
Figure 4.25: Time development of autogenous shrinkage of sealed test specimens made of fibre reinforced high performance concrete containing 0 %, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % and 2,00 % of longer steel fibres IRI 50/30.....	48
Figure 4.26: Time development of total shrinkage of fibre reinforced high performance concrete specimens containing 0 %, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % and 2,00 % of shorter steel fibres IRI 50/16.	49
Figure 4.27: Time development of total shrinkage of test specimens made of fibre reinforced high performance concrete containing 0 %, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % and 2,00 % of longer steel fibres IRI 50/30.	50
Figure 4.28: Time development of drying shrinkage of test specimens made of fibre reinforced high performance concrete containing 0 %, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % and 2,00 % of shorter steel fibre IRI 50/16.....	52
Figure 4.29: Time development of drying shrinkage of test specimens made of fibre reinforced high performance concrete containing 0 %, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % and 2,00 % of longer steel fibre IRI 50/30.....	54
Figure 4.30: Measured deformations of high performance fibre reinforced concrete containing 0,50 % of longer steel fibre IRI 50/30 and with containing 0,50 % of shorter steel fibres IRI 50/16 within 24 hours after concreting.	55
Figure 4.31: Autogenous shrinkage of fibre reinforced high performance concrete containing 0,50 % of longer (IRI 50/30) or 0,50 % of shorter (IRI 50/16) steel fibres.	55
Figure 4.32: Measured deformations of high performance steel fibre concrete containing 2,00 % of longer steel fibre IRI 50/30 or 2,00 % of shorter steel fibre IRI 50/16.....	56
Figure 4.33: Autogenous shrinkage of fibre reinforced high performance concrete containing 2,00 % of longer (IRI 50/30) or 2,00 % of shorter steel fibre (IRI 50/16).....	57
Figure 4.34: Time development of total shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0,50 % of longer (IRI 50/30), or 0,50 % of shorter (IRI 50/16) steel fibre.....	58

- Figure 4.35:** Time development of autogenous shrinkage of sealed test specimens made of fibre reinforced high performance concrete containing 0,50 % of longer (IRI 50/30), or 0,50 % of shorter steel fibre (IRI 50/16)..... 58
- Figure 4.36:** Time development of total shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 2,00 % of longer (IRI 50/30), or 2,00 % of shorter steel fibre (IRI 50/16)..... 59
- Figure 4.37:** Time development of autogenous shrinkage of sealed test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 2,00 % of longer (IRI 50/30), or 2,00 % of shorter (IRI 50/16) steel fibre..... 60
- Figure 4.38:** Time development of drying shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0,50 % of longer (IRI 50/30), or 0,50 % of shorter steel fibre (IRI 50/16)..... 61
- Figure 4.39:** Time development of drying shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 2,00 % of longer (IRI 50/30), or 2,00 % of shorter steel fibre (IRI 50/16)..... 62
- Figure 4.40:** Time development of shrinkage of fibre reinforced high performance concrete containing 0 %, 1,00 % and 2,00 %, comparison of literature and experimental results. 64
- Figure 4.41:** Comparison of the influence of 1,00 % and 2,00 % steel fibre content on the total shrinkage of fibre reinforced high strength concrete between the own and literature experimental results..... 65
- Figure 4.42:** Time development of measured deformations and temperature for specimens made of high performance concrete KVP1 without fibre reinforcement. 67
- Figure 4.43:** Time development of measured deformations, temperature and autogenous shrinkage for specimens made of high performance fibre reinforced concrete KVP2 with 0,25 % of polypropylene fibres..... 67
- Figure 4.44:** Time development of measured deformations, temperature and autogenous shrinkage for specimens made of high performance fibre reinforced concrete KVP3 with 0,50 % of polypropylene fibres..... 68
- Figure 4.45:** Time development of measured deformations, temperature and autogenous shrinkage for specimens made of high performance fibre reinforced concrete KVP4 with 0,75 % of polypropylene fibres..... 68
- Figure 4.46:** Time development of measured deformations, temperature and autogenous shrinkage for specimens made of high performance fibre reinforced concrete KVP5 with 0,25 % of moistened polypropylene fibres. 68
- Figure 4.47:** Time development of measured deformations, temperature and autogenous shrinkage for specimens made of high performance fibre reinforced concrete KVP6 with 0,50 % of moistened polypropylene fibres. 68
- Figure 4.48:** Time development of measured deformations, temperature and autogenous shrinkage for specimens made of high performance fibre reinforced concrete KVP7 with 0,75 % of moistened polypropylene fibres. 69

- Figure 4.49:** Measured deformations of test specimens made of fibre reinforced high performance concrete containing various amounts of dry polypropylene fibres within first 24 hours after concreting. 70
- Figure 4.50:** Autogenous shrinkage of fibre reinforced high performance concrete containing various volume parts of dry polypropylene fibres within first 24 hours after finishing specimens. 71
- Figure 4.51:** Measured deformations of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing various volume parts of moistened polypropylene fibres within first 24 hours finishing specimens. 72
- Figure 4.52:** Autogenous shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0 %, 0,25 %, 0,50 % and 0,75 % by volume content of moistened polypropylene fibres within first 24 hours after concreting..... 72
- Figure 4.53:** Time development of autogenous shrinkage of sealed test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0 %, 0,25 %, 0,50 % and 0,75 % volume content of dry polypropylene fibres during the complete measuring period. 76
- Figure 4.54:** Time development of autogenous shrinkage of sealed test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0 %, 0,25 %, 0,50 % and 0,75 % of moistened polypropylene fibres during the complete measuring period. 77
- Figure 4.55:** Time development of total shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0 %, 0,25 %, 0,50 % and 0,75 % of dry polypropylene fibres. 78
- Figure 4.56:** Time development of total shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0 %, 0,25 %, 0,50 % and 0,75 % of moisted polypropylene fibres. 79
- Figure 4.57:** Time development of drying shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0 %, 0,25 %, 0,50 % and 0,75 % of dry polypropylene fibres. 81
- Figure 4.58:** Time development of drying shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0 %, 0,25 %, 0,50 % and 0,75 % of moisted polypropylene fibres. 82
- Figure 4.59:** Measured deformations of high performance fibre reinforced concrete containing 0,25 % of dry or 0,25 % of moisted polypropylene fibres..... 84
- Figure 4.60:** Autogenous shrinkage of high performance fibre reinforced concrete containing 0,25 % of dry or 0,25 % of moisted polypropylene fibers. 85
- Figure 4.61:** Measured deformations of high performance fibre reinforced concrete containing 0,75 % of dry or 0,75 % moistened polypropylene fibres. 85
- Figure 4.62:** Autogenous shrinkage of fibre reinforced high performance concrete containing 0,75 % of dry or 0,75 % of moisted polypropylene fibers..... 86
- Figure 4.63:** Time development of total shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0,25 % of dry or 0,25 % of moisted polypropylene fibres. . 87

- Figure 4.64:** Time development of autogenous shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0,25 % of dry or 0,25 % of moisted polypropylene fibres.. 87
- Figure 4.65:** Time development of total shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0,75 % of dry or 0,75 % of moisted polypropylene fibres.. 88
- Figure 4.66:** Time development of autogenous shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0,75 % of dry or 0,75 % of moisted polypropylene fibres.. 89
- Figure 4.67:** Time development of drying shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0,25 % of dry or 0,25 % of moisted polypropylene fibres.. 90
- Figure 4.68:** Time development of drying shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0,75 % of dry or 0,75 % of moisted polypropylene fibres.. 91
- Figure 4.69:** Measured deformations of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0,25 % of polypropylene or 0,25 % of steel or 0,25 % of combination of steel and dry polypropylene fibres and comparable concrete without fibres. 93
- Figure 4.70:** Autogenous shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0,25 % of dry polypropylene or 0,25 % of steel or 0,25 % of combination of steel and dry polypropylene fibres and autogenous shrinkage of comparable concrete without fibres. 94
- Figure 4.71:** Time development of total shrinkage of test specimens made of fibre reinforced high performance concrete containing 0,25 % of polypropylene or 0,25 % of steel or 0,25 % of combination of shorter steel and dry polypropylene fibres and time development total shrinkage of comparable high performance concrete without fibres..... 95
- Figure 4.72:** Time development of autogenous shrinkage of test specimens made of fibre reinforced high performance concrete containing 0,25 % or polypropylene, or 0,25 % of shorter steel, or 0,25 % combination of shorter steel fibres and dry polypropylene fibres and time development autogenous shrinkage of comparable concrete without fibres..... 96
- Figure 4.73:** Time development of drying shrinkage of test specimens made of fibre reinforced high performance concrete containing 0,25 % of dry polypropylene, or 0,25 % of short steel, or 0,25 % combination of shorter steel and dry polypropylene fibres and time development of drying shrinkage of comparable concrete without fibres. 97
- Figure 4.74:** Time development of total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete test specimens with volume content of 0 %, 0,50 %, 1,00 % and 2,00 % of shorter steel fibres IRI 50/16..... 99
- Figure 4.75:** Time development of total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete test specimens with volume content of 0 %, 0,50 %, 1,00 % and 2,00 % of longer steel fibres IRI 50/30..... 100
- Figure 4.76:** Time development of autogenous shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete test sealed specimens with volume content of 0 %, 0,50 %, 1,00 % and 2,00 % short steel fibres IRI 50/16. 101
- Figure 4.77:** Time development of autogenous shrinkage of test sealed specimens od fibre reinforced normal strength concrete with volume content of 0 %, 0,50 %, 1,00 % and 2,00 % longer steel fibres IRI 50/30. 102

Figure 4.78: Time development of drying shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete test specimens containing 0 %, 0,50 %, 1,00 % and 2,00 % volume content of short steel fibres IRI 50/16.....	103
Figure 4.79: Time development of drying shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete test specimens containing 0 %, 0,50 %, 1,00 % and 2,00 % volume content of long steel fibres IRI 50/30.....	104
Figure 4.80: Time development of total shrinkage of test specimens of fibre reinforced normal strength concrete containing 0,50 % of longer or shorter steel fibres.	106
Figure 4.81: Time development of total shrinkage of test specimens of fibre reinforced normal strength concrete containing 2,00 % of longer or shorter steel fibres.	106
Figure 4.82: Time development of autogenous shrinkage of test specimens made of fibre reinforced normal strength concrete containing 0,50 % of longer or shorter steel fibres.	107
Figure 4.83: Time development of autogenous shrinkage of test specimens made of fibre reinforced normal strength concrete containing 2,00 % of longer or shorter steel fibres.	108
Figure 4.84: Time development of drying shrinkage of test specimens made of fibre reinforced normal strength concrete containing 0,50 % of longer or shorter steel fibre.	110
Figure 4.85: Time development of drying shrinkage of test specimens of fibre reinforced normal strength concrete containing 2,00 % of longer and 2,00 % shorter steel fibre.	111
Figure 4.86: Time development of total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete test specimens with volume content of 0 %, 0,50 %, 1,00 %, 1,50 % and 2,00 % of shorter steel fibres IRI 50/16.....	112
Figure 4.87: Time development of total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete test specimens with volume content of 0 %, 0,50 %, 1,00 %, 1,50 % and 2,00 % of longer steel fibres IRI 50/30.....	113
Figure 4.88: Time development of total shrinkage of test specimens made of fibre reinforced normal strength concrete containing 0,50 % of longer or shorter steel fibre.	114
Figure 4.89: Time development of total shrinkage of test specimens made of fibre reinforced normal strength concrete containing 2,00 % of longer or shorter steel fibre.	115
Figure 4.90: Time development of total shrinkage of test specimens made of normal strength concrete of own (KNJ1) and literature (TKN1 in S1) experimental results.....	118
Figure 4.91: Time development of total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete containing 0,50 % steel fibre and comparable concrete without fibre at foreign and own experimental research.	118
Figure 4.92: Time development of total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete containing 1,00 % fibres and comparable concrete without fibres; comparison of literature and own experimental results.	119
Figure 4.93: Time development of total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete containing 2,00 % of fibres and comparable concrete without fibres; comparison of literature and own experimental results.	119

Figure 4.94: Influence of 0,50 %, 1,00 % and 2,00 % of steel fibres content on reduction of total shrinkage of normal strength composite; comparison of own and literature experimental results.	121
Figure 4.95: Prism of fibre reinforced concrete fixed in steel frame for creep research of fibre reinforced concrete.	123
Figure 4.96: Time development of creep of fibre reinforced normal strength concrete containing 0 %, 0,50 %, 1,00 %, 1,50 % or 2,00 % of shorter steel fibres IRI 50/16.	125
Figure 4.97: Time development of creep of fibre reinforced normal strength concrete containing 0 %, 0,50 %, 1,00 %, 1,50 % or 2,00 % of longer steel fibres IRI 50/30.	127
Figure 4.98: (a) Longitudinal horizontal section of concrete specimen containing longer steel fibers IRI 50/30 (b) and cross section of concrete specimen containing shorter steel fibers IRI 50/16.	128
Figure 4.99: Time development of creep of fibre reinforced normal strength concrete containing 0 %, 1,00 %, and 2,00 % steel fibre in own or with the same content of carbon fibres in literature experimental results.	130
Figure 5.1: Comparison of measured time development of total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete with lower content (0,50 %) of shorter steel fibres and results of numerical simulation.	138
Figure 5.2: Comparison of measured time development of total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete with higher content (2,00 %) of shorter steel fibre and results of numerical simulation.	139
Figure 5.3: Total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete with 0,50 % of longer steel fibre (KNJ2) as obtained with experiment or with proposed numerical model.	145
Figure 5.4: Total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete with 1,00 % of longer steel fibre (KNJ3) as obtained with experiment or with the proposed numerical model.	145
Figure 5.5: Total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete with 2,00 % of longer steel fibre (KNJ4) as obtained with experiment or with the proposed numerical model.	145
Figure 5.6: Total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete with 0,50 % of shorter steel fibre (KNJ5) as obtained with experiment or with the proposed numerical model.	146
Figure 5.7: Total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete with 1,00 % of shorter steel fibre (KNJ6) as obtained with experiment or with the proposed numerical model.	146
Figure 5.8: Total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete with 2,00 % of shorter steel fibre (KNJ7) as obtained with experiment or with the proposed numerical model.	146
Figure 5.9: Measured and with the existent numerical method calculated time development of total shrinkage of fibre reinforced high strength concrete with 0,25 % content of short steel fibres.	148
Figure 5.10: Measured and with the existent numerical method calculated time development of total shrinkage of fibre reinforced high strength concrete with 1.00 % content of long steel fibres.	149

Figure 5.11: Measured and with the existent numerical method calculated time devolpment of total shrinkage of fibre reinforced high strength concrete with 2,00 % content of short steel fibres.	150
Figure 5.12: Comparison of experimental results with total shrinkage of high strength concrete as calculated with improved numerical procedure.....	152
Figure 5.13: Time devolpment of total shrinkage of high strength fibre reinforced concrete with 0,25 % of shorter steel fibres (KVJ2) as measured or calculated with proposed numerical procedure.	160
Figure 5.14: Time devolpment of total shrinkage of high strength fibre reinforced concrete with 0,50 % of shorter steel fibres (KVJ3) as measured or calculated with proposed numerical procedure.	160
Figure 5.15: Time devolpment of total shrinkage of high strength fibre reinforced concrete with 0,75 % of shorter steel fibres (KVJ4) as measured or calculated with proposed numerical procedure.	161
Figure 5.16: Time devolpment of total shrinkage of high strength fibre reinforced concrete with 1,00 % of shorter steel fibres (KVJ5) as measured or calculated with proposed numerical procedure.	161
Figure 5.17: Time devolpment of total shrinkage of high strength fibre reinforced concrete with 1,50 % of shorter steel fibres (KVJ6) as measured or calculated with proposed numerical procedure.	162
Figure 5.18: Time devolpment of total shrinkage of high strength fibre reinforced concrete with 2,00 % of shorter steel fibres (KVJ7) as measured or calculated with proposed numerical procedure.	162
Figure 5.19: Time devolpment of total shrinkage of high strength fibre reinforced concrete with 0,25 % of longer steel fibres (KVJ8) as measured or calculated with proposed numerical procedure.	163
Figure 5.20: Time devolpment of total shrinkage of high strength fibre reinforced concrete with 0,50 % of longer steel fibres (KVJ9) as measured or calculated with proposed numerical procedure.	163
Figure 5.21: Time devolpment of total shrinkage of high strength fibre reinforced concrete with 0,75 % of longer steel fibres (KVJ10) as measured or calculated with proposed numerical procedure.	164
Figure 5.22: Time devolpment of total shrinkage of high strength fibre reinforced concrete with 1,50 % of longer steel fibres (KVJ12) as measured or calculated with proposed numerical procedure.	164
Figure 5.23: Time devolpment of total shrinkage of high strength fibre reinforced concrete with 2,00 % long steel fibres (KVJ13) a measured or calculated with proposed numerical procedure.	165
Figure 6.1: Comperison of measured and with numerical procedure simulated creep of fibre reinforced normal strength concrete with 0,50 % of shorter steel fibres content.	170
Figure 6.2: Comparison of measured and with numerical procedure simulated creep of fibre reinforced normal strength concrete with 1,50 % of shorter steel fibres content.	171

Figure 6.3: Comparison of measured and with numerical procedure simulated creep of fibre reinforced normal strength concrete with 2,00 % of shorter steel fibres content.	171
Figure 6.4: Comparison of measured and with proposed numerical procedure simulated creep of normal strength concrete.	174
Figure 6.5: Comparison of measured and with proposed numerical procedure defined creep of fibre reinforced concrete with 0,50 % content of shorter steel fibres (KNVJ6).	179
Figure 6.6: Eksperimental and with proposed numerical procedure defined creep of fibre reinforced with 1,00 % short steel fibre (KNVJ7).	179
Figure 6.7: Comparison of measured and with proposed numerical procedure defined creep of fibre reinforced concrete with 1,50 % content of shorter steel fibres (KNVJ8).	180

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1: Priporočena zrnavost agregata za vlaknasti beton z jeklenimi vlakni (ACI Committee 544).....	4
Preglednica 2.2: Skupine jeklenih vlaken glede na način izdelave (SIST EN 14889-1-2006)	10
Preglednica 2.3: Skupine polipropilenskih vlaken glede na način izdelave (SIST EN 14889-2-2006)10	
Preglednica 4.1: Lastnosti mivke Termit iz Moravč (Irma, d. o. o., 14. 10. 2004)	24
Preglednica 4.2: Lastnosti kamnine agregata iz Separacije Kresnice (Igmata, d. d., 16. 2. 2009)	24
Preglednica 4.3: Mineralna sestava cementnih klinkerjev	25
Preglednica 4.4: Kemična sestava ter fizikalno-kemične in mehanske lastnosti cementa CEM II/A-S 42.5R.....	25
Preglednica 4.5: Osnovne lastnosti antikorodina	26
Preglednica 4.6: Kemična sestava in fizikalno-kemične lastnosti mikrosilike (TKK Serpenica).....	26
Preglednica 4.7: Lastnosti uporabljenih jeklenih vlaken (IRMA, d. d., 2005 in IRMA, d. d., 2006)..	27
Preglednica 4.8: Lastnosti uporabljenih polipropilenskih vlaken (Grace Krenit).....	27
Preglednica 4.9: Visokotrdni vlaknasti betoni z različnim deležem jeklenih vlaken.....	29
Preglednica 4.10: Visokotrdne kompozitne betonske mešanice z različnim deležem polipropilenskih vlaken.....	30
Preglednica 4.11: Vsebnost vode v navlaženih polipropilenskih vlaknih.....	31
Preglednica 4.12: Preskušanci vlaknastega betona normalne trdnosti, negovani prvih 24 ur po betoniranju	32
Preglednica 4.13: Preskušanci vlaknastega betona normalne trdnosti, ki so bili prvih 24 ur po betoniranju pokriti s PVC-folijo, naslednjih 6 dni pa so ležali v vodi.....	32
Preglednica 4.14: Srednja vrednost in standardni odklon izmerjenih deformacij in zgodnjega avtogenega krčenja kompozita z različnimi vsebnostmi jeklenih vlaken v % pri starosti t	38
Preglednica 4.15: Srednja vrednost in standardni odklon krčenja kompozita z različnimi vsebnostmi jeklenih vlaken v % pri starosti t	39
Preglednica 4.16: Srednja vrednost in standardni odklon izmerjenih deformacij in zgodnjega avtogenega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z različno vsebnostjo polipropilenskih vlaken v % pri času t	66
Preglednica 4.17: Srednja vrednost in standardni odklon krčenja kompozita z različnimi deleži polipropilenskih vlaken v % pri starosti t	67
Preglednica 4.18: Krčenje in lezenje vlaknastih betonov normalne trdnosti z jeklenimi vlakni v % pri času t	124
Preglednica 5.1: Vrednosti parametrov a_m , b_m in c_m	140

Preglednica 5.2: Izmerjeno (ε_{se}) in izračunano (ε_{sm}) celotno krčenje vlaknastega betona z 0,50 % daljših (KNJ2) oziroma 1,00 % daljših (KNJ3) jeklenih vlaken.....	142
Preglednica 5.3: Izmerjeno (ε_{se}) in izračunano (ε_{sm}) celotno krčenje vlaknastega betona z 2,00 % daljših (KNJ4) oziroma 0,50 % krajših (KNJ5) jeklenih vlaken.....	143
Preglednica 5.4: Izmerjeno (ε_{se}) in izračunano (ε_{sm}) celotno krčenje vlaknastega betona z 1,00 % krajših (KNJ6) oziroma 2,00 % krajših (KNJ7) jeklenih vlaken.	144
Preglednica 5.5: Vrednosti parametrov e_v in f_v	153
Preglednica 5.6: Vrednosti celotnega krčenja preiskovanega betona visoke trdnosti brez vlaken (KVJ1) in vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % krajših jeklenih vlaken (KVJ2), dobljenih z eksperimentalnimi meritvami in razvitim računskim postopkom.	154
Preglednica 5.7: Izmerjeno (ε_{se}) in izračunano (ε_{sm}) celotno krčenje vlaknastega visokotrdnega betona z vsebnostjo 0,50 % krajših (KVJ3) oziroma 0,75 % krajših (KVJ4) jeklenih vlaken.	155
Preglednica 5.8: Izmerjeno (ε_{se}) in izračunano (ε_{sm}) celotno krčenje vlaknastega visokotrdnega betona z vsebnostjo 1,00 % krajših (KVJ5) oziroma 1,50 % krajših (KVJ6) jeklenih vlaken.	156
Preglednica 5.9: Izmerjeno (ε_{se}) in izračunano (ε_{sm}) celotno krčenje vlaknastega visokotrdnega betona z vsebnostjo 2,00 % krajših (KVJ7) oziroma 0,25 % daljših (KVJ8) jeklenih vlaken.....	157
Preglednica 5.10: Izmerjeno (ε_{se}) in izračunano (ε_{sm}) celotno krčenje vlaknastega visokotrdnega betona z vsebnostjo 0,50 % daljših (KVJ9) oziroma 0,75 % daljših (KVJ10) jeklenih vlaken.	158
Preglednica 5.11: Izmerjeno (ε_{se}) in izračunano (ε_{sm}) celotno krčenje vlaknastega visokotrdnega betona z vsebnostjo 1,00 % daljših (KVJ11) oziroma 2,00 % daljših (KVJ13) jeklenih vlaken.	159
Preglednica 6.1: Vrednosti parametrov g in h	174
Preglednica 6.2: Izmerjeno in numerično simulirano lezenje preiskovanega betona normalne trdnosti brez vlaken (KNVJ1) in vlaknastega betona z 0,50 % krajših jeklenih vlaken (KNVJ6).....	176
Preglednica 6.3: Izmerjeno in numerično simulirano lezenje vlaknastega betona z 1,00 % (KNVJ7) oziroma 1,50 % krajših jeklenih vlaken (KNVJ8).	177
Preglednica 6.4: Izmerjeno in numerično simulirano lezenje vlaknastega betona z 2,00 % krajših jeklenih vlaken (KNVJ9).....	178

LIST OF TABLES

Table 2.1: Recommended granulation of aggregate for steel fibre reinforced concrete (ACI Committee 544).....	4
Table 2.2: Groups of steel fibres regarding their production (SIST EN 14889-1-2006)	10
Table 2.3: Groups of polypropylene fibres regarding their production (SIST EN 14889-2-2006).....	10
Table 4.1: Properties of fine sand (producer: Termit Moravče), (Irma, d. o. o., 14.10. 2004).....	24
Table 4.2: Properties of stone aggregate from Separation Kresnice (Igmata d.d., 16.2. 2009).....	24
Table 4.3: Mineralogical structure of cement clinker	25
Table 4.4: Chemical composition with physical and chemical properties of cement CEM II/A-S 42.5R	25
Table 4.5: Basic properties of antikorodin.....	26
Table 4.6: Chemical composition with physical and chemical properties of mikrosilika (TKK Serpenica)	26
Table 4.7: Properties of used steel fibres (IRMA d.d., 2005 in IRMA d.d., 2006)	27
Table 4.8: Properties of used polypropylene fibres (Grace Krenit)	27
Table 4.9: High performance steel fibre reinforced concrete with different content of steel fibres	29
Table 4.10: High performance fibre reinforced concrete compositions with different content of polypropylene fibres	30
Table 4.11: Water content in moistened polypropylene fibres.....	31
Table 4.12: Specimens of normal strength fibre reinforced concrete cured 24 hours after casting	32
Table 4.13: Specimens of normal strength fibre reinforced concrete, that were 24 hours after casting covered with polyethylene sheet and was further on for 6 days cured in water.....	32
Table 4.14: Average value and standard deviation of measured deformations and early autogenous shrinkage of composite with different content of steel fibres in % at age t	38
Table 4.15: Average value and standard deviation shrinkage of composite with different content of steel fibres in % at age t	39
Table 4.16: Average and standard deviation of measured deformations and early autogenous shrinkage of fibre reinforced concrete with different content of polypropylene fibre in % at time t	66
Table 4.17: Average value and standard deviation shrinkage of composite with different content of polypropylene fibre in % at the age t	67
Table 4.18: Shrinkage and creep of normal strength steel fibres reinforced concrete in % at time t	124
Table 5.1: Value of parameters a_m , b_m and c_m	140
Table 5.2: Measured (ϵ_{se}) and calculated (ϵ_{sm}) total shrinkage of fibre reinforced concrete with 0.50 % of longer (KNJ2) or 1.00 % of longer (KNJ3) steel fibres.	142

Table 5.3: Measured (ε_{se}) and calculated (ε_{sm}) total shrinkage of fibre reinforced concrete with 2.00 % of longer (KNJ4) or 0.50 % of shorter (KNJ5) steel fibres.	143
Table 5.4: Measured (ε_{se}) and calculated (ε_{sm}) total shrinkage of fibre reinforced concrete with 1.00 % of shorter (KNJ6) or 2.00 % of shorter (KNJ7) steel fibre.....	144
Table 5.5: Value of parameters e_v and f_v	153
Table 5.6: Value of total shrinkage of examined high strength concrete without fibres (KVJ1) and fibre reinforced high strength concrete with 0.25 % of shorter steel fibres obtain with experimental measurements and from proposed numerical procedure.	154
Table 5.7: Measured (ε_{se}) and calculated (ε_{sm}) total shrinkage of fibre reinforced high strength concrete with 0.50 % of shorter (KVJ3) or 0.75 % of shorter (KVJ4) steel fibres.....	155
Table 5.8: Measured (ε_{se}) and calculated (ε_{sm}) total shrinkage of fibre reinforced high strength concrete with 1.00 % of shorter (KVJ5) or 1.50 % of shorter (KVJ6) steel fibres.....	156
Table 5.9: Measured (ε_{se}) and calculated (ε_{sm}) total shrinkage of fibre reinforced high strength concrete with 2.00 % of shorter (KVJ7) or 0.25 % of longer (KVJ8) steel fibres.....	157
Table 5.10: Measured (ε_{se}) and calculated (ε_{sm}) total shrinkage of fibre reinforced high strength concrete with 0.50 % of longer (KVJ9) or 0.75 % of longer (KVJ10) steel fibres.	158
Table 5.11: Measured (ε_{se}) and calculated (ε_{sm}) total shrinkage of fibre reinforced high strength concrete with 1.00 % of longer (KVJ11) or 2.00 % of longer (KVJ13) steel fibres.	159
Table 6.1: Value of parameters g and h	174
Table 6.2: Measured and numerical simulated creep of examine normal strength concrete (KNVJ1) and fibre reinforced concrete with 0.50 % short steel fibre (KNVJ6).....	176
Table 6.3: Measured and numerically simulated creep of examined fibre reinforced concrete with content of 1.00 % (KNVJ7) or 1.50 % of shorter steel fibres (KNVJ8).....	177
Table 6.4: Measured and numerically simulated creep of examined fibre reinforced concrete with content of 2.00 % of shorter steel fibres (KNVJ9).....	178

1 UVOD

Beton je zaradi velike tlačne trdnosti, možnosti poljubnega oblikovanja konstrukcij, velike trajnosti, majhnega vzdrževanja in razmeroma nizke cene eden izmed najbolj uporabljenih gradbenih materialov. Kljub slabostim, kot so nizka natezna, upogibna, strižna in udarna trdnost ter krčenje in lezenje z različnimi tehničnimi ukrepi, lahko njegove pomanjkljivosti občutno ublažimo. Zlasti trdnost in duktilnost, v manjši meri pa tudi nekatere druge lastnosti betona, lahko izboljšamo z mikroarmiranjem z vlakni anorganskega ali pa tudi organskega izvora.

V večini primerov tak način ojačanja betona ne more nadomestiti statično potrebne armature, vendar lahko zaradi tridimenzionalnega učinka, približno enakomerno razpršenega mikroarmiranja po celotni prostornini betonske mase, betonu zagotavlja občutno povečanje natezne trdnosti, duktilnosti, odpornosti proti udarcem in termičnim šokom ter povečanje strižne trdnosti.

Vlaknasta mikroarmatura se uporablja zlasti za cevi, različne druge polizdelke, panele, talne plošče in za elemente, za katere se zahteva veliko odpornost proti obrusu. Vlaknasti beton je običajen beton, ki poleg cementa Portland, vode, drobnega in grobega agregata vsebuje še vlaknasto armaturo. V svetu uporabljajo vlakna različnih oblik in dimenzij, narejena iz jekla, plastike, stekla ali naravnih materialov.

Pospešen razvoj vlaknastega betona z uporabo primernih vlaken se je začel v šestdesetih letih prejšnjega stoletja. Opravljenih je bilo precej eksperimentalnih raziskav mehanskih lastnosti vlaknastih betonov normalne trdnosti. Znanih eksperimentalnih raziskav reoloških lastnosti vlaknastih betonov, ki trajajo daljši čas, pa je bistveno manj. Še največ znanih tovrstnih raziskav se nanaša na krčenje vlaknastih betonov normalne trdnosti zaradi sušenja (Balaguru in Shah 1992, Swamy in Stavrides 1975, Kovler in Bentur 1997, Chaun in Young 1990). Rezultatov eksperimentalnih raziskav avtogenega in celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti pri različni vsebnosti jeklenih in polipropilenskih vlaken (Kamen 2006 ter Paillere idr. 1989) pa je v strokovni literaturi zelo malo. Pri betonih visoke trdnosti je pravilna ocena avtogenega dela krčenja, ki predstavlja velik del celotnega krčenja betona, bistvenega pomena.

Rezultatov raziskav zgodnjega avtogenega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti v prvih 24 urah po vgraditvi betona v literaturi nismo zasledili. Prav tako v strokovni literaturi ni veliko podatkov o notranji negi kompozitnega betona z dodano vlaknasto armaturo. V okviru naših eksperimentalnih raziskav krčenja vlaknastih visokotrdnih betonov z dodanimi navlaženimi polipropilenskimi vlakni je predstavljen eden izmed možnih načinov notranje nege kompozitnega betona. Izsledki naših eksperimentalnih raziskav zgodnjega in celotnega avtogenega krčenja vlaknastega betona z različno vsebnostjo jeklenih in polipropilenskih vlaken predstavljajo pomembne dopolnitve sorazmerno skromne baze podatkov o krčenju vlaknastih betonov visoke trdnosti.

Podatkov o eksperimentalnih raziskavah lezenja vlaknastih betonov normalne trdnosti z različno vsebnostjo jeklene vlaknaste armature (Mangat in Azari 1986, Chern in Young 1989, ACI Committee 544.4R-88) je v strokovni literaturi sorazmerno malo, pa še ti se med seboj ne ujemajo. Medtem ko iz

poročila ACI Committee 544.4R-88 sledi, da je lezenje vlaknastega betona približno enako lezenju betona brez dodane vlaknaste armature, pa raziskovalci Mangat in Azariji (1986) ter Chern in Young (1989) ugotavljajo, da je lezenje kompozita, ki je mikroarmiran z jeklenimi vlakni, manjše od lezenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature. S svojimi eksperimentalnimi raziskavami lezenja vlaknastih betonov normalne trdnosti smo raziskovali vpliv različne vsebnosti jeklenih vlaken na lezenje mikroarmiranega kompozita normalne trdnosti.

V standardih ni posebnih podatkov o reoloških lastnostih mikroarmiranih vlaknastih betonov visoke in normalne trdnosti. V strokovni literaturi pa obstaja nekaj praktičnih priporočil in izkustvenih enačb, ki temeljijo na maloštevilnih eksperimentalnih raziskavah. V okviru svojih eksperimentalnih raziskav smo raziskovali lezenje vlaknastega betona normalne trdnosti z različno vsebnostjo daljših in krajših jeklenih vlaken. Meritve lezenja kompozita smo izvajali pri konstantni trajni tlačni napetosti preskušancev $\sigma_c = 10$ Mpa, kar predstavlja 22 % maksimalne tlačne trdnosti kompozita. Rezultati naših eksperimentalnih raziskav lezenja mikroarmiranega betona, ki so bile opravljene v okviru te disertacije, predstavljajo ustrezen izviren prispevek k vedenju o reoloških lastnostih vlaknastih betonov.

Na podlagi eksperimentalnih rezultatov krčenja in lezenja kompozita smo ustrezno modificirali v literaturi dosegljive predloge numeričnih modelov za napovedovanje krčenja in lezenja vlaknastih betonov visoke in normalne trdnosti. V poglavju *Lastnosti vlaknastih betonov* so predstavljene osnovne značilnosti in sestavine vlaknastih betonov, pri čemer je posebno poudarjen vpliv jeklene in polipropilenske vlaknaste armature na lastnosti kompozita.

V poglavju *Reološke lastnosti vlaknastih betonov* so najprej predstavljene osnovne značilnosti časovnih deformacij lezenja in krčenja vlaknastih betonov. Na podlagi rezultatov tujih raziskovalcev je predstavljen vpliv jeklene in polipropilenske vlaknaste armature na časovni razvoj krčenja in lezenja vlaknastih betonov visoke in normalne trdnosti. Pri vlaknastih betonih visoke trdnosti je posebna pozornost namenjena vplivu vlaknaste armature na avtogeno krčenje kompozita, pri betonih normalne trdnosti pa vplivu mikroarmature na krčenje kompozita zaradi sušenja.

Potek eksperimentalnih raziskav krčenja in lezenja vlaknastih betonov je prikazan v poglavju *Eksperimentalne raziskave*. Pri tem je najprej opisana zasnova eksperimentalnih raziskav, podan je tudi pregled uporabljenih materialov, vključno z njihovimi razmerji v preiskovanih vlaknastih betonih visoke in normalne trdnosti. V nadaljevanju pa je opisan postopek meritve zgodnjega avtogenega in celotnega krčenja vlaknastega betona visoke in normalne trdnosti. V osrednjem delu poglavja so prikazani rezultati meritev krčenja vlaknastih betonov visoke in normalne trdnosti. Krčenje vlaknastih betonov visoke trdnosti pri različni vsebnosti jeklenih in polipropilenskih vlaken je prikazano v grafični obliki in v preglednicah. Pri vlaknastih visokotrdnih betonih z dodanimi jeklenimi vlakni je grafično prikazan vpliv dolžine pri isti vsebnosti in vpliv vsebnosti daljših in krajših jeklenih vlaken na zgodnje avtogeno krčenje in na časovni razvoj celotnega krčenja vlaknastega betona. Za vlaknaste betone visoke trdnosti z dodanimi polipropilenskimi vlakni je prikazana primerjava vpliva suhih in predhodno navlaženih polipropilenskih vlaken, če je njihova vsebnost enaka, ter vpliv vsebnosti tako predhodno navlaženih kakor tudi suhih polipropilenskih vlaken na zgodnje avtogeno krčenje in na časovni razvoj celotnega krčenja preiskovanih kompozitov. Dobljene eksperimentalne rezultate krčenja vlaknastih betonov visoke trdnosti smo primerjali z dosegljivimi rezultati drugih

raziskovalcev. Na podlagi analize in primerjave naših rezultatov meritev krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z dodanimi jeklenimi in polipropilenskimi vlakni so podane ustrezne ugotovitve. Sledijo rezultati meritev avtogenega in celotnega krčenja različno negovanih preskušancev iz vlaknastih betonov normalne trdnosti pri različnih vsebnostih daljših in krajših jeklenih vlaken. Rezultate svojih meritev smo primerjali z rezultati drugih raziskovalcev. V zaključnem delu poglavja so predstavljeni še rezultati meritev lezenja vlaknastega betona normalne trdnosti pri različnih vsebnostih daljših in krajših jeklenih vlaken. Lastne eksperimentalne rezultate lezenja smo primerjali z dostopnimi rezultati meritev lezenja vlaknastega betona drugih raziskovalcev in z rezultati meritev lezenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature.

V poglavju *Numerično modeliranje celotnega krčenja vlaknastih betonov normalne in visoke trdnosti* so predstavljeni nekateri numerični modeli za določitev celotnega krčenja vlaknastih betonov normalne in visoke trdnosti pri različni vsebnosti jeklene vlaknaste armature. Predlagana sta numerična modela za napovedovanje časovnega razvoja celotnega krčenja vlaknastega betona normalne in visoke trdnosti. Predlagana numerična modela smo na podlagi svojih meritev celotnega krčenja vlaknastega betona normalne in visoke trdnosti pri različnih vsebnostih daljših in krajših jeklenih vlaken razvili z modifikacijo ustreznih predlogov tujih raziskovalcev.

V poglavju *Numerično modeliranje lezenja vlaknastih betonov normalne trdnosti* so najprej predstavljeni nekateri numerični modeli za določitev lezenja vlaknastih betonov normalne trdnosti pri različni vsebnosti jeklenih vlaken. Na koncu poglavja je predstavljen izboljššan numerični model za napoved časovnega razvoja lezenja vlaknastega betona normalne trdnosti, ki smo ga določili z modifikacijo predlogov tujih raziskovalcev, na podlagi svojih rezultatov meritev lezenja vlaknastega betona normalne trdnosti.

V *Zaključku* so prikazane bistvene ugotovitve o vplivu različne dolžine, vsebnosti in vrste vlaken na velikost in časovni potek avtogenega in celotnega krčenja ter krčenja zaradi sušenja vlaknastega betona normalne in visoke trdnosti. Prikazan je tudi vpliv dolžine in vsebnosti jeklene vlaknaste armature na lezenje vlaknastega betona normalne trdnosti.

V poglavju *Viri* je navedena uporabljena literatura.

2 SPLOŠNO O VLAKNASTIH BETONIH

2.1 Lastnosti vlaknastega betona

Vlaknasti beton je beton, ki poleg drugih sestavnih materialov vsebuje še jeklena ali katera druga vlakna, katerih prostorninski delež znaša najmanj 0,1 %. Količina cementa se pri projektiranju vlaknastega betona izbere na podlagi zahtevane tlačne trdnosti in drugih zahtevanih lastnosti kompozita. Agregat, ki ga uporabljamo za običajne betone brez dodanih vlaken, je primeren tudi za vlaknaste betone. Zrnastni sestav agregata vlaknastega betona pomembno vpliva na učinkovitost vgrajenih vlaken in na vgradljivost kompozita. Z večanjem deleža grobega agregata se poveča tlačna trdnost in zmanjša krčenje, poslabša pa vgradljivost kompozita. Pri projektiranju vlaknastega betona je zaradi lažje vgradljivosti priporočena uporaba večjega prostorninskega deleža drobnega agregata (Balaguru in Shah 1992). Swamy (1975) navaja, da agregat v vlaknastem betonu vpliva na dimenzijsko stabilnost cementnega kamna, ki prenaša napetosti zaradi zunanje obremenitve na cementno matrico. Za beton, mikroarmiran z jeklenimi vlakni ACI Committee 544.4R-88, priporoča zrnastost agregata, ki je podana v preglednici 2.1.

Preglednica 2.1: Priporočena zrnastost agregata za vlaknasti beton z jeklenimi vlakni (ACI Committee 544)

Table 2.1: Recommended granulation of aggregate for steel fibre reinforced concrete (ACI Committee 544)

velikost odprtin	PRESEJEK SKOZI SITO [%]		
[mm]	PREMER NAJVEČJEGA ZRNA		
	$D_{\max} = 10 \text{ mm}$	$D_{\max} = 13 \text{ mm}$	$D_{\max} = 19 \text{ mm}$
51	100	100	100
38	100	100	100
25	100	100	100
19	100	100	94–100
13	100	93–100	70–88
10	96–100	85–96	61–73
5	72–84	58–78	48–56
2,4	46–57	41–53	40–47
1,1	34–44	32–42	32–40
0,6	22–33	19–30	20–32
0,3	10–18	8–15	10–20
0,15	2–7	1–5	3–9
0,08	0–2	0–2	0–2

Grobi agregat za izdelavo vlaknastih betonov ima lahko normalno (gramoz), majhno ali pa veliko težo. Na kakovost in ekonomičnost konstrukcij iz vlaknastega betona pomembno vplivata tudi mešanje in vgrajevanje oziroma zgoščevanje kompozita. Po ACI Committee 544.4R-88 je strojna oprema, ki je primerna za vgrajevanje klasičnega betona, primerna tudi za vgrajevanje vlaknastega betona. R. Swamy (1974) zaradi lažjega vgrajevanja za vlaknaste betone, odvisno od geometrije in prostorninskega deleža vlaken, priporoča prostorninski delež cementne paste med 35 % in 45 %. Za

betone brez dodane vlaknaste armature pa prostorninski delež cementne paste znaša med 25 % in 35 %.

Vsebnost vode v betonski mešanici pomembno vpliva na hidratacijo cementa in na tlačno trdnost kompozita. Z večanjem vodo-cementnega razmerja tlačna trdnost kompozita pada, medtem ko se z manjšanjem tega razmerja povečuje. Vodo-cementno razmerje kompozitne betonske mešanice vpliva tudi na obstojnost kompozita. Majhna vrednost razmerja je značilna za betone visoke trdnosti.

Vgradljivost kompozitov visoke trdnosti je zaradi manjšega vodo-cementnega razmerja slabša od vgradljivosti kompozita običajne trdnosti z enako vsebnostjo vlaken. Vlakna so osnovna komponenta vlaknastega betona in pomembno vplivajo na lastnosti kompozita. Skupaj z agregatom predstavljajo večinski prostorninski delež kompozitne betonske mešanice. Za doseganje potrebne vgradljivosti je pri visokotrdnih vlaknastih betonih nujna uporaba superplastifikatorjev.

Vlakna za vlaknaste betone so lahko jeklena, steklena, karbonska, polipropilenska ali naravna. Njihova učinkovitost pa je močno odvisna tudi od adhezijskega stika med vlakni in cementno pasto, ki je v veliki meri pogojena s površino, geometrijo in obliko vlaken. Prečni prerez vlaken je lahko okrogel, kvadraten ali pa nepravilen. Osnovna geometrijska značilnost vlaken je razmerje med dolžino in nadomestnim premerom. Običajno uporabljena vlakna v vlaknastih betonih imajo to razmerje med 30 in 100. Glede na obliko pa jih delimo na ravna, zakrivljena, vlečena in taljena vlakna.

Primeren prostorninski delež vlaken v vlaknastem betonu je odvisen od načina vgrajevanja, zmožnosti mešalca ter od želenih mehanskih in reoloških lastnosti strjenega kompozita. Balaguru in Shah (1992) navajata, da je optimalni delež jeklenih vlaken v vlaknastih betonih med 0,4 % in 2 % prostornine betona. Za betonske kompozite z dodanimi polipropilenskimi vlakni pa različni avtorji v strokovni literaturi navajajo, da optimalen prostorninski delež polipropilenskih vlaken znaša med 0,06 % in 0,5 %. Balaguru in Shah (1992) ugotavljata, da se z večanjem vsebnosti vlaken v kompozitu poveča nevarnost segregacije in lokalnih gnezd v kompozitu. Poleg tega na oblikovanje gnezd v kompozitu vplivata tudi prostorninski delež grobega agregata in geometrija vlaken. Vlaknasti betoni z daljšimi vlakni so bolj podvrženi nastanku gnezd kot vlaknasti betoni z enako vsebnostjo krajših vlaken.

Stično območje med vlakni in cementno matrico

Swamy (1975) ugotavlja, da stično območje med vlakni in cementno matrico, kot najšibkejši del sistema, pomembno vpliva na mehanske in reološke lastnosti vlaknastega betona. Vpliv vlaknaste armature na lastnosti kompozita pa je po njegovem mnenju odvisen zlasti od količine, geometrije, vrste, površine, togosti, trdnosti in smeri oziroma poteka vlaken. V začetnem obdobju, ko je cementna matrica še homogena in nerazpokana, je vpliv dodanih vlaken na lastnosti kompozita drugačen kot pozneje, ko se zaradi sušenja v cementni matrici pojavijo razpoke. Na začetku vezanja cementa se v betonu pojavijo napetosti, ki se lahko po določenem času prek enakomerno razporejenih vlaken razporedijo po celotni prostornini kompozita. Prenos napetosti iz cementne matrice na vlakna je odvisen zlasti od površinskih značilnosti vlaken in od sprijemnih napetosti med cementno matrico in

vlakni. Iz rezultatov tujih eksperimentalnih raziskav sprijemnih napetosti med vlakni in cementno matrico (Balaguru in Shah, 1992) je razvidno, da potek sprijemnih napetosti med vlakni in cementno matrico vzdolž dolžine vlaken ni linearen. Pred pojavom razpok so sprijemne napetosti linearne, po pojavu razpok pa nelinearne.

Ko natezna napetost betona prekorači natezno trdnost cementne matrice, se v vlaknastem betonu pojavijo razpoke. To je zvezen pojav, ki je odvisen od učinka, vrste, vsebnosti in dolžine vlaken. Dodana vlakna v vlaknastem betonu prenašajo obtežbo prek nastalih razpok. Pri natezni porušitvi vlaknastega betona se krajša vlakna izpulijo, daljša pa pretrgajo (Balaguru in Shah 1992). Swamy (1975) navaja, da so betoni z dodanimi daljšimi jeklenimi vlakni bolj duktilni kot betoni brez dodanih vlaken. Glede na način porušitve vlaknastega betonskega kompozita se v strokovni literaturi uporablja posebna lastnost vlaken, ki jo imenujejo kritična dolžina. To je dolžina vlaken, ki omogoča prenos sile brez pretrganja vlakna. Skazlić in Bjegović (2004) sta proučevala vpliv kombinacije jeklenih in polipropilenskih vlaken na pojav razpok v svežem in strjenem vlaknastem betonu. Ugotovila sta, da so polipropilenska vlakna zaradi nizkega modula elastičnosti učinkovitejša, zlasti pri omejevanju razpok v svežem kompozitnem betonu. Jeklena vlakna pa so zaradi višjega modula elastičnosti in sposobnosti sidranja v betonsko maso učinkovitejša pri zmanjšanju razpok v strjenem vlaknastem betonu.

Balaguru in Shah (1992) navajata, da je vlaknasti beton duktilen, če se pri porušitvi kompozita pod vplivom natezne osne obremenitve vlakna ne pretrgajo, ampak izvlečejo iz betona. Pri uporabi jeklenih vlaken, ki so že sama po sebi duktilna, pa pričakujemo duktilno porušitev kompozita tudi v primeru, ko je ta posledica izpuljenja vlaken pod vplivom natezne osne obremenitve. Pri uporabi neduktilnih steklenih vlaken pri porušitvi kompozita pod vplivom natezne osne obremenitve pričakujemo, da se bodo vlakna pretrgala oziroma da se bo nekoliko porušil kompozit. Iz poznavanja lastnosti betona in dodanih vlaken lahko sklepamo o lastnostih kompozita.

Zgoščenost vlaknastega betona

Eden izmed pomembnih ciljev pri projektiranju in pripravi vlaknaste betonske mešanice je zagotovitev enakomerne razporeditve vlaken po kompozitu in preprečitev oblikovanja gnezd zaradi vlaknaste armature. S povečevanjem vsebnosti vlaken in količine grobega agregata se sposobnost zgostitve kompozita zmanjšuje. Ta pa je odvisna tudi od premera in dolžine ter od oblikovnega koeficienta vlaken, ki je določen z razmerjem med dolžino in nadomestnim premerom vlakna. Swamy (1975) na podlagi eksperimentalnih raziskav ugotavlja, da je vpliv premera vlaken na sposobnost zgostitve kompozitne betonske mešanice pomembnejši kot njihova dolžina. Vlaknaste betone s tanjšimi vlakni je lažje zgostiti kot vlaknaste betone z debelejšimi vlakni. Swamy (1974) navaja, da so vlaknasti betoni z dodanimi vlakni oblikovnega koeficienta med 80 in 120 pri vsebnosti vlaken do 2 % primerno vgradljivi.

Vgradljivost vlaknastega betona je odvisna tudi od trajanja in načina mešanja. Za ustrezno zgostitev vlaknastega betona je potrebno več energije kot za zgostitev betona brez vlaken. Vlakna se pri procesu zgoščevanja vrtijo in naključno usmerjajo, kar vpliva na mehanske in reološke lastnosti kompozita.

Izkazalo se je, da je način zgoščevanja kompozita z notranjimi vibratorji bolj praktičen kot z zunanji. Rezultati eksperimentalnih raziskav tlačne trdnosti kompozitne mešanice z velikim deležem dodanih vlaken so pokazali (Swamy, 1975), da nezadostna oziroma neustrezna zgoščenost vlaknastega kompozita odločilno vpliva na njegovo tlačno trdnost.

Vpliv vlaken na mehanske lastnosti kompozita

Vlaknasti beton ima v primerjavi z betonom brez vlaknaste armature večjo natezno trdnost in odpornost proti udarni obtežbi, večjo sposobnost absorbiranja energije in je odpornejši proti utrujanju. Navedene lastnosti vlaknastih betonov so odvisne zlasti od količine in vrste uporabljenih vlaken. Cementna matrica vlaknastega betonskega kompozita je zaradi vsebovanih vlaken nekoliko poroznejša. Vlakna v vlaknastem betonu armirajo cementno matrico.

Vpliv jeklenih vlaken na mehanske lastnosti kompozita

Krčenje posameznih elementov betonskih konstrukcij zaradi postopne gradnje konstrukcij poteka v časovnem zamiku, kar v konstrukcijah povzroča ustrezne notranje napetosti. Ko nastale natezne napetosti v betonu prekoračijo njegovo natezno trdnost, se pojavijo razpoke. Širina in število razpok se pri konstantni obtežbi s časom povečujeta. Swamy idr. (1979) navajajo, da dodana vlakna vplivajo na izboljšanje natezne trdnosti in togosti kompozita in tudi na bolj umirjeno in enakomernejše nastajanje razpok. Vlakna v vlaknastem betonu prečkajo razpoke in delujejo kot natezne vezi, ki ovirajo širjenje in odpiranje razpok, ter omogočajo bolj duktilno obnašanje kompozita. Pri procesu krčenja vlaknastega betona vlakna prenašajo natezne sile, ki se pojavijo zaradi krčenja kompozita prek nastalih razpok, kar povzroči enakomeren prenos natezних napetosti vzdolž kompozita. Če so natezne sile, ki jih vlakna prenašajo prek razpok, manjše od natezne trdnosti nearmiranega betona se v kompozitu razpoke ne bodo pojavile. Če pa so natezne sile, ki jih vlakna prenašajo prek razpok, večje od natezne trdnosti kompozita, se bodo v nerazpokanem delu kompozita razpoke pojavile. Balaguru in Shah (1992) navajata, da se z večanjem deleža vlaken v betonu večja število in manjša širina razpok po prostornini kompozita. Jeklena vlakna, vključena v beton, so pri zmanjšanju števila razpok zaradi krčenja v kompozitu učinkovitejša kot polipropilenska vlakna, in sicer zaradi večje togosti jeklenih vlaken, ki omogočajo prenos večjih natezних sil prek razpok kompozita (Balaguru in Shah, 1992).

Johnston (1982) navaja, da so zakrivljena jeklena vlakna pod vplivom osne natezne obremenitve odpornejša proti izvlečenju in duktilnosti kot ravna jeklena vlakna enake dolžine. Swamy (1986) navaja, da je kompozit, mikroarmiran z jekleno vlaknasto armaturo, za 10 % do 15 % odpornejši proti upogibni obremenitvi. V svojem poznejšem delu pa Swamy (1994) navaja, da so mehanske in fizikalne lastnosti vlaknastega betona odvisne od prostorninskega deleža vlaken, njihove geometrije in poteka, stika med matrico in vlaknom, lastnosti osnovne betonske mešanice, prostornine grobega agregata in načina mešanja.

Swamy idr. (1979) ter Balaguru in Shah (1992) navajajo, da imajo vlaknasti betoni v primerjavi z betoni brez dodane vlaknaste armature povečano duktilnost. Na stopnjo povečanja duktilnosti pomembno vplivajo materialne značilnosti in prostorninski delež vlaken v kompozitu. Vlaknastim kompozitom z jeklenimi vlakni se duktilnost najbolj poveča (Balaguru in Shah 1992, Swamy 1975 in Swamy 1974).

Swamy idr. (1979) navajajo, da se z jekleno vlaknasto armaturo povečata uklonska odpornost in sposobnost kompozita, da absorbira energijo. Zvezna in naključna porazdelitev vlaken po kompozitu zagotavlja povečano togost kompozita v poljubni smeri, v nasprotju z betonom, armiranim z jekleno palično armaturo, kar s povečanjem togosti pomembneje prispeva le v dveh med seboj pravokotnih smereh (Swamy, 1974).

Iz poročila Ameriškega komiteja ACI 544.1R-96 izhaja, da se elastični modul in Poissonov količnik kompozita s spreminjanjem prostorninskega deleža jeklenih vlaken med 0 % in 2 % ne spreminjata. Priporočajo, da se za vlaknaste betone s prostorninskim deležem jeklenih vlaken do 2 % prostornine kompozita upošteva kar elastični modul primerjalnega betona brez dodane vlaknaste armature.

Na podlagi eksperimentalnih raziskav tlačne trdnosti vlaknastih betonov (Houde idr. 1987 in ACI 544.1R-96) ugotovljajo, da se tlačna trdnost kompozita zaradi jeklene vlaknaste armature razmeroma malo poveča.

Vpliv polipropilenskih vlaken na mehanske lastnosti kompozita

Vpliv polipropilenskih vlaken na mehanske lastnosti vlaknastega betonskega kompozita je odvisen zlasti od značilnosti povezave med vlakni in cementno matrico. Polipropilen ne vpija vode in je kemijsko inerten, kar preprečuje možnost oblikovanja kemijske vezi v stičnem območju. Fizikalna povezava med vlakni in cementno pasto v vlaknastem betonu je močnejša od povezave med agregatom in cementno pasto v betonu brez vlaken. Za vlaknaste betone z dodanimi polipropilenskimi vlakni je značilno, da cementna pasta ovije vlakno.

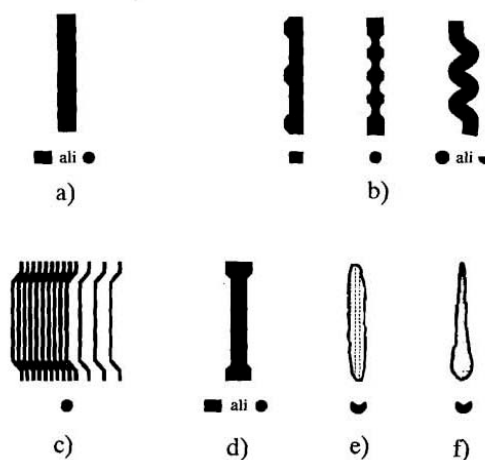
Konsistenca sveže betonske mešanice z dodanimi polipropilenskimi vlakni se lahko določa z metodo poseda ali razleza, pri tem pa je po navedbah (Sachan idr. (1988) in Laskar (2009)) metoda razleza primernejša. Balaguru in Shah (1992) navajata, da dodana polipropilenska vlakna pri različnih prostorninskih deležih vlaken, dodanih osnovni betonski mešanici, tako rekoč ne vplivajo na tlačno trdnost betona, bistveno pa se povečajo porušne deformacije pri osni tlačni porušni obremenitvi. Izboljšanje duktilnosti kompozita je pri prostorninskem deležu vlaken do 0,1 % tudi zanemarljivo majhno. Obdelavnost svežega kompozita s polipropilenskimi vlakni, ki znaša 2 % prostornine, je že občutno slabša, posledica tega pa je večji delež zračnih por v otrdelem kompozitu. V tem primeru neugodni učinek povečane količine zračnih por prevlada nad ugodnim učinkom vlaken na tlačno trdnost kompozita, ki je zaradi tega manjša od tlačne trdnosti primerjalnega betona brez vlaken.

Na podlagi rezultatov eksperimentalnih raziskav elastičnega modula vlaknastega betona z dodanimi polipropilenskimi vlakni raziskovalci Ramakrishnan idr. (1987) ter Nagabhushanam idr. (1989) navajajo, da dodana polipropilenska vlakna pri prostorninskem deležu vlaken 0 % in 2 % prostornine kompozita ne vplivajo na elastični modul kompozita.

2.2 Vrsta in lastnosti uporabljenih vlaken v kompozitu

Jeklena vlakna

Jeklena vlakna so izdelana iz običajnih ali iz nerjavečih jekel. Modul elastičnosti trjavečih jeklenih vlaken je približno 200 GPa, nerjavečih pa 170 GPa. Natezna trdnost jeklenih vlaken je med 345 MPa in 1380 MPa. Prečni prerez jeklenih vlaken je pravokoten, krožen ali drugačen. Dolžina vlakna je navadno manjša od 75 mm. Razmerje med dolžino in nadomestnim premerom vlaken se giblje med 20 in 100 (ACI 544.1R-96). Vlakna glede na obliko delimo na ravna, mehansko deformirana, zakrivljena na konceh in na vlakna s spremenljivim prerezom vzdolž dolžine vlaken (slika 2.1). V okolju z visoko temperaturo se zahteva uporaba nerjavečih jeklenih vlaken (ACI 544.1R-96). Za zagotovitev primerne načina vgrajevanja in zgoščenosti vlaknastega betona je priporočena prostorninska vsebnost jeklenih vlaken med 0,25 % in 1,50 % kompozita (ACI 544.1R-96). Okrogla in ravna jeklena vlakna (slika 2.1a) dobimo z rezanjem tanke žice, ki ima premer med 0,25 mm in 1 mm, na koščke. Ploščata in ravna jeklena vlakna se izdelujejo z rezanjem tanke pločevine debeline med 0,15 in 0,41 mm ali pa s sploščitvijo žice. Ta vlakna so široka med 0,25 in 1 mm (slika 2.1a). Mehansko deformirana vlakna so izdelana tako, da je enakomerno deformirana celotna dolžina vlakna (slika 2.1b). Za zagotovitev boljše sprijemnosti med vlaknom in cementno pasto so vlakna na konceh deformirana (slika 2.1c in slika 2.1d). Nekatera vlakna izdelujejo z razvlečenjem staljene kovine. Ta vlakna imajo nepravilno oblikovano površino in prečni prerez v obliki meseca (slika 2.1f). V tujini uporabljajo tudi vlakna, ki imajo grobo nepravilno oblikovano površino (slika 2.1e).



Slika 2.1: Različni tipi jeklenih vlaken (Balaguru in Shah, 1992)
Figure 2.1: Different types of steel fibre (Balaguru and Shah, 1992)

Glede na postopek izdelave se jeklena vlakna v skladu s slovenskim standardom SIST EN 14889-1-2006 delijo v pet skupin (preglednica 2.2). Pri vseh je obvezna kontrola oblike, premaza, dimenzij, natezne trdnosti in duktilnosti.

Preglednica 2.2: Skupine jeklenih vlaken glede na način izdelave (SIST EN 14889-1-2006)

Table 2.2: Groups of steel fibres regarding their production (SIST EN 14889-1-2006)

SKUPINA I	Hladno oblikovana žica
SKUPINA II	Rezana vrv
SKUPINA III	Ločeno s topljenjem
SKUPINA IV	Mehansko rezana topljena žica
SKUPINA V	Valjana iz blokov

Polipropilenska vlakna

Pomembni mehanski lastnosti polipropilenskih vlaken predstavljata zlasti natezna trdnost, ki znaša od 310 MPa do 760 MPa, in nizek modul elastičnosti, ki znaša od 3,5 GPa do 4,9 GPa. Te lastnosti so odvisne od kemijske sestave, molekularne teže in drugih značilnosti polipropilenskih vlaken. Gostota vlaken je od 0,90 g/cm³ do 0,91 g/cm³. Debelina znaša približno 0,1 mm, dolžina pa od 12 mm do 50 mm. Lahko so ravna ali deformirana. Porušna deformacija vlakna znaša približno 15 %. Polipropilenska vlakna krožnega prečnega prereza se v skladu s slovenskim standardom SIST EN 14889-2-2006 glede na velikost premera delijo v dve skupini (preglednica 2.3).

Preglednica 2.3: Skupine polipropilenskih vlaken glede na način izdelave (SIST EN 14889-2-2006)

Table 2.3: Groups of polypropylene fibres regarding their production (SIST EN 14889-2-2006)

SKUPINA I	Premer vlaken manjši od 0,3 mm
SKUPINA II	Premer vlaken večji od 0,3 mm

Polipropilen je linearni hidrokarbonski polimer z metilno skupino, pritrjeno na vsak drugi karbonski atom verige hrbtenice. Metilna stran vpliva na kemijske lastnosti, terciarni karbonski del atoma pa omogoča predel za oksidacijo. Vse metilne skupine so na eni strani molekule in so kristalizirane v spiralo, ki reagira glede na sterilno oviro. Spremembe v smeri spirale vplivajo na kristalizacijo in prostornino polimera. Odstotek netopljivega polimera omogoča grobo merjenje kemične strukture pravilno razporejenih prostorov vzdolž verige. Z večanjem deleža pravilno razporejenih prostorov vzdolž verige s 70 % na 95 % se večja modul elastičnosti in dopustne napetosti. Raztezek pri porušitvi se s 600 % zmanjša na 50 %. Polipropilen je hidrofoben material, torej ne absorbira vode. Pri polipropilenskih vlaknih se ne pričakuje, da se bodo kemično vezala v cementno matrico, vendar do te vezave pride zaradi mehanske interakcije na stiku med vlakni in cementno matrico (Beaudoin J. J., 1990).

Proces proizvodnje vzdolžnih razcepov oziroma majhnih vlaken v polipropilenskem filmu oziroma ozkemu traku se imenuje fibrilacija. Natezni filmi ali trakovi so fibrilirani, tako da so potegnjeni prek

specialno konstruiranih valjev. Natezni trakovi (fibrili) omogočajo povezavo med polipropilenom in cementno matrico in vplivajo na lastnosti kompozita.

Molekularna teža polipropilena vpliva na njegove mehanske lastnosti. Molekularna teža komercialnega polipropilena je v območju od $M_r = 38,000\text{--}60,000$ do $M_w = 220,000\text{--}700,000$ ($M_w/M_r = 5,8$ do $11,7$). Povečanje molekularne teže vodi v zmanjšanje trdnosti in modula elastičnosti polipropilena.

Polipropilen se v betonih uporablja zato, da bi zagotovil zgodnjo trdnost in ker omogoča nadzorovan odziv na toplotne spremembe in spremembe vlage (ACI 544.1R-96). Pomembna lastnost, zaradi katere se uporablja v vlaknastih betonih, je veliko razmerje med dolžino in premerom vlaken. Ugodna lastnost polipropilena pa je tudi njegova odpornost proti kislinam in bazam (Swamy, 1994).

2.3 Napotki za določitev primerne prostorninskega deleža vlaken v betonskemu kompozitu

Projektiranje svežih vlaknastih betonov poteka enako kot projektiranje betonov brez dodane vlaknaste armature in je odvisno od namena uporabe. Vlaknasti betoni se od klasičnih razlikujejo le v pogledu obdelavnosti in po količini zajetega zraka, kar negativno vpliva na tlačno trdnost kompozita (Balaguru in Shah, 1992). Za zagotovitev enake vgradljivosti in trdnosti kompozita, kot ju ima primerjalni beton brez dodanih vlaken, sta potrebna večja količina cementa in večji delež drobnega agregata (Bokan Bosilkov, 1996).

Osnovna zahteva, ki jo je treba izpolniti pri projektiranju in vgradnji kompozita, je enakomerna porazdelitev vlaken v kompozitu. Dolga, tanka in ravna vlakna z velikim razmerjem med dolžino in premerom vlaken se v kompozitu prepletajo ali celo oblikujejo gnezda. Mehansko deformirana jeklena vlakna v kompozitu imajo boljše lastnosti sidranja v cementno pasto kot vlaknasta betonska mešanica z enako vsebnostjo ravnih jeklenih vlaken.

Priprava receptur svežega kompozita za eksperimentalne raziskave

Ko projektiramo vlaknasto betonsko mešanico, osnovni betonski mešanici dodamo še ustrezno količino vlaken. Pri pripravi recepture sveže mešanice kompozita moramo upoštevati, da dodana vlakna zmanjšajo obdelavnost kompozita in povzročajo delež zraka v njem (Balaguru in Shah, 1992). Da bi zagotovili enako obdelavnost kompozita in primerjalnega betona brez vlaknaste mikroarmature, moramo pri kompozitni mešanici, če uporabimo enako količino cementa in enako zrnastostno sestavo agregata kot pri primerjalni betonski mešanici brez vlaken, povečati vodovezivno razmerje oziroma uporabiti ustrezno količino plastifikatorja.

Pri pripravi vlaknastega betona se priporoča, da najprej dobro zmešamo izbrana vlakna in suh agregat, potem pa dodamo še cement in vodo. Trajanje mešanja je odvisno od vrste mešalnika. Swamy (1974)

navaja, da čezmerno mešanje pri nekaterih mešanica povzroča nastanek gnezd. Pri vlaknastih betonih je poraba energije med zgoščevanjem večja kot pri betonu brez vlaknaste armature.

V okviru svojih eksperimentalnih raziskav krčenja in lezenja vlaknastega betona smo se odrekli zahtevi po enaki vgradljivosti betona brez vlaknaste armature in vlaknastega betona. Recepture svežega vlaknastega betona normalne in visoke trdnosti za izdelavo preskušancev smo pripravili tako, da mešanice vlaknastega in primerjalnega betona brez vlaknaste armature vsebujejo enako količino cementa in imajo enako vodovezivno razmerje. Dodana vlakna v vlaknastem betonu pa smo upoštevali z ustreznim zmanjšanjem prostorninskega deleža agregata (Bokan Bosilkov, 1996). Enačbe, po katerih smo določali količine posameznih osnovnih materialov v betonskih mešanica, so prikazane v nadaljevanju.

Za m³ vlaknastega betona so prostorninski deleži posameznih materialov določeni z enačbo (2.1) (Bokan Bosilkov, 1996):

$$1000[dm^3] = \frac{C}{\rho_C} + \frac{V}{\rho_V} + \frac{A}{\rho_A} + \frac{V_J}{\rho_{VJ}} + \frac{V_P}{\rho_{VP}} + Z \quad (2.1)$$

kjer je:

C, V, A ... masa posameznih materialov [kg]: cement (C), voda (V), agregat (A),

ρ_C, ρ_V, ρ_A ... ustrezna gostota ali prostorninska masa [kg/dm³]

Z ... prostornina zračnih por [dm³]

V_J/ρ_{VJ} ... prostorninski delež jeklenih vlaken v betonu v dm³, izbran glede na lastnosti, ki jih želimo doseči pri vlaknastem betonu

V_P/ρ_{VP} ... prostorninski delež polipropilenskih vlaken v betonu v dm³, izbran glede na lastnosti, ki jih želimo doseči pri vlaknastem betonu

Maso agregata določimo po enačbi (2.2):

$$A = \rho_A \cdot \left(1000 - \frac{C}{\rho_C} - \frac{V}{\rho_V} - \frac{V_J}{\rho_{VJ}} - \frac{V_P}{\rho_{VP}} - Z \right) \quad (2.2)$$

Maso jeklenih vlaken določimo po enačbi (2.3):

$$V_J = k_j \cdot \rho_{VJ} \cdot 1000 \quad (2.3)$$

Maso polipropilenskih vlaken določimo po enačbi (2.4):

$$V_P = k_p \cdot \rho_{VP} \cdot 1000 \quad (2.4)$$

3 REOLOŠKE LASTNOSTI VLAKNASTIH BETONOV

Rezultatov raziskav reoloških lastnosti vlaknastih betonov je v strokovni literaturi razmeroma malo, pa še ti se med seboj ne ujemajo oziroma si delno celo nasprotujejo. Dosegljivi rezultati raziskav lezenja vlaknastih betonov so še posebno maloštevilni, pa tudi objave s področja krčenja vlaknastih betonov so v strokovni literaturi razmeroma skope in se ne ujemajo. Objav o raziskavah avtogenega krčenja vlaknastih betonov, ki predstavlja pomemben del celotnega krčenja vlaknastih betonov visoke trdnosti, v strokovni literaturi praktično ni. Uporaba vlaknastih betonov je zelo primerna zlasti za tlake v objektih, za erozijsko močno obremenjene dovodne kanale in cevovode, za izjemno požarno odporne konstrukcije in za močno dinamično obremenjene dele ali elemente konstrukcij. Poznavanje krčenja in lezenja vlaknastega betona je zaradi tega zelo pomembno za smiselno snovanje gradbenih objektov. Ugoden učinek manjšega krčenja vlaknastega betona v primerjavi s krčenjem enakovrednega betona brez vlaknaste armature je pomemben zlasti za tlake objektov z velikim tlorisom, saj zaradi neenakomernega krčenja betona predstavlja resen tehnični problem. Manjše krčenje in večja deformacijska kapaciteta kompozita zagotavljajo vgrajena vlakna, ki zmanjšajo poškodbe tlakov in omogočajo večjo medsebojno oddaljenost dilatacijskih reg, ki se jim v posebnih primerih lahko celo izognemo. Vlaknasti beton s polipropilenskimi vlakni omogoča zelo visoko stopnjo požarne odpornosti nosilnih armiranobetonskih konstrukcij iz tovrstnega vlaknastega betona. Pri povišani temperaturi, ki se pojavi v okolici površine konstrukcijskih elementov, se polimerna vlakna stalijo. Tako se ob površini ustvari paropropustna porozna struktura betona, ki omogoča izhod vodne pare oziroma preprečuje pojav visokih pornih tlakov ob površini betonskih elementov tako, da se krovni sloj betona ne odluči od notranjega dela elementa.

3.1 Krčenje vlaknastih betonov

Krčenje vlaknastega betona je odvisno od lastnosti in deležev osnovnih materialov kompozita ter od razmer v okolju. Prostorninske deformacije vlaknastega betona so posledica krčenja cementne paste med strjevanjem in sušenjem betona, ki z zmanjšano intenzivnostjo potekata zelo dolgo. Časovno zmanjšanje prostornine betona (krčenje betona), ki se pojavi zaradi porabe oziroma izhlapevanja kemično nevezane vode v betonu, ni odvisno od napetosti. Pri neenakomernem oziroma oviranem krčenju se v betonskem elementu pojavijo razpoke. Velikost in časovni potek krčenja vlaknastega betona sta odvisna od razmer v okolju, zlasti od konsistence svežega betona, od vrste in količine cementa, od vrste kamnine in zrnivosti agregata ter od vrste vsebnosti vlaknaste mikroarmature. Beton z majhno obdelavnostjo vsebuje večji delež grobega agregata kot beton z veliko obdelavnostjo, kar vpliva na zmanjšanje krčenja slabše obdelavnega betona. Neville (1995) navaja, da se s povečanjem količine grobega agregata z 71 % na 74 % pri enakem vodovezivnem razmerju krčenje betona zmanjša za 20 %. S povečevanjem prostorninskega deleža cementa pri konstantnem vodovezivnem razmerju se večja delež hidratizirane cementne paste, kar se kaže v povečanem krčenju.

S spreminjanjem relativne vlage okolja se količina vode v otrdeli cementni pasti spreminja. Vodo v cementni pasti delimo na kapilarno vodo, adsorbirano, medslajno in kemično vezano vodo.

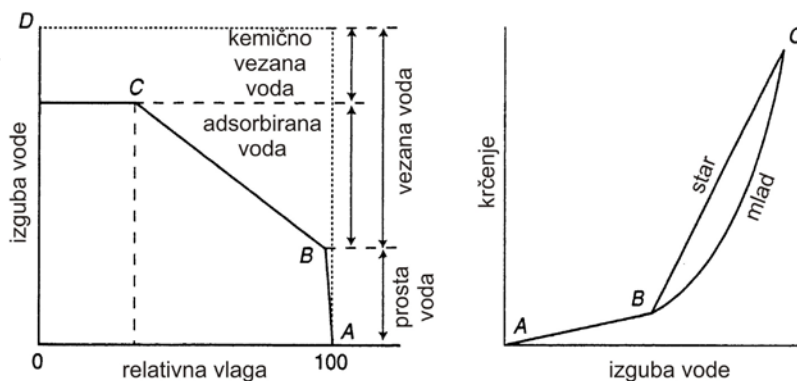
Kapilarna voda je v porah cementne paste, ki so večje od 50 Å. Predstavlja nakopičeno vodo, na katero delujejo privlačne sile trdne površine. Glede na njeno obnašanje v cementni pasti jo delimo na dva dela. Prvi del predstavlja voda v odprtinah, večjih od 50 nm, in jo imenujemo prosta voda. Z njeno odstranitvijo iz cementne paste ne povzročimo nobenih prostorninskih sprememb. Drugi del kapilarne vode pa predstavlja voda v majhnih kapilarah, velikih od 5 do 50 nm. Odstranitev te vode povzroči spremembo pornih tlakov in posledično avtogeno krčenje cementne paste.

Adsorbirana voda se nahaja v neposredni bližini površine. Pod vplivom nateznih sil se vodne molekule fizikalno adsorbirajo na površino hidratizirane cementne paste. Energija vodne molekule se z njeno oddaljenostjo od trdne površine zmanjšuje, zato se lahko večji del adsorbirane vode s sušenjem cementne paste pri relativni vlažnosti do 30 % izgubi. Posledica izgube adsorbirane vode pa je krčenje cementne paste zaradi sušenja.

Medslojna voda je voda, ki je povezana s strukturo gela kalcij-silikat-hidrat. To vodo je mogoče odstraniti samo z intenzivnim sušenjem. Ko se izgubi, se struktura gela bistveno skrči.

Kemično vezana voda je sestavni del produktov hidratacije in se pri sušenju ne izgublja (Mehta in Monteiro, 2006).

Nasičena hidratizirana cementna pasta dimenzijsko ni stabilna. Dokler cementno pasto hranimo pri 100 % vlažnosti, ni nobenih dimenzijskih sprememb. Kadar pa je cementna pasta izpostavljena okolju z relativno vlago, ki je manjša od 100 %, se voda iz nje izgublja, kar povzroči krčenje cementne paste. L'Hermite je opisal, kako je izguba vode iz cementne malte povezana z relativno vlažnostjo okolja, in razložil njen vpliv na krčenje. Ko relativna vlaga okolja pade pod 100 %, prosta voda v kapilarah cementne paste (> 50 nm) začne izhlapevati v okolico. Ker je ta voda ni vezana na trdno površino produktov hidratacije s kemično-fizikalnimi vezmi, njena izguba ne povzroča krčenja (odsek A-B na sliki 3.1). Po izgubi proste vode se z nadaljnjim sušenjem cementne paste začne proces krčenja, ki je v največji meri posledica izgube adsorbirane vode in vode v majhnih kapilarah (odsek B-C na sliki 3.1). Adsorbirana voda, ki je utesnjena v ozkem prostoru med dvema trdnima površinama, povzroča razporni tlak. Z njeno odstranitvijo iz cementne paste se razporni tlak zmanjša, površini se približata in začne se proces krčenja sistema. Na krčenje cementne paste pa vpliva tudi izguba vode iz majhnih kapilar (5–50 nm), na stene katerih delujejo natezne sile. Pri zelo ostrih razmerah sušenja pride do izločanja medslajne vode iz kalcijev-silikat-hidratnega gela.



Slika 3.1: Izguba vode in krčenje cementne malte kot posledica relativne vlage

Figure 3.1: Loss of water and shrinkage of cement mortar as a function of relative moisture loss

Mikroarmiranje betona s kratkimi, naključno usmerjenimi oziroma potekajočimi vlakni je ena izmed metod za redukcijo razpok zaradi krčenja. Vlakna v vlaknastih betonih delujejo tako, da ovirajo nastajanje in širjenje razpok. Chuan in Young (1990) navajata, da je krčenje vlaknastega betona manjše za preskušance, ki vsebujejo vlakna z višjim razmerjem med dolžino in nadomestnim premerom. Pri projektiranju vlaknastega betonskega kompozita se dolžina vlaken določa tako, da se zagotovi zahtevani prenos nateznih sil iz vlaken na kompozit. Vlakna se glede na material izbirajo tako, da se z njimi izboljšajo mehanske in reološke lastnosti vlaknasto-betonskega kompozita. Swamy idr. (1979), Paillere idr. (1989), Chuan in Young (1990), Banthia in Gupta (2006) ugotavljajo, da vlakna v vlaknastih betonskih kompozitih pomembno vplivajo na zmanjšanje krčenja kompozita glede na krčenje primerjalnega betona brez vlaken. Dolžina vlaken mora biti takšna, da vlakna prečkajo morebitne razpoke in da se ob zunanji obtežbi ne izpulijo. Za določitev dolžine vlaken je pomembna sprijemna trdnost adhezijskega stika med vlakni in matrico. Če je stik med vlakni in cementno matrico šibak, se lahko že pri majhni obtežbi vlakno izpuli iz cementne matrice. V tem primeru vlakno ne poveča togosti sistema. Če pa je stik med vlakni in matrico močan, se vlakno zaradi delovanja zunanje sile ne izpuli, ampak pretrga. V tem primeru se vlakna obnašajo kot neaktivni vključki, ki izboljšajo le mehanske lastnosti kompozita. Mehta in Monteiro (2006) navajata, da je za premoščanje številnih razpok v kompozitu treba zagotoviti veliko kratkih vlaken. Daljša vlakna pa so po njunem mnenju učinkovita pri premoščanju velikih razpok, pri večjih obtežbah. Beaudoin (1990) je predstavil računski model za določitev kritične dolžine vlaken. Model temelji na predpostavki, da so strižne napetosti vzdolž stika med vlakni in cementno matrico konstantne. Model velja tako za duktilno kot togo matrico. Na podlagi razvitega modela trdi, da se bodo vlakna izpulila, če bodo krajša od kritične dolžine vlaken, določene z modelom. Dolžina prenosa natezne obremenitve prek razpoke je v modelu določena s polovico kritične dolžine vlakna (enačba 3.1).

$$l_c = \frac{d \cdot \sigma_f}{2 \cdot \lambda} \quad (3.1)$$

Pri tem so:

- σ_f natezna trdnost vlakna
- d nadomestni premer vlakna
- λ strižna trdnost stika
- l_c kritična dolžina vlakna

Celotno krčenje vlaknastega betona delimo na *plastično*, *kemično* in *avtogeno krčenje* ter *krčenje kompozita zaradi sušenja* (Neville, 1995). Avtogeno krčenje kompozita se začne ob začetku vezanja cementa (Saje D. in Saje F., 2001) in je posledica samoizsuševanja v porah cementne matrice. Plastično krčenje kompozita se pojavi že v času, ko je kompozit še plastičen. Krčenje površinskega sloja kompozitnega elementa ovira notranji del prečnega prereza kompozitnega elementa, ki se krči manj kot površina elementa. To na površini elementa povzroča natege, v njegovi notranjosti pa ustrezne napetosti. Ko te ob površini mladega kompozitnega elementa dosežejo oziroma presežejo natezno trdnost kompozita, se pojavijo razpoke. Plastično krčenje kompozita se lahko zmanjša z ustrežno nego kompozita, s katero se nadomešča pri procesu hidratacije cementa porabljena voda. Z nego kompozita je treba zagotoviti, da se zaloga vode v kompozitu ne zmanjša pod minimum. Velikost plastičnega krčenja betona oziroma kompozita je v največji meri odvisna od količine cementa in od vode v kompozitu (Muravljov, 2000). Krčenje zaradi sušenja pa predstavlja manjšanje prostornine strjenega kompozita zaradi izhlapevanja vode iz betona v okolico.

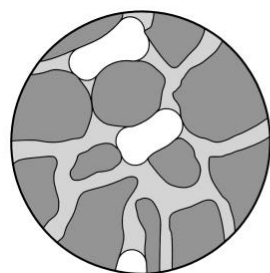
Kemično krčenje cementne paste predstavlja zmanjšanje prostornine cementne paste, ki se pojavi zaradi kemičnega vezanja vode v procesu hidratacije cementa. Nastala prostornina produktov, ki nastanejo pri kemični reakciji vode in cementa, je manjša od prostornine vhodnega cementa in vode skupaj. Glavni razlog za zmanjšanje prostornine cementne paste, v primerjavi s prostornino vode in cementa, je večja gostota kemično vezane vode v primerjavi s prosto vodo v sveži cementni pasti pred vezanjem cementa (FIB, 1999). Kemično krčenje cementne paste povzroča avtogeno krčenje kompozita.

Poleg prej navedenih vrst krčenja se pri vlaknastem betonu pojavi še krčenje zaradi karbonatizacije in temperaturno deformiranje vlaknastega betona. Pri kemični reakciji cementa in vode se v kompozitu sprošča toplota, kar povzroči povišanje temperature kompozita in njegovo deformiranje zaradi spremembe temperature. Sprememba temperature kompozita je odvisna od razmer v okolici in od sestave vlaknastega betona. Razlika temperature v notranjosti in na površini preskušanca povzroča diferencialne napetosti, ki ob površini elementa še dodatno pospešijo nastanek razpok v kompozitu. Z delovanjem CO₂ iz okolice pride v cementnem kamnu do kemične reakcije. Karbonski dioksid z vodo tvori karbonatno kislino, ki reagira s Ca(OH)₂, kar v cementnem kamnu povzroči nastanek CaCO₃, pri tem pa se sprosti voda. Hitrost napredovanja karbonatizacije cementnega kamna v notranjosti elementa je odvisna od strukture por in od njihove nasičenosti z vodo. Prodiranje karbonskega dioksida v notranjost elementa je najpočasnejše, če so pore zapolnjene z vodo. Karbonatizacija cementnega kamna poteka oziroma napreduje najhitreje v delno vlažnem kompozitu oziroma pri spremembi vlage kompozita.

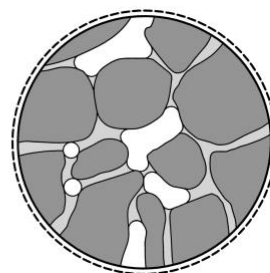
V vlaknastih betonih visoke trdnosti je zaradi majhnega vodovezivnega razmerja vsebnost vode v kompozitu sorazmerno majhna, kar povzroči manjše krčenje kompozita zaradi sušenja. Po drugi strani pa se zaradi razmeroma majhne vsebnosti vode v kompozitu v kemijskem procesu hidratacije cementa porabi tudi del kemijsko nevezane porne vode cementnega gela, kar povzroči razmeroma veliko avtogeno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti, ki predstavlja velik del celotnega krčenja kompozita. Pri vlaknastih betonih normalne trdnosti pa je zaradi večjega vodovezivnega razmerja v svežem kompozitu na razpolago dovolj nevezane vode za kemijski proces hidratacije cementa, zato je avtogeni del krčenja glede na celotno krčenje kompozita sorazmerno majhen. Swamy skupaj s sodelavci na podlagi opravljenih eksperimentalnih raziskav ugotavlja, da vlaknasta mikroarmatura v kompozitu vpliva na zmanjšanje prostega krčenja kompozita v primerjavi s krčenjem primerjalnega betona brez vlaken. Pri tem prosto krčenje kompozita predstavlja izmerjeno deformacijo preskušanca, ki ne zajema spremembe dolžine preskušanca zaradi spremembe temperature (ACI Committee 209).

Avtogeno krčenje vlaknastih betonov

Voda se pri hidrataciji porablja za tvorbo hidratacijskih produktov. S časovnim potekom hidratacije se prostornina por, nastalih pri kemičnem krčenju, večja. Po Boylovem zakonu je povečanje prostornine zaprtih por povezano z zmanjšanjem tlaka zraka v porah. Zmanjšanje tlaka posredno vpliva na sorazmerno vlažnost v porah. Ob vzpostavitvi termodinamičnega ravnovesja v porah cementne paste se najprej izloča prosta kapilarna voda, nato pa voda iz adsorpcijske ploskve stene por. Z manjšanjem adsorpcijske plasti vode na stenah por se pojavijo natezne napetosti na adsorpcijski ploskvi, ki povzročajo močne deformacije, tem pa se struktura cementne paste upira s svojo trenutno togostjo. V začetnem obdobju strjevanja, ko je modul elastičnosti cementne paste še razmeroma nizek, lahko omenjene napetosti povzročajo sorazmerno velike zunanje deformacije, ki jih imenujemo avtogeno krčenje kompozita.



nizka stopnja hidratacije



visoka stopnja hidratacije

Slika 3.2: Shematični prikaz prečnega prereza hidratizirane cementne paste (Weiss idr., 1999)

Figure 3.2: Schematic view of cross section of hydrate cement paste (Weiss et al., 1999)

Na sliki 3.2 je dogajanje med hidratacijo cementa prikazano v obliki shematičnega prikaza prečnega prereza hidratizirajoče cementne paste. Temno siva barva predstavlja trdno snov – to so nehidratizirani cement, mikrosilika, produkti hidratacije in drugo. Svetlo siva barva predstavlja porno vodo, bela pa z zrakom zapolnjene pore. Na levi strani je prikazan prerez z nizko stopnjo hidratacije, na desni pa z

višjo stopnjo hidracije. V procesu hidracije se porablja pora voda. Trdni del cementne paste se povečuje, pore se zmanjšujejo in nastajajo nove. Nove prazne pore so posledica kemičnega krčenja. Pri vezanju porne vode v hidrationske produkte se zaradi zmanjševanja por povečujejo radiji meniskov v kapilarnih porah, kar povzroča povečanje nateznih sil na stene por. Rezultanta nateznih sil na stene por je obratno sorazmerna radiju ukrivljenosti vodne površine v pori. Natezna obremenitev sten por vodi do prostorninskega krčenja cementne paste oziroma kompozita, ki ga imenujemo avtogeno krčenje (Saje, 2001).

Avtogeno krčenje kompozita je eden izmed osnovnih vzrokov za nastanek razpok visokotrdnega kompozita. Z dodajanjem elektrofiltrskega pepela in zmanjševanjem količine cementa se avtogeno krčenje kompozita zmanjšuje, z dodajanjem kremenčevega peska pa povečuje. Z večanjem vodo-cementnega razmerja in prostorninskega deleža agregata se avtogeno krčenje kompozita zmanjšuje. Avtogeno krčenje kompozita predstavlja krčenje zapečatenega preskušanca, pri katerem z nepropustno folijo ali površinskim premazom preprečimo izmenjavo vlage med preskušancem in okolico. S takšnimi zatesnjenimi preskušanci simuliramo pogoje krčenja betona v notranjosti debelih kompozitnih elementov, kjer tako rekoč ni izmenjave vlage med betonom in okolico.

Laura (2003) navaja, da je avtogeno krčenje betona pogojeno zgolj z vodo-cementnim razmerjem in da je, če je to razmerje večje od 0,40, tlačna trdnost betona pa manjša od 41,5 MPa, zanemarljivo majhno.

Kamen (2006) ugotavlja, da jeklena vlakna v vlaknastem betonu zelo velike zmogljivosti omogočajo zmanjšanje avtogenega krčenja kompozita za 35 % glede na krčenje primerjalnega betona brez vlaken. Poleg tega navaja, da je avtogeno krčenje kompozita pomembno le v prvih 90 dneh od priprave preskušancev, pozneje pa je bistveno manjše. Tudi Paillere idr. (1989) navajajo, da je avtogeno krčenje vlaknastega betona s prostorninskim deležem jeklenih vlaken 0,8 % manjše od avtogenega krčenja primerjalnega betona brez vlaknaste mikroarmature.

Krčenje vlaknastih betonov zaradi sušenja

Krčenje zaradi sušenja se pojavi pri preskušancih, ki so izpostavljeni okolju, kjer jim je omogočeno sušenje. Krčenje kompozita zaradi sušenja je posledica premikanja vlage znotraj materiala in izhlapevanja vlage iz preskušancev. Definirano je kot časovno odvisna deformacija kompozita pri konstantni temperaturi, merjena na neobteženem preskušancu, ki je izpostavljen sušenju. Krčenje zaradi sušenja se začne na površini preskušanca. Ko natezne napetosti zaradi gradienta vlage oziroma napetosti na površini preskušanca prekoračijo natezno trdnost kompozita, se pojavijo razpoke.

Pri betonih brez vlaknaste armature je krčenje zaradi sušenja odvisno od starosti in geometrije preskušancev, razmer v okolju, sestave mešanice, količine cementa ter količine in vrste agregata. Betoni z visokim modulom elastičnosti agregata se manj krčijo zaradi sušenja kot primerjalni betoni z nizkim modulom elastičnosti agregata (ACI 224R-01). Krčenje zaradi sušenja betona je opredeljeno kot razlika celotnega in avtogenega krčenja. Zaradi različne strukture betona je krčenje zaradi sušenja

visokotrdnega betona manjše od krčenja zaradi sušenja betona normalne trdnosti, pri katerem je zaradi velikega vodovezivnega razmerja avtogeni del krčenja sorazmerno majhen, tako da krčenje zaradi sušenja predstavlja večji del celotnega krčenja. Majhno vodo-cementno razmerje in majhna propustnost betona visoke trdnosti vplivata na krčenje betona zaradi sušenja. Mikrosilika v betonih visoke trdnosti zmanjša poroznost hidratizirane cementne paste, posebno v stičnem območju med cementno pasto in agregatom. Dilger in Wang (2000) trdita, da je za betone z nizkim vodo-cementnim razmerjem značilno, da se pri hidrataciji cementa porabi skoraj vsa voda, in ko relativna vlažnost betona pade na 80 %, skorajda ni izmenjave vlage med betonom in zunanjim okoljem.

Vlaknasta armatura v kompozitu ovira krčenje kompozita ter pojav in širjenje razpok v njem. Na zmanjšanje krčenja zaradi sušenja vlaknastih betonov v primerjavi s krčenjem betonov brez dodane vlaknaste armature vplivajo zlasti prostorninski delež ter geometrija in vrsta vlaken. Chuan in Young (1990) navajata, da se vlaknasti betoni z daljšimi jeklenimi vlakni bolj krčijo kot vlaknasti betoni s krajšimi vlakni. Z večanjem prostorninskega deleža vlaken v kompozitni mešanici pa se krčenje kompozita zaradi sušenja zmanjšuje. Balaguru in Shah (1992) ter Grzybowski in Shah (1990) ugotavljajo, da jeklena vlaknasta mikroarmatura učinkoviteje zmanjšuje krčenje kompozita zaradi sušenja, v primerjavi s krčenjem primerjalnega betona brez mikroarmature, kot pa polipropilenska vlakna, katerih vpliv na zmanjšanje krčenja kompozita zaradi sušenja je minimalen. To ugotovitev utemeljujejo z večjo togostjo jeklenih vlaken v primerjavi s polipropilenskimi.

Zhang idr. (2005) ugotavljajo, da se krčenje vlaknastega lahkega betona zmanjšuje z večanjem vsebnosti jeklenih vlaken od 0 % do 1,5 %.

Barr in Baden (2003) navajata, da je pri trdnostnih razredih kompozita od 40 Mpa do 120 Mpa zveza med krčenjem zaradi sušenja in izgubo teže kompozita v prvih stotih dneh sušenja linearna. Pri tem ugotavljata, da dodana vlaknasta armatura zmanjšuje krčenje in vgradljivost kompozita.

Krčenje zaradi sušenja kompozita z jeklenimi vlakni

Tuje in lastne eksperimentalne raziskave potrjujejo, da na krčenje zaradi sušenja kompozita z jeklenimi vlakni vpliva tudi prostorninski delež vlaken, razmerje med dolžino in nadomestnim premerom vlaken ter dolžina vlaken (Balaguru in Shah, 1992).

Balaguru in Ramakrishnan (1988) sta ugotovila, da je 500. dan od izdelave preskušancev krčenje vlaknastega betona z 0,50 % jeklenimi vlakni trdnostnega razreda kompozita 40 Mpa za 9 %, pri trdnostnem razredu kompozita 55 Mpa pa za 10 % manjše od krčenja primerjalnega betona brez vlaken. Avtorja trdita, da v začetnem času, pred pojavom razpok v kompozitu, oblika vlaken ne vpliva na krčenje kompozita. Po nastanku razpok pa jeklena vlakna, ki so na konceh zakrivljena, učinkoviteje vplivajo na zmanjšanje krčenja kompozita kot ravna jeklena vlakna enake dolžine. Swamy (1979) navaja, da je krčenje zaradi sušenja kompozita s prostorninsko vsebnostjo jeklenih vlaken 1,00 % za 20 % manjše od krčenja zaradi sušenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature. Kovler in

Bentur (1997), ki sta raziskovala krčenje kompozita z jeklenimi vlakni od 0 % do 2 % pa trdita, da jeklena vlaknasta mikroarmatura ne vpliva na krčenje kompozita.

Raziskovalci Kovler in Bentur (1997), Balaguru in Ramakrishnan (1992) ter Swamy (1979) so proučevali vpliv različne vsebnosti jeklene vlaknaste mikroarmature na krčenje kompozita. Razlike med njihovimi ugotovitvami izhajajo iz različnega časa in dolžine časovnega intervala, v katerem so posamezni raziskovalci krčenje kompozita merili in ga primerjali s krčenjem primerjalnega betona brez vlaken. Balaguru in Ramakrishnan (1992) sta raziskovala vpliv jeklene vlaknaste armature od konca negovanja preskušanca pa do starosti 600 dni. Swamy je proučeval vpliv jeklenih vlaken na krčenje kompozita od končane nege preskušancev do 100 dni od začetka sušenja preskušanca. Kovler in Bentur pa sta raziskovala vpliv različne vsebnosti jeklene vlaknaste mikroarmature na krčenje kompozita v prvih 45 urah po končani negi. Iz primerjave rezultatov meritev krčenja kompozita z jeklenimi vlakni in primerjalnega betona brez vlaken, ki so jih opravili raziskovalci Balaguru in Ramakrishnan ter Swamy, izhaja, da po približno dveh dneh od zamešanja preskušancev jeklena vlaknasta armatura pravzaprav še ne vpliva na krčenje kompozita. Pozneje pa se njen vpliv na krčenje kompozita zaradi sušenja poveča. Chern in Young (1990) navajata, da je optimalna prostorninska vsebnost jeklenih vlaken za zmanjšanje krčenja kompozita normalne trdnosti zaradi sušenja manj kot 2 %. Pri tem so vlakna z večjim razmerjem med dolžino in nadomestnim premerom vlaken učinkovitejša od vlaken z manjšim razmerjem med dolžino in nadomestnim premerom vlaken. Raziskovalca Barr in Baden (2003) tudi navajata, da jeklena vlakna pri prostorninskih deležih 1 %, 2 % in 3 % vplivajo na zmanjšanje krčenja kompozita normalne trdnosti zaradi sušenja. Pri tem ugotavljata, da že odstotek prostorninskega deleža jeklenih vlaken zadostuje za zmanjšanje krčenja kompozita zaradi sušenja v 100 dneh od razopaženja.

Krčenje zaradi sušenja kompozita s polipropilenskimi vlakni

Ugotovitve različnih raziskovalcev o vplivu polipropilenskih vlaken na krčenje kompozita se ne ujemajo. Aly idr. (2008) navajajo, da je krčenje zaradi sušenja kompozita normalne trdnosti z 0,5 % polipropilenskih vlaken dolžine 19 mm, ki je bil po enem dnevu razopažen in nato 7 dni negovan v vodi, od 15 % do 22 % večje od krčenja primerjalnega betona brez dodane vlaknaste armature. Poleg tega ugotavljajo, da je kompozit s polipropilenskimi vlakni bolj podvržen razpokanju kot primerjalni betoni brez dodane vlaknaste armature, kar utemeljujejo z majhnim elastičnim modulom vlaken in večjim krčenju zaradi sušenja kompozita. Kot vzrok za povečano krčenje kompozita glede na krčenje primerjalnega betona navajajo večjo poroznost kompozita in zato večjo izgubo vode. Predvidevamo, da so se pri kompozitih, ki so jih preiskovali Aly idr., na stiku med vlakni in cementno matrico pojavile povezane pore, ki povečujejo poroznost kompozita. Zollo in Ilter (1986) navajata 14 %, 40 % oziroma 25 % zmanjšanje krčenja zaradi sušenja kompozita z 0,1 %, 0,2 % in 0,3 % polipropilenskih vlaken v primerjavi s krčenjem primerjalnega betona. Kovler idr. (1992) pa ugotavljajo, da 0,2 % polipropilenskih vlaken zelo malo vpliva na začetno prsto krčenje kompozita. Pri omejevanju zgodnjih razpok, ki so v največji meri posledica plastičnega in avtogenega krčenja kompozita, so po njihovih rezultatih polietilenska vlakna učinkovitejša. Njihove ugotovitve pa se lahko nanašajo le na

zelo mlad kompozit, saj so laboratorijske preiskave preskušancev izvajali prva dva dni po zamešanju kompozita.

Myers idr. (2003) prav tako ugotavljajo, da dodana polipropilenska vlakna razmeroma malo vplivajo na zmanjšanje dolgotrajnega krčenja kompozita. Po njihovem mnenju je to posledica sorazmerno nizkega modula elastičnosti vlaken v primerjavi z elastičnim modulom betona. Poleg tega pa na zmanjšanje prostega krčenja zaradi sušenja vlaknastega betona in primerjalnega betona brez vlaknaste armature vpliva tudi elektrofilitrski pepel. Ta namreč vpliva tudi na zmanjšanje prostega krčenja proučevanih kompozitov, zaradi tega pa je vloga vlaken v kompozitu manjša. M. Rouse in L. Billington (2007) ugotavljata, da imajo preskušanci vlaknastega betona visoke trdnosti brez dodane vlaknaste armature za 2,5-krat več razpok, ki so posledica krčenja zaradi sušenja, kot primerjalni kompozit s polipropilenskimi vlakni.

Temperaturne deformacije vlaknastih betonov

Pri hidrataciji cementa se sprošča toplota, ki povzroči povišanje temperature in s tem večjo deformacijo kompozita. Na temperaturno polje kompozita oziroma preskušanca poleg sproščene hidratacijske toplote, ki je odvisna predvsem od sestave kompozita, vplivata tudi relativna vlaga in temperatura okolja. Zaradi izmenjave toplote med preskušancem in okoljem, ki poteka prek površine preskušancev, se v njih pojavi gradient temperature in pripadajoče neenakomerne temperaturne deformacije, ki povzročita ustrezne notranje napetosti in s tem površinske razpoke kompozita. Pri analizi napetostno-deformacijskega stanja kompozita med hidratacijo cementa je treba upoštevati tudi dejstvo, da znaša temperaturni razteznostni koeficient svežega kompozita približno $1,48 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, koeficient otrdelega kompozita pa približno $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, če privzamemo vrednosti, ki veljajo za beton brez vlaken, kar pa ni popolnoma natančno.

3.2 Lezenje vlaknastega betona

Lezenje kompozita je časovni prirastek deformacije kompozita zaradi trajno delujoče obtežbe. Hipna deformacija ob nanosu obtežbe, ki je odvisna tudi od hitrosti nanosa obtežbe na preskušance, zajema pri običajnih pogojih nanosa obremenitve preskušancev poleg začetne elastične deformacije tudi del lezenja preskušanca.

V kalcijevi silikatni hidratizirani fazi cementne paste se v odvisnosti od velikosti in trajanja delujoče napetosti izgublja velika količina vezane vode, zaradi česar se v cementni pasti pojavijo napetosti zaradi lezenja. Izguba adsorbirane vode pri konstantni napetosti je najpogostejši vzrok za lezenje betona oziroma kompozita. Drugi vzrok pa je pojav zapoznelega elastičnega odziva v agregatu pod vplivom trajne obtežbe. Dokler sta cementna pasta in agregat povezana, napetost v cementni pasti s časom pojema, ker se delno prenaša na agregat, ki se pri večji napetosti deformira elastično. Zapoznele elastične deformacije agregata so vzrok za povratni del časovnih prirastkov deformacij zaradi lezenja betona oziroma kompozita (Mehta in Monteiro, 2006).

Lezenje in krčenje betona oziroma kompozita sta reološka pojava, ki potekata istočasno in sta v veliki meri odvisna od istih fizikalno-kemijskih procesov v materialu, zato ne moreta biti med seboj popolnoma neodvisna (Neville, 1995). Obremenjeni preskušanci betona oziroma kompozita so vedno istočasno izpostavljeni tudi sušenju, razen če so v vodi. Lezenje betona oziroma kompozita eksperimentalno določamo tako, da od celotnega časovnega prirastka deformacije betona oziroma kompozita obremenjenega preskušanca odštejemo deformacijo krčenja, ki jo izmerimo na vzporednem neobremenjenem preskušancu, ki je izdelan iz iste sveže mešanice betona oziroma kompozita in se hrani v enakih razmerah kot obremenjeni preskušavec, na katerem merimo celotne časovne deformacije, to je lezenje in krčenje preskušanca skupaj. Če trajna napetost ne prekorači 40 % tlačne trdnosti betona oziroma kompozita, je meritev linearne teorije lezenja materiala dovolj natančna. Zato v tem območju napetosti velja tudi zakon superpozicije deformacij lezenja in krčenja materiala. Pri večjih napetostih pa je treba lezenje materiala upoštevati po nelinearni teoriji lezenja.

Krčenje betona oziroma kompozita zaradi sušenja je v največji meri odvisno od razlike relativne vlage preskušancev in okolja ter še od drugih pogojev izmenjave vlage med preskušancem in okoljem. Lezenje betona oziroma kompozita pa je odvisno od prej opisanih fizikalno-kemičnih procesov, ki potekajo znotraj obremenjenega materiala, od nastajanja mikrorazpok kompozita v stičnem območju ter od pogojev izmenjave vlage med preskušancem in okoljem.

Po podatkih ACI Committee 544.4R-88 je lezenje vlaknastega betona z dodanimi jeklenimi vlakni pod vplivom trajne konstantne napetosti v 12 mesecih po nanosu obtežbe približno enako lezenju primerjalnega betona brez dodane vlaknaste armature. Mangat in Azari (1986), ki sta raziskovala vpliv jeklene vlaknaste mikroarmature s prostorninskim deležem vlaken do 3 %, pa ugotavljata, da vlaknasta mikroarmatura vpliva na zmanjšanje lezenja kompozita. Pri tem se s povečevanjem deleža vlaken povečuje tudi njihov vpliv na zmanjšanje lezenja kompozita. Po njihovih rezultatih eksperimentalnih raziskav je celotno lezenje kompozita z 1 % deležem jeklenih vlaken približno za 10 % do 20 % manjše od lezenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature. Učinek jeklenih vlaken na zmanjšanje lezenja kompozita je po njihovih ugotovitvah pri majhnih napetostih kompozita večji kot pri velikih napetostih. Chern in Young (1989) ugotavljata, da je po njihovih meritvah redukcija lezenja kompozita v primerjavi z lezenjem primerjalnega betona pri prostorninskem deležu jeklenih vlaken od 0 % do 1 % večja kot pri od 1 % do 2 % deležu vlaken.

4 EKSPERIMENTALNE RAZISKAVE

Pospešen razvoj vlaknastega betona z uporabo primernih vlaken se je začel v šestdesetih letih prejšnjega stoletja. Številne raziskave so bile usmerjene predvsem v poznavanje mehanskih lastnosti vlaknastih betonov. Da bi dopolnili vedenje o reoloških lastnostih vlaknastih betonov pri različnih vrstah in vsebnostih vlaken, smo za namene doktorske disertacije opravili obsežne eksperimentalne raziskave časovnega poteka krčenja in lezenja vlaknastih betonov. Opravljene raziskave se nanašajo na krčenje vlaknastih betonov normalne in visoke trdnosti s prostorninskimi vsebnostmi od 0 % do 2 % daljših in krajših jeklenih vlaken. Vpliv dodanih suhih in navlaženih polipropilenskih vlaken na krčenje visokotrdnega vlaknastega betona smo raziskovali pri 0 % do 0,75 % prostorninskem deležu vlaken. Krčenje kompozita smo merili na preskušancih, ki so bili izdelani z uporabo agregata iz Separacije Kresnice. Pri eksperimentalnih raziskavah časovnega poteka lezenja vlaknastih betonov pa smo se omejili na vlaknaste betone normalne trdnosti, ki so mikroarmirani z jeklenimi vlakni.

4.1 Zasnova eksperimentalnih raziskav

Zaradi možnosti medsebojne primerjave smo sestavo primerjalnega betona preskušancev brez vlaknaste armature povzeli po doktorski disertaciji Saje (2001). Pri tem je vodovezivno razmerje vlaknastih betonov normalne trdnosti znašalo 0,52, vodovezivno razmerje vlaknastih betonov visoke trdnosti pa 0,36. Ustrezno vgradljivost kompozita smo zagotovili z dodatkom praškastega superplastifikatorja naftalenskega tipa, ki smo ga primešali dodani mikrosiliki.

Avtogeno krčenje, ki se večinoma razvije v prvih urah oziroma dnevih od zamešanja, predstavlja pri betonih visoke trdnosti pomemben del celotnega krčenja visokotrdnega betona oziroma kompozita. Zaradi majhne vsebnosti nevezane vode v betonu visoke trdnosti se med hidratacijo cementa porabi tudi del nevezane porne vode, kar povzroči zmanjšanje pornih tlakov in posledično zmanjšanje prostornine cementne paste oziroma avtogeno krčenje betona, ki se začne ob začetku vezanja cementa.

4.2 Uporabljeni materiali in njihovi deleži v vlaknastih betonih

Preskušanci za eksperimentalne raziskave krčenja in lezenja vlaknastega betona so bili izdelani iz vlaknastih betonskih mešanic, ki so podane v nadaljevanju doktorske disertacije (glej preglednice od 4.9 do 4.13). Vsi uporabljeni osnovni materiali so dosegljivi na slovenskem trgu.

Agregat

Za izdelavo vlaknastih betonov smo uporabili drobljen agregat z največjim premerom zrn agregata 16 mm in kremenovo mivko. Uporabljeni agregat je sestavljen iz različnih frakcij pranega drobljenega apnenčevega agregata iz Separacije Kresnice in mivke iz podjetja Termit, d. d., iz Moravč. Lastnosti uporabljenega agregata so podane v preglednicah 4.1 in 4.2.

Preglednica 4.1: Lastnosti mivke Termit iz Moravč (Irma, d. o. o., 14. 10. 2004)**Table 4.1:** Properties of fine sand (producer: Termit Moravče), (Irma, d. o. o., 14.10. 2004)

Nahajališče	Moravče			
Opis po standardu EN 932-3	Mivko sestavljajo kremenova zrna s premerom od 0,063 do 2 mm, zrn s premerom, manjšim od 0,063 mm, je manj kot 1 %. Prevladujejo ostroroba do slabo zaobljena zrna nepravilnih oblik monokristalnega kremen (> 95 %). Pod stereoskopsko lupo opazujemo še večja delno zaobljena zrna polikristalnega kremen, nekatera od njih so delno ali v celoti monolitizirana ali prevlečena z organsko snovjo. Obarvanih kremenovih zrn je v agregatu manj kot 5 %, monolitiziranih in zrn, prevlečenih z organsko snovjo, pa je manj kot 3 %.			
Gostota zrn	SIST EN	ρ_A	2,644	Mg/m ³
Gostota suhih zrn	1097-6	ρ_{rd}	2,577	Mg/m ³
Gostota nasičenih in površinskih suhih zrn		ρ_{ssd}	2,601	Mg/m ³

Preglednica 4.2: Lastnosti kamnine agregata iz Separacije Kresnice (Igmata, d. d., 16. 2. 2009)**Table 4.2:** Properties of stone aggregate from Separation Kresnice (Igmata d.d., 16.2. 2009)

Nahajališče Vrsta kamnine Mineraloško-petrografska analiza	Separacija Kresnice <i>apnenec</i> makroskopski opis		Preskušane je svetlo siv apnenec. Kamnina je trdna in gosta. Razpoke v obliki stilolitnih šivov so zapolnjene z rjavim netopnim ostankom glinenih materialov. Del razpok je zapolnjen s prekriziranim kalcitom.			
	mikroskopski opis		Osnova kamenine je mikrit, v katerem opazujemo stilolitne šive in tektonske žilice, zapolnjene z netopnim ostankom glinenih materialov. V mikritni osnovi opazimo redke ostanke bioklastov. Ponekod je mikrit prekrizirjen v mikrosparit oz. sparit, predvsem v zapolnitvah žilic. Dolomit nastopa v skupkih v obliki kristalčkov.			
Tlačna trdnost kamnine	v suhem stanju		najmanjša	118 MPa		
			največja	198 MPa		
			srednja	163 MPa		
		v mokrem stanju		najmanjša	103 MPa	
				največja	173 MPa	
				srednja	143 MPa	
Gostota zrn	Enota	Metoda	Velikost zrn (mm)			
<i>gostota zrn</i>	[Mg/m ³]	SIST EN	0/4	4/8	8/16	16/32
<i>gostota suhih zrn</i>	[Mg/m ³]	1097-6	2,69	2,71	2,71	2,71
<i>gostota nasičenih in površinskih suhih zrn</i>	[Mg/m ³]		2,65	2,68	2,69	2,69
<i>Vpijanje vode</i>	%		2,67	2,70	2,69	2,70
			0,6	0,4	0,3	0,3

Cement

Za izdelavo vlaknastih betonskih preskušancev smo uporabili cement vrste CEM II / A-S 42.5 R (Blaine [m^2/kg] = 355) iz cementarne Salanit, d. d., v Anhovem. Delež posameznih mineralov v cementnem klinkerju je razviden iz preglednice 4.3. V preglednici 4.4 pa je podana kemična sestava ter fizikalno-kemične in mehanske lastnosti uporabljenega cementa.

Preglednica 4.3: Mineralna sestava cementnih klinkerjev

Table 4.3: Mineralogic structure of cement clinker

Vrsta cementa	Vrsta cementnega klinkerja	Minerali klinkerja			
		C3S	C2S	C3A	C4AF
CEM II/A-S 42.5R	običajni klinker	64 %	15 %	9 %	9 %

Preglednica 4.4: Kemična sestava ter fizikalno-kemične in mehanske lastnosti cementa CEM II/A-S 42.5R

Table 4.4: Chemical composition with physical and chemical properties of cement CEM II/A-S 42.5R

Kemična sestava			
<i>Parameter</i>	<i>Izmerjeno</i>	<i>Zahteva standarda</i>	<i>Metoda preskušanja</i>
Žarilna izguba (%)	2,70	-	SIST EN 196-2. t. 7
Netopni ostanek (%)	0,40	-	SIST EN 196-2. t. 9
SO ₃ (%)	2,65	≤ 4,0	SIST EN 196-2. t. 8
Klorid (%)	0,02	≤ 0,1	SIST EN 196-2. t. 14
SiO ₂ (%)	21,73	-	SIST EN 196-2. t. 13
Al ₂ O ₃ (%)	5,13	-	SIST EN 196-2. t. 13
Fe ₂ O ₃ (%)	2,69	-	SIST EN 196-2. t. 13
CaO (%)	60,66	-	SIST EN 196-2. t. 13
MgO (%)	2,54	-	SIST EN 196-2. t. 13
Na ₂ O (%)	0,30	-	SIST EN 196-2. t. 17
K ₂ O (%)	0,81	-	SIST EN 196-2. t. 17
Fizikalne lastnosti			
<i>Parameter</i>	<i>Izmerjeno</i>	<i>Zahteva standarda</i>	<i>Metoda preskušanja</i>
Ostanek na situ 0,09 mm (%)	0,10	-	SIST EN 196-6
Prostorninska masa (g/cm^3)	3,09	-	SIST EN 196-6
Specifična površina (cm^2/g)	3900	-	SIST EN 196-6
Voda za standardno konsistenco (%)	29,8	-	SIST EN 196-3
Začetek vezanja (min)	220	≥ 60	SIST EN 196-3
Konec vezanja (min)	280	-	SIST EN 196-3
Prostorninska obstojnost Le Chatelier (mm)	0,20	≤ 10	SIST EN 196-3
Mehanske lastnosti			
Upogibna trdnost (MPa) po 2 dneh	4,6	-	SIST EN 196-1
Upogibna trdnost (MPa) po 28 dneh	8,2	-	SIST EN 196-1
Tlačna trdnost (MPa) po 2 dneh	26,5	≥ 20,0	SIST EN 196-1
Tlačna trdnost (MPa) po 28 dneh	51,1	≥ 42,5 ≤ 62,5	SIST EN 196-1

Mineralni in kemijski dodatki

Za eksperimentalne raziskave krčenja vlaknastih betonov visoke trdnosti smo del cementa pri preiskovanih kompozitih nadomestili z mineralnim dodatkom oziroma mikrosiliko v suhem stanju (preglednica 4.6). Ustrezno vgradljivost vlaknastega betona pa smo zaradi majhnega vodovezivnega razmerja dosegli s superplastifikatorjem (antikorodina). To je praškasta mešanica mikrosilike in superplastifikatorja, ki je po kemični sestavi sulfonorani naftalen-formaldehid kondenzat (preglednica 4.5).

Preglednica 4.5: Osnovne lastnosti antikorodina

Table 4.5: Basic properties of antikorodin

Dodatek	Gostota pri 20 °C (g/cm ³)	Delež suhe snovi pri 105 °C (%)
antikorodin	2,40	100,0

Preglednica 4.6: Kemična sestava in fizikalno-kemične lastnosti mikrosilike (TKK Serpenica)

Table 4.6: Chemical composition with physical and chemical properties of mikrosilika (TKK Serpenica)

KEMIJSKA SESTAVA MIKROSILIKE	
SiO ₂	95,50–95,90 %
Al ₂ O ₃	0,13–0,17 %
Fe ₂ O ₃	0,09–0,12 %
CaO	0,35–0,55 %
C prosti	1,10–1,30 %
C iz SiC	0,30–0,50 %
C celotni	1,50–1,80 %
SiC	1,10–1,60 %
MgO	0,25–0,30 %
SO ₃	0,20–0,30 %
N ₂ O	0,10–0,15 %
K ₂	0,45–0,60 %
žaroizguba	0,80–1,40 %
FIZIKALNO-KEMIJSKE LASTNOSTI MIKROSILIKE	
<i>nasipna gostota</i>	400–550 kg/m ³
<i>prostorninska masa</i>	2200 kg/m ³
<i>specifična površina (BET)</i>	21–23 m ² /g
<i>velikost delcev (80 %)</i>	0,1–0,3 μm
<i>vlaga</i>	0,25–0,30 %

Vlakna

Opravljene eksperimentalne raziskave se nanašajo na vlaknasti beton normalne in visoke trdnosti, ki je mikroarmiran z jeklenimi in polipropilenskimi vlakni. Uporabljena daljša (VJ2) in krajša (VJ1) jeklena vlakna so izdelek domačega proizvajalca in dobavitelja IRMA, d. d. Njihove lastnosti so prikazane v preglednici 4.7.



Slika 4.1: Uporabljena jeklena vlakna (levo IRI 50/16 (VJ1) in desno IRI 50/30 (VJ2))

Figure 4.1: Used steel fibres (IRI 50/16 (VJ1) on left and IRI 50/30 (VJ2) on right)

Preglednica 4.7: Lastnosti uporabljenih jeklenih vlaken (IRMA, d. d., 2005 in IRMA, d. d., 2006)

Table 4.7: Properties of used steel fibres (IRMA d.d., 2005 in IRMA d.d., 2006)

Jeklena vlakna	Dolžina vlaken [mm]	Nadomestni premer vlaken [mm]	Natezna trdnost vlaken [MPa]	Klasifikacija vlaken (ASTM A 820)
IRI 50/16 (VJ1)	16	0,5	800	Tip 1
IRI 50/30 (VJ2)	30	0,5	900	Tip 1

Uporabljena polipropilenska vlakna pa so proizvod tujega proizvajalca Grace Krenit. Njihov videz in mikroskopska slika sta prikazana na sliki 4.2, njihove lastnosti pa v preglednici 4.8.



a) skupek vlaken

b) mikroskopska slika vlakna

c) razbrazdana površina vlakna

Slika 4.2: Uporabljena polipropilenska vlakna

Figure 4.2: Used polypropylene fibres

Preglednica 4.8: Lastnosti uporabljenih polipropilenskih vlaken (Grace Krenit)

Table 4.8: Properties of used polypropylene fibres (Grace Krenit)

Gostota vlaken [g/cm ³]	Dolžina vlaken [mm]	Nadomestni prečni prerez vlaken [μm]	Natezna trdnost vlaken [MPa]	Elastični modul vlaken [MPa]
0,91	12	35 x (250–600)	340–500	8500–12500

Sestava preiskovanih vlaknastih betonov

Zaradi želje po primerjavi eksperimentalnih rezultatov smo recepture svežih kompozitov določili tako, da smo k osnovni recepturi visokotrdnega betona oziroma betona normalne trdnosti, povzeti po doktorski disertaciji (Saje, 2001), dodali ustrezna vlakna in izbranemu deležu vlaken ustrezno zmanjšali delež agregata v kompozitu. Razlez in posed svežih kompozitov smo določili v skladu s standardi SIST EN 12350-2, SIST EN 12350-5 in SIST EN 206-1. Pri določanju vodovezivnega razmerja visokotrdnih vlaknastih betonov in primerjalnega visokotrdnega betona brez vlaken v skladu s standardom SIST EN 206 nismo upoštevali k-faktorja za mikrosiliko, ker smo želeli primerjati rezultate meritev krčenja z rezultati meritev krčenja za beton brez vlaken, povzete po doktorski disertaciji (Saje, 2001).

Sestava visokotrdnih betonskih kompozitov z dodanimi jeklenimi vlakni za eksperimentalno raziskavo krčenja

Preskušanci so bili izdelani iz trinajstih različnih mešanic svežega vlaknastega betona visoke trdnosti z vodovezivnim razmerjem 0,36. Osnovna betonska mešanica KVJ1 je bila brez dodane jeklene vlaknaste armature, vlaknaste betonske mešanice KVJ2, KVJ3, KVJ4, KVJ5, KVJ6 in KVJ7 pa so vsebovale krajša jeklena vlakna (VJ1) s prostorninskimi deleži vlaken od 0,25 % do 2,00 %. Vlaknaste betonske mešanice KVJ8, KVJ9, KVJ10, KVJ11, KVJ12 in KVJ13 so vsebovale od 0,25 % do 2,00 % daljših jeklenih vlaken (VJ2). Količina veziva v vseh preiskovanih mešanicah je znašala 400 kg/m^3 kompozita, od tega je bilo 90 % cementa (360 kg/m^3) in 10 % mikrosilike (40 kg/m^3). Koncepta k vrednosti po standardu SIST EN 206-1, ki priporoča zmanjšanje količine cementa zaradi uporabljene mikrosilike, pri eksperimentalnih raziskavah nismo upoštevali zaradi primerljivosti rezultatov z drugimi avtorji in pomanjkanja podatkov za uporabljeno vrsto cementa CEM II/A-S 42.5R. Uporabljen je bil drobni (0–4 mm) in grobi (4–16 mm) agregat iz Separacije Kresnice. Lastnosti in recepture svežih mešanic vlaknastega visokotrdnega betona z dodanimi jeklenimi vlakni so v preglednici 4.9.

Preglednica 4.9: Visokotrdni vlaknasti betoni z različnim deležem jeklenih vlaken**Table 4.9:** High performance steel fibre reinforced concrete with different contain of steel fibres

Mešanica	KVJ1	KVJ2	KVJ3	KVJ4	KVJ5	KVJ6	KVJ7	KVJ8	KVJ9	KVJ10	KVJ11	KVJ12	KVJ13
Vrsta agregata	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)
Mivka [kg/m ³]	285	284	283	282	281	279	277	284	283	282	281	279	277
Drobni agregat 0–4 [kg/m ³]	853	850	847	844	841	835	829	850	847	844	841	835	829
Grobi agregat 4–16 [kg/m ³]	758	755	753	750	747	742	737	755	753	750	747	742	737
Količina veziva [kg/m ³]	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
Količina mikrosilike [% veziva]	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Jeklena vlakna	-	(VJ1)	(VJ1)	(VJ1)	(VJ1)	(VJ1)	(VJ1)	(VJ2)	(VJ2)	(VJ2)	(VJ2)	(VJ2)	(VJ2)
Prostorninski delež vlaken [%]	-	0,25	0,50	0,75	1,00	1,50	2,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,50	2,00
Količina vode kg/m ³	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144
Vodovezivno razmerje	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
Količina superplastifikatorja [%]	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05
Posed [cm]	18	23	17	17	14	12	15	19,5	15	14,5	15	2,5	1,5
Razlez [cm]	55	53	47	43	42	40	36	52	45	46	36	29	30
Delež por [%]	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Gostota [kg/m ³], SIST EN 12350-6	2436	2455	2405	2452	2427	2452	2438	2393	2385	2420	2500	2348	2504
f _{cm, 28 dni} [MPa], SIST EN 12390-3	68,9	85,0	86,3	86,6	87,1	88,89	91,85	91,4	91,1	92,1	92,9	94,9	101,5

Legenda

(K) – agregat Kresnice

(VJ1) – jeklena vlakna IRI 50/16

(VJ2) – jeklena vlakna IRI 50/30

Sestava vlaknastih visokotrdnih betonov z dodanimi polipropilenskimi vlakni in kompozita s kombinacijo jeklenih in polipropilenskih vlaken za eksperimentalno raziskavo krčenja

Za raziskavo vpliva dodanih polipropilenskih vlaken na krčenje visokotrdnega kompozita smo izdelali osem različnih mešanic vlaknastih betonov z vodovezivnim razmerjem 0,36. Pri tem je bila mešanica KVP1 osnovna betonska mešanica brez dodanih polipropilenskih vlaken. Mešanice KVP2, KVP3 in KVP4 so vsebovale po 0,25 %, 0,50 % in 0,75 % prostorninskega deleža kompozita suhih vlaken, vlaknaste mešanice KVP5, KVP6 in KVP7 pa so vsebovale 0,25 %, 0,50 % oziroma 0,75 % navlaženih polipropilenskih vlaken. Mešanica KVJP je vsebovala 0,25 % kombinacije jeklenih in polipropilenskih vlaken v razmerju 1 : 1. Količina veziva v vseh vlaknastih betonskih mešanicah je znašala po 400 kg/m³, od tega je bilo 90 % cementa (360 kg/m³) in 10 % mikrosilike (40 kg/m³). Recepture in lastnosti svežih preiskovanih vlaknastih betonskih mešanic z različnim deležem suhih in prej namočenih polipropilenskih vlaken so v preglednici 4.10.

Preglednica 4.10: Visokotrdne kompozitne betonske mešanice z različnim deležem polipropilenskih vlaken**Table 4.10:** High performance fibre reinforced concrete compositions with different contains of polypropylene fibres

Mešanica	KVP1	KVP2	KVP3	KVP4	KVP5	KVP6	KVP7	KVJP	KVPN
Vrsta agregata	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)
Mivka [kg/m ³]	285	284	283	282	284	283	282	284	283
Drobni agregat 0–4 mm [kg/m ³]	853	850	847	844	850	847	844	850	847
Grobi agregat 4–16 mm [kg/m ³]	758	755	753	750	755	753	750	755	753
Količina veziva [kg/m ³]	400	400	400	400	400	400	400	400	400
Količina cementa [kg/m ³]	360	360	360	360	360	360	360	360	360
Količina mikrosilike [kg/m ³]	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Polipropilenska vlakna	-	suha	suha	suha	vlažna	vlažna	vlažna	P + VJ1	suha
Prostorninski delež vlaken [%]	-	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50	0,75	0,25	0,50
Količina vode kg/m ³	144	144	144	144	144	144	144	144	144
Vodovezivno razmerje	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,38
Količina superplastifikatorja [% veziva]	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05
Količina dodane vode [liter]	-	-	-	-	-	-	-	-	7.7
Posed [cm]	18	13	3	8.5	14	1.5	1.5	15	1.5
Razlez [cm]	55	35	33	41	33.5	34.5	38	41	38
Delež por [%]	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Gostota [kg/m ³], SIST EN 12350-6	2436	2409	2459	2383	2413	2382	2339	2422	2390
f _{cm, 28 dni} [MPa], SIST EN 12390-3	68,96	74,25	76,48	78,15	74,07	76,33	78,05	80,5	71,80

Legenda

(K) – agregat Kresnice (P+ VJ1) – jeklena vlakna IRI 50/16 in suha polipropilenska vlakna

V mešanicah z oznakami KVP5, KVP6 in KVP7 smo uporabili polipropilenska vlakna, ki so se 24 ur pred uporabo namakala v vodi. Po 24 urah smo vlakna vzeli iz vode, odtisnili in z otresavanjem čim bolj odstranili površinsko vodo, tako da so bila vlakna napojena le v brazdah vlaken. Za uporabljena polipropilenska vlakna je značilno, da je površina razbrazdana in obdana s tankimi resicami (glej sliko 4.2b), kar omogoča zadrževanje vode na površini vlaken. Poleg tega se voda lahko zadržuje tudi v brazdah vlaken, ki so delno zapolnjene z drobnimi delci kalcijevih sestavin, votline pa omogočajo zadrževanje vode (glej sliko 4.2c). Podatki o vsebnosti vode v namočenih vlaknih so v preglednici 4.11. Predvidevamo, da je malo vode ostalo tudi na površini vlaken. Naša predpostavka je bila, da je vsa voda v brazdah vlaken. S tehtanjem suhih in namočenih vlaken ter primerjavo količine vode pred namakanjem vlaken in po njem smo analizirali vsebnost vode v prej namočenih vlaknih. V cementni pasti imajo navlažena polipropilenska vlakna vlogo notranjega rezervoarja vode (Saje idr. 2008).

Za določitev vpliva v navlaženih polipropilenskih vlaknih in vsebovane vode na lastnosti vlaknastega betona smo izdelali dodatni primerjalni vlaknasti beton (KVPN) z enakimi količinami vseh sestavin kot pri vlaknastem betonu z vgrajenimi navlaženimi polipropilenskimi vlakni. Edina razlika je bila v tem, da je bila v primerjalni mešanici s suhimi polipropilenskimi vlakni (KVPN) količina dodane vode enaka količini dodane vode v vlaknastem betonu z navlaženimi polipropilenskimi vlakni.

Preglednica 4.11: Vsebnost vode v navlaženih polipropilenskih vlaknih**Table 4.11:** Water content in moistened polypropylene fibres

Mešanica	Delež vlaken (v %)	Masa suhih vlaken (g)	Masa navlaženih vlaken (g)	Masa vode na površini in v votlinah vlaken (g)	Masni delež vode v navlaženih vlaknih (v %)
KVP5	0,25	82	256	174	68
KVP6	0,50	164	458	294	64
KVP7	0,75	246	930	684	74

Sestava betonskih kompozitov normalne trdnosti z dodanimi jeklenimi vlakni za raziskavo krčenja

Za raziskavo vpliva vsebnosti in dolžine jeklenih vlaken na krčenje kompozita pri različni negi preskušancev smo izdelali 16 različnih mešanic vlaknastega betona normalne trdnosti z vodovezivnim razmerjem 0,52. Preskušanci iz mešanic KNJ1 do KNJ7 so bili negovani tako, da so bili prvih 24 ur po zamešanju pokriti s polietilensko folijo, nato pa so bili izpostavljeni zunanji vlagi (70 %) in temperaturi (22 °C). Preskušanci iz mešanice KNVJ1 do KNVJ9 so bili prvih 24 ur po zamešanju prav tako pokriti s polietilensko folijo, po 24 urah pa so bili 6 dni negovani v vodi. Mešanici KNJ1 in KNVJ1 sta bila primerjalna betona brez dodane jeklene vlaknaste armature. Vlaknasti betoni oziroma mešanice KNJ2, KNJ3 in KNJ4 so vsebovali daljša jeklena vlakna IRI 50/30 (VJ2) s prostorninskimi deleži vlaken po 0,50 %, 1,00 % in 2,00 % kompozita. Vlaknasti betoni oziroma mešanice KNJ5, KNJ6 in KNJ7 pa so bili enake sestave, z dodatkom 0,50 %, 1,00 % in 2,00 % krajših jeklenih vlaken IRI 50/16. Preskušanci vlaknastega betona normalne trdnosti iz mešanic KNVJ2 do KNVJ9 so bili prvih 24 ur po izdelavi pokriti s polietilensko folijo, zatem pa so 6 dni odležali v vodi, potem pa so bili do preskušanja, to je sedmi dan, izpostavljeni okolni relativni vlagi ($RH = 70 \% \pm 3 \%$) in temperaturi ($T = 22 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Preskušanci iz mešanic KNVJ2 do KNVJ5 so vsebovali po 0,5 %, 1,00 % oziroma 1,50 % daljših jeklenih vlaken IRI 50/30, preskušanci KNVJ6 do KNVJ9 pa so imeli enake deleže krajših jeklenih vlaken IRI 50/16. Količina cementa je v vseh mešanicah kompozita znašala po 400 kg/m³ kompozita. Recepture in lastnosti svežih vlaknastih betonskih mešanic normalne trdnosti z različnimi vsebnostmi krajših in daljših jeklenih vlaken pri različni negi preskušancev so v preglednicah 4.12 in 4.13.

Preglednica 4.12: Preskušanci vlaknastega betona normalne trdnosti, negovani prvih 24 ur po betoniranju**Table 4.12:** Specimens of normal strength fibre reinforced concrete cured 24 hours after casting

Mešanica	KNJ1	KNJ2	KNJ3	KNJ4	KNJ5	KNJ6	KNJ7
Vrsta agregata	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)
Mivka [kg/m ³]	264	262	260	256	262	260	256
Drobni agregat 0–4 [kg/m ³]	790	784	777	765	784	777	765
Grobi agregat 4–16 [kg/m ³]	702	697	691	680	697	691	680
Količina veziva [kg/m ³]	400	400	400	400	400	400	400
Vrsta jeklenih vlaken	-	(VJ2)	(VJ2)	(VJ2)	(VJ1)	(VJ1)	(VJ1)
Prostorninski delež vlaken [%]	-	0,50	1,00	2,00	0,50	1,00	2,00
Vodovezivno razmerje	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
Posed [cm]	11,3	7,5	3,5	3	9	7	5
Razlez [cm]	44	40	30	27	40	39	34
Delež por [%]	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Prostorninska masa [kg/m ³], SIST EN 12350-6	2300	2315	2338	2398	2341	2344	2402
f _{cm, 28 dni} [Mpa], SIST EN 12390-3	46,59	44,44	47,77	41,85	50,74	39,25	44,96

Legenda

(K) – agregat Kresnice

(VJ1) – jeklena vlakna IRI 50/16

(VJ2) – jeklena vlakna IRI 50/30

Preglednica 4.13: Preskušanci vlaknastega betona normalne trdnosti, ki so bili prvih 24 ur po betoniranju pokriti s PVC-folijo, naslednjih 6 dni pa so ležali v vodi**Table 4.13:** Specimens of normal strength fibre reinforced concrete, that were 24 hours after casting covered with polyethylene sheet and was further on for 6 day cured in water

Mešanica	KNVJ1	KNVJ2	KNVJ3	KNVJ4	KNVJ5	KNVJ6	KNVJ7	KNVJ8	KNVJ9
Vrsta agregata	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)
Mivka [kg/m ³]	264	262	260	258	256	264	262	260	256
Drobni agregat 0–4 [kg/m ³]	790	784	777	771	765	790	784	777	765
Grobi agregat 4–16 [kg/m ³]	702	697	691	685	680	702	697	691	680
Količina veziva [kg/m ³]	400	400	400	400	400	400	400	400	400
Vrsta jeklenih vlaken	-	(VJ2)	(VJ2)	(VJ2)	(VJ2)	(VJ1)	(VJ1)	(VJ1)	(VJ1)
Prostorninski delež vlaken [%]	-	0,50	1,00	1,50	2,00	0,50	1,00	1,50	2,00
Vodovezivno razmerje	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
Posed [cm]	12	8,5	5	3	1	9	8	6	5
Razlez [cm]	44	38,5	35	32	31	40	39	36	34
Delež por [%]	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Prostorninska masa [kg/m ³], SIST EN 12350-6	2300	2321	2332	2396	2442	2341	2344	2374	2402
f _{cm, 28 dni} [Mpa], SIST EN 12390-3	46,59	45,18	45,19	47,40	47,70	50,74	39,25	42,96	44,96

Legenda

(K) – agregat Kresnice

(VJ1) – jeklena vlakna IRI 50/16

(VJ2) – jeklena vlakna IRI 50/30

Sestava betonskih kompozitov normalne trdnosti z dodanimi jeklenimi vlakni za eksperimentalno raziskavo lezenja

Lezenje vlaknastih betonov normalne trdnosti smo merili na preskušancih devetih različnih vlaknastih betonskih mešanic. Mešanica KNVJ1 je bila osnovna, primerjalna betonska mešanica brez dodane jeklene vlaknaste armature, mešanice KNVJ2, KNVJ3, KNVJ4 in KNVJ5 so vsebovale daljša jeklena vlakna (VJ2) z 0,50 %, 1,00 %, 1,50 % in 2,00 % prostornine kompozita, mešanice KNVJ6, KNVJ7, KNVJ8 in KNVJ9 pa so vsebovale enake deleže krajših jeklenih vlaken (VJ1). Preskušanci preiskovanih kompozitov so bili 24 ur po zamešanju pokriti s polietilensko folijo, 24 ur po izdelavi pa so bili 6 dni v vodi. Preskušanci so bili stari 7 dni, ko smo začeli s eksperimentalno raziskavo lezenja. Lastnosti in recepture svežih mešanic vlaknastega betona normalne trdnosti z dodanimi krajšimi in daljšimi jeklenimi vlakni so v preglednici 4.13.

4.3 Merjenje avtogenega in celotnega krčenja vlaknastih betonov visoke trdnosti

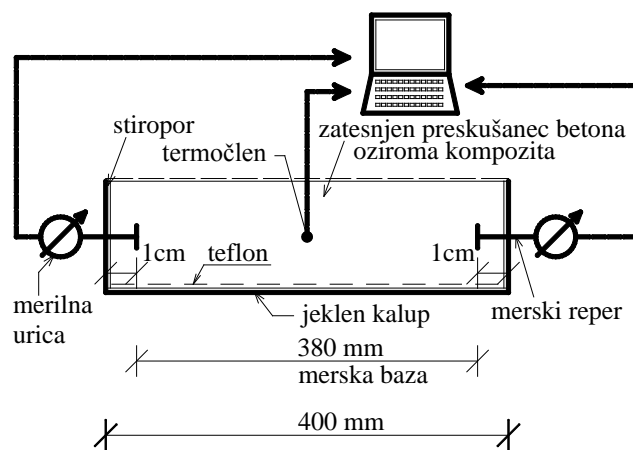
Krčenje kompozita je sestavljeno iz plastičnega in avtogenega krčenja ter iz krčenja zaradi sušenja kompozita. Plastično krčenje, ki je posledica izhlapevanja vode iz sveže zabetoniranega kompozita, se pojavi takoj po končanem betoniranju. Avtogeno krčenje kompozita pa je posledica porabe vode v kemičnem procesu strjevanja cementne paste. Zaradi tega se avtogeno krčenje pojavi takoj po začetku hidratacije cementa, tako da se velik del avtogenega krčenja kompozita razvije v prvih urah oziroma dneh po betoniranju. Pri eksperimentalnem ugotavljanju avtogenega krčenja betona oziroma kompozita moramo od celotnih izmerjenih časovnih deformacij odšteti temperaturne deformacije zaradi spremembe temperature preskušancev, ki je posledica sproščene hidratacijske toplote. Avtogeno krčenje kompozita pri betonih oziroma kompozitih običajne trdnosti predstavlja sorazmerno majhen del celotnega krčenja kompozita. Pri betonih oziroma kompozitih visoke trdnosti pa zaradi majhnega vodovozivnega razmerja sveže mešanice avtogeno krčenje predstavlja pomemben del celotnega krčenja visokotrdnega betona oziroma kompozita.

Prvih 24 ur po zamešanju smo avtogeno krčenje preskušancev z elektronsko vodenimi meritvami spremljali neprekinjeno, pozneje pa smo meritve izvajali vsak dan, nazadnje pa v nekaj dnevnikih oziroma tedenskih presledkih. Avtogeno krčenje vlaknastega in primerjalnega visokotrdnega betona brez vlaknaste armature smo merili na preskušancih, zatesnjenih z neprepustno polietilensko folijo, ki preprečuje izmenjevanje vlage med preskušancem in okolico. Celotno krčenje vlaknastega betona pa smo merili na preskušancih, ki so bili od zabetoniranja dalje v klimatski komori ves čas izpostavljeni konstantni relativni vlagi okolja $70 \% \pm 3 \%$ in temperaturi $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Avtogeno krčenje je določeno s krčenjem zatesnjenih preskušancev, krčenje zaradi sušenja pa je določeno z razliko izmerjenega celotnega krčenja in izmerjenega avtogenega krčenja preskušancev. Računalniško vodene meritve začetnega avtogenega krčenja zatesnjenih preskušancev smo z uporabo elektronskih merilnih uric izvajali v skladu z japonskim standardom JIS A 1129 (Tazawa idr., 1999) (slika 4.3).

Način merjenja avtogenega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti

Kalupe preskušancev za merjenje avtogenega krčenja dimenzij 100 x 100 x 400 mm smo priredili tako, da smo na končnih stranicah jeklenega kalupa izvrtali luknji, skozi kateri smo namestili merske reperje za merjenje krčenja. Merski reperji so bili nameščeni tako, da je dolžina merske baze znašala 380 mm. Zgodnjo avtogeno krčenje smo začeli meriti takoj, ko so se odčitki na merilnih uricah preskušancev umirili (merilni reper ni sledil vsiljenemu premikanju vzmeti merilne urice), to je v času, ko je bila trdnost stika med merilnimi reperji in betonom oziroma kompozitom dovolj velika, da so mmerilni reperji začeli slediti deformiranju preskušanca. Da smo zmanjšali trenje, smo med preskušane in podlago kalupa vložili teflonsko folijo. Izmenjavo vlage med preskušancem in okolico smo preprečili tako, da smo preskušane takoj po vgraditvi v kalup po vzdolžnih ploskvah plošč zatesnili s polietilensko folijo debeline 0,5 mm. Na oba konca kalupa pa smo vstavili stiropor debeline 5 mm. Tako pripravljene po tri preskušance za vsak tip kompozita in primerjalnega betona smo iz laboratorija odnesli v klimatsko komoro s konstantno vlago $70 \% \pm 3 \%$ in temperaturo $22 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ter začeli meriti temperaturo in zgodnje avtogeno krčenje preskušancev. Shematičen prikaz merjenja avtogenega krčenja je prikazan na sliki 4.3.



Slika 4.3: Shematičen prikaz merjenja avtogenega krčenja vlaknasto-betonskega preskušanca
Figure 4.3: Schematic view of measuring autogenous shrinkage of fibre reinforced concrete

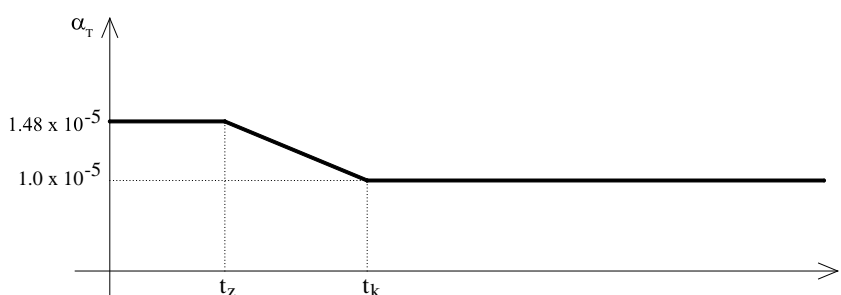
Temperaturo v sredini preskušanca smo merili s termočlenom. Obseg oziroma izbor in obdelava rezultatov meritev časovnih sprememb dolžine preskušancev, katerih del je poleg avtogenega krčenja tudi kemično oziroma plastično krčenje kompozita, sta bila avtomatizirana. Za začetek avtogenega krčenja preskušancev smo privzeli začetek naraščanja temperature v vlaknastem betonu, kar je približno enako začetku vezanja cementa. Japonski inštitut za beton (Tazawa idr., 1999) namreč za začetek merjenja avtogenega krčenja definira čas začetka vezanja cementa, ki se na zunaj približno kaže z naraščanjem temperature preskušanca, če je ta v okolju s konstantno temperaturo.

Meritve so potekale na po treh zatesnjenih preskušancih za vsak tip kompozita oziroma primerjalnega betona. Računalniško vodeni obseg rezultatov meritev je potekal prek šestih merilnih uric z natančnostjo 0,001 mm, ki so bile postavljene na merske reperje preskušancev (slika 4.4).



Slika 4.4: Elektronsko merjenje avtogenega krčenja kompozita oziroma betona
Figure 4.4: Electronic measure of autogenous shrinkage of composite or concrete

Elektronsko izmerjene deformacije v prvih 24 urah po zamešanju predstavljajo celotne deformacije kompozita oziroma betona. Velikost avtogenega krčenja kompozita smo določili z razliko izmerjenih in temperaturnih deformacij preskušancev, ki smo jih ocenili na podlagi razteznostnega koeficienta svežega betona oziroma kompozita $\alpha_T = 1,4 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ in izmerjene spremembe temperature preskušancev (glej disertacijo Saje 2001). Od časa, ko je temperatura betona začela naraščati, pa do časa, ko se je temperatura preskušanca pri izotermnih razmerah okolja spet izenačila s temperaturo okolice, smo za temperaturni razteznostni koeficient upoštevali linearno interpolacijo med vrednostma, ki veljata za sveži oziroma otrdeli beton (slika 4.5).



Slika 4.5: Časovno spreminjanje temperaturnega razteznostnega koeficienta betona oziroma kompozita
Figure 4.5: Time dependent temperature extension coefficient of concrete or composite

Rezultati meritev krčenja vlaknastega in primerjalnega betona so v grafični obliki in v obliki preglednic prikazani v poglavju 4.5. Na grafičnih prikazih avtogeno krčenje preskušancev predstavlja razliko med izmerjenimi celotnimi in ocenjenimi temperaturnimi deformacijami.

Ko so časovni prirastki avtogenega krčenja preskušancev po 24 urah od zabetoniranja preskušancev postali manj izraziti, smo na zatesnjene preskušance namestili merilne reperje za nadaljevanje merjenja avtogenega krčenja vlaknastega betona z nasadnim deformetrom. Merilne reperje smo namestili tako, da smo na nasprotnih vzdolžnih stranicah zatesnjenga preskušanca v polietilenski foliji naredili po dve luknjici, skozi kateri smo s sekundnim lepilom prilepili po dva kovinska reperja in izmerili začetno medsebojno oddaljenost reperjev. Po enem dnevu smo priključke reperjev dodatno utrdili z dvokomponentnim lepilom za sveži beton proizvajalca Sika. S tem smo zagotovili trdnejši stik med reperji in preskušancem. Meritve z nasadnim deformetrom smo od drugega dne najprej

izvajali enkrat na dan, ko je bil časovni prirastek deformacij manjši, pa redkeje. Sistem zatesnitve preskušanca se je pokazal kot zelo dober, saj je preskušanec z maso približno deset kilogramov izgubil na teži manj kot 1 g na mesec, kar je skladno z japonskimi standardi, ki v času merjenja dovoljujejo 0,05 % izgube mase (Tazawa idr. 1999, Saje idr. 2000).

Način merjenja celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti

Celotno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti smo merili na preskušancih, ki smo jih 24 ur po zabetoniranju razkalupili in namestili v klimatsko komoro z relativno vlažnostjo $70\% \pm 3\%$ in temperaturo $22\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Za vsako vrsto vlaknastega betona je merjenje krčenja potekalo na najmanj treh preskušancih. Merjenje krčenja smo izvajali z nasadnim deformetrom z natančnostjo 0,001 mm (slika 4.6). Pri krčenju preskušencev smo upoštevali srednjo vrednost izmerjenega krčenja na dveh med seboj vzporedno ležečih ploskvah prizme.



Slika 4.6: Meritev celotnega krčenja z nasadnim deformetrom
Figure 4.6: Measurement of total shrinkage with inset deformeter

4.4 Merjenje celotnega krčenja vlaknastih betonov normalne trdnosti

Krčenje zaradi sušenja kompozita normalne trdnosti predstavlja prevladujoči del celotnega krčenja kompozita. Avtogeni del krčenja, ki je določen z razliko celotnega krčenja in krčenja kompozita zaradi sušenja, predstavlja pri betonih normalne trdnosti manjši del celotnega krčenja. Zgodnje avtogeno krčenje kompozitov normalne trdnosti je v prvih 24 urah po zamešanju tako rekoč zanemarljivo (Saje, 2001).

Celotno in avtogeno krčenje preiskovanih vlaknastih betonov smo merili na prizmah. Za vsako preiskovano mešanico kompozita smo za merjenje krčenja izdelali po 4 prizme z dimenzijami 100 mm x 100 mm x 400 mm, za določitev tlačne trdnosti kompozita pa še po tri kocke s stranico 15 cm. Celotno krčenje smo merili na treh prizmah za vsako vrsto kompozita. Na četrti prizmi, ki smo jo takoj po zabetoniranju zapečatili, pa smo merili avtogeno krčenje kompozita. Meritve avtogenega krčenja od drugega dne naprej in celotnega krčenja kompozita smo izvajali z nasadnim deformetrom. Meritve smo najprej izvajali enkrat na dan, ko se je proces krčenja upočasnil, pa redkeje.

4.5 Rezultati meritev avtogenega in celotnega krčenja betonov visoke trdnosti

Rezultati meritev avtogenega krčenja in celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti so grafično ter v obliki preglednic prikazani v nadaljevanju. V preglednicah so povprečne vrednosti krčenja zatesnjenih preskušancev in povprečne vrednosti krčenja preskušancev kompozita oziroma primerjalnega betona, izpostavljenega sušenju v okolju z relativno vlažnostjo $70\% \pm 3\%$ in temperaturo $22\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Povprečje avtogenega in celotnega krčenja je določeno kot srednja vrednost meritev na treh preskušancih. V prvih 24 urah od zamešanja smo spremljali tudi časovno spreminjanje temperature preskušanca in okolice. V preglednicah so za vsako vrsto vlaknastega betona podane začetna temperatura betona T_z , največja dosežena temperatura betona T_{\max} , čas t_z privzetega začetka krčenja, čas $t(T_{\max})$, ko je zaradi hidratacije dosežena najvišja temperatura preskušancev, in čas t_k , ko se temperatura preskušancev izenači s temperaturo okolja. Za posamezno preiskovano vrsto kompozita je v preglednici podana tudi povprečna temperatura okolice T_o . Srednje vrednosti izmerjenega krčenja visokotrdnega kompozita pri starostih kompozita 7, 28, 90 in 180 dni so v preglednici 4.15. Rezultati meritev krčenja za vmesne vrednosti pa so prikazani na diagramih časovnega poteka krčenja.

4.6 Rezultati meritev avtogenega in celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti z jeklenimi vlakni

Na slikah 4.7 do 4.19 so za preiskovane visokotrдне vlaknaste betone z jeklenimi vlakni prikazani časovni poteki temperature preskušancev, izmerjenih deformacij preskušancev in avtogenega krčenja preskušancev, ki je določeno z vsoto izmerjenih in temperaturnih deformacij zaradi spreminjanja temperature preskušancev. Vsi prikazani rezultati meritev se nanašajo na prvih 24 ur po izdelavi preskušancev, ki so bili med meritvami v okolju s konstantnima relativno vlago $70\% \pm 3\%$ in temperaturo $22\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Iz časovnega poteka avtogenega krčenja mikroarmiranega betona visoke trdnosti, ki je prikazano na slikah od 4.7 do 4.19, je bilo med 12. in 24. uro opazno rahlo zmanjšanje avtogenega krčenja betona, in sicer med časom, ko je bila v betonu dosežena največja temperatura, in časom, ko se je temperatura betona izenačila s temperaturo okolice. Ta fizikalni pojav je posledica termodinamičnega ravnovesja v porah cementnega kamna. Ko začne temperatura v betonu padati, se beton zaradi linearnega temperaturnega raztezka krči, s čimer se zmanjša tudi prostornina zaprtih por v cementnem kamnu. Zaradi zmanjšanja prostornine zaprte pore se po zakonih termodinamike poveča relativna vlažnost v pori, kar zmanjša natezne sile, ki delujejo na stene pore, to pa povzroči zmanjšanje avtogenega krčenja betona. Zaradi padca temperature zraka v zaprti pori ob vzpostavitvi termodinamičnega ravnovesja naraste relativna vlažnost zraka, kar povzroči dodatno zmanjšanje avtogenega krčenja kompozita.

Srednje vrednosti in standardni odklon rezultatov meritev zgodnjega avtogenega krčenja in izmerjenih deformacij krčenja po 12 in 24 urah od priprave preskušancev so v preglednici 4.14. Rezultati meritev avtogenega in celotnega krčenja v poznejšem času pri starostih kompozita 7, 28, 90 in 180 dni pa so v preglednici 4.15.

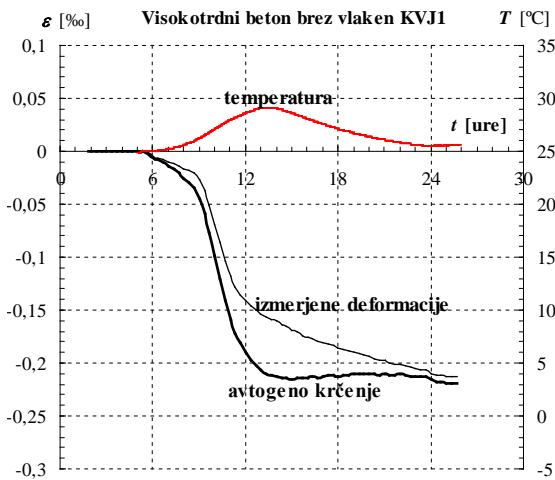
Preglednica 4.14: Srednja vrednost in standardni odklon izmerjenih deformacij in zgodnjega avtogenega krčenja kompozita z različnimi vsebnostmi jeklenih vlaken v ‰ pri starosti t

Table 4.14: Average value and standard deviation of measured deformations and early autogenous shrinkage of composite with different content of steel fibres in ‰ at age t

Kompozit	t_z [h]	T_z [°C]	$t(T_{max})$ [h]	T_{max} [°C]	t_k [h]	T_o [°C]	Srednja vrednost in standardni odklon izmerjenih deformacij krčenja [‰]			
							Srednja vrednost in standardni odklon zgodnjega avtogenega krčenja [‰]			
							Starost kompozita t			
12 ur	12 ur	24 ur	24 ur							
KVJ1	5,5	24,90	13,5	29,1	24	25,48	-0,141	±0,021	-0,210	±0,023
							-0,190	±0,022	-0,216	±0,025
KVJ2	6	21,65	14,4	25,2	24	22,4	-0,107	±0,056	-0,188	±0,021
							-0,143	±0,058	-0,197	±0,021
KVJ3	6	21,98	15,2	25,9	24	21,8	-0,043	±0,006	-0,161	±0,004
							-0,077	±0,008	-0,175	±0,006
KVJ4	6	22,44	15,9	25,9	24	22	-0,026	±0,029	-0,131	±0,030
							-0,050	±0,031	-0,144	±0,031
KVJ5	6,2	22,23	14,7	26,53	24	22,2	-0,036	±0,014	-0,136	±0,020
							-0,080	±0,016	-0,154	±0,022
KVJ6	6,2	22,23	15,7	25,96	24	21,9	-0,005	±0,004	-0,108	±0,009
							-0,034	±0,006	-0,122	±0,011
KVJ7	6,3	22,59	14,6	26,21	24	22,15	-0,013	±0,016	-0,097	±0,019
							-0,048	±0,018	-0,112	±0,021
KVJ8	6	23,3	14,2	26,7	24	22,69	-0,068	±0,028	-0,164	±0,030
							-0,113	±0,030	-0,170	±0,032
KVJ9	6	20,58	16,9	24,46	24	20,28	-0,018	±0,013	-0,136	±0,011
							-0,041	±0,015	-0,156	±0,013
KVJ10	6	23,17	14,4	27,53	24	23,07	-0,058	±0,027	-0,147	±0,030
							-0,103	±0,029	-0,165	±0,034
KVJ11	6	20,17	17,3	24,12	24	20,20	0,000	0,000	-0,068	±0,012
							-0,022	±0,011	-0,090	±0,013
KVJ12	6,2	19,63	17,5	24,10	24	20,02	0,000	0,000	-0,064	±0,018
							-0,026	±0,010	-0,093	±0,020
KVJ13	6,2	19,54	17,9	23,93	24	19,98	0,000	±0,004	-0,056	±0,015
							-0,016	±0,004	-0,081	±0,015

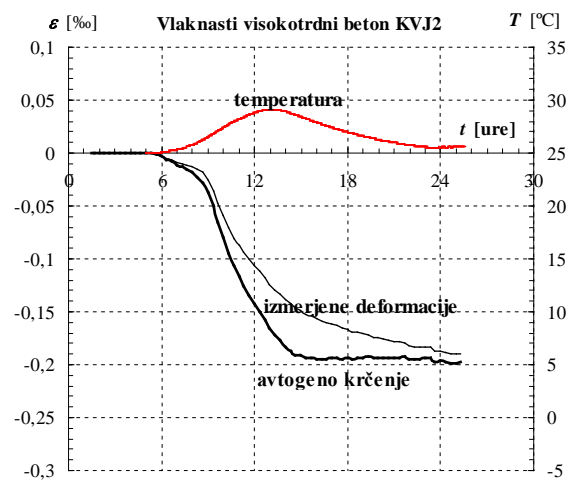
Preglednica 4.15: Srednja vrednost in standardni odklon krčenja kompozita z različnimi vsebnostmi jeklenih vlaken v % pri starosti t **Table 4.15:** Average value and standard deviation shrinkage of composite with different content of steel fibres in % at age t

Kompozit	Povprečna vrednost in standardni odklon celotnega krčenja preskušancev pri RH = 70% [%]							
	Povprečna vrednost in standardni odklon krčenja zatesnjenih preskušancev [v ‰]							
	Starost kompozita t							
	7 dni		28 dni		90 dni		180 dni	
KVJ1	-0,492	±0,008	-0,621	±0,008	-0,690	±0,008	-0,710	±0,008
	-0,360	±0,009	-0,460	±0,009	-0,498	±0,009	-0,530	±0,006
KVJ2	-0,428	±0,005	-0,538	±0,003	-0,566	±0,007	-0,592	±0,007
	-0,343	±0,008	-0,457	±0,008	-0,493	±0,005	-0,514	±0,001
KVJ3	-0,396	±0,006	-0,492	±0,002	-0,562	±0,010	-0,573	±0,012
	-0,306	±0,011	-0,405	±0,011	-0,474	±0,008	-0,496	±0,010
KVJ4	-0,352	±0,008	-0,468	±0,005	-0,522	±0,007	-0,539	±0,004
	-0,292	±0,011	-0,399	±0,021	-0,450	±0,028	-0,474	±0,021
KVJ5	-0,305	±0,006	-0,469	±0,008	-0,537	±0,006	-0,550	±0,002
	-0,221	±0,019	-0,366	±0,012	-0,436	±0,007	-0,461	±0,003
KVJ6	-0,335	±0,023	-0,424	±0,019	-0,485	±0,017	-0,498	±0,015
	-0,266	±0,019	-0,376	±0,020	-0,420	±0,016	-0,445	±0,018
KVJ7	-0,309	±0,012	-0,414	±0,014	-0,480	±0,021	-0,491	±0,021
	-0,222	±0,009	-0,325	±0,013	-0,393	±0,016	-0,414	±0,016
KVJ8	-0,406	±0,032	-0,494	±0,035	-0,576	±0,045	-0,595	±0,047
	-0,302	±0,016	-0,398	±0,011	-0,455	±0,015	-0,475	±0,016
KVJ9	-0,414	±0,020	-0,497	±0,008	-0,574	±0,005	-0,588	±0,004
	-0,315	±0,024	-0,402	±0,007	-0,465	±0,010	-0,490	±0,012
KVJ10	-0,410	±0,006	-0,494	±0,002	-0,555	±0,006	-0,571	±0,013
	-0,295	±0,008	-0,403	±0,001	-0,464	±0,001	-0,487	±0,004
KVJ11	-0,292	±0,008	-0,371	±0,004	-0,438	±0,009	-0,453	±0,011
	-0,215	±0,014	-0,307	±0,023	-0,367	±0,016	-0,383	±0,016
KVJ12	-0,328	±0,019	-0,426	±0,020	-0,481	±0,015	-0,494	±0,016
	-0,245	±0,006	-0,349	±0,004	-0,406	±0,006	-0,433	±0,013
KVJ13	-0,287	±0,043	-0,367	±0,028	-0,427	±0,020	-0,444	±0,021
	-0,181	±0,019	-0,302	±0,010	-0,337	±0,035	-0,360	±0,037



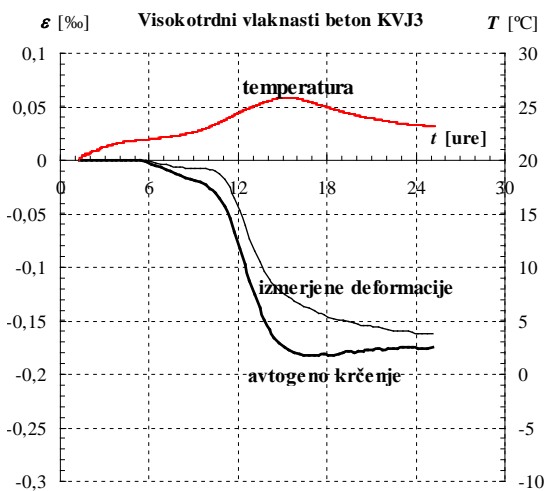
Slika 4.7: Časovni potek merjenega krčenja in temperature preskušancev visokotrdnega betona KVJ1 brez dodane vlaknaste armature.

Figure 4.7: Time development of temperature and measured shrinkage of high performance concrete specimens KVJ1 without fibres.



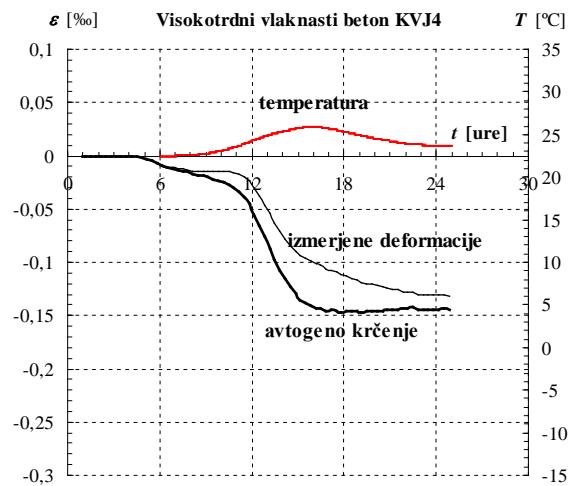
Slika 4.8: Časovni potek izmerjenega avtogenega krčenja in temperature visokotrdnega vlaknastega betona KVJ2 z 0,25 % jeklenih vlaken IRI 50/16.

Figure 4.8: Time development of temperature and measured autogenous shrinkage of high performance concrete KVJ2 with 0,25 % of steel fibres IRI 50/16.



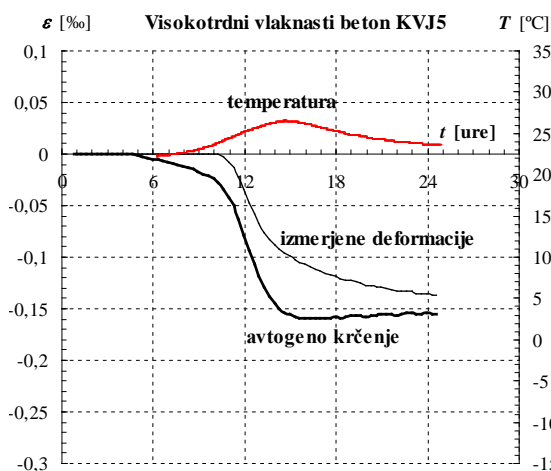
Slika 4.9: Časovni potek izmerjenega avtogenega krčenja in temperature visokotrdnega vlaknastega betona KVJ3 z 0,50 % jeklenih vlaken IRI 50/16.

Figure 4.9: Time development of temperature and measured autogenous shrinkage of high performance concrete KVJ3 with 0,50 % of steel fibres IRI 50/16.



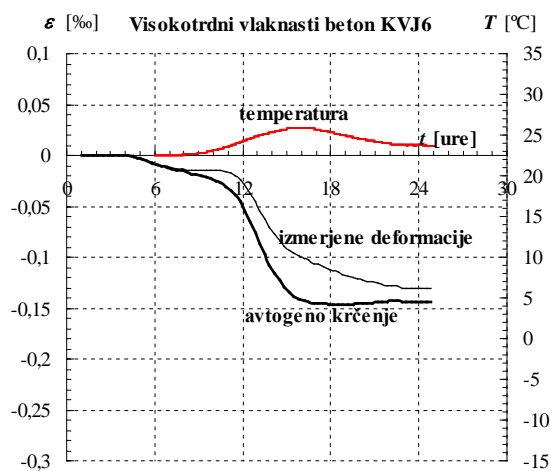
Slika 4.10: Časovni potek izmerjenega avtogenega krčenja in temperature visokotrdnega vlaknastega betona KVJ4 z 0,75 % jeklenih vlaken IRI 50/16.

Figure 4.10: Time development of temperature and measured autogenous shrinkage of high performance concrete KVJ4 with 0,75 % of steel fibres IRI 50/16.



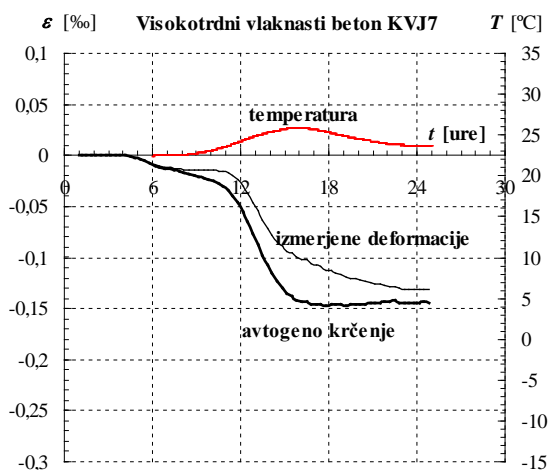
Slika 4.11: Časovni potek izmerjenega avtogenega krčenja in temperature visokotrdnega vlaknastega betona KVJ5 z 1,00 % jeklenih vlaken IRI 50/16.

Figure 4.11: Time development of temperature and measured autogenous shrinkage of high performance concrete KVJ5 with 1,00 % of steel fibres IRI 50/16.



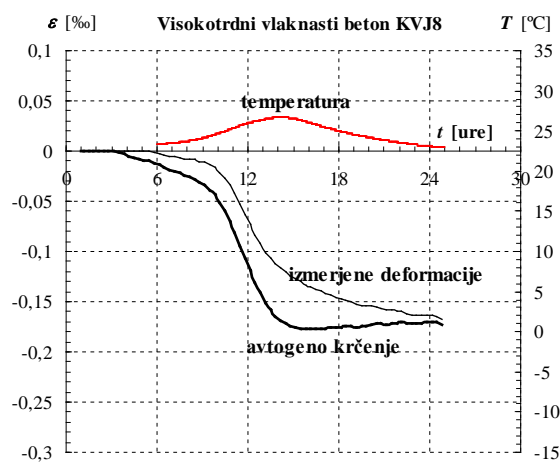
Slika 4.12: Časovni potek izmerjenega avtogenega krčenja in temperature preskušancev visokotrdnega vlaknastega betona KVJ6 z 1,50 % jeklenih vlaken IRI 50/16.

Figure 4.12: Time development of temperature and measured autogenous shrinkage of high performance concrete KVJ6 with 1,50 % of steel fibres IRI 50/16.



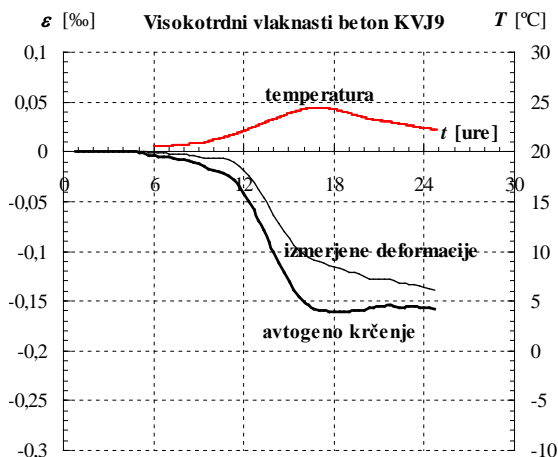
Slika 4.13: Časovni potek izmerjenega avtogenega krčenja in temperature visokotrdnega vlaknastega betona KVJ7 z 2,00 % jeklenih vlaken IRI 50/16.

Figure 4.13: Time development of temperature and measured autogenous shrinkage of high performance concrete KVJ7 with 2,00 % of steel fibres IRI 50/16.



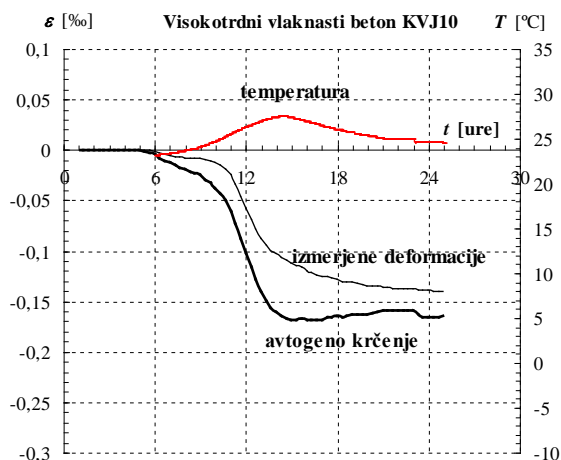
Slika 4.14: Časovni potek izmerjenega avtogenega krčenja in temperature visokotrdnega vlaknastega betona KVJ8 z 0,25 % jeklenih vlaken IRI 50/30.

Figure 4.14: Time development of temperature and measured autogenous shrinkage of high performance concrete KVJ8 with 0,25 % of steel fibres IRI 50/30.



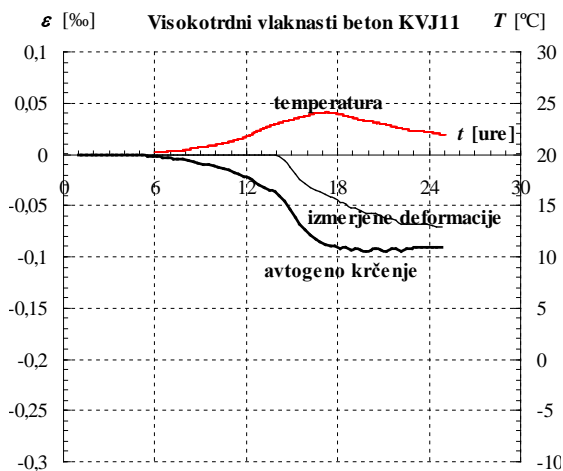
Slika 4.15: Časovni potek izmerjenega avtogenega krčenja in temperature visokotrdnega vlaknastega betona KVJ9 z 0,50 % jeklenih vlaken IRI 50/30.

Figure 4.15: Time development of temperature and measured autogenous shrinkage of high performance concrete KVJ9 with 0.50 % of steel fibres IRI 50/30.



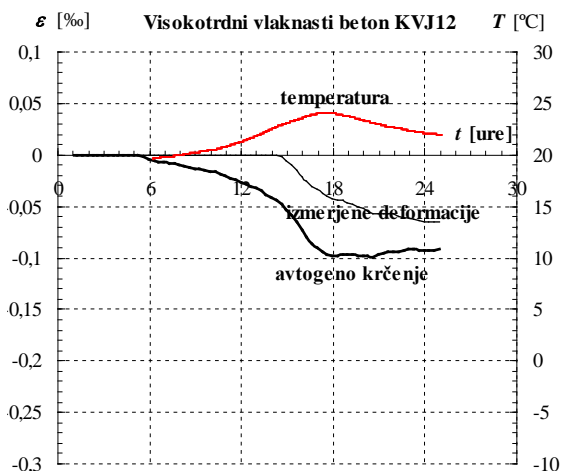
Slika 4.16: Časovni potek izmerjenega avtogenega krčenja in temperature visokotrdnega vlaknastega betona KVJ10 z 0,75 % jeklenih vlaken IRI 50/30.

Figure 4.16: Time development of temperature and measured autogenous shrinkage of high performance concrete KVJ10 with 0.75 % of steel fibres IRI 50/30.



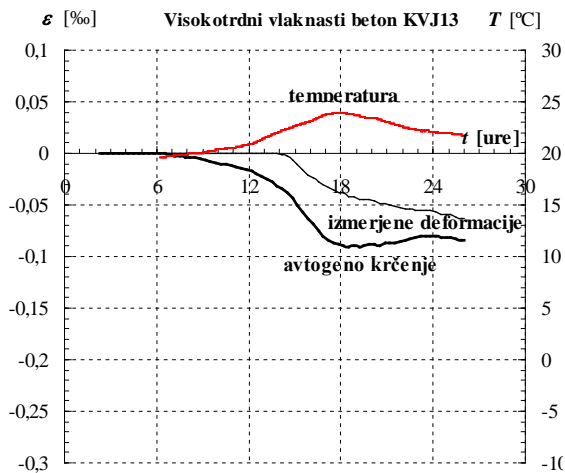
Slika 4.17: Časovni potek izmerjenega avtogenega krčenja in temperature visokotrdnega vlaknastega betona KVJ11 z 1,00 % jeklenih vlaken IRI 50/30.

Figure 4.17: Time development of temperature and measured autogenous shrinkage of high performance concrete KVJ11 with 1,00 % of steel fibres IRI 50/30.



Slika 4.18: Časovni potek izmerjenega avtogenega krčenja in temperature preskušancev visokotrdnega vlaknastega betona KVJ12 z 1,50 % jeklenih vlaken IRI 50/30.

Figure 4.18: Time development of temperature and measured autogenous shrinkage of high performance concrete KVJ12 with 1,50 % of steel fibres IRI 50/30.

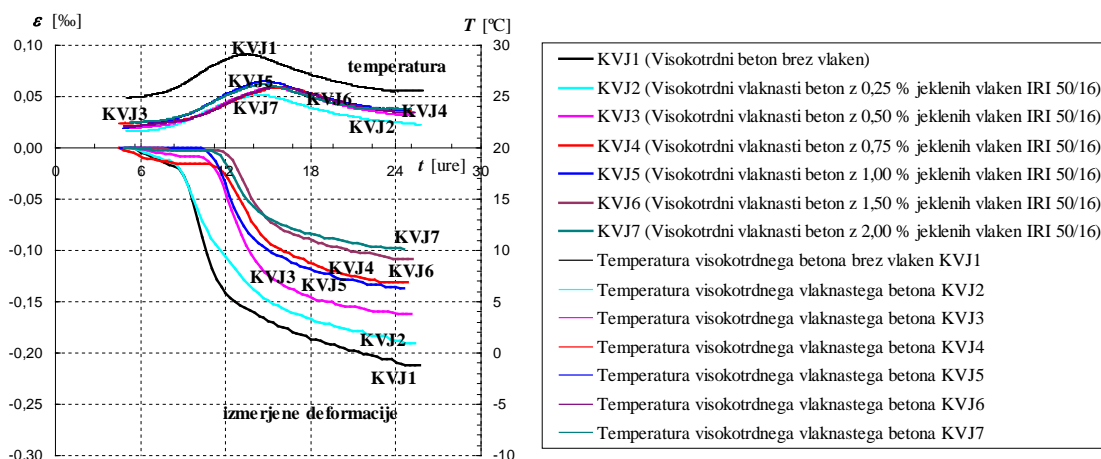


Slika 4.19: Časovni potek izmerjenega avtogenega krčenja in temperature visokotrdnega vlaknastega betona KVJ13 z 2,00 % jeklenih vlaken IRI 50/30.

Figure 4.19: Time development of temperature and measured autogenous shrinkage of high performance concrete KVJ13 with 2,00 % of steel fibres IRI 50/30.

Avtogeno krčenje visokotrdnega vlaknastega betona z različnimi deleži krajših jeklenih vlaken v prvih 24 urah od zamešanja

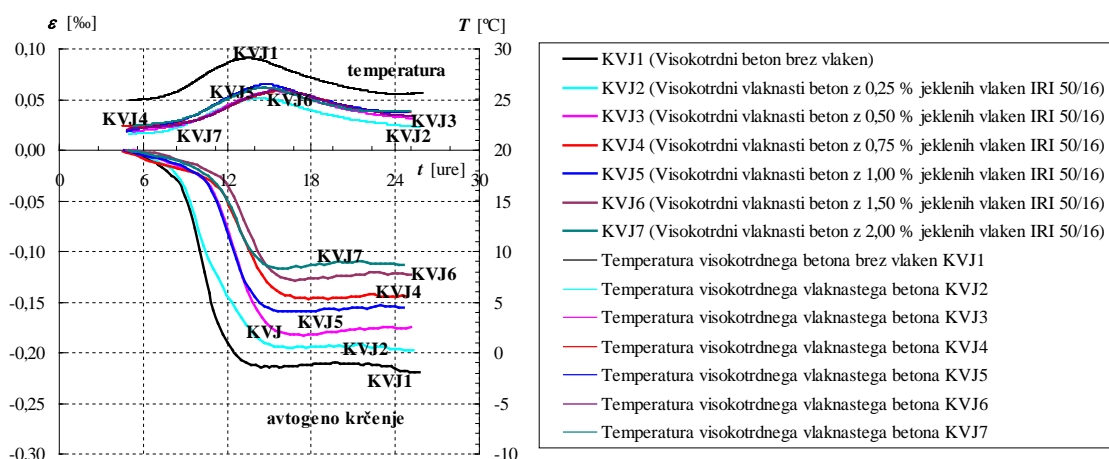
Na sliki 4.20 so prikazane izmerjene deformacije kompozita visoke trdnosti z različnim deležem krajših jeklenih vlaken (IRI 50/16) v prvih 24 urah po zamešanju. Vodovezivno razmerje svežih mešanic vseh kompozitov KVJ1, KVJ2, KVJ3, KVJ4, KVJ5, KVJ6 in KVJ7 je bilo enako in je znašalo 0,36. Količina agregata v vlaknasto-betonskih mešanicah je bila v odvisnosti od količine dodanih vlaken ustrezno zmanjšana. Iz prikaza eksperimentalnih rezultatov meritev na sliki 4.20 je razvidno, da se deformacija visokotrdnega kompozita s povečevanjem deleža dodane jeklene vlaknaste mikroarmature zmanjšuje. Izmerjene deformacije visokotrdnega vlaknastega betona z 0,75 % in 1,00 % prostorninskim deležem krajših jeklenih vlaken je po 24 urah od betoniranja za 35 % manjše od izmerjenih deformacij primerjalnega betona brez vlaknaste armature in za 25 % večje od izmerjenih deformacij vlaknastega betona s prostorninskim deležem jeklenih vlaken 1,50 % oziroma 2,00 % prostornine kompozita. Najmanjše izmerjene deformacije so bile izmerjene pri preskušancih iz kompozita z 2,00 % deležem krajših jeklenih vlaken, ki je za 55 % manjše od izmerjenih deformacij primerjalnega betona brez vlaknaste armature.



Slika 4.20: Izmerjene deformacije preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z različnimi vsebnostmi krajših jeklenih vlaken (IRI 50/16) v prvih 24 urah po betoniranju.

Figure 4.20: Measured deformations of specimens with fibre reinforced high performance concrete containing various amount of shorter steel fibres within 24 hours after concreting.

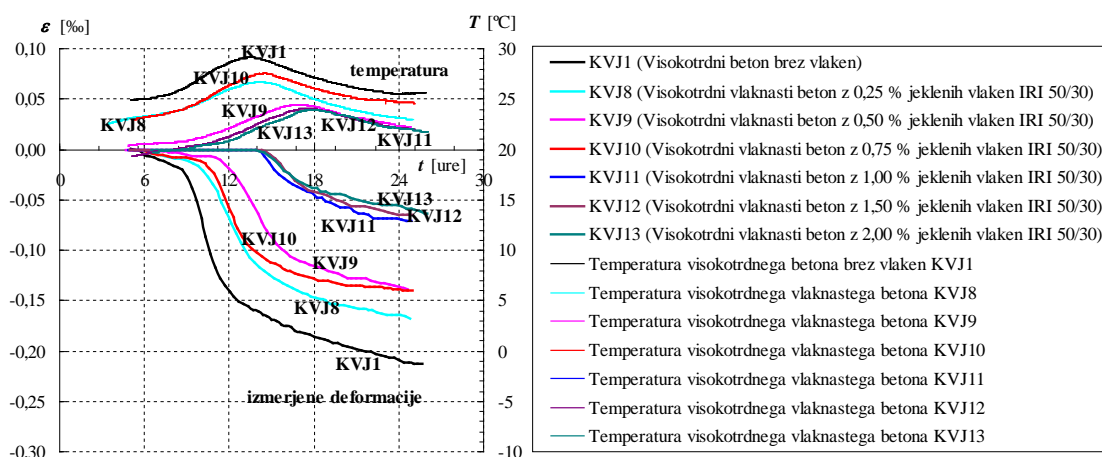
Na sliki 4.21 je prikazano časovno spreminjanje temperature preskušancev in časovni potek avtogenega krčenja betona visoke trdnosti, mikroarmiranega z različnimi prostorninskimi deleži krajših jeklenih vlaken IRI 50/16, v prvih 24 urah po betoniranju. Iz prikaza eksperimentalnih rezultatov na sliki 4.21 je razvidno, da se krčenje visokotrdnega betona z večanjem prostorninskega deleža vlaken v 24 urah po zamešanju zmanjša za približno 10 %. Zgodnje avtogeno krčenje vlaknastega betona z 1,50 % in 2,00 % deležem krajših jeklenih vlaken je približno enako in je za 20 % manjše od avtogenega krčenja vlaknastega visokotrdnega betona s prostorninskim deležem jeklenih vlaken, ki znaša 1,00 %. Avtogeno krčenje preskušancev vlaknastega betona KVJ7 z 2,00 % jeklenih vlaken IRI 50/16 je najmanjše in je za 50 % manjše od avtogenega krčenja primerjalnega betona brez dodane vlaknaste armature.



Slika 4.21: Avtogeno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti z različnimi prostorninskimi deleži krajših jeklenih vlaken IRI 50/16.

Figure 4.21: Autogenous shrinkage of fibre reinforced high performance concrete containing various volume parts of shorter steel fibres within 24 hours after concreting.

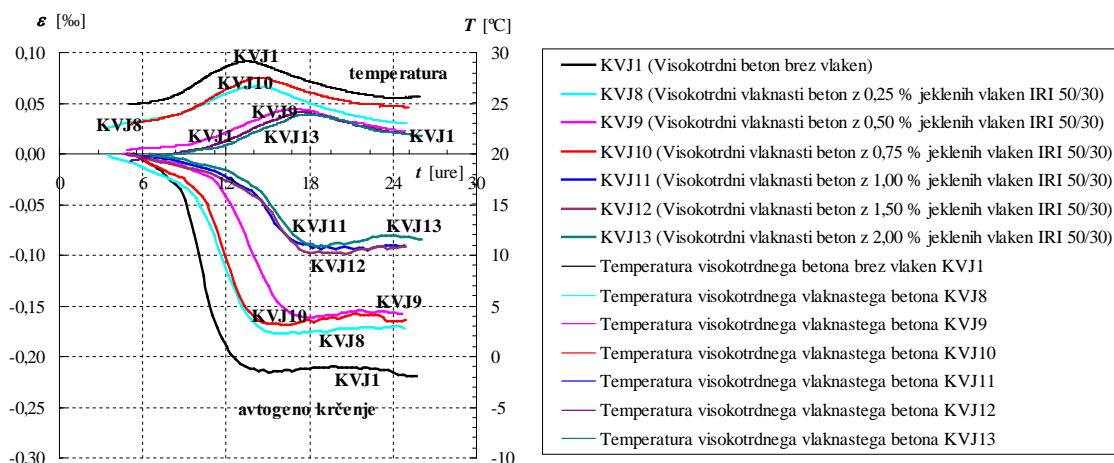
Na sliki 4.22 so prikazane celotne izmerjene deformacije vlaknastega betona visoke trdnosti z 0 %, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % in 2,00 % daljših jeklenih vlaken IRI 50/30. Iz prikaza rezultatov eksperimentalnih meritev je razvidno, da se izmerjene deformacije visokotrdnega vlaknastega betona z večanjem prostorninskega deleža jeklenih vlaken v kompozitu zmanjšujejo. Celotne izmerjene deformacije visokotrdnega vlaknastega betona z 1,00 %, 1,50 % in 2,00 % jeklenih vlaken so v 24 urah po zamešanju približno enake in so za 70 % manjše od deformacij primerjalnega betona KVJ1 brez vlaken. Izmerjene deformacije preskušancev kompozita KVJ13 z 2,00 % vlaken so od vseh preiskovanih kompozitov najmanjše.



Slika 4.22: Izmerjene deformacije preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z različnimi vsebnostmi daljših jeklenih vlaken (IRI 50/30) v prvih 24 urah po betoniranju.

Figure 4.22: Measured deformations of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing various amount of longer steel fibres (IRI 50/30) within 24 hours after concreting.

Iz prikaza rezultatov meritev zgodnjega avtogenega krčenja na sliki 4.23 je razvidno, da je avtogeno krčenje preskušancev vlaknastega betona KVJ8, ki vsebuje 0,25 % jeklenih vlaken, približno za 20 % manjše od avtogenega krčenja primerjalnega betona KVJ1 brez dodane vlaknaste armature. Ocenjene avtogene deformacije vlaknastega betona visoke trdnosti z 1,00 %, 1,50 % in 2,00 % daljših jeklenih vlaken so v 24 urah od zamešanja približno enake in po 24 urah od zabetoniranja pa za 40 % manjše od avtogenega krčenja vlaknastega betona KVJ9. Krčenje vlaknastih betonov KVJ8, KVJ9 in KVJ10 se razlikuje za približno 5 %. Krčenje preskušancev kompozita KVJ13, ki vsebuje 2,00 % jeklenih vlaken, je najmanjše, in sicer za 60 % manjše od krčenja primerjalnega betona enake sestave brez dodane vlaknaste armature. Na podlagi rezultatov meritev eksperimentalnih razsikav zgodnjega avtogenega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z dodanimi jeklenimi vlakni je razvidno, da se z večanjem prostorninskega deleža daljših jeklenih vlaken v kompozitu avtogeno krčenje vlaknastega betona v začetnih 24 urah po betoniranju zmanjšuje.



Slika 4.23: Avtogeno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti z različnimi prostorninskimi deleži daljših jeklenih vlaken IRI 50/30.

Figure 4.23: Autogenous shrinkage of fibre reinforced high performance concrete with different contents of longer steel fibre (IRI 50/30) within 24 hours after concreting.

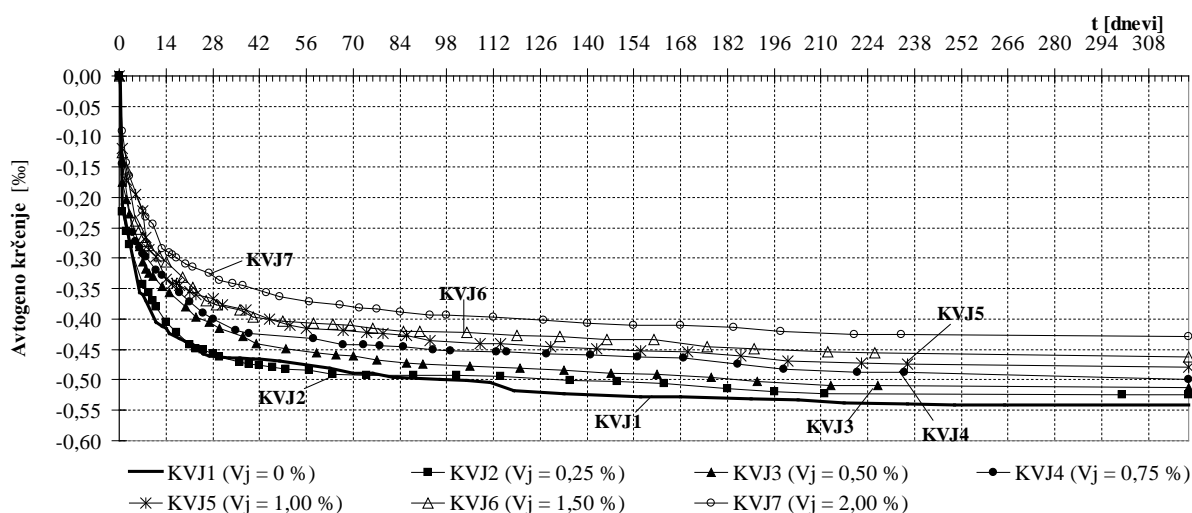
Iz primerjave časovnega razvoja temperature preskušancev preiskovanih kompozitov od KVJ1 do KVJ13, na slikah 4.20, 4.21, 4.22 in 4.23 ter v preglednici 4.14, je razvidno, da se z večanjem vsebnosti dodanih jeklenih vlaken čas privzetega začetka krčenja kompozita povečuje. Krčenje visokotrdnega betona brez dodane vlaknaste armature KVJ1 se zazna po približno 5,5 ure od zamešanja. Preskušanci iz kompozita KVJ2, KVJ3 in KVJ4 z 0,25 %, 0,50 % in 0,75 % prostorninskim deležem krajših jeklenih vlaken IRI 50/16 kažejo začetek krčenja po približno 6 urah od zamešanja, medtem ko se pri vlaknastih betonih KVJ5 in KVJ6 z 1,00 % in 1,50 % vlaken krčenje začne po približno 6,2 ure od zamešanja. Iz eksperimentalnih rezultatov (preglednica 4.14) je razvidno, da se krčenje kompozita začne najpozneje pri preskušancih vlaknastega betona KVJ7 s krajšimi jeklenimi vlakni, ki znašajo 2,00 % prostornine kompozita. Kot pri vlaknastih betonih s krajšimi jeklenimi vlakni se tudi pri kompozitih z dodanimi daljšimi jeklenimi vlakni s povečevanjem vsebnosti vlaken čas začetka krčenja kompozita daljša. Krčenje kompozitov KVJ8, KVJ9, KVJ10 in KVJ11 z 0,25 %, 0,50 %, 0,75 % in 1,00 % prostorninskim deležem daljših jeklenih vlaken se začne po približno 6 urah od zamešanja, medtem ko se pri kompozitih z 1,50 % in 2,00 % prostorninskim deležem začne po 6,2 ure od zamešanja.

Iz časovnega poteka temperature preskušancev bi sklepali, da se krčenje pri vlaknastih betonih z jeklenimi vlakni začne pozneje kot pri primerjalnem visokotrdnem betonu brez vlaknaste armature. Kompozit za enako povečanje temperature porabi več toplote kot preskušanci iz primerjalnega betona brez vlaken. To se kaže predvsem v največjem času povečanja temperature preskušancev, ki ga približno enačimo s časom začetka krčenja betona oziroma kompozita. Vsebnost vlaken na začetek krčenja le minimalno vpliva, kar je razvidno tudi iz opravljenih meritev. Minimalni časovni zamik začetka naraščanja temperature preskušanca je lahko le posledica izmenjave toplote med preskušancem in okoljem, ki je pri kompozitu minimalno večja kot pri betonu brez vlaken.

Avtogeno in celotno krčenje visokotrdnega vlaknastega betona z jeklenimi vlakni

Časovni razvoj avtogenega krčenja zatesnjenih preskušancev iz visokotrdnega kompozita, ki je mikroarmiran s krajšimi jeklenimi vlakni (IRI 50/16), je prikazan na sliki 4.24, časovni razvoj avtogenega krčenja zatesnjenih preskušancev iz visokotrdnega kompozita, ki je mikroarmiran z daljšimi jeklenimi vlakni (IRI 50/30), pa na sliki 4.25. Razvoj celotnega krčenja sušenju izpostavljenih preskušancev iz visokotrdnega kompozita, ki je mikroarmiran s krajšimi jeklenimi vlakni, je prikazan na sliki 4.26, razvoj celotnega krčenja sušenju izpostavljenih preskušancev iz visokotrdnega kompozita, ki je mikroarmiran z daljšimi jeklenimi vlakni, pa na sliki 4.27.

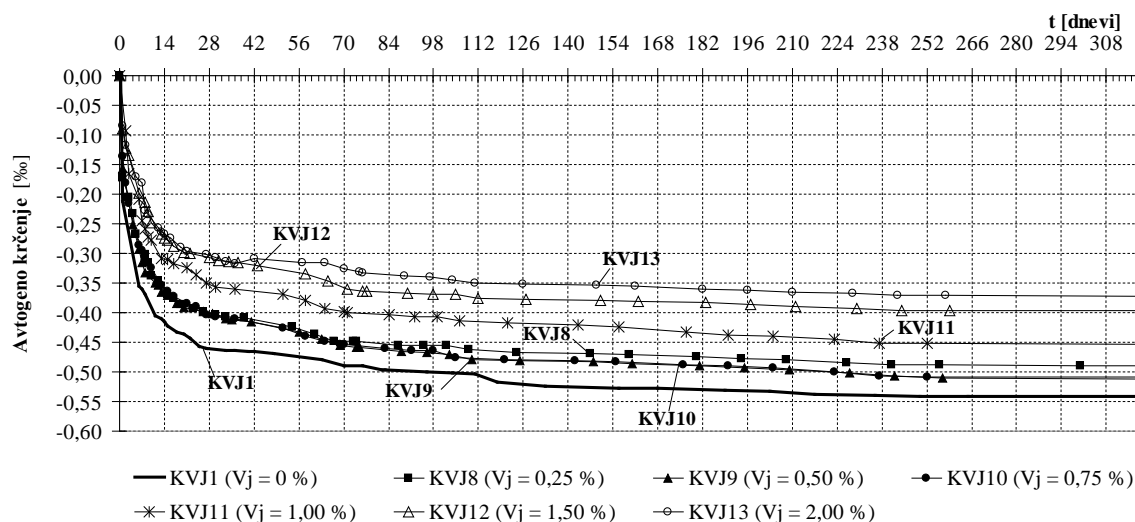
Na sliki 4.24 so prikazani rezultati meritev avtogenega krčenja zatesnjenih preskušancev vlaknastega betona z različno vsebnostjo krajših jeklenih vlaken IRI 50/16. Najmanjše krčenje je bilo ugotovljeno pri preskušancih z največjim, 2,00 % deležem jeklenih vlaken in je bilo po 14 in 28 dneh od zamešanja za 30 % manjše od avtogenega krčenja primerjalnega betona brez dodane vlaknaste armature. S staranjem preskušancev se razlika med avtogenim krčenjem preskušancev vlaknastega betona z 2,00 % jeklenih vlaken in primerjalnega betona brez vlaknaste armature manjša in na koncu trajanja meritev po 320 dneh od zamešanja znaša 20 %. Avtogeno krčenje preskušancev vlaknastega betona z 0,50 % in 0,75 % prostorninskim deležem jeklenih vlaken je po 14 dneh od zamešanja za 20 % manjše od krčenja primerjalnega betona brez dodane jeklene vlaknaste armature. Ta razlika v krčenju se s časom trajanja meritev manjša in po 28 dneh od zamešanja znaša 12 %, po 320 dneh od zamešanja pa 10 %. Avtogeno krčenje preskušancev z 1,00 % in 1,50 % jeklenih vlaken pa je po 14 dneh od zamešanja za 25 % manjše od avtogenega krčenja primerjalnega betona brez dodane vlaknaste armature. S časom se razlika v krčenju primerjanih vlaknastih betonov manjša in po 28 dneh od zamešanja znaša 22 %, v končnem času trajanja meritev po 320 dneh od zamešanja pa 15 %.



Slika 4.24: Časovni razvoj avtogenega krčenja zatesnjenih preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0 %, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % in 2,00 % krajših jeklenih vlaken IRI 50/16.

Figure 4.24: Time development of autogenous shrinkage of sealed test specimens made of fibre reinforced high performance concrete containing 0 %, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % and 2,00 % of shorter steel fibres IRI 50/16.

Na sliki 4.25 je prikazan časovni razvoj avtogenega krčenja zatesnjenih preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z naslednjimi prostorninskimi deleži daljših jeklenih vlaken: 0 %, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % in 2,00 %. Avtogeno krčenje preskušancev iz vlaknastega betona z 0,25 %, 0,50 % in 0,75 % daljših jeklenih vlaken je po 14 dneh od zamešanja za približno 14 % manjše od avtogenega krčenja primerjalnega betona brez dodane vlaknaste armature. Po 28 dneh od zamešanja se razlika med avtogenim krčenjem vlaknastih betonov in primerjalnega betona brez vlaken zmanjša na 13 %. S časovnim razvojem krčenja se razlike med krčenjem vlaknastih betonov in primerjalnega betona manjšajo. Končno krčenje pri 320 dneh od zamešanja je za vlaknaste betone z 0,50 % in 0,75 % jeklenih vlaken 5 % manjše od krčenja primerjalnega betona brez vlaken. Končno krčenje betona z vsebnostjo 0,25 % jeklenih vlaken je 10 % manjše od končnega krčenja primerjalnega betona in 4 % večje od krčenja vlaknastih betonov z 0,50 % in 0,75 % jeklenih vlaken. Manjše avtogeno krčenje vlaknastega betona z 0,25 % jeklenih vlaken, v primerjavi z avtogenim krčenjem vlaknastih betonov z 0,50 % in 0,75 % daljših jeklenih vlaken, pripisujemo manjšemu deležu por v kompozitu z 0,25 % jeklenih vlaken, ki je posledica enakomernejše razporeditve jeklenih vlaken v kompozitu. Avtogeno krčenje vlaknastih betonov z 1,50 % in 2,00 % daljših jeklenih vlaken je po 14 oziroma 28 dneh od zamešanja preskušancev za 35 % oziroma 34 % manjše od avtogenega krčenja primerjalnega betona brez vlaken. Najmanjše avtogeno krčenje smo izmerili pri vlaknastem betonu z 2 % jeklenih vlaken, ki je za 30 % manjše od avtogenega krčenja primerjalnega betona brez vlaken in za 26 % manjše od avtogenega krčenja vlaknastega betona z 1,50 % daljših jeklenih vlaken.

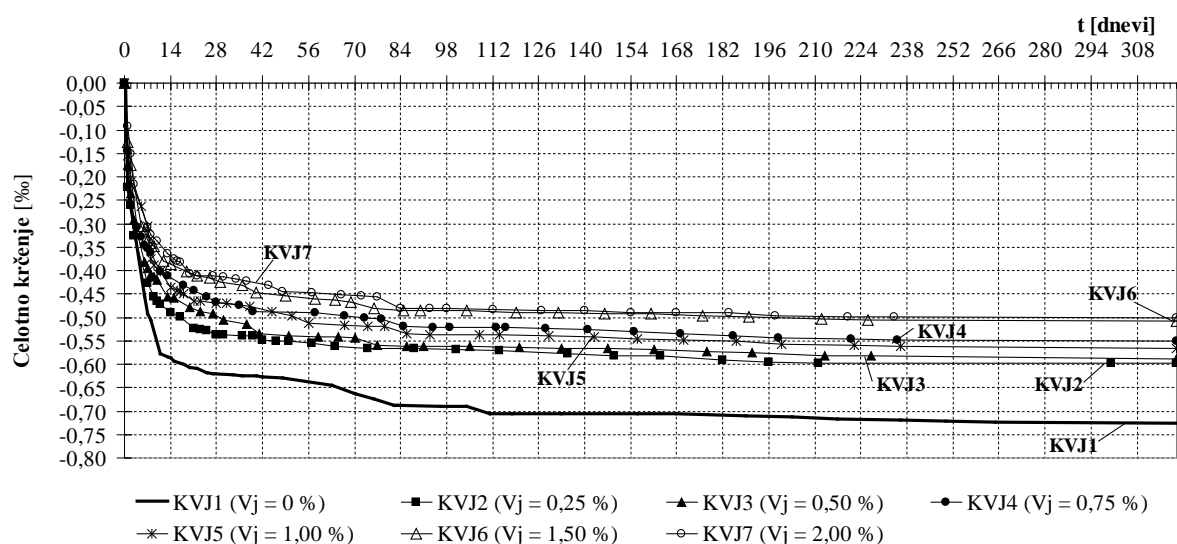


Slika 4.25: Časovni razvoj avtogenega krčenja zatesnjenih preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0 %, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % in 2,00 % daljših jeklenih vlaken IRI 50/30.

Figure 4.25: Time development of autogenous shrinkage of sealed test specimens made of fibre reinforced high performance concrete containing 0 %, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % and 2,00 % of longer steel fibres IRI 50/30.

Celotno krčenje preskušancev z različnimi deleži krajših jeklenih vlaken je prikazano na sliki 4.26. Celotno krčenje vlaknastega betona z 2,00 % jeklenih vlaken je izmed vseh preiskovanih kompozitov vlaknastega betona najmanjše in je po 14 dneh od zamešanja za 37 % manjše od krčenja primerjalnega betona brez vsebovane vlaknaste armature. Ta razlika krčenja se s časom manjša in znaša po 28 dneh

od zamešanja le še 33 %. Končno krčenje vlaknastega betona z 2,00 % vlaken je po 320 dneh od zamešanja za 31 % manjše od krčenja primerjalnega betona brez vlaken. Celotno krčenje vlaknastega betona z 1,50 % krajših jeklenih vlaken v celotnem času meritev skoraj sovпада s krčenjem vlaknastega betona z 2,00 % krajših jeklenih vlaken. Celotno krčenje vlaknastega betona s prostorninskimi deleži krajših jeklenih vlaken 0,75 % in 1,00 % je po 14 dneh od zamešanja približno enako in je za približno 26 % manjše od krčenja betona primerljive sestave brez vlaken. Po 28 dneh od zamešanja se razlika med krčenjem vlaknastih betonov in betona brez vlaknaste armature zmanjša na 24 %. Po 320 dneh od zamešanja pa je celotno krčenje vlaknastih visokotrdnih betonov z 1,00 % in 0,75 % jeklenih vlaken za 22 % manjše od krčenja betona brez vlaken. Celotno krčenje vlaknastega betona z 0,25 % in 0,50 % jeklenih vlaken je po 14 dneh od zamešanja približno enako in je za 22 % manjše od krčenja primerjalnega betona brez vlaken. Po 28 dneh od zamešanja se pojavi razlika med krčenjem vlaknastih betonov z 0,25 % in 0,50 % vlaken, in sicer znaša 8 %. V končnem času po 320 dneh od zamešanja pa je krčenje vlaknastih betonov z deležema vlaken 0,25 % in 0,50 % približno enako in je za 17 % manjše od krčenja betona brez vlaken.

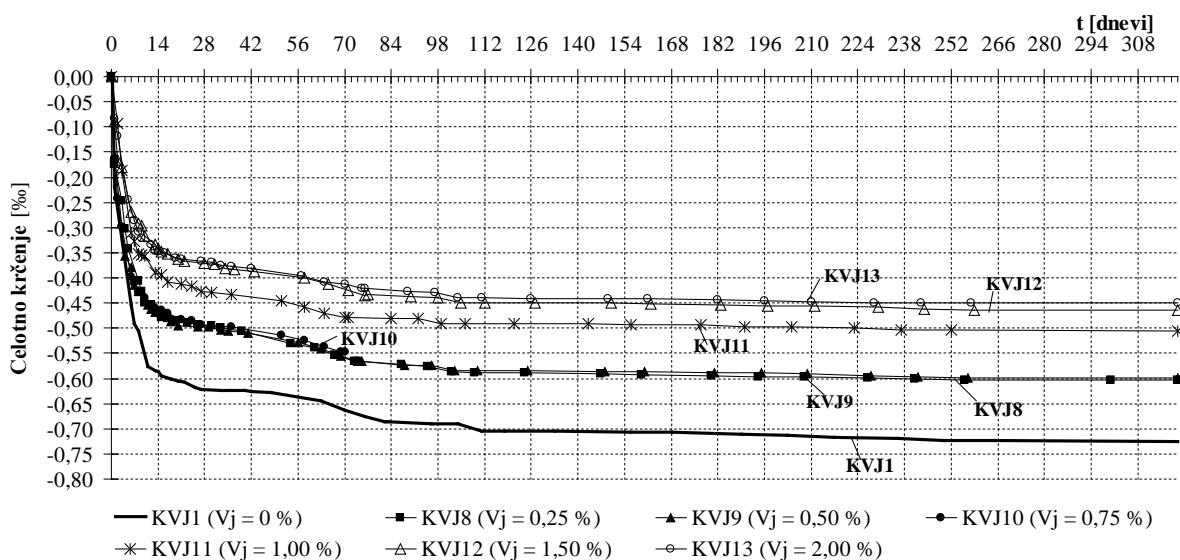


Slika 4.26: Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti s prostorninskimi deleži 0 %, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % in 2,00 % krajših jeklenih vlaken IRI 50/16.

Figure 4.26: Time development of total shrinkage of fibre reinforced high performance concrete specimens containing 0 %, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % and 2,00 % of shorter steel fibres IRI 50/16.

S slike 4.27 je razvidno, da se celotno krčenje preskušancev kompozita s prostorninskima deležema daljših jeklenih vlaken 0,25 %, 0,50 % med seboj skoraj ne razlikuje in je po 14 dneh od zamešanja za 20 % manjše, po 28 dneh od zamešanja pa za 19 % manjše od krčenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature. Po 320 dneh od zamešanja je končno krčenje visokotrdnega kompozita z 0,25 %, 0,50 % in 0,75 % vlaken za 17 % manjše od krčenja visokotrdnega betona brez vlaken. Celotno krčenje vlaknastega betona z 1,00 % daljših jeklenih vlaken je po 14 in 28 dneh od zamešanja za 33 % manjše od krčenja primerjalnega betona brez vlaken. Celotno krčenje vlaknastega betona z 1,00 % daljših jeklenih vlaken se od 140. dne po izdelavi preskušancev ne povečuje več, tako da se v tem času razlika med celotnim krčenjem kompozita in primerjalnega betona brez vlaken povečuje in v 320 dneh

po izdelavi preskušancev znaša 30 %. Najmanjše celotno krčenje je bilo izmerjeno pri visokotrdnih vlaknastih betonih z 1,50 % in 2,00 % daljših jeklenih vlaken, ki je bilo po 14 in 28 dneh od zamešanja za 40 % manjše od krčenja primerjalnega betona brez vlaken. S časom trajanja meritve se razlika med krčenjem kompozita in krčenjem primerjalnega betona brez vlaken zmanjšuje in pri 320 dneh znaša le še 36 %.



Slika 4.27: Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti s prostorninskimi deleži 0 %, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % in 2,00 % daljših jeklenih vlaken IRI 50/30.

Figure 4.27: Time development of total shrinkage of test specimens made of fibre reinforced high performance concrete containing 0 %, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % and 2,00 % of longer steel fibres IRI 50/30.

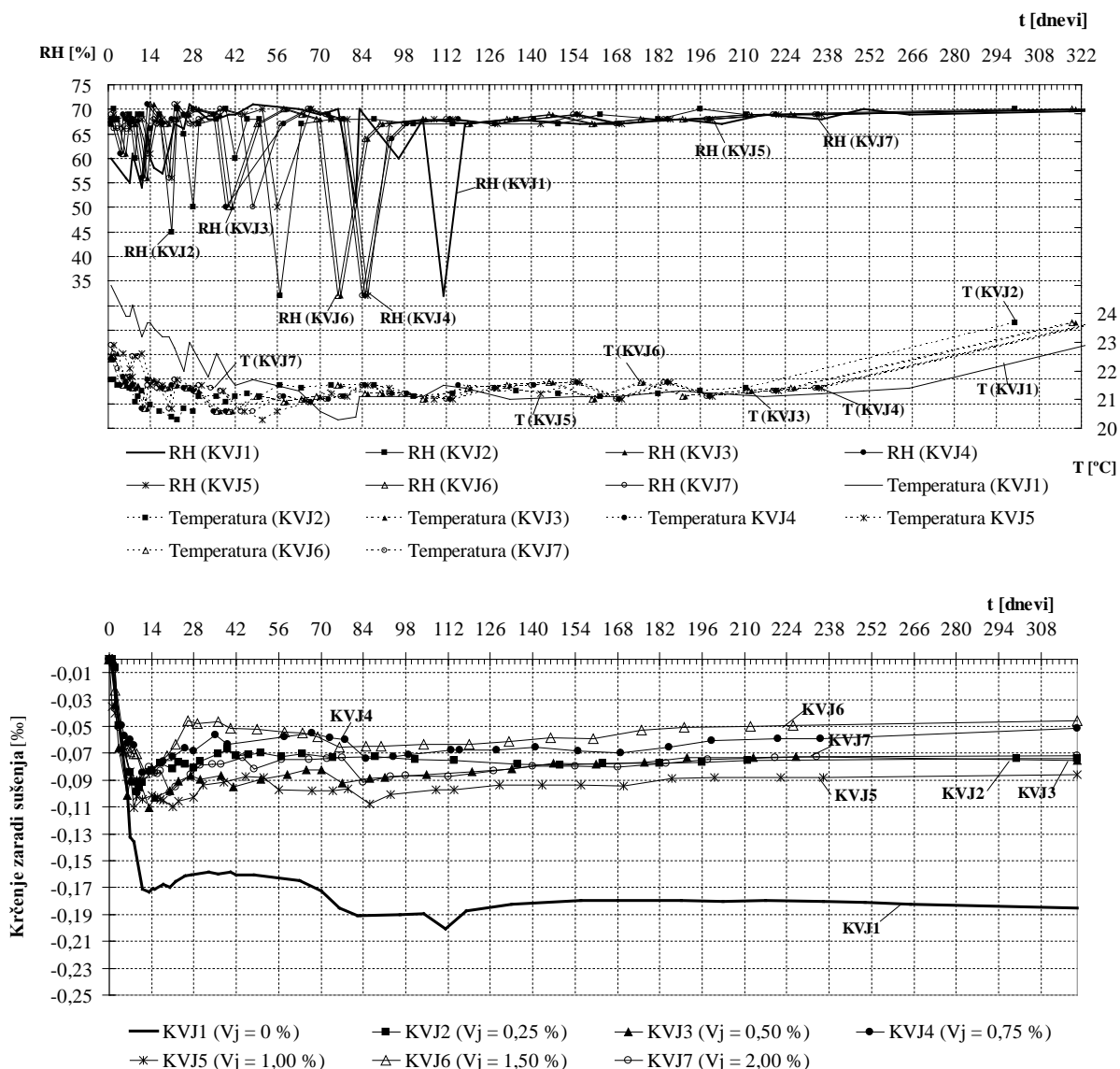
Krčenje visokotrdnega vlaknastega betona zaradi sušenja v odvisnosti od vsebnosti jeklenih vlaken

Krčenje kompozita zaradi sušenja, ki je za primer uporabe krajših jeklenih vlaken prikazano na sliki 4.28, za primer uporabe daljših jeklenih vlaken pa na sliki 4.29, smo določili tako, da smo od celotnega izmerjenega krčenja kompozita, ki je za primer uporabe krajših jeklenih vlaken prikazano na sliki 4.26, za primer uporabe daljših vlaken pa na sliki 4.27, odšteli ustrezno avtogeno krčenje kompozita, ki smo ga tudi izmerili in je prikazano na sliki 4.24 oziroma 4.25.

Iz rezultatov eksperimentalnih raziskav, ki so prikazani na slikah 4.26 do 4.29, je razvidno, da krčenje kompozita zaradi sušenja predstavlja približno tretjino celotnega krčenja kompozita. Vpliv prostorninskega deleža jeklenih vlaken na krčenje kompozita zaradi sušenja je tako pri uporabi krajših jeklenih vlaken (slika 4.28) kakor tudi pri uporabi daljših jeklenih vlaken (slika 4.29) sorazmerno majhen. Na splošno pa je krčenje kompozita zaradi sušenja, tako pri uporabi krajših kakor tudi daljših vlaken, približno za 50 % do 60 % manjše od krčenja zaradi sušenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature.

Krčenje zaradi sušenja kompozita s krajšimi jeklenimi vlakni

Od izdelave preizkušancev pa vse do konca trajanja meritev krčenja zaradi sušenja kompozita je izmed vseh obravnavanih tipov kompozita krčenje zaradi sušenja najmanjše pri kompozitu z 1,50 % prostorninskim deležem vlaken (glej sliko 4.28). Štirinajsti dan po zamešanju je za 54 % manjše od krčenja primerjalnega visokotrdnega betona brez vlaken. Po 28 dneh od zamešanja je krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona z 1,50 % krajših jeklenih vlaken za 70 % manjše, po 320 dneh pa za 75 % manjše od krčenja primerjalnega betona brez vlaken. Iz prikazanih rezultatov meritev je razvidno, da se krčenje zaradi sušenja visokotrdnega kompozita s prostorninskimi deleži 0,50 % in 1,00 % krajših jeklenih vlaken IRI 50/16 v času od izdelave preskušancev pa do 14. dne od zamešanja med seboj zelo malo razlikuje in je na splošno približno za 41 % manjše od krčenja zaradi sušenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature. Po 28 dneh od zamešanja je krčenje z 1,00 % vlaken manjše za 37 %, krčenje vlaknastega betona z 0,50 % jeklenih vlaken pa za 44 % manjše od krčenja betona brez vlaken. Končno krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona z 1,00 % krajših jeklenih vlaken je za 51 % manjše, krčenje betona z 0,50 % jeklenih vlaken pa za 58 % manjše od končnega krčenja zaradi sušenja betona brez vlaken. Po 14 dneh od zamešanja je krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona z 0,25 %, 0,75 % in 2,00 % krajših jeklenih vlaken za 50 % manjše od krčenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature. Po 28 dneh od zamešanja je krčenje vlaknastega betona z 2,00 % jeklenih vlaken manjše za 46 %, z 0,5 % vlaken za 49 %, krčenje z 0,75 % vlaken pa za 57 % manjše od krčenja primerjalnega visokotrdnega betona brez vlaknaste armature. Končno krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona z 0,25 % in 2,00 % krajših jeklenih vlaken je približno enako in je za 59 % manjše od krčenja betona brez vlaknaste armature. Končno krčenje vlaknastega betona z 0,75 % jeklenih vlaken je za 67 % manjše od krčenja primerjalnega betona brez vlaken.



Slika 4.28: Časovni razvoj krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0 %, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % in 2,00 % krajših jeklenih vlaken IRI 50/16.

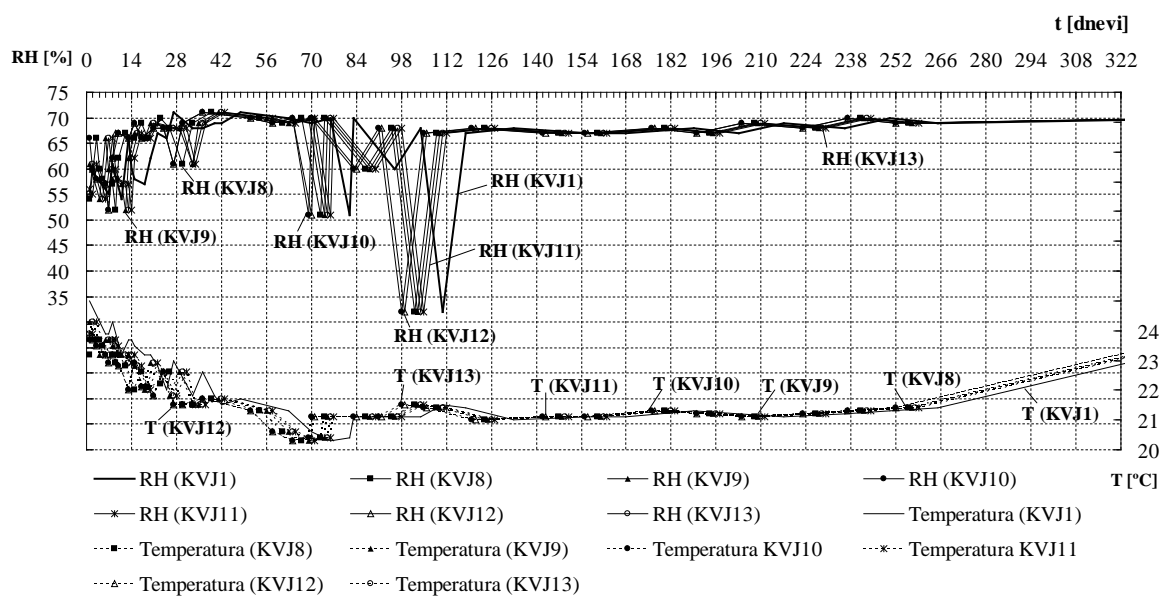
Figure 4.28: Time development of drying shrinkage of test specimens made of fibre reinforced high performance concrete containing 0 %, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % and 2,00 % of shorter steel fibre IRI 50/16.

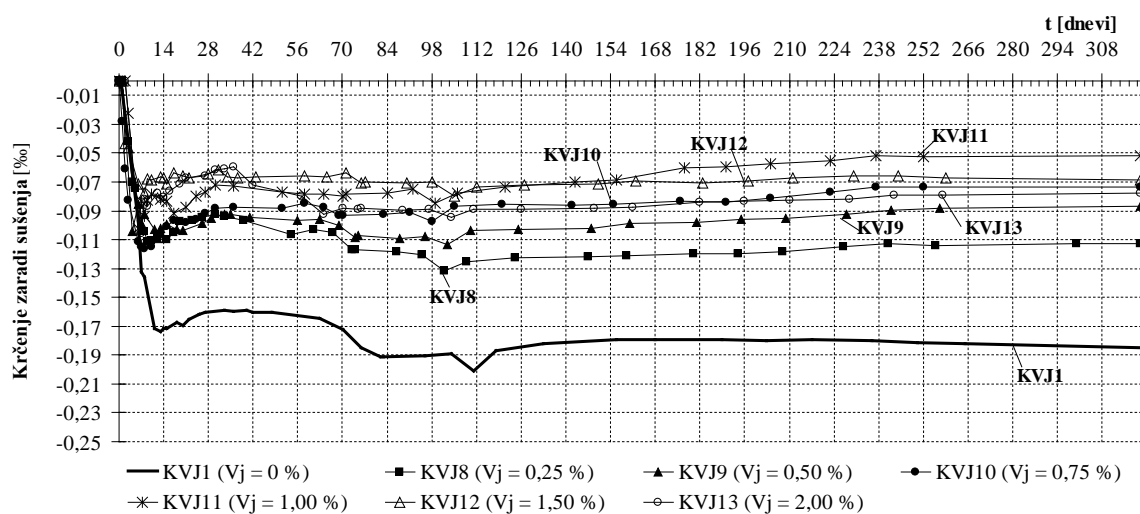
Na sliki 4.28 je razvidno, da se pri različnih časih pojavijo nezveznosti v krčenju zaradi sušenja kompozita in primerjalnega betona brez vlaken. Z meritvami temperature T ($^{\circ}\text{C}$) in relativne vlažnosti RH (%) okolice ugotavljamo, da je v času skoka krčenja zaradi sušenja vlažnost okolice padla pod vzdrževano povprečno vlažnostjo prostora $70\% \pm 3\%$. Pri krčenju zaradi sušenja je zunanost preskušanca izpostavljena razmeram okolice, zato se padec relativne vlage okolice kaže predvsem na površini preskušancev, kjer se meri krčenje preskušancev oziroma kompozitov. S padcem relativne vlage okolice se krčenje zaradi sušenja povečuje. V prvih 42 dneh po pripravi preskušancev kompozitov in primerjalnega betona brez vlaken se padec vlage okolice pojavi zaradi intenzivnega laboratorijskega dela. Skoka v krčenju zaradi sušenja pri visokotrdnem betonu brez vlaken pri 84. in

112. dnevu od priprave preskušancev sta posledica kratkotrajnih težav z napravo za vzdrževanje vlage okolice.

Krčenje zaradi sušenja kompozita z daljšimi jeklenimi vlakni

Iz prikazanih rezultatov meritev je razvidno, da se krčenje zaradi sušenja visokotrdnega kompozita s prostorninskimi deleži 0,25 %, 0,50 % in 0,75 % daljših jeklenih vlaken IRI 50/30 (slika 4.29) do 14. dne po izdelavi preskušancev med seboj zelo malo razlikuje. Na splošno je v tem časovnem obdobju krčenje zaradi sušenja teh preskušancev približno za 41 % manjše od krčenja zaradi sušenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature. Po 28 dneh od zamešanja preskušancev se ta razlika poveča na 43 %. Pozneje se med krčenjem visokotrdnih vlaknastih betonov z 0,25 % in 0,50 % jeklenih vlaken ter vlaknastim betonom z 0,75 % jeklenih vlaken pojavijo večje razlike. Končno krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona z 0,25 % daljših jeklenih vlaken je za 37 % manjše, vlaknastega betona z 0,50 % jeklenih vlaken za 55 % manjše, vlaknastega betona z 0,75 % jeklenih vlaken pa za 59 % manjše od končnega krčenja zaradi sušenja primerjalnega betona brez vlaken. Po 14 dneh od izdelave preskušancev je krčenje zaradi sušenja visokotrdnih vlaknastih betonov z 1,00 %, 1,50 % in 2,00 % daljših jeklenih vlaken približno za 57 % manjše od krčenja zaradi sušenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature. Po 28 dneh od izdelave preskušancev se ta razlika poveča na 60 %. Pozneje se med krčenjem zaradi sušenja visokotrdnih vlaknastih betonov z deleži 1,00 %, 1,50 % in 2,00 % pojavijo večje razlike. V 320 dneh od izdelave preskušancev je krčenje zaradi sušenja visokotrdnega vlaknastega betona z 1,00 % jeklenih vlaken za 71 % manjše od krčenja zaradi sušenja vlaknastega betona visoke trdnosti z 1,50 % jeklenih vlaken in za 62 % manjše od krčenja zaradi sušenja primerjalnega visokotrdnega betona brez vlaken.





Slika 4.29: Časovni razvoj krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0 %, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % in 2,00 % daljših jeklenih vlaken IRI 50/30.

Figure 4.29: Time development of drying shrinkage of test specimens made of fibre reinforced high performance concrete containing 0 %, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % and 2,00 % of longer steel fibre IRI 50/30.

Na podlagi eksperimentalnih rezultatov z upoštevanjem spreminjanja prostorninskega deleža daljših in krajših jeklenih vlaken med 0 % in 2,00 % lahko sklepamo, da se avtogeno in celotno krčenje visokotrdnega vlaknastega betona s povečevanjem vsebnosti vlaken zmanjšujeta.

Vgradljivost kompozita oziroma nevarnost pojava gnezdenja vlaken pa se s povečevanjem vsebnosti vlaken poslabšuje oziroma povečuje. Zgornja meja možne prostorninske vsebnosti daljših jeklenih vlaken glede na merilo še spremenljive vgradljivosti pri običajnih načinih vgrajevanja kompozita po naših izkušnjah znaša približno 2,00 %. Pri uporabi krajših jeklenih vlaken in visokoplastičnih kompozitov pa je lahko ta meja nekoliko višja.

Vpliv dolžine jeklenih vlaken na krčenje visokotrdnega vlaknastega betona

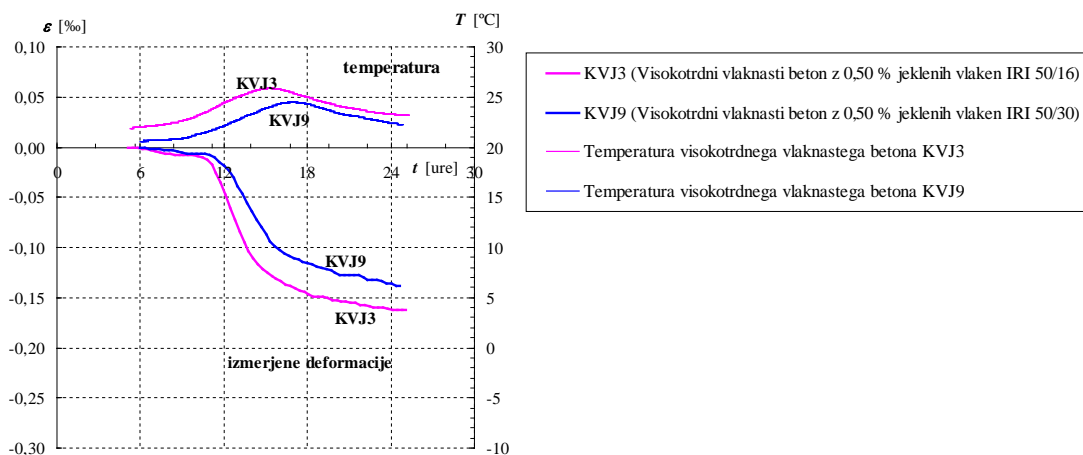
Pri visokotrdnih vlaknastih betonih enake sestave smo pri isti vsebnosti jeklenih vlaken raziskovali vpliv dolžine vlaken na časovni potek krčenja kompozita. Na slikah od 4.30 do 4.39 je prikazano krčenje kompozita s prostorninskima deležema 0,50 % in 2,00 % daljših in krajših jeklenih vlaken.

Vpliv dolžine jeklenih vlaken na avtogeno krčenje vlaknastega betona v prvih 24 urah od zamešanja

Na slikah od 4.30 do 4.33 so prikazane srednje vrednosti časovnega poteka temperature in izmerjene celotne deformacije oziroma avtogeno krčenje vlaknastega betona z majhno in veliko vsebnostjo daljših in krajših jeklenih vlaken v prvih 24 urah po betoniranju.

Na sliki 4.30 so prikazane celotne deformacije vlaknastega betona visoke trdnosti pri prostorninskem deležu 0,50 % daljših in 0,50 % krajših jeklenih vlaken. V prvih 10 urah po betoniranju sta celotni izmerjeni deformaciji vlaknastega betona z 0,50 % daljših in 0,50 % krajših vlaken približno enaki,

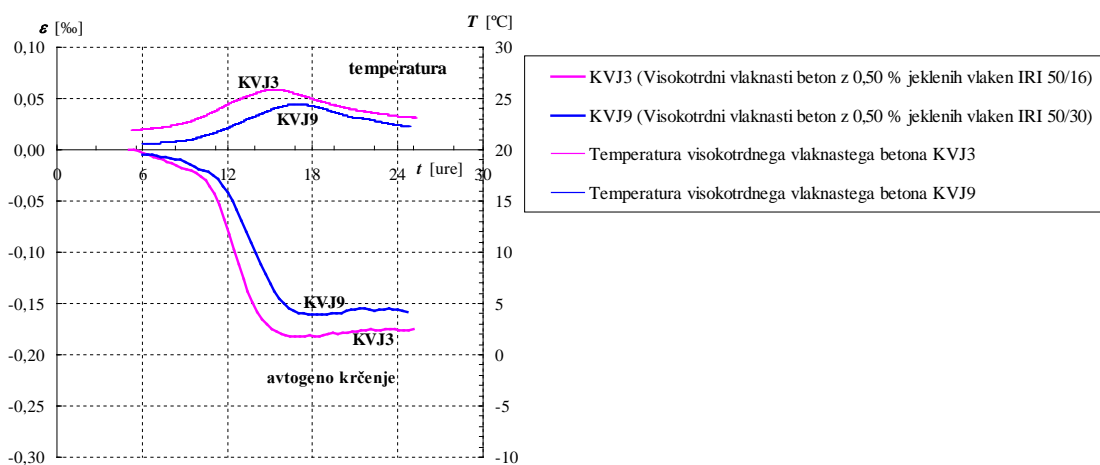
pozneje pa so časovni prirastki deformacije vlaknastega betona z daljšimi jeklenimi vlakni manjši od časovnih prirastkov deformacij vlaknastega betona s krajšimi jeklenimi vlakni IRI 50/16. V 24 urah po betoniranju preskušancev je bila celotna izmerjena deformacija kompozita z daljšimi jeklenimi vlakni za 15 % manjša od celotne izmerjene deformacije kompozita s krajšimi jeklenimi vlakni.



Slika 4.30: Izmerjene deformacije vlaknastih betonov visoke trdnosti z 0,50 % daljših jeklenih vlaken IRI 50/30 in z 0,50 % krajših jeklenih vlaken IRI 50/16 v prvih 24 urah po betoniranju.

Figure 4.30: Measured deformations of high performance fibre reinforced concrete containing 0,50 % of longer steel fibre IRI 50/30 and with containing 0,50 % of shorter steel fibres IRI 50/16 within 24 hours after concreting.

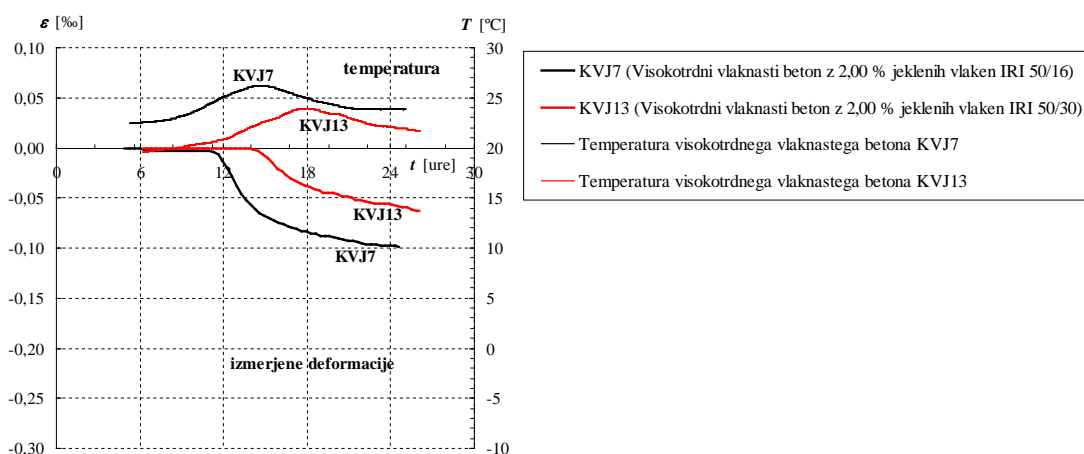
Iz prikaza eksperimentalnih raziskav (slika 4.31) je razvidno, da je avtogeno krčenje preskušancev iz vlaknastega betona KVJ9, ki vsebuje daljša jeklena vlakna, točno po 10 urah od betoniranja za 5 % manjše od avtogenega krčenja vlaknastega betona enake sestave z dodanimi krajšimi jeklenimi vlakni IRI 50/16. V poznejšem času se razlika avtogenega krčenja obeh kompozitov povečuje tako, da v 24 urah po betoniranju naraste za 10 %.



Slika 4.31: Avtogeno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,50 % daljših (IRI 50/30) oziroma 0,50 % krajših (IRI 50/16) jeklenih vlaken.

Figure 4.31: Autogenous shrinkage of fibre reinforced high performance concrete containing 0,50 % of longer (IRI 50/30) or 0,50 % of shorter (IRI 50/16) steel fibres.

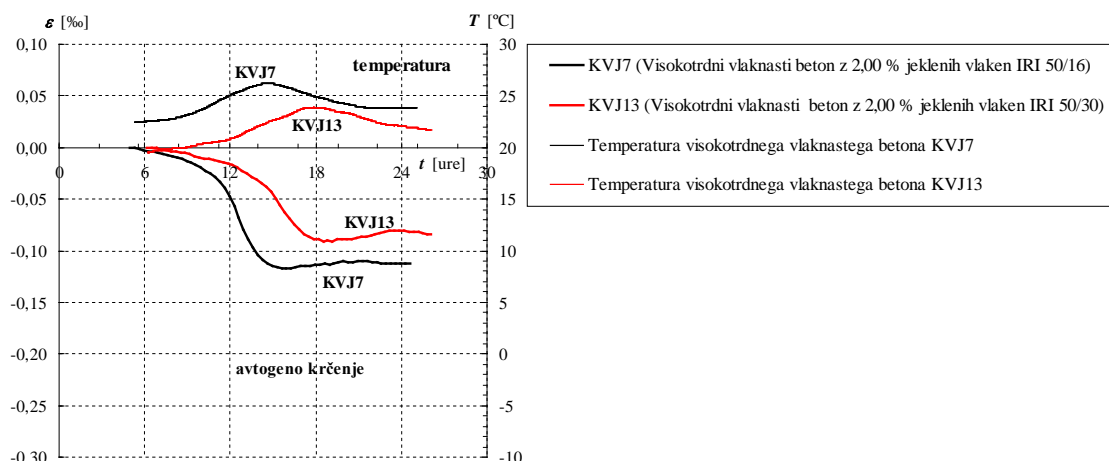
Izmerjene celotne deformacije vlaknastega betona visoke trdnosti z 2,00 % daljših oziroma krajših jeklenih vlaken so prikazane na sliki 4.32. Izmerjene deformacije vlaknastih betonov z dodanimi daljšimi in krajšimi vlakni so v prvih 10 urah po zamešanju približno enake, pozneje pa so izmerjene deformacije kompozita z daljšimi jeklenimi vlakni manjše od izmerjenih deformacij kompozita s krajšimi vlakni. V 24 urah po izdelavi preskušancev je izmerjena deformacija vlaknastega betona z daljšimi jeklenimi vlakni za 43 % manjša od izmerjene deformacije vlaknastega betona s krajšimi jeklenimi vlakni.



Slika 4.32: Izmerjene deformacije vlaknastega betona visoke trdnosti z 2,00 % daljših jeklenih vlaken IRI 50/30 oziroma 2,00 % krajših jeklenih vlaken IRI 50/16.

Figure 4.32: Measured deformations of high performance steel fibre concrete containing 2,00 % of longer steel fibre IRI 50/30 or 2,00 % of shorter steel fibre IRI 50/16.

Na sliki 4.33 je prikazano avtogeno krčenje visokotrdnega vlaknastega betona z 2,00 % prostorninskim deležem daljših oziroma krajših jeklenih vlaken v prvih 24 urah od izdelave preskušancev. Avtogeno krčenje visokotrdnega vlaknastega betona s krajšimi jeklenimi vlakni je v 10 urah po izdelavi preskušancev za približno 50 % večje od avtogenega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z daljšimi jeklenimi vlakni. V 10 do 15 urah od izdelave preskušancev se ta razlika večja in pri 13 urah od izdelave preskušancev znaša 58 %. Pozneje se manjša in pri 24 urah od izdelave preskušancev znaša 27 %.



Slika 4.33: Avtogeno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti z 2,00 % daljših (IRI 50/30) oziroma 2,00 % krajših (IRI 50/16) jeklenih vlaken.

Figure 4.33: Autogenous shrinkage of fibre reinforced high performance concrete containing 2,00 % of longer (IRI 50/30) or 2,00 % of shorter steel fibre (IRI 50/16).

Iz primerjave rezultatov avtogenega krčenja visokotrdnega kompozita v prvih 24 urah po izdelavi preizkušancev je razvidno, da je avtogeno krčenje kompozita, ki je mikroarmiran s krajšimi jeklenimi vlakni IRI 50/16, večje od avtogenega krčenja enakega kompozita, ki je mikroarmiran z daljšimi jeklenimi vlakni IRI 50/30.

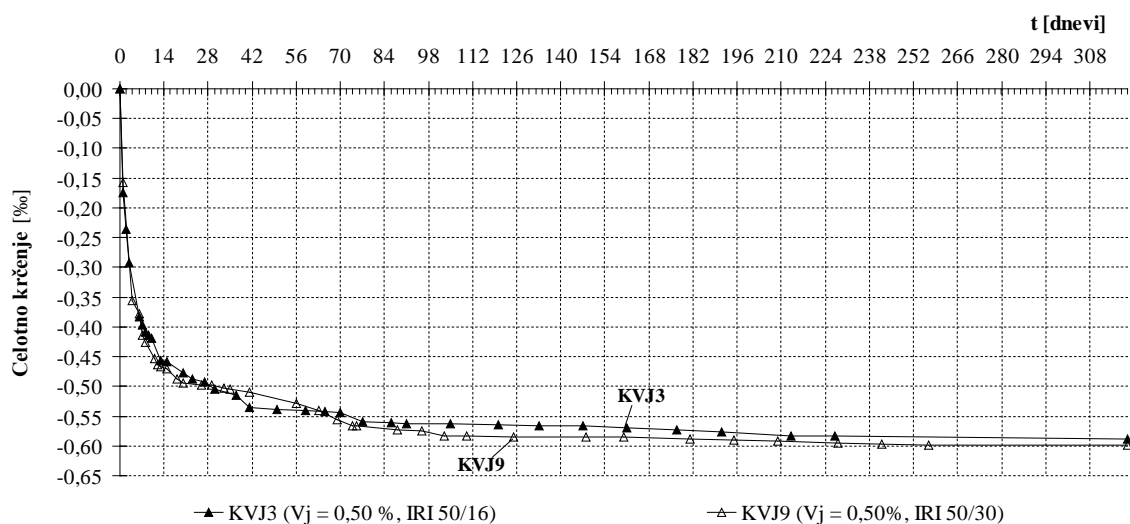
Večji vpliv daljših jeklenih vlaken na zmanjšanje krčenja kompozita v primerjavi s krajšimi vlakni je posledica daljše sidrne dolžine vlaken, ki omogoča vnos večje sile iz vlaken v beton in obratno. V zgodnjem obdobju mladega kompozita sta togost in nosilnost vlaken v primerjavi s še neotrdelo cementno pasto sorazmerno veliki in v večji meri vplivata na splošne lastnosti kompozita kot celote kot v poznejšem obdobju strjevanja oziroma pri strjenem betonu. Ker je pri daljših vlaknih zaradi večje sidrne dolžine sila, ki se prek sprijemnih napetosti prenese z betona na vlakno in obratno, večja kot pri krajših vlaknih, je vpliv daljših vlaken na zmanjšanje avtogenega krčenja mladega kompozita večji od vpliva krajših vlaken.

Glede na to, da avtogeni del krčenja predstavlja večji del celotnega krčenja visokotrdnega kompozita, lahko sklepamo, da je za omejevanje krčenja visokotrdnih kompozitov učinkovitejša uporaba daljših kot krajših jeklenih vlaken. Pri kompozitih normalne trdnosti pa je zaradi sorazmerno majhnega deleža avtogenega krčenja kompozita za omejevanje velikosti krčenja učinkovitejša uporaba krajših jeklenih vlaken, ki so za zmanjšanje krčenja kompozita zaradi sušenja učinkovitejša kot daljša.

Vpliv dolžine jeklenih vlaken na avtogeno in celotno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti

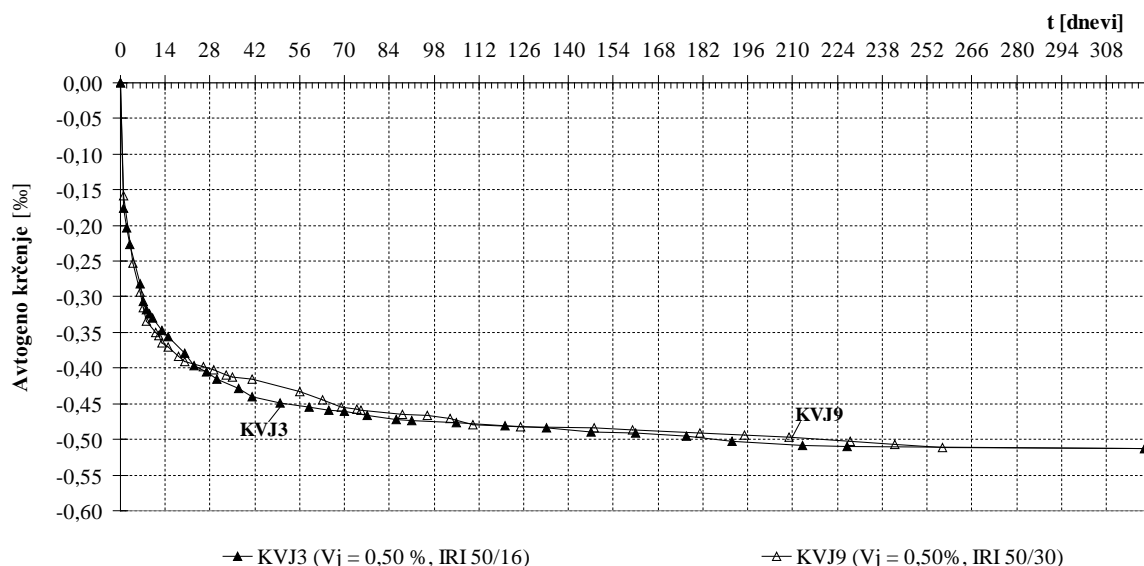
Časovni potek celotnega in avtogenega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona pri nizkem in visokem prostorninskem deležu daljših in krajših jeklenih vlaken je prikazan na slikah od 4.34 do 4.37.

Na sliki 4.34 oziroma 4.35 je prikazano celotno oziroma avtogeno krčenje betona visoke trdnosti pri 0,50 % prostorninskem deležu daljših oziroma krajših jeklenih vlaken. Iz prikazanih rezultatov meritev pri 0,50 % prostorninskem deležu vlaken je razvidno, da se tako avtogeno kakor tudi celotno krčenje vlaknastega betona z daljšimi jeklenimi vlakni le minimalno razlikuje od avtogenega oziroma celotnega krčenja kompozita s krajšimi jeklenimi vlakni.



Slika 4.34: Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,50 % daljših (IRI 50/30) oziroma 0,50 % krajših (IRI 50/16) jeklenih vlaken.

Figure 4.34: Time development of total shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0,50 % of longer (IRI 50/30), or 0,50 % of shorter (IRI 50/16) steel fibre.

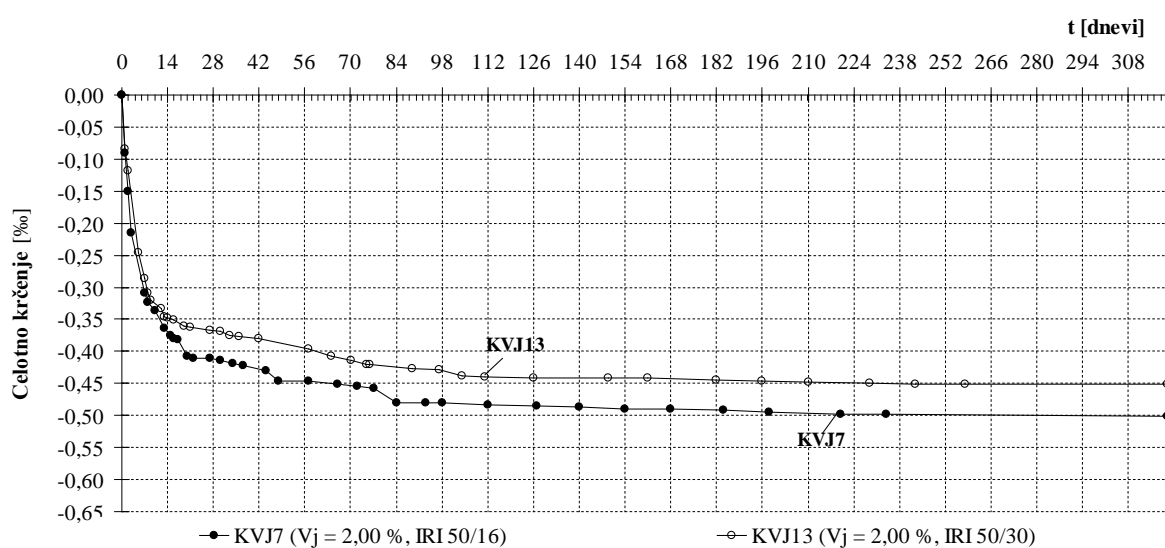


Slika 4.35: Časovni razvoj avtogenega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,50 % daljših (IRI 50/30) oziroma 0,50 % krajših jeklenih vlaken (IRI 50/16).

Figure 4.35: Time development of autogenous shrinkage of sealed test specimens made of fibre reinforced high performance concrete containing 0,50 % of longer (IRI 50/30), or 0,50 % of shorter steel fibre (IRI 50/16).

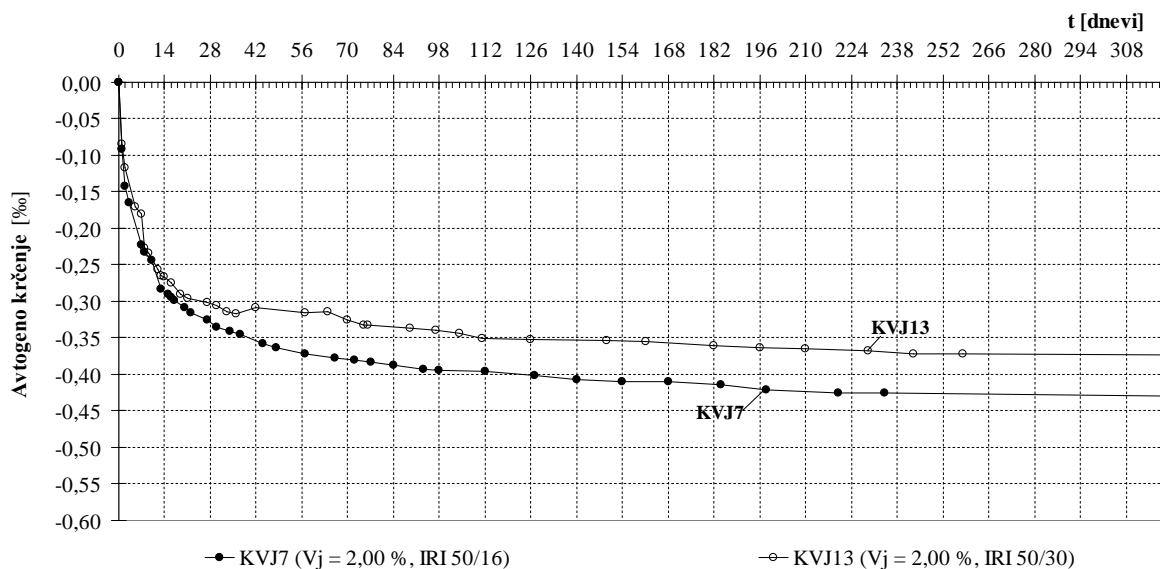
Na sliki 4.36 oziroma 4.37 je prikazano celotno oziroma avtogeno krčenje visokotrdnega vlaknastega betona z 2,00 % prostorninskim deležem daljših oziroma krajših jeklenih vlaken.

Celotno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti (slika 4.36) z daljšimi oziroma krajšimi vlakni je v prvih 14 dneh od izdelave preskušancev približno enako, pozneje pa je krčenje vlaknastega betona z daljšimi jeklenimi vlakni manjše od krčenja vlaknastega betona s krajšimi jeklenimi vlakni. Po 28 dneh od izdelave preskušancev je celotno krčenje z 2,00 % prostorninskim deležem daljših jeklenih vlaken za 10 % manjše od krčenja vlaknastega betona z enako vsebnostjo krajših jeklenih vlaken. Ta razlika med celotnim krčenjem vlaknastih betonov z daljšimi oziroma krajšimi jeklenimi vlakni do konca izvajanja meritev ostane približno konstantna.



Slika 4.36: Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 2,00 % daljših (IRI 50/30) oziroma 2,00 % krajših jeklenih vlaken (IRI 50/16).

Figure 4.36: Time development of total shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 2,00 % of longer (IRI 50/30), or 2,00 % of shorter steel fibre (IRI 50/16).



Slika 4.37: Časovni razvoj avtogenega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 2,00 % daljših (IRI 50/30) oziroma 2,00 % krajših (IRI 50/16) jeklenih vlaken.

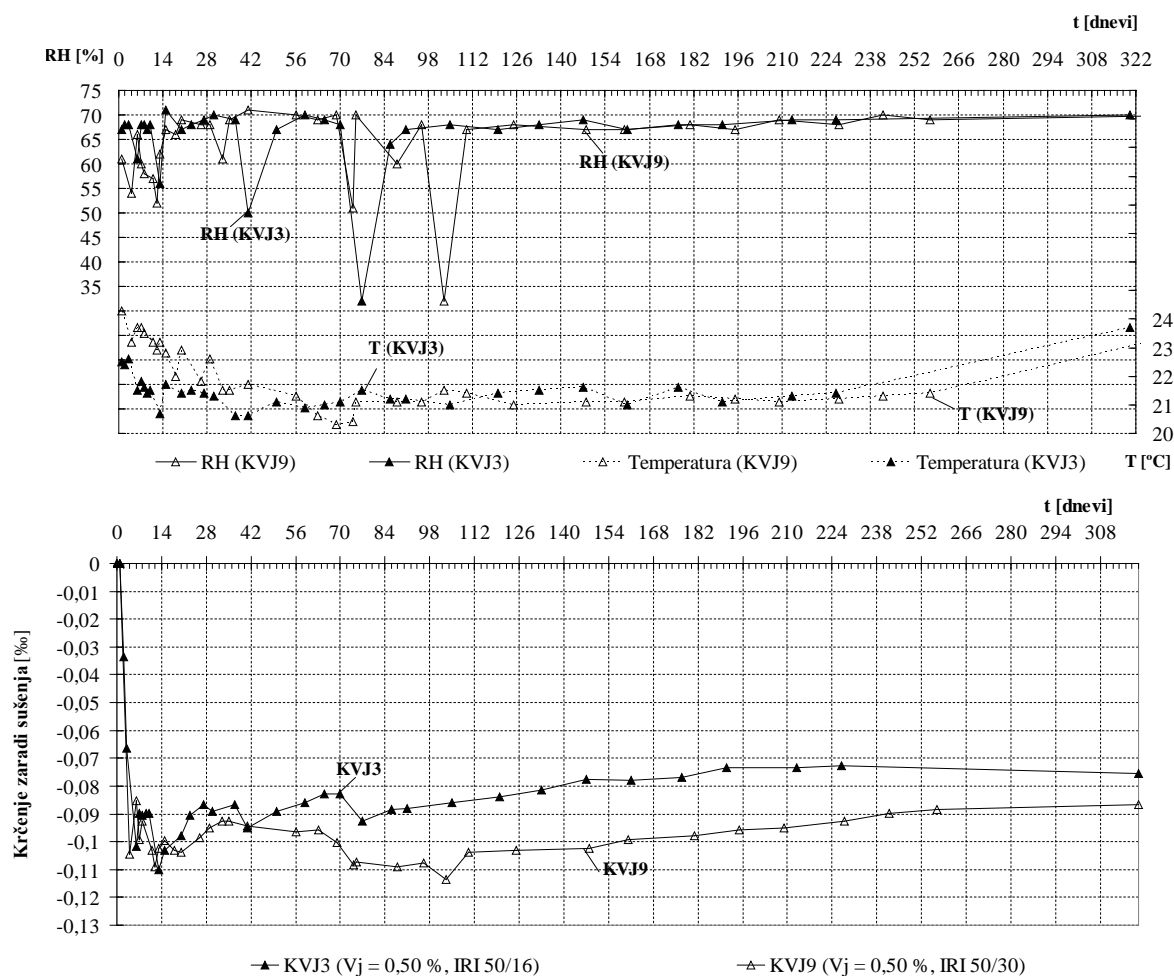
Figure 4.37: Time development of autogenous shrinkage of sealed test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 2,00 % of longer (IRI 50/30), or 2,00 % of shorter (IRI 50/16) steel fibre.

Na sliki 4.37 je prikazan časovni razvoj avtogenega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti z 2,00 % prostorninskim deležem daljših oziroma krajših jeklenih vlaken. V prvih 14 dneh od izdelave preskušancev se avtogeno krčenje vlaknastega betona z daljšimi oziroma krajšimi vlakni le minimalno razlikuje, od 14. dneva dalje pa je avtogeno krčenje visokotrdnega vlaknastega betona z daljšimi jeklenimi vlakni manjše. V 28 dneh po izdelavi preskušancev je avtogeno krčenje visokotrdnega kompozita z daljšimi vlakni za 8 % manjše od avtogenega krčenja kompozita s krajšimi vlakni. Ta razlika se s časom še naprej povečuje tako, da do konca izvajanja meritev naraste na 14 %.

Vpliv dolžine jeklenih vlaken na krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti zaradi sušenja

Krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,50 % oziroma 2,00 % daljših oziroma krajših jeklenih vlaken je prikazano na sliki 4.38 oziroma 4.39.

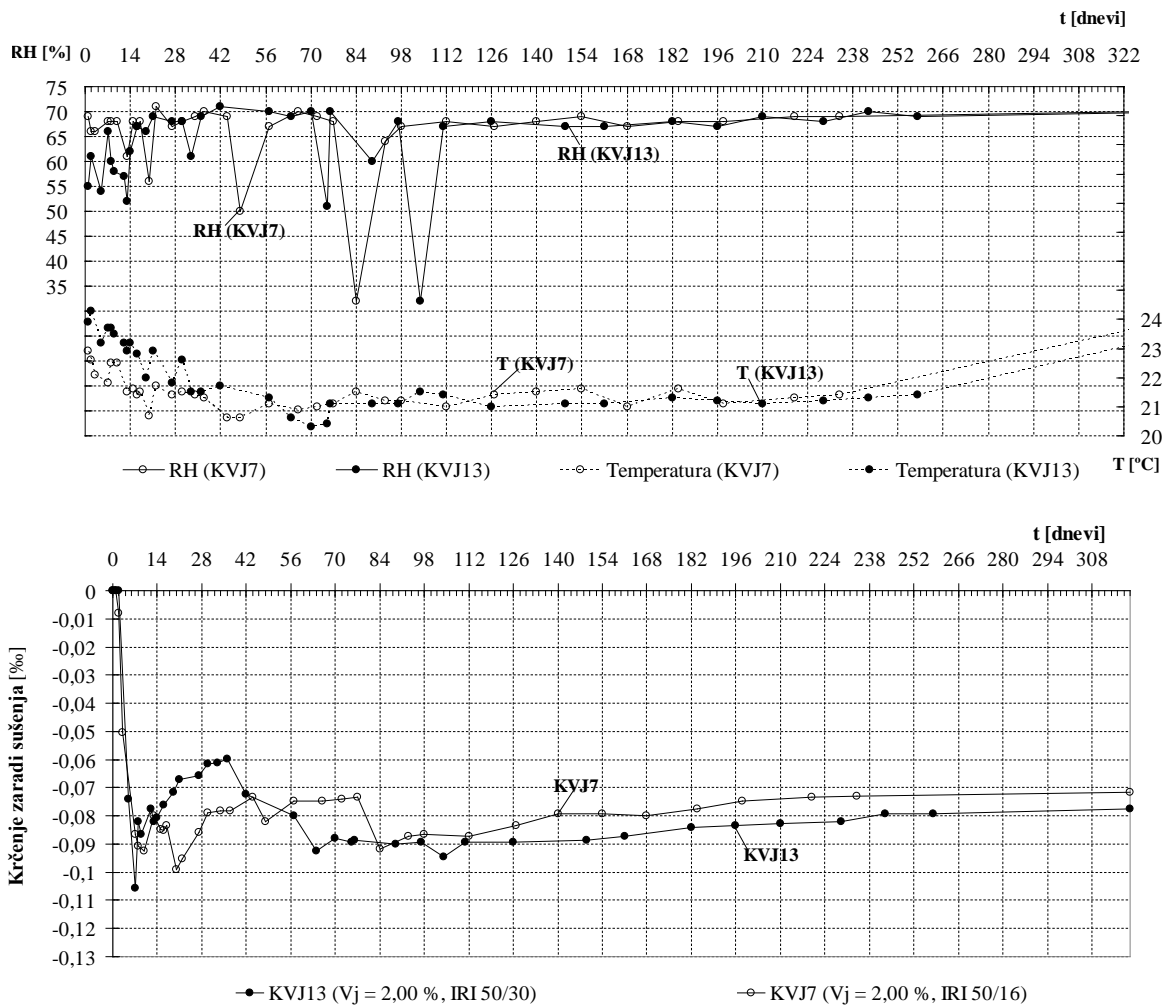
S slike 4.38 je razvidno, da je v prvih 14 dneh od izdelave preskušancev razlika med krčenjem zaradi sušenja visokotrdnega vlaknastega betona z 0,50 % daljših jeklenih vlaken in krčenjem visokotrdnega vlaknastega betona z 0,50 % krajših jeklenih vlaken minimalna. V 28 dneh od izdelave preskušancev je krčenje visokotrdnega vlaknastega betona s krajšimi jeklenimi vlakni za 6 % manjše od krčenja zaradi sušenja visokotrdnega vlaknastega betona z enako vsebnostjo daljših jeklenih vlaken. Pozneje se razlika med krčenjem še povečuje tako, da ob koncu izvajanja meritev, to je v 320 dneh po izdelavi preskušancev, znaša 15 %.



Slika 4.38: Časovni razvoj krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,50 % daljših (IRI 50/30) oziroma 0,50 % krajših jeklenih vlaken (IRI 50/16).

Figure 4.38: Time development of drying shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0,50 % of longer (IRI 50/30), or 0,50 % of shorter steel fibre (IRI 50/16).

Časovni potek krčenja zaradi sušenja visokotrdnega vlaknastega betona z 2,00 % prostorninskim deležem daljših oziroma krajših jeklenih vlaken je prikazan na sliki 4.39. Iz prikazanih rezultatov do 12. dne od izdelave preskušancev je razlika med krčenjem zaradi sušenja visokotrdnega kompozita z 2 % daljših in krčenjem zaradi sušenja visokotrdnega kompozita z 2 % krajših jeklenih vlaken minimalna. Po 14 dneh je krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona, mikroarmiranega z daljšimi jeklenimi vlakni, za približno 22 % manjše od krčenja zaradi sušenja vlaknastega betona, mikroarmiranega z enako vsebnostjo krajših jeklenih vlaken. Od 14. do 42. dne po izdelavi preskušancev je krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona z daljšimi jeklenimi vlakni manjše od krčenja zaradi sušenja vlaknastega betona z enako vsebnostjo krajših jeklenih vlaken. Od 80. dne po izdelavi preskušancev pa do konca meritve se krčenje zaradi sušenja obeh obravnavanih visokotrdnih vlaknastih betonov le minimalno razlikuje.



Slika 4.39: Časovni razvoj krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 2,00 % daljših (IRI 50/30) oziroma 2,00 % krajših jeklenih vlaken (IRI 50/16).

Figure 4.39: Time development of drying shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 2,00 % of longer (IRI 50/30), or 2,00 % of shorter steel fibre (IRI 50/16).

Iz rezultatov eksperimentalnih raziskav izhaja, da je pri majhnem prostorninskem deležu vlaken vpliv krajših jeklenih vlaken na zmanjšanje krčenja zaradi sušenja otrdelega kompozita večji od vpliva daljših vlaken. Vpliv trdnosti in togosti pri majhni vsebnosti vlaken v otrdelem kompozitu je zaradi majhnega deleža vlaken v kompozitu ter zaradi povečane trdnosti in togosti otrdelega betona na splošne lastnosti kompozita kot celote sorazmerno majhen. Poleg tega jeklena vlakna v otrdelem kompozitu povečujejo možnost nastanka povezanega sistema por, ki pospešujejo izločanje vode iz kompozita, s čimer povečujejo tudi krčenje kompozita zaradi sušenja. Ker krajša vlakna bolj prispevajo k nastanku sistema povezanih por v kompozitu kot daljša, so ta pri oviranju krčenja kompozita zaradi sušenja učinkovitejša od daljših.

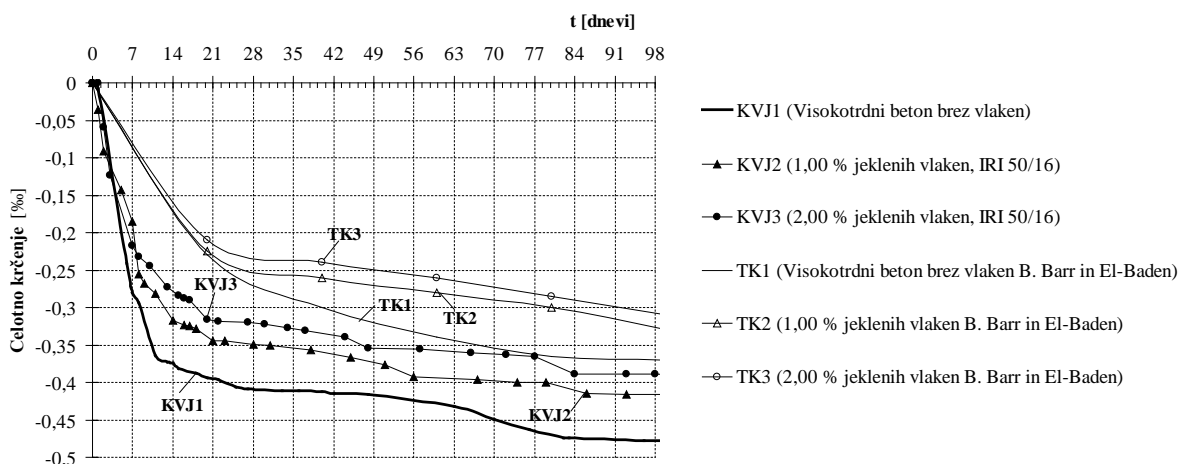
Vpliv prostorninskega deleža jeklene vlaknaste armature na celotno krčenje visokotrdnega vlaknastega betona po naših in tujih eksperimentalnih raziskavah

Vpliv jeklene mikroarmature na celotno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti, določen z našimi eksperimentalnimi raziskavami, smo primerjali z vplivom enake vsebnosti vlaken na celotno krčenje vlaknastega betona, ki sta ga z eksperimentalnimi raziskavami ugotovila Barr in Baden (2003). Za primerjavo vpliva različne vsebnosti jeklene mikroarmature na celotno krčenje visokotrdnega vlaknastega betona smo se iz dosegljivih tujih raziskav osredotočili na beton, ki ga je mogoče najbolj primerjati s proučevanim betonom pri naših eksperimentalnih raziskavah.

Barr in El Baden sta proučevala vpliv jeklenih vlaken s prostorninskimi deleži od 1,00 % do 3,00 % na celotno krčenje vlaknastega betona trdnostnih razredov od 40 MPa do 120 MPa. Avtorja v svojem prispevku ne omenjata geometrijskih značilnosti uporabljenih jeklenih vlaken.

Sveža mešanica proučevanega primerjalnega betona brez vlaken KVJ1 pri našem eksperimentu je vsebovala 400 kg veziva, 755 kg grobega agregata in 1133 kg drobnega agregata v 1 m³ kompozita. Vodovezivno razmerje pa je bilo 0,36. Tlačna trdnost betona po 28 dneh od priprave betona je znašala 68,9 MPa. Primerjalni beton brez vlaken (TK1), ki sta ga raziskovalca Barr in Baden uporabila za primerjalni preskušane, pa je vseboval 340 kg veziva, od tega 11 % mikrosilike, 1190 kg grobega agregata in 721 kg drobnega agregata v 1 m³ betona. Vodovezivno razmerje je bilo 0,45. Barr in Baden sta preskušance v obliki prizem, dimenzij 76 x 76 x 254 mm, izpostavila okolju s temperaturo 20 °C in relativno vlažnostjo 65 ± 5 %, medtem ko smo v svojih eksperimentalnih raziskavah krčenja preskušance primerjalnega betona KVJ1 dimenzij 100 x 100 x 400 mm izpostavili okolju s temperaturo 22 °C ± 2 °C in relativno vlažnostjo 70 ± 3 %.

Na sliki 4.40 so prikazani rezultati naših eksperimentalnih raziskav celotnega krčenja kompozita z 1,00 % (KVJ2) oziroma 2,00 % (KVJ3) jeklenih vlaken, celotno krčenje primerjalnega betona brez vlaken (KVJ1) ter celotno krčenje vlaknastih betonov (TK2) in (TK3) z enakima deležema jeklenih vlaken in primerjalnega betona brez vlaken (TK1), ki sta ga izmerila B. Barr in Baden. Tlačna trdnost preiskovanega kompozita KVJ2 je znašala 86,3 MPa, kompozita KVJ3 86,6 MPa, tlačna trdnost primerjalnega betona brez vlaken pa 68,9 MPa. Tlačna trdnost primerjalnega betona brez vlaken (TK1), ki sta ga preiskovala B. Barr in Baden, pa je znašala 80 MPa. Barr in Baden podajata eksperimentalne rezultate meritev celotnega krčenja. Avtogenega dela krčenja, ki pri visokotrdnih betonih predstavlja pomemben del celotnega krčenja, v svoji raziskavi ne zajameta. Zato smo zaradi lažje primerjave rezultatov na sliki 4.40 od celotnega krčenja visokotrdnih vlaknastih betonov KVJ2 in KVJ3 ter primerjalnega betona KVJ1 odšteli zgodnje avtogeno krčenje v 24 urah od izdelave preskušancev. Časovna poteka celotnega krčenja osnovnega betona brez dodane vlaknaste armature KVJ1 in osnovnega betona Barra in Badna (TK1) (slika 4.40) sta kvalitativno podobna, kvantitativno pa se močno razlikujeta. Ta razlika je posledica večje količine cementa in manjšega vodovezivnega razmerja pri naših preiskovanih kompozitih v primerjavi s kompoziti, ki sta jih preiskovala Barr in Baden.



Slika 4.40: Potek krčenja vlaknastih betonov visoke trdnosti z 0 %, 1,00 % in 2,00 % vlaken v naših in tujih eksperimentalnih raziskavah.

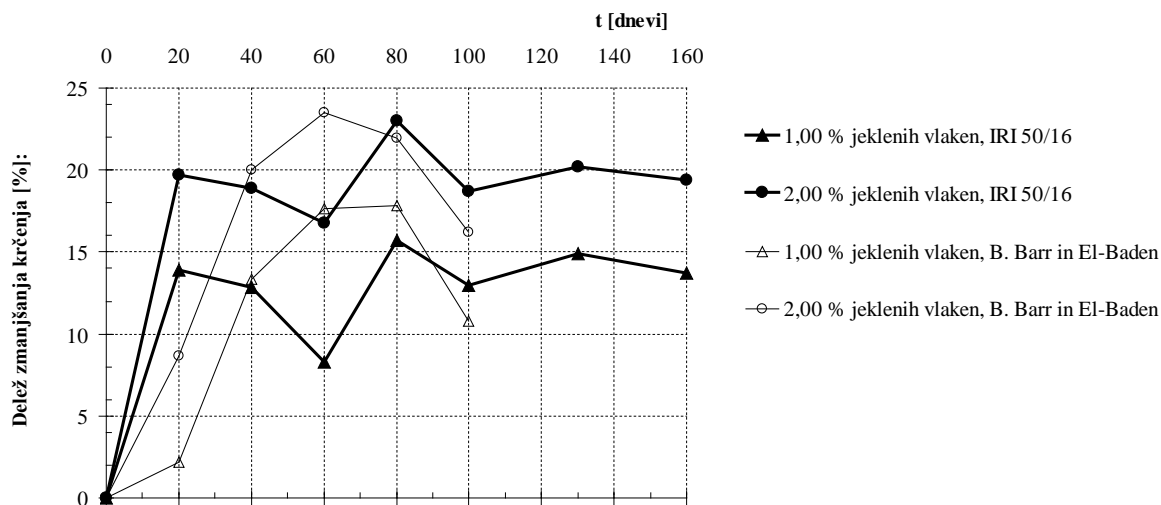
Figure 4.40: Time development of shrinkage of fibre reinforced high performance concrete containing 0 %, 1,00 % and 2,00 %, comparison of literature and experimental results.

S slike 4.41 je razvidna primerjava med vplivom 1,00 % in 2,00 % deležem jeklenih vlaken na celotno krčenje betona visoke trdnosti v našem in eksperimentu, ki sta ga opravila raziskovalca Barr in Baden. Iz časovnih potekov zmanjšanja krčenja kompozitov v primerjavi s celotnim krčenjem primerjalnega betona brez vlaken je razvidno, da se z večanjem vsebnosti vlaken v kompozitih visoke trdnosti v našem in pri Barr-Badnovem eksperimentu celotno krčenje kompozita manjša.

Vpliv 1,00 % in 2,00 % deleža jeklenih vlaken na celotno krčenje kompozita je v našem eksperimentu v času od začetka meritev pa do 40. dne od priprave preskušancev večji, kot je vpliv enake vsebnosti jeklenih vlaken na celotno krčenje kompozita v eksperimentu Barra in Badna.

Mešanici KVJ1 in TK1 imata različni količini grobega in drobnega agregata in različni vodovezivni razmerji. Mešanica betona TK1 ima za 35 % večji delež grobega agregata in za 35 % manjši delež drobnega agregata kot betonska mešanica KVJ1. Zaradi večje količine cementa je delež cementne paste v betonski mešanici KVJ1 večji kot v mešanici TK1. Predvidevamo, da je vpliv jeklenih vlaken na celotno krčenje visokotrdnega betona večji v našem eksperimentu kot v Barr-Badnovem eksperimentu zaradi večjega deleža cementne paste in posledično večjega zgodnjega krčenja. Vlakna, uporabljena v našem eksperimentu, imajo večji vpliv na celotno krčenje kompozita kot isti delež uporabljenih vlaken v Barr-Badnovem eksperimentu celotnega krčenja.

Od 80. dne naprej opažamo upadanje vpliva 1,00 % in 2,00 % deleža jeklenih vlaken na celotno krčenje kompozita. V tujem eksperimentu je ta upad viden do 100. dne, vpliva vlaken pri daljšem časih pa ne moremo ocenjevati, ker tujih eksperimentalnih rezultatov meritev celotnega krčenja ni. Pri raziskovanju celotnega krčenja kompozita v našem eksperimentu od 100. do 160. dne od priprave preskušancev pa se vpliv jeklenih vlaken na celotno krčenje kompozita, če ta vsebuje 1,00 % ali 2,00 % vlaken, s časom tako rekoč nič ne spreminja.



Slika 4.41: Primerjava vpliva 1,00 % in 2,00 % deleža jeklenih vlaken na celotno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti po naših in tujih eksperimentalnih raziskavah.

Figure 4.41: Comparison of the influence of 1,00 % and 2,00 % steel fibre content on the total shrinkage of fibre reinforced high strength concrete between the own and literature experimental results.

Na podlagi sorazmerno dobrega ujemanja rezultatov naših in tujih eksperimentalnih raziskav vpliva 1,00 % in 2,00 % deleža jeklenih vlaken na celotno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti lahko podamo splošen sklep, da je krčenje vlaknastih betonov manjše od krčenja visokotrdnega betona brez vlaken in da se krčenje vlaknastega betona s povečevanjem vsebnosti vlaken zmanjšuje.

4.7 Rezultati in analiza meritev avtogenega in celotnega krčenja betonov visoke trdnosti z dodanimi polipropilenskimi vlakni

Meritve avtogenega in celotnega krčenja s polipropilenskimi vlakni mikroarmiranega betona visoke trdnosti smo izvajali na preskušancih s suhimi in na preskušancih s predhodno navlaženimi polipropilenskimi vlakni, pa tudi na preskušancih iz primerjalnega betona brez dodane vlaknaste mikroarmature. Rezultati meritev krčenja so prikazani v grafični obliki. Na slikah 4.53 in 4.54 je avtogeno krčenje vlaknastega betona prikazano ločeno od celotnega krčenja in od krčenja zaradi sušenja kompozita. Zaradi boljše preglednosti je avtogeni del krčenja vlaknastega kompozita v prvih 24 urah posebej prikazan na slikah od 4.42 do 4.48 v večjem merilu. Srednje vrednosti in standardni odklon rezultatov meritev zgodnjega avtogenega krčenja so v preglednici 4.16, rezultati meritev avtogenega in celotnega krčenja pri izbranih starostih betona 7, 28, 90 in 180 dni pa v preglednici 4.17.

Preglednica 4.16: Srednja vrednost in standardni odklon izmerjenih deformacij in zgodnjega avtogenega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z različno vsebnostjo polipropilenskih vlaken v ‰o pri času t .

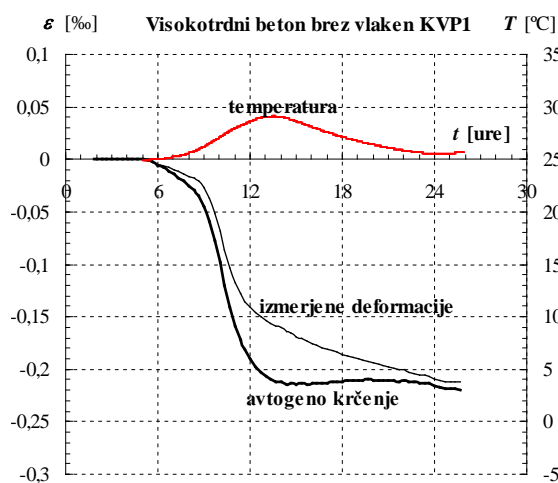
Table 4.16: Average and standard deviation of measured deformations and early autogenous shrinkage of fiber reinforced concrete with different contain of polypropylene fibre in ‰o at time t .

Kompozit	t_z [h]	T_z [°C]	$t(T_{max})$ [h]	T_{max} [°C]	t_k [h]	T_o [°C]	Srednja vrednost in standardni odklon izmerjenih deformacij krčenja [v ‰o]			
							Srednja vrednost in standardni odklon zgodnjega avtogenega krčenja [v ‰o]			
							Starost kompozita t			
12 ur	12 ur	24 ur	24 ur							
KVP1	5,5	24,90	13,50	29,10	24	25,48	-0,141	±0,021	-0,210	±0,023
							-0,190	±0,022	-0,216	±0,025
KVP2	6,0	23,55	14,45	27,78	24	23,84	-0,150	±0,005	-0,213	±0,004
							-0,192	±0,006	-0,228	±0,006
KVP3	6,2	24,47	13,56	27,69	24	23,59	-0,147	±0,018	-0,205	±0,016
							-0,183	±0,020	-0,215	±0,018
KVP4	6,4	23,89	14,32	27,82	24	23,97	-0,112	±0,010	-0,168	±0,008
							-0,153	±0,011	-0,179	±0,010
KVP5	6,2	23,93	14,32	28,10	24	23,22	-0,136	±0,006	-0,200	±0,007
							-0,176	±0,008	-0,212	±0,009
KVP6	6,4	23,48	14,74	27,44	24	23,73	-0,102	±0,015	-0,176	±0,012
							-0,138	±0,017	-0,189	±0,014
KVP7	6,5	24,09	15,44	27,74	24	23,27	-0,005	±0,010	-0,051	±0,014
							-0,032	±0,012	-0,064	±0,016
KVJP	5,5	20,53	15,20	24,24	24	20,41	-0,157	±0,047	-0,237	±0,047
							-0,192	±0,045	-0,250	±0,045
KVPN	6,3	19,70	16,20	23,02	24	20,41	-	-	-0,105	±0,015
							-	-	-0,118	±0,018

Preglednica 4.17: Srednja vrednost in standardni odklon krčenja kompozita z različnimi deleži polipropilenskih vlaken v % pri starosti t .

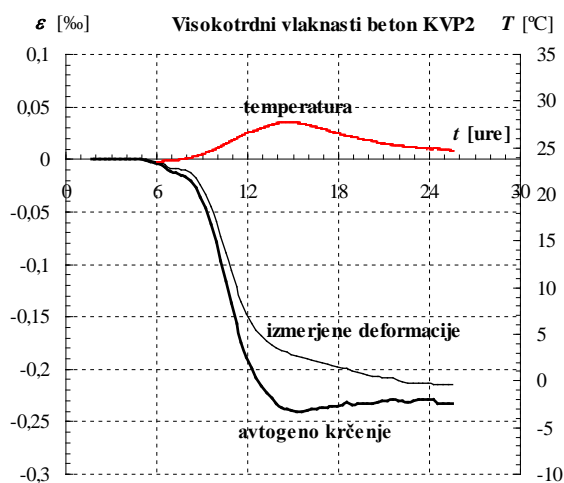
Table 4.17: Average value and standard deviation shrinkage of composite with different contain of polypropylene fibre in % at the age t .

Kompozit	Srednja vrednost in standardni odklon celotnega krčenja preskušancev pri RH = 70 % [v %]							
	Srednja vrednost in standardni odklon krčenja zatesnjenih preskušancev [v %]							
	Starost betona t							
	7 dni		28 dni		90 dni		180 dni	
KVP1	-0,492	±0,008	-0,621	±0,008	-0,690	±0,008	-0,710	±0,008
	-0,360	±0,009	-0,460	±0,009	-0,498	±0,009	-0,530	±0,006
KVP2	-0,402	±0,022	-0,498	±0,009	-0,571	±0,012	-0,605	±0,003
	-0,370	±0,033	-0,458	±0,012	-0,517	±0,015	-0,557	±0,018
KVP3	-0,366	±0,011	-0,453	±0,020	-0,495	±0,017	-0,553	±0,013
	-0,324	±0,005	-0,420	±0,002	-0,469	±0,015	-0,530	±0,023
KVP4	-0,354	±0,022	-0,422	±0,023	-0,478	±0,025	-0,510	±0,026
	-0,292	±0,004	-0,381	±0,004	-0,440	±0,003	-0,478	±0,003
KVP5	-0,380	±0,022	-0,511	±0,020	-0,579	±0,015	-0,606	±0,020
	-0,295	±0,019	-0,405	±0,010	-0,478	±0,010	-0,513	±0,011
KVP6	-0,382	±0,003	-0,475	±0,003	-0,529	±0,002	-0,564	±0,003
	-0,275	±0,024	-0,357	±0,019	-0,437	±0,020	-0,477	±0,020
KVP7	-0,258	±0,007	-0,362	±0,007	-0,435	±0,001	-0,463	±0,003
	-0,205	±0,019	-0,272	±0,019	-0,344	±0,011	-0,385	±0,008
KVJP	-0,380	±0,008	-0,462	±0,008	-0,494	±0,008	-0,516	±0,008
	-0,281	±0,004	-0,373	±0,006	-0,412	±0,009	-0,439	±0,013



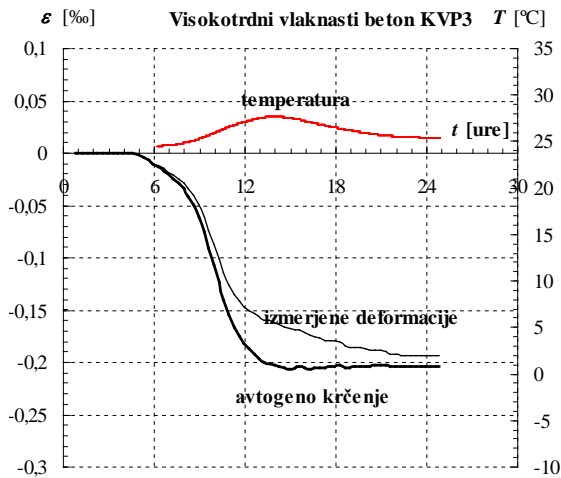
Slika 4.42: Časovni potek izmerjene deformacije in temperature ter avtogenega krčenja preskušancev visokotrdnega betona KVP1 brez dodane vlaknaste armature.

Figure 4.42: Time development of measured deformations and temperature for specimens made of high performance concrete KVP1 without fibre reinforcement.



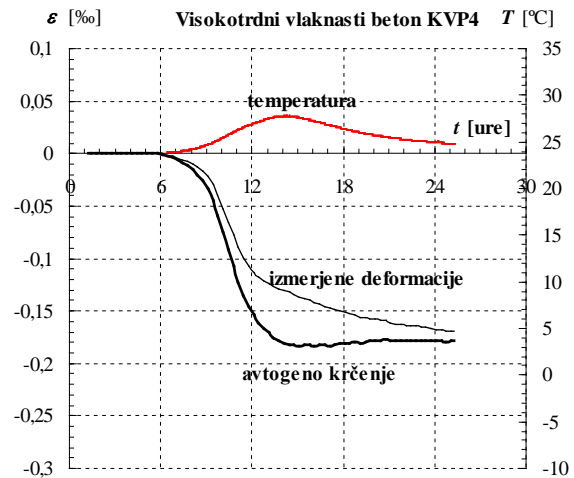
Slika 4.43: Časovni potek izmerjenih deformacij in temperature ter avtogenega krčenja preskušancev visokotrdnega vlaknastega betona KVP2 z 0,25 % polipropilenskih vlaken.

Figure 4.43: Time development of measured deformations, temperature and autogenous shrinkage for specimens made of high performance fibre reinforced concrete KVP2 with 0,25 % of polypropylene fibres.



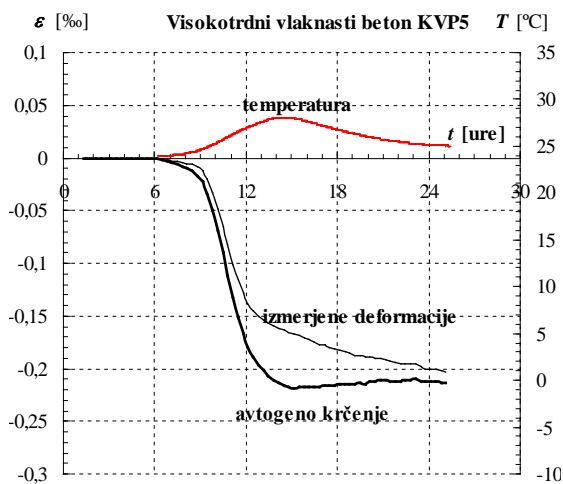
Slika 4.44: Časovni potek izmerjenih deformacij in temperature ter avtogenega krčenja preskušancev visokotrdnega vlaknastega betona KVP3 z 0,50 % polipropilenskih vlaken.

Figure 4.44: Time development of measured deformations, temperature and autogenous shrinkage for specimens made of high performance fibre reinforced concrete KVP3 with 0,50 % of polypropylene fibres.



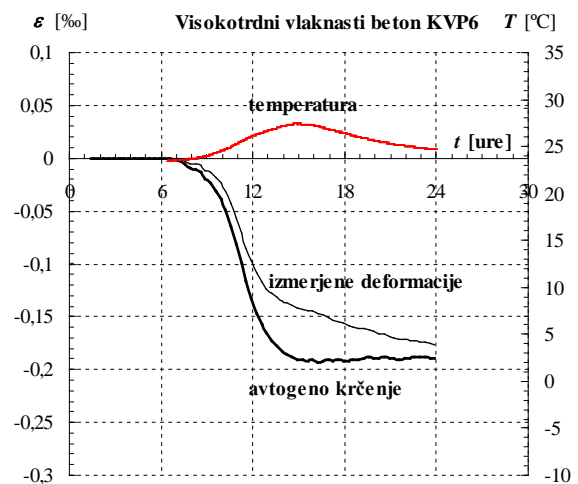
Slika 4.45: Časovni potek izmerjenih deformacij in temperature ter avtogenega krčenja preskušancev visokotrdnega vlaknastega betona KVP4 z 0,75 % polipropilenskih vlaken.

Figure 4.45: Time development of measured deformations, temperature and autogenous shrinkage for specimens made of high performance fibre reinforced concrete KVP4 with 0,75 % of polypropylene fibres.



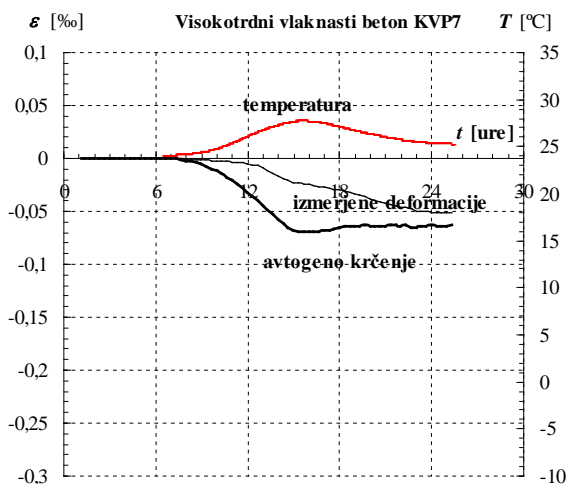
Slika 4.46: Časovni potek izmerjenih deformacij in temperature ter avtogenega krčenja preskušancev visokotrdnega vlaknastega betona KVP5 z 0,25 % navlaženih polipropilenskih vlaken.

Figure 4.46: Time development of measured deformations, temperature and autogenous shrinkage for specimens made of high performance fibre reinforced concrete KVP5 with 0,25 % of moistened polypropylene fibres.



Slika 4.47: Časovni potek izmerjenih deformacij in temperature ter avtogenega krčenja preskušancev visokotrdnega vlaknastega betona KVP6 z 0,50 % navlaženih polipropilenskih vlaken.

Figure 4.47: Time development of measured deformations, temperature and autogenous shrinkage for specimens made of high performance fibre reinforced concrete KVP6 with 0,50 % of moistened polypropylene fibres.



Slika 4.48: Časovni potek izmerjenih deformacij in temperature ter avtogenega krčenja preskušancev visokotrdnega vlaknastega betona KVP7 z 0,75 % navlaženih polipropilenskih vlaken.

Figure 4.48: Time development of measured deformations, temperature and autogenous shrinkage for specimens made of high performance fibre reinforced concrete KVP7 with 0,75 % of moistened polypropylene fibres.

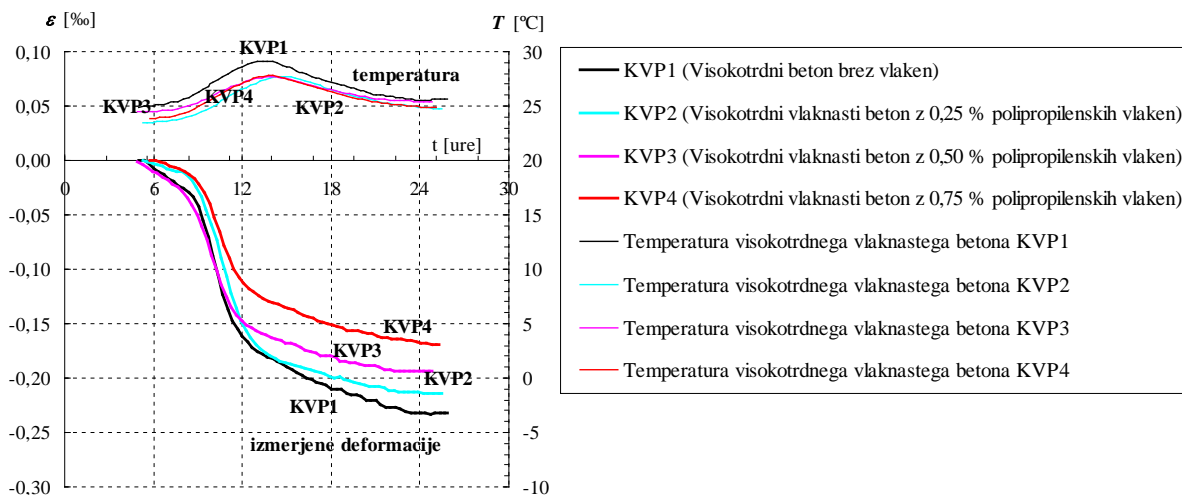
Vpliv prostorninskega deleža polipropilenskih vlaken na zgodnje avtogeno krčenje visokotrdnega vlaknastega betona

Vpliv prostorninskega deleža suhih polipropilenskih vlaken na zgodnje avtogeno krčenje

Na slikah 4.49, 4.50, 4.51 in 4.52 so prikazani časovni poteki temperature in avtogenega krčenja ali izmerjene deformacije vlaknastega betona visoke trdnosti v prvih 24 urah od izdelave preskušancev. Pri tem je bilo avtogeno krčenje kompozita določeno kot razlika izmerjenih in temperaturnih deformacij preskušancev.

Na sliki 4.49 so prikazane izmerjene deformacije betona visoke trdnosti z različnimi prostorninskimi deleži polipropilenskih vlaken v prvih 24 urah od izdelave preskušancev. Sveža betonska mešanica KVP1 oziroma sveže mešanice kompozitov KVP2, KVP3 in KVP4 imajo enako vodovozivno razmerje, razlika je le v vsebnosti vlaken in deleža agregata v preskušanih betonih oziroma kompozitih. Količina agregata v vlaknastih betonih KVP2, KVP3 in KVP4 z različno vsebnostjo polipropilenskih vlaken je namreč zmanjšana za prostornino dodanih vlaken. S slike 4.49 je razvidno, da izmerjene deformacije visokotrdnih vlaknastih betonov v prvih 10 urah od izdelave preskušancev skoraj sovpadajo z deformacijami primerjalnega betona brez vlaken. Pozneje, šteto od izdelave preskušancev, pa se krčenje visokotrdnega vlaknastega betona s povečevanjem vsebnosti polipropilenskih vlaken v kompozitu zmanjšuje. Po 24 urah od izdelave preskušancev so izmerjene deformacije vlaknastega betona z 0,25 % polipropilenskih vlaken za 7 % manjše, deformacije

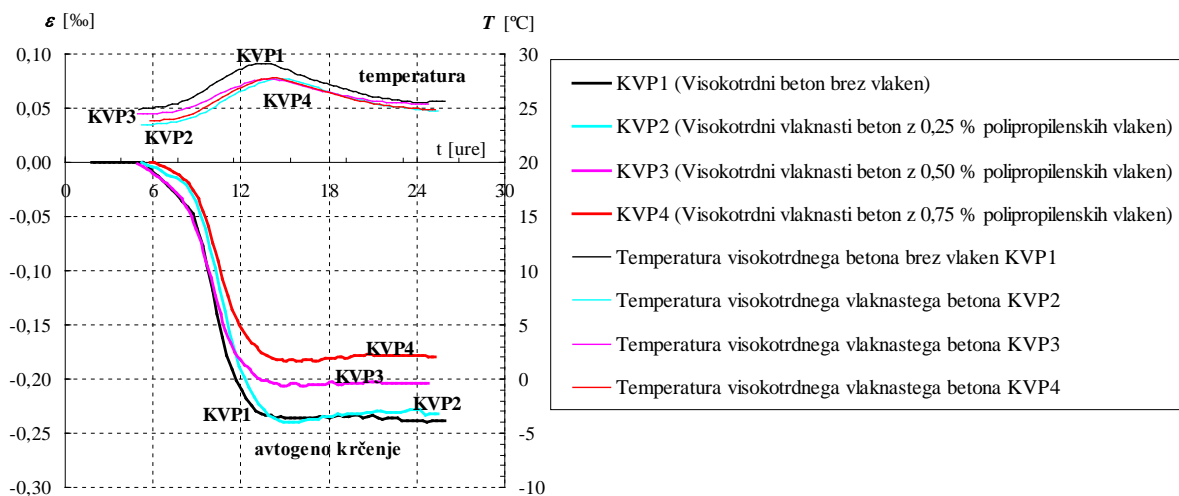
vlaknastega betona z 0,50 % polipropilenskih vlaken pa za 17 % manjše od izmerjenih deformacij primerjanega betona brez vlaken. Izmerjene deformacije visokotrdnega vlaknastega betona z 0,75 % polipropilenskih vlaken so od vseh preiskovanih vlaknastih betonov najmanjše in so v 24 urah po izdelavi preskušancev za 27 % manjše od deformacij primerjalnega betona brez vlaken KVP1.



Slika 4.49: Izmerjene deformacije preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z različno vsebnostjo suhih polipropilenskih vlaken v prvih 24 urah po betoniranju.

Figure 4.49: Measured deformations of test specimens made of fibre reinforced high performance concrete containing various amounts of dry polypropylene fibres within first 24 hours after concreting.

Na sliki 4.50 je prikazano časovno spreminjanje temperature preskušancev in časovni razvoj avtogenega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti z različnimi prostorninskimi deleži polipropilenskih vlaken v prvih 24 urah po izdelavi preskušancev. Pri tem je vpliv temperaturnih raztezkov zaradi spreminjanja temperature preskušancev v času intenzivnega krčenja cementa že implicitno zajet. S slike 4.50 je razvidno, da se avtogeno krčenje vlaknastih betonov 10 ur po izdelavi preskušancev tako rekoč ne razlikuje od avtogenega krčenja primerjalnega betona brez vlaken. Po 10 urah od izdelave preskušancev pa do konca meritev je avtogeno krčenje vlaknastih betonov KVP3 in KVP4 manjše od avtogenega krčenja primerjalnega visokotrdnega betona brez vlaken. Avtogeno krčenje vlaknastega betona z 0,50 % polipropilenskih vlaken je po 24 urah od izdelave preskušancev za 15 % manjše od avtogenega krčenja primerjalnega betona KVP1. Najmanjše avtogeno krčenje je bilo izmerjeno pri vlaknastem betonu z 0,75 % polipropilenskih vlaken, ki je po 24 urah za 25 % manjše od avtogenega krčenja primerjanega betona brez vlaken in za 10 % manjše od vlaknastega betona KVP3. Avtogeno krčenje vlaknastega betona z 0,25 % polipropilenskih vlaken se po 20 urah od izdelave preskušancev skoraj ujema z avtogenim krčenjem primerjalnega betona brez vlaken. V končnem času pa je avtogeno krčenje vlaknastega betona KVP2 za 3 % manjše od avtogenega krčenja primerjalnega betona KVP1 brez vlaken.



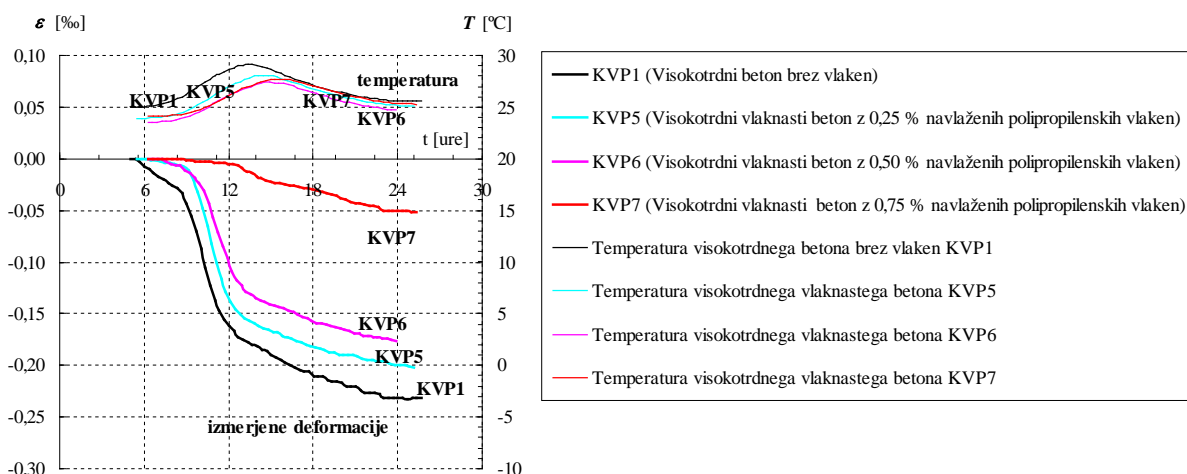
Slika 4.50: Avtogeno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti z različnimi prostorninskimi deleži suhih polipropilenskih vlaken v prvih 24 urah po izdelavi preskušancev.

Figure 4.50: Autogenous shrinkage of fibre reinforced high performance concrete containing various volume parts of dry polypropylene fibres within first 24 hours after finishing specimens.

Vpliv prostorninskega deleža predhodno navlaženih polipropilenskih vlaken na zgodnje avtogeno krčenje

Na sliki 4.51 so prikazane izmerjene deformacije preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti, s predhodno navlaženimi polipropilenskimi vlakni, katerih delež je 0,25 %, 0,50 % oz. 0,75 %, in primerjalnega betona brez vlaken. Navlažena polipropilenska vlakna v vlaknastih betonih KVP5, KVP6 in KVP7 poleg mehanskih ojačitev predstavljajo tudi dodaten rezervoar vode. Pri vlaknastih betonih z navlaženimi polipropilenskimi vlakni je voda po cementni pasti kompozita razporejena enakomerneje in jo je tudi več kot v primerjalnem betonu brez navlaženih polipropilenskih vlaken. Posledica tega so manjše kapilarne sile v sveži vlaknasto-betonski masi in s tem manjše avtogeno krčenje v prvih 24 urah po zabetoniranju preskušancev.

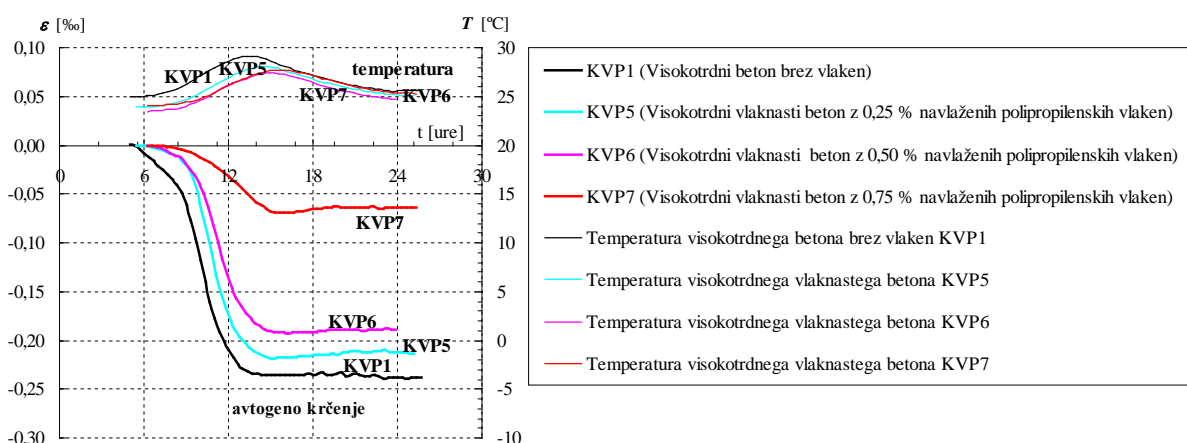
S slike 4.51 je razvidno, da se z večanjem prostorninskega deleža dodanih polipropilenskih vlaken izmerjene deformacije vlaknastega betona zmanjšujejo. Najmanjše deformacije so bile izmerjene pri visokotrdnem vlaknastem betonu KVP7, ki vsebuje 0,75 % polipropilenskih vlaken. V 24 urah po izdelavi preskušancev so bile te deformacije za 78 % manjše od deformacij primerjalnega betona brez vlaken. Izmerjene deformacije visokotrdnega vlaknastega betona KVP5 z 0,25 % navlaženih polipropilenskih vlaken so bile po 24 urah od izdelave preskušancev za 13 % manjše od izmerjenih deformacij primerjalnega betona KVP1 brez vlaken. Izmerjene deformacije vlaknastega betona KVP6 pa so bile po 24 urah od izdelave preskušancev za 23 % manjše od izmerjenih deformacij primerjalnega betona brez vlaken.



Slika 4.51: Izmerjene deformacije preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z različnimi prostorninskimi deleži navlaženih polipropilenskih vlaken v prvih 24 urah po izdelavi preskušancev.

Figure 4.51: Measured deformations of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing various volume parts of moistened polypropylene fibres within first 24 hours finishing specimens.

Iz prikaza eksperimentalnih raziskav (slika 4.52) je razvidno, da se avtogeno krčenje vlaknastih betonov visoke trdnosti z večanjem deleža polipropilenskih vlaken v kompozitu zmanjšuje. Avtogeno krčenje preskušancev kompozita KVP6, ki vsebuje 0,50 % navlaženih polipropilenskih vlaken, je po 24 urah od izdelave preskušancev približno za 25 % manjše od avtogenega krčenja primerjalnega betona brez vlaken in za 15 % manjše od avtogenega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona KVP5, ki vsebuje 0,25 % navlaženih polipropilenskih vlaken. Avtogeno krčenje preskušancev iz vlaknastega betona KVP7 z 0,75 % prostorninskim deležem polipropilenskih vlaken je pri 24 urah od izdelave preskušancev za 73 % manjše od avtogenega krčenja preskušancev primerjalnega betona brez dodane vlaknaste armature.



Slika 4.52: Avtogeno krčenje preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0 %, 0,25 %, 0,50 % in 0,75 % prostorninskim deležem navlaženih polipropilenskih vlaken v prvih 24 urah po izdelavi preskušancev.

Figure 4.52: Autogenous shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0 %, 0,25 %, 0,50 % and 0,75 % by volume content of moistened polypropylene fibres within first 24 hours after concreting.

Iz časovnega poteka avtogenega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti, ki je prikazano na slikah 4.50 in 4.52, je med 12. in 24. uro opazno rahlo zmanjšanje avtogenega krčenja vlaknastega betona, in sicer takrat, ko je v betonu dosežena največja temperatura, ko se temperatura preskušancev skoraj spet izenači s temperaturo okolice. Ta fizikalni pojav je posledica termodinamičnega ravnovesja v porah cementnega kamna. Ko začne temperatura v betonu padati, se beton zaradi linearnega temperaturnega raztezka krči, s čimer se zmanjša tudi prostornina zaprtih por v cementnem kamnu. Zaradi zmanjšanja prostornine zaprte pore se po zakonih termodinamike poveča relativna vlažnost v pori, kar zmanjša natezne sile, ki delujejo na stene por, to pa povzroči zmanjšanje avtogenega krčenja betona oziroma kompozita. Zaradi padca temperature zraka v zaprti pori ob vzpostavitvi termodinamičnega ravnovesja naraste relativna vlažnost zraka, kar povzroči še dodatno zmanjšanje avtogenega krčenja kompozita.

Iz časovnega poteka izmerjenih deformacij (slika 4.49) in avtogenega krčenja (slika 4.50) vlaknastih betonov visoke trdnosti z dodanimi suhimi polipropilenskimi vlakni je razvidno, da se z večanjem vsebnosti polipropilenskih vlaken izmerjene deformacije oziroma avtogeno krčenje kompozita manjša. Predvidevamo, da polipropilenska vlakna avtogeno krčenje kompozita do neke mere ovirajo že prav od začetka strjevanja kompozita. Med strjevanjem se povečuje togost cementne paste ter sprijemna trdnost med vlakni in pasto, kar poveča učinkovitost vlaken pri oviranju krčenja cementne paste. Zaradi tega se tudi medsebojne razlike avtogenega krčenja kompozita z različnimi deleži vlaknaste armature s časom povečujejo.

Izmerjene deformacije (slika 4.51) in avtogeno krčenje (slika 4.52) s predhodno navlaženimi polipropilenskimi vlakni (0,25 % in 0,50 %) mikroarmiranega betona visoke trdnosti potekajo analogno z izmerjenimi deformacijami oziroma avtogenim krčenjem betona enake sestave brez dodane vlaknaste armature. Razlike izmerjenih deformacij oziroma avtogenega krčenja med betonom brez vlaknaste armature in kompozitom z 0,25 % polipropilenskih vlaken so približno enake razlikam izmerjenih deformacij oziroma avtogenega krčenja med kompozitom z 0,25 % vlaken in kompozitom z 0,50 % vlaken. Iz tega sledi, da so razlike med izmerjenimi deformacijami oziroma avtogenim krčenjem približno proporcionalne deležem vlaken. Izmerjene deformacije in pripadajoče avtogeno krčenje kompozita z 0,75 % vlaken pa so bistveno manjši kot pri kompozitu z 0,50 % vlaken. Pri mikroarmiranju betona visoke trdnosti s predhodno navlaženimi polipropilenskimi vlakni se pojavita dva fizikalna učinka, ki ugodno delujeta na zmanjšanje avtogenega krčenja betona. Poleg oviranja krčenja cementne paste zaradi togosti vlaken, ki je prisotno tudi pri uporabi suhih vlaken, se pri uporabi navlaženih vlaken pojavi še ugoden učinek dodatne rezerve vode, ki je nakopičena v navlaženih vlaknih mikroarmature. Dopuščamo možnost, da je razmeroma veliko odstopanje izmerjenih deformacij in avtogenega krčenja kompozita z 0,50 % vlaken od izmerjenih deformacij in avtogenega krčenja kompozita z 0,75 % vlaken lahko v neki meri tudi posledica morebitnega gnezdenja vlaken. Pri večji vsebnosti vlaken je večja verjetnost, da je na vseh mestih kompozita vsaj nekaj vlaken, ki zadrževajo vodo cementni pasti v celotni masi kompozita zagotavljajo ustrezno količino vode, ki zmanjšuje krčenje kompozita kot celote.

V nadaljevanju je prikazana primerjava med zgodnjim avtogenim krčenjem kompozitov z 0,50 % deležem suhih KVP3, namočenih KVP6 in suhih polipropilenskih vlaken z dodano vodo KVPN.

Dodane vode v kompozitu s suhimi polipropilenskimi vlakni KVPN je ravno toliko, kolikor je vode v napojenih polipropilenskih vlaknih kompozita KVP6.

Ugotavljamo, da prosta dodana voda v kompozitu z namočenimi polipropilenskimi vlakni vpliva na razlez, saj je za 10 % večji kot pri kompozitu z isto vsebnostjo navlaženih vlaken (preglednica 4.10). Sklepamo, da voda v navlaženih polipropilenskih vlaknih ne vpliva na razlez kompozita, saj je skoraj enak razlezu kompozita z isto vsebnostjo suhih polipropilenskih vlaken (KVP3).

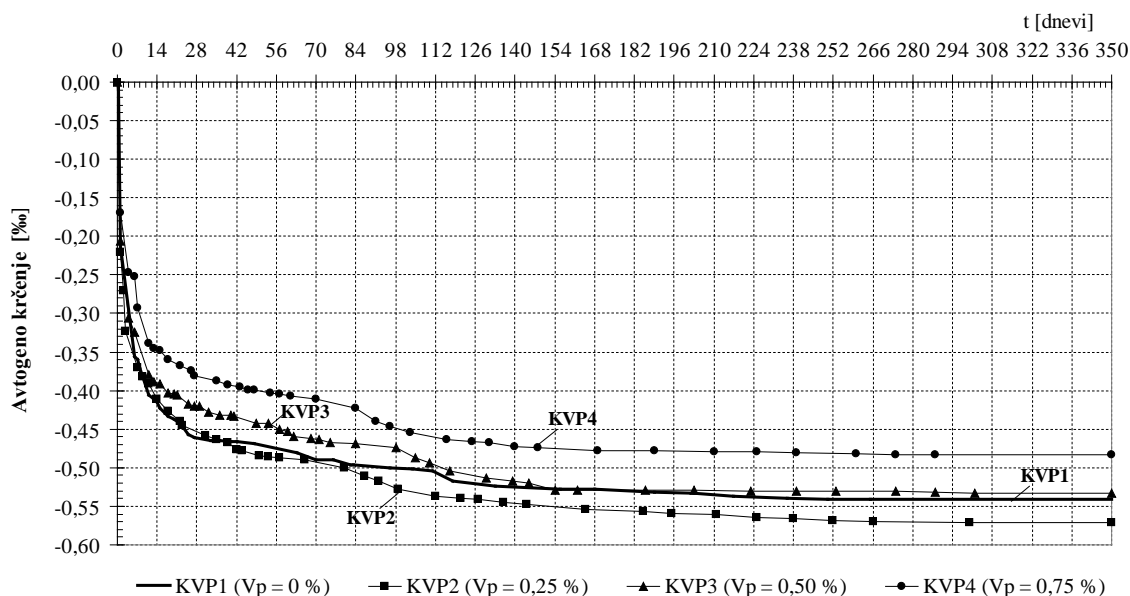
Iz preglednice 4.10 je razvidno, da sta tlačni trdnosti kompozitov s suhimi polipropilenskimi vlakni in kompozita z navlaženimi polipropilenskimi vlakni približno enaki. Tlačna trdnost kompozita z 0,50 % deležem suhih vlaken in dodano vodo KVPN pa je manjša od tlačne trdnosti kompozita z enakim deležem suhih polipropilenskih vlaken in manjša od tlačne trdnosti kompozita z enako vsebnostjo navlaženih polipropilenskih vlaken. Iz preglednice 4.17 je razvidno, da je avtogeno krčenje kompozita z 0,50 % deležem suhih polipropilenskih vlaken in količino vode, povečano za vsebnost vode v navlaženih vlaknih KVPN, po 24 urah od priprave preskušancev manjše od avtogenega krčenja kompozita z enako vsebnostjo suhih polipropilenskih vlaken in manjše od avtogenega krčenja kompozita z 0,50 % navlaženih polipropilenskih vlaken. Avtogeno krčenje kompozita z 0,50 % suhih polipropilenskih vlaken in ustrezno povečano količino vode je po 24 urah od priprave preskušancev za 49 % manjše od avtogenega krčenja kompozita z enako vsebnostjo suhih polipropilenskih vlaken brez dodatnega povečanja vode in za 40 % manjše od avtogenega krčenja kompozita z enako vsebnostjo navlaženih polipropilenskih vlaken.

Iz preglednice 4.10 je razvidno, da je vpliv 0,50 % deleža navlaženih polipropilenskih vlaken na konsistenco in tlačno trdnost kompozita manjši kot vpliv enakega deleža suhih polipropilenskih vlaken in ustrezno povečane količine vode. Dodatno dodana voda v kompozitu s suhimi polipropilenskimi vlakni, ki je enaka količini vode v navlaženih polipropilenskih vlaknih, poveča vodovezivno razmerje, kar se kaže v povečanem razlezu in zmanjšani tlačni trdnosti glede na razlez in tlačno trdnost kompozitov z enako vsebnostjo suhih oziroma navlaženih polipropilenskih vlaken. Manjše avtogeno krčenje kompozita KVPN s suhimi polipropilenskimi vlakni in dodatno količino dodane vode je v primerjavi z avtogenim krčenjem kompozita s suhimi vlakni KVP3 in avtogenim krčenjem kompozita z navlaženimi polipropilenskimi vlakni posledica vpliva večjega vodovezivenga razmerja zaradi dodane vode. Konsistenca svežega kompozita z 0,50 % deležem navlaženih polipropilenskih vlaken je približno enaka konsistenci svežega kompozita z enakim deležem suhih polipropilenskih vlaken. Voda v navlaženih polipropilenskih vlaknih ne vpliva na konsistenco svežega kompozita KVP6, vendar ugodno vpliva na zgodnje avtogeno krčenje kompozita. Predvidevamo, da voda, ki jo v kompozitu zadržujejo predhodno navlažena polipropilenska vlakna, tvori notranjo rezervo vode, ki vpliva na zmanjšanje zgodnjega avtogenega krčenja kompozita.

Vpliv prostorninskega deleža polipropilenskih vlaken na časovni potek avtogenega in celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti

Na slikah 4.53 in 4.54 je za primerjalni beton KVP1 oziroma kompozite KVP2, KVP3, KVP4, KVP5, KVP6 in KVP7 prikazan časovni razvoj avtogenega krčenja zatesnjenih preskušancev iz primerjalnega betona visoke trdnosti brez vlaken in preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z naslednjimi prostorninskimi deleži suhih oziroma predhodno navlaženih polipropilenskih vlaken: 0 %, 0,25 %, 0,50 % in 0,75 %.

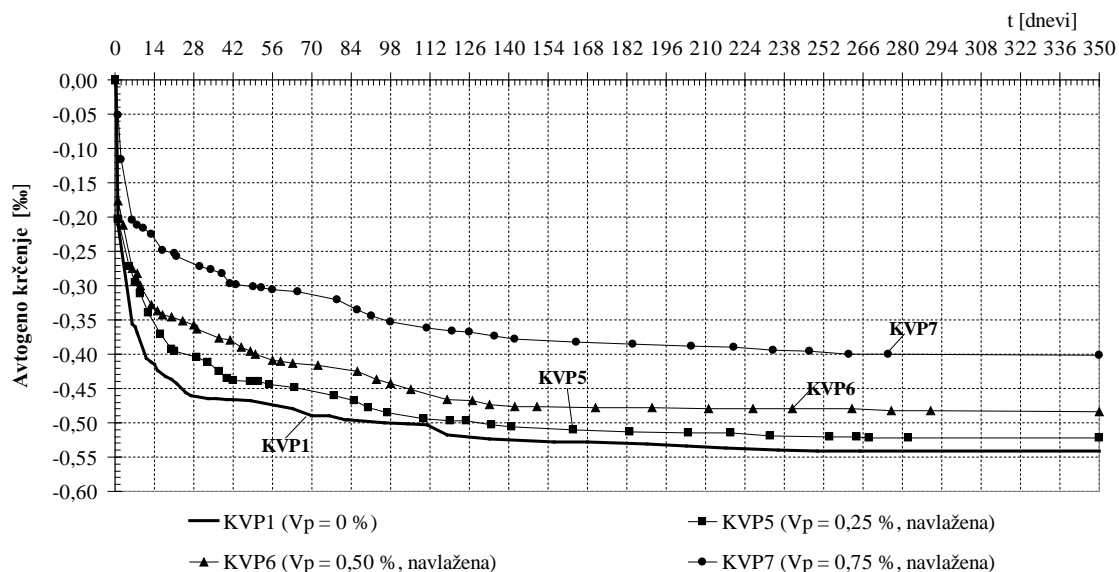
Najmanjše avtogeno krčenje kompozita (slika 4.53) je bilo ugotovljeno pri preskušancih z 0,75 % polipropilenskih vlaken, ki je pri 14 oziroma 28 dneh od izdelave preskušancev za 17 % oziroma 19 % manjše od avtogenega krčenja primerjalnega betona brez vlaken. Na koncu merjenja, pri 350 dneh od izdelave preskušancev, je avtogeno krčenje vlaknastega betona KVP4 za 10 % manjše od avtogenega krčenja primerjalnega betona brez vlaken. Avtogeno krčenje vlaknastih betonov z 0,25 % in 0,50 % vlaken se po 14 dneh od izdelave preskušancev le minimalno razlikuje od avtogenega krčenja primerjalnega visokotrdnega betona brez vlaken. Po 84. dnevu od izdelave preskušancev se avtogeno krčenje vlaknastega betona z 0,25 % polipropilenskih vlaken povečuje hitreje od avtogenega krčenja primerjalnega betona brez vlaken in je v 350 dneh po izdelavi preskušancev za 5 % večje od avtogenega krčenja primerjalnega betona brez vlaken. Avtogeno krčenje vlaknastega betona KVP3 je od 14. do 100. dne od izdelave preskušancev približno za 4 % manjše od avtogenega krčenja primerjalnega visokotrdnega betona brez vlaken. Od 100. dne po izdelavi preskušancev pa vse do konca meritve se avtogeno krčenje vlaknastega betona z 0,50 % suhih polipropilenskih vlaken povečuje hitreje kot a avtogeno krčenje primerjalnega betona brez vlaken, tako da je na koncu meritev za 3 % manjše od avtogenega krčenja primerjalnega betona brez vlaken.



Slika 4.53: Časovni razvoj avtogenega krčenja zatesnjenih preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0 %, 0,25 %, 0,50 % in 0,75 % prostorninskim deležem suhih polipropilenskih vlaken v celotnem času izvajanja meritev.

Figure 4.53: Time development of autogenous shrinkage of sealed test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0 %, 0,25 %, 0,50 % and 0,75 % volume content of dry polypropylene fibres during the complete measuring period.

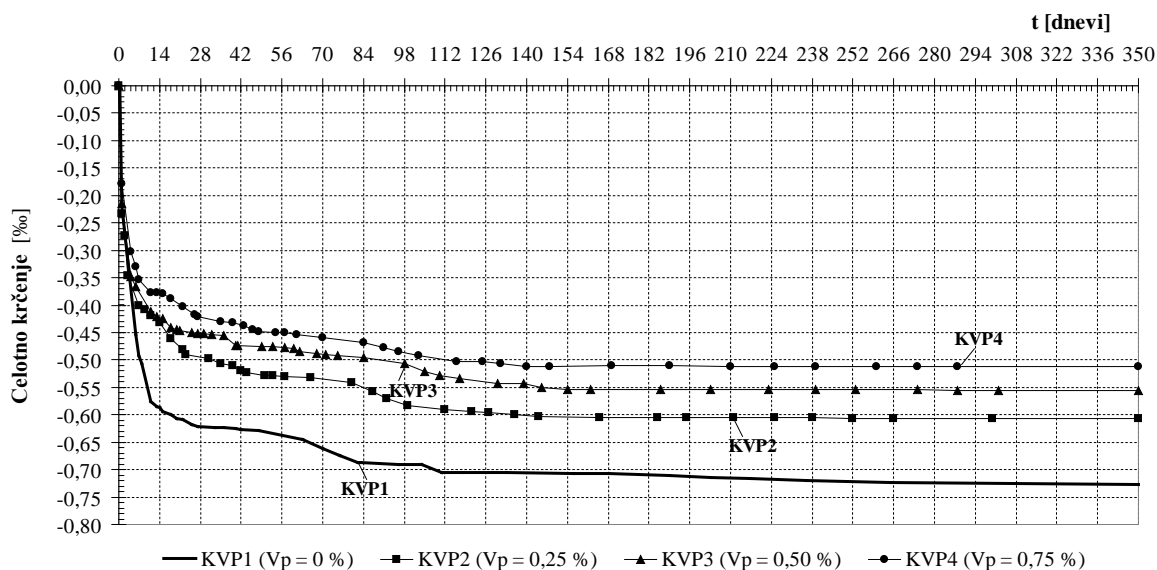
Na sliki 4.54 so prikazani rezultati meritev avtogenega krčenja zatesnjenih preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z različnimi prostorninskimi deleži navlaženih polipropilenskih vlaken. Avtogeno krčenje vlaknastih betonov z 0,25 % in 0,50 % navlaženih polipropilenskih vlaken je 14. dan od izdelave preskušancev približno za 19 % manjše od avtogenega krčenja primerjalnega visokotrdnega betona brez vlaken. 28. dan od izdelave preskušancev je avtogeno krčenje vlaknastega betona z 0,50 % navlaženih polipropilenskih vlaken za 21 % manjše, avtogeno krčenje kompozita z 0,25 % navlaženih polipropilenskih vlaken pa za 12 % manjše od avtogenega krčenja primerjalnega betona brez vlaken. Po 350. dneih od izdelave preskušancev je avtogeno krčenje vlaknastega betona z 0,50 % navlaženih polipropilenskih vlaken za 11 % manjše, avtogeno krčenje vlaknastega betona z 0,25 % navlaženih polipropilenskih vlaken pa za 4 % manjše od avtogenega krčenja primerjalnega betona brez vlaken. Najmanjše avtogeno krčenje je bilo izmerjeno pri preskušancih vlaknastega betona z 0,75 % navlaženih polipropilenskih vlaken, ki je bilo po 14 dneih od izdelave preskušancev za 48 %, po 28 dneih od izdelave preskušancev pa za 41 % manjše od avtogenega krčenja primerjalnega betona brez vlaken. Po 350 dneih od izdelave preskušancev je bilo avtogeno krčenje vlaknastega betona z 0,75 % navlaženih polipropilenskih vlaken za 26 % manjše od avtogenega krčenja primerjalnega betona KVP1 brez vlaken.



Slika 4.54: Časovni razvoj avtogenega krčenja zatesnjenih preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0 %, 0,25 %, 0,50 % in 0,75 % prostorninskim deležem navlaženih polipropilenskih vlaken v celotnem času izvajanja meritev.

Figure 4.54: Time development of autogenous shrinkage of sealed test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0 %, 0,25 %, 0,50 % and 0,75 % of moistened polypropylene fibres during the complete measuring period.

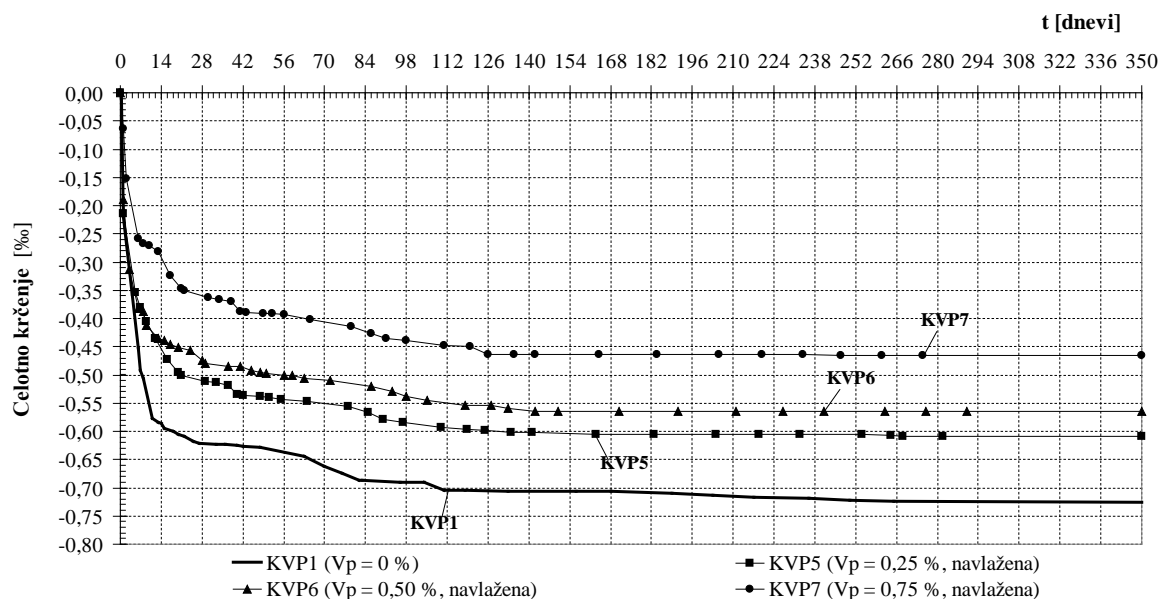
Na sliki 4.55 je prikazan časovni potek celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti z različnimi deleži suhih polipropilenskih vlaken. Celotno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,75 % polipropilenskih vlaken je izmed vseh preiskovanih vlaknastih betonov najmanjše in je 14. dan od izdelave preskušancev za 36 %, 28. dan od izdelave preskušancev pa za 32 % manjše od celotnega krčenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature. Ob koncu izvajanja meritev je celotno krčenje vlaknastega betona z 0,75 % polipropilenskih vlaken za 30 % manjše od celotnega krčenja primerjalnega betona brez vlaken. Celotno krčenje vlaknastega betona z 0,25 % in 0,50 % polipropilenskih vlaken je po 14 dneh od izdelave preskušancev za 28 % manjše od celotnega krčenja primerjalnega betona brez vlaken. Od 14. dne po izdelavi preskušancev pa do konca meritve se celotno krčenje vlaknastega betona z 0,50 % polipropilenskih vlaken povečuje počasneje od celotnega krčenja vlaknastega betona z 0,25 % polipropilenskih vlaken. Po 28 dneh od izdelave preskušancev je celotno krčenje vlaknastega betona z 0,50 % suhih polipropilenskih vlaken za 27 % manjše, celotno krčenje vlaknastega betona z 0,25 % suhih polipropilenskih vlaken pa za 20 % manjše od celotnega krčenja betona brez vlaken. 350. dan od izdelave preskušancev je bilo celotno krčenje vlaknastega betona z 0,50 % polipropilenskih vlaken za 29 % manjše, celotno krčenje vlaknastega betona z 0,25 % polipropilenskih vlaken pa za 16 % manjše od celotnega krčenja primerjalnega betona brez vlaken.



Slika 4.55: Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0 %, 0,25 %, 0,50 % in 0,75 % prostorninskim deležem suhih polipropilenskih vlaken.

Figure 4.55: Time development of total shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0 %, 0,25 %, 0,50 % and 0,75 % of dry polypropylene fibres.

S slike 4.56 je razvidno, da je najmanjše celotno krčenje vlaknastega betona z 0,75 % navlaženih polipropilenskih vlaken, saj je po 14 dneh od izdelave preskušancev za 52 % manjše, po 28 dneh od izdelave preskušancev pa za 42 % manjše od celotnega krčenja visokotrdnega betona brez vlaken. 350. dan od izdelave preskušancev je celotno krčenje vlaknastega betona KVP7 za 35 % manjše od celotnega krčenja primerjalnega betona brez vlaken KVP1. 14 dni po pripravi preskušancev celotno krčenje vlaknastih betonov KVP5 in KVP6 sovpada in je za 27 % manjše od celotnega krčenja primerjalnega betona brez vlaken. Od 14. dne po izdelavi preskušancev se celotno krčenje vlaknastega betona z 0,50 % navlaženih polipropilenskih vlaken manjša v primerjavi s celotnim krčenjem vlaknastega betona z 0,25 % navlaženih polipropilenskih vlaken in je za 24 % manjše od celotnega krčenja primerjalnega betona brez vlaken. Od 350. dne po izdelavi preskušancev je celotno krčenje vlaknastega betona z 0,50 % navlaženih polipropilenskih vlaken za 22 % manjše od celotnega krčenja primerjalnega betona brez vlaken in za 7 % manjše od celotnega krčenja vlaknastega betona z 0,25 % navlaženih polipropilenskih vlaken.



Slika 4.56: Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0 %, 0,25 %, 0,50 % in 0,75 % prostorninskim deležem navlaženih polipropilenskih vlaken.

Figure 4.56: Time development of total shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0 %, 0,25 %, 0,50 % and 0,75 % of moisted polypropylene fibres.

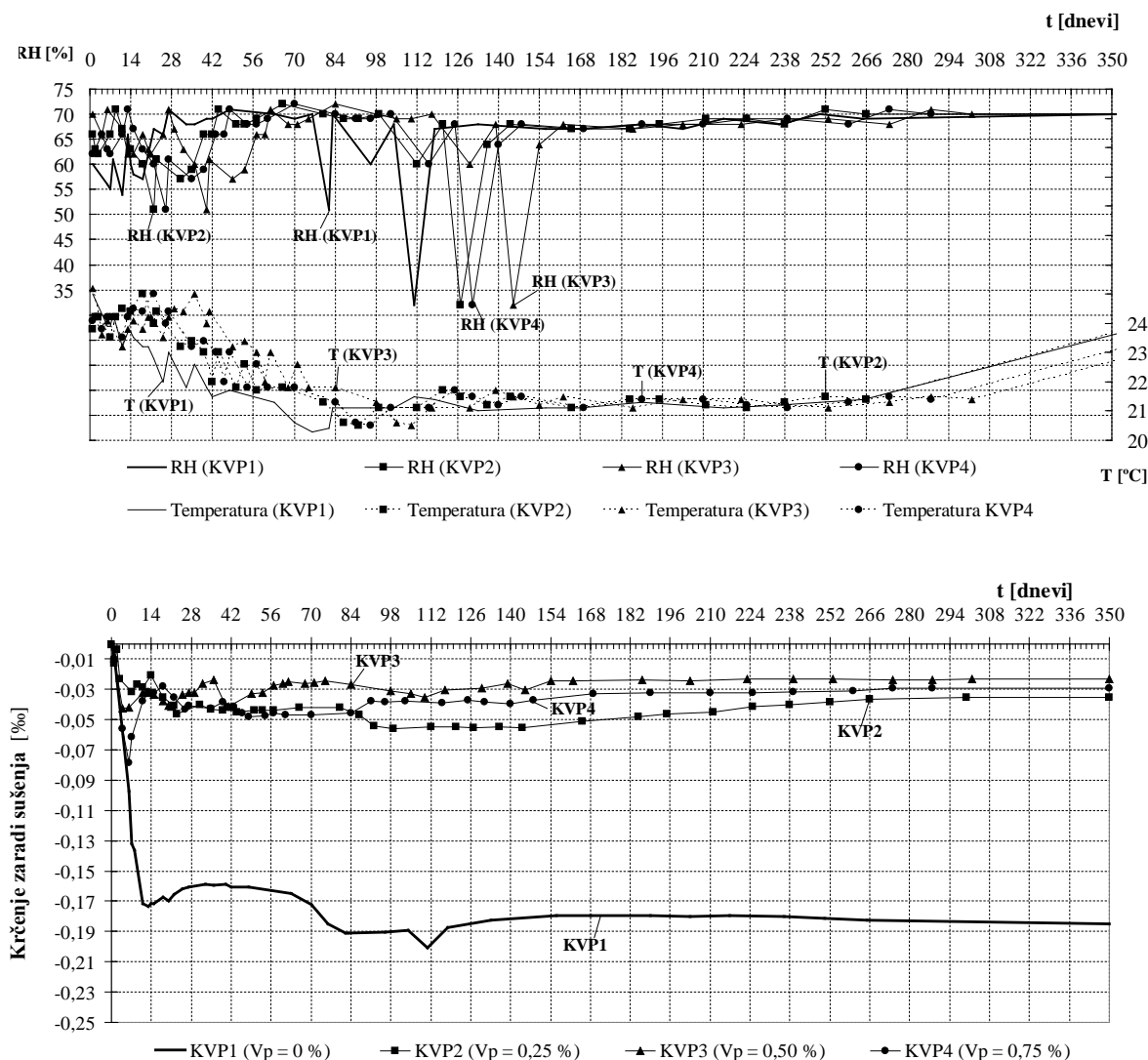
Vpliv prostorninskega deleža polipropilenskih vlaken na časovni potek krčenja zaradi sušenja visokotrdnega vlaknastega betona

Na slikah 4.57 in 4.58 je prikazan časovni razvoj krčenja zaradi sušenja kompozitov KVP1, KVP2, KVP3, KVP4, KVP5, KVP6 in KVP7. Na sliki 4.57 je prikazan časovni razvoj krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z naslednjimi deleži suhih polipropilenskih vlaken: 0 %, 0,25 %, 0,50 % in 0,75 %. Na sliki 4.58 pa je prikazan časovni razvoj krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastega betona z enakimi prostorninskimi deleži (0 %, 0,25 %, 0,50 % in 0,75 %) predhodno navlaženih polipropilenskih vlaken.

Iz prikazanih rezultatov meritev je razvidno, da je krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona na splošno približno za dve tretjini manjše od krčenja zaradi sušenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature. Razlike krčenja zaradi sušenja kompozita pri različnem deležu polipropilenskih vlaken so od 0 % do 70 %; glede na velikost krčenja narmiranega betona zaradi sušenja so te razlike sorazmerno majhne.

Iz poteka krčenja kompozitov zaradi sušenja v prvih 7 dneh po izdelavi preskušancev je razvidno, da je krčenje vlaknastega betona z 0,25 % suhih polipropilenskih vlaken najmanjše, največje pa je krčenje vlaknastega betona, ki vsebuje 0,75 % suhih polipropilenskih vlaken. Krčenje vlaknastega betona z 0,50 % suhih polipropilenskih vlaken je približno med obema skrajnostma. Štirinajsti dan po izdelavi preskušancev pa je krčenje zaradi sušenja kompozitov pri vseh treh vsebnostih suhih polipropilenskih vlaken približno enako in je za približno 85 % manjše od krčenja zaradi sušenja primerjalnega betona

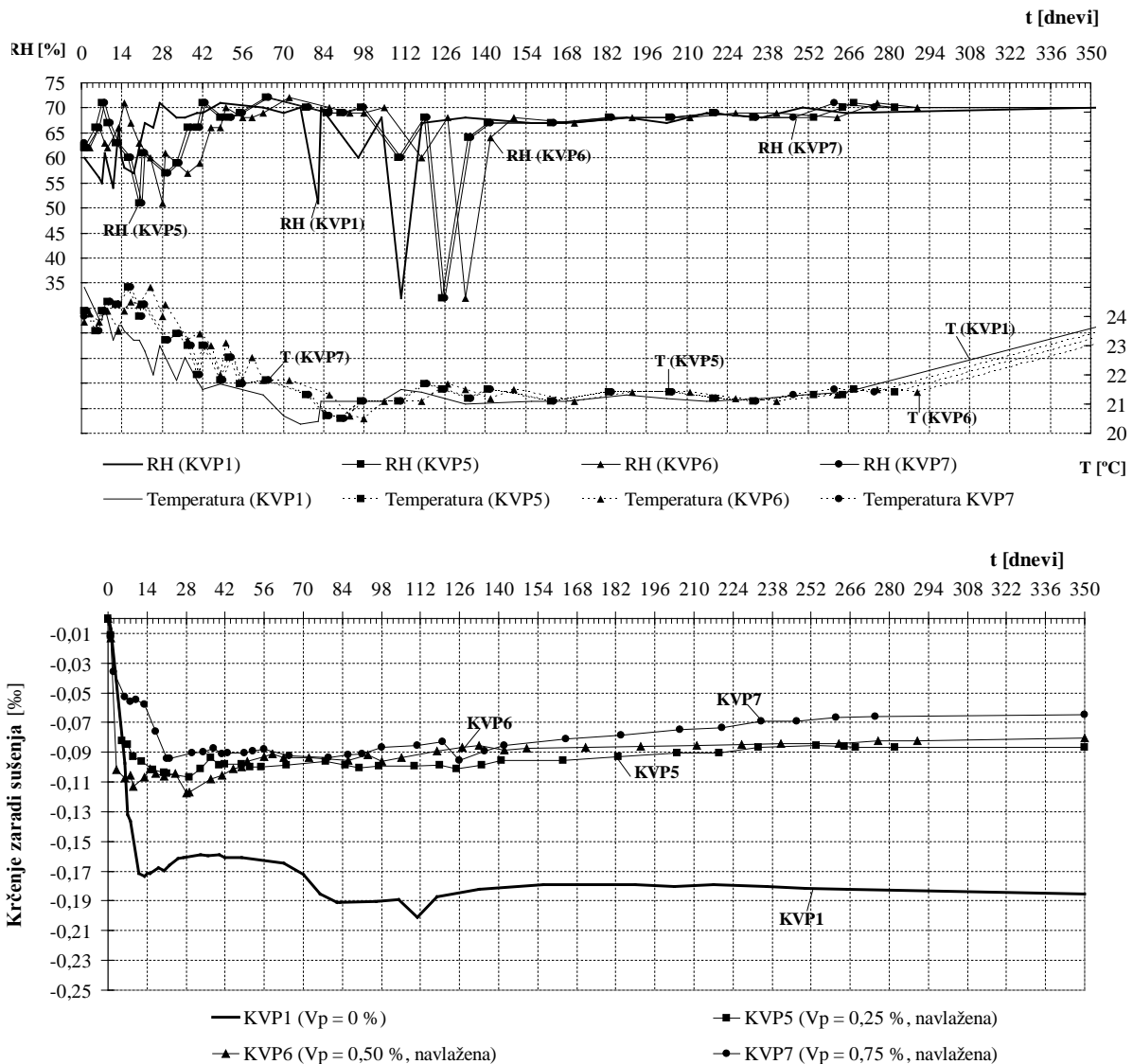
brez vlaken. Pozneje je krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona z 0,50 % suhih polipropilenskih vlaken najmanjše in je 28. dan po izdelavi preskušancev za 84 % manjše od krčenja zaradi sušenja primerjalnega betona brez vlaken. Krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona z 0,25 % suhih polipropilenskih vlaken je največje in je 28. dan po izdelavi preskušancev za 75 % manjše od krčenja zaradi sušenja primerjalnega betona brez vlaken. Po 42. dnevu od izdelave preskušancev se krčenje začne umirjati oziroma začne kompozit z vsemi tremi deleži suhih polipropilenskih vlaken celo blago nabrekati. Krčenje zaradi sušenja kompozita z 0,50 % suhih polipropilenskih vlaken ostane vse do konca meritev najmanjše in je 350. dan po izdelavi preskušancev za 95 % manjše od krčenja zaradi sušenja primerjalnega betona brez vlaken. Krčenje zaradi sušenja kompozita z 0,25 % suhih polipropilenskih vlaken je od 80. dne po izdelavi preskušancev pa vse do konca meritev največje in je 350. dan po izdelavi preskušancev za 80 % manjše od krčenja zaradi sušenja primerjalnega betona brez vlaken. Krčenje vlaknastega betona z 0,75 % suhih polipropilenskih vlaken je od 84. dne po izdelavi preskušancev vse do konca meritev manjše od krčenja zaradi sušenja vlaknastega betona z 0,50 % in večje od krčenja zaradi sušenja vlaknastega betona z 0,25 % suhih polipropilenskih vlaken.



Slika 4.57: Časovni razvoj krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0 %, 0,25 %, 0,50 % in 0,75 % prostorninskim deležem suhih polipropilenskih vlaken.

Figure 4.57: Time development of drying shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0 %, 0,25 %, 0,50 % and 0,75 % of dry polypropylene fibres.

Na sliki 4.58 je prikazano krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona visoke trdnosti, ki je mikroarmiran s predhodno navlaženimi polipropilenskimi vlakni. Iz rezultatov meritev je razvidno, da se po krčenju zaradi sušenja vlaknasti betoni visoke trdnosti, ki so mikroarmirani z različnimi prostorninskimi deleži navlaženih polipropilenskih vlaken, po 42. dnevu od izdelave ne razlikujejo za več kot za približno 20 %.



Slika 4.58: Časovni razvoj krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0 %, 0,25 %, 0,50 % in 0,75 % prostorninskim deležem navlaženih polipropilenskih vlaken.

Figure 4.58: Time development of drying shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0 %, 0,25 %, 0,50 % and 0,75 % of moisted polypropylene fibres.

Krčenje zaradi sušenja visokotrdnega vlaknastega betona z 0,75 % predhodno navlaženih polipropilenskih vlaken je v celotnem časovnem intervalu opazovanja najmanjše, razen od 126. do 133. dne od izdelave preskušancev, ko je zaradi sušenja kompozita z 0,75 % vlaken minimalno večje od krčenja zaradi sušenja kompozita z 0,50 % polipropilenskih vlaken. Štirinajsti dan po izdelavi preskušancev je krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona z 0,50 % navlaženih polipropilenskih vlaken največje in je za 40 % manjše od krčenja primerjalnega betona brez vlaken. Od 14. do 28. dne po izdelavi preskušancev se krčenje zaradi sušenja vlaknastih betonov z 0,25 % in 0,50 % predhodno navlaženih polipropilenskih vlaken skoraj ne razlikuje in je 28. dan po izdelavi preskušancev za 37 % manjše od krčenja zaradi sušenja primerjalnega betona brez vlaken. Od 28. do 42. dne po izdelavi preskušancev je krčenje zaradi sušenja visokotrdnega vlaknastega betona z 0,50 % predhodno

navlaženih polipropilenskih vlaken večje od krčenja zaradi sušenja visokotrdnih vlaknastih betonov z 0,25 % in 0,75 % navlaženih polipropilenskih vlaken. Od 42. dne po izdelavi preskušancev do konca meritev pa je krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % predhodno navlaženih polipropilenskih vlaken največje.

Na splošno je krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona visoke trdnosti, ki je mikroarmiran s predhodno navlaženimi polipropilenskimi vlakni, za približno 40 % do 50 % manjše od krčenja zaradi sušenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature, razen prvih 7 dni po izdelavi preskušancev, ko je krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona z 0,50 % navlaženih polipropilenskih vlaken nekoliko večje od krčenja zaradi sušenja primerjalnega betona brez vlaken.

Dejstvo je, da je krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti, ki je mikroarmiran s suhimi polipropilenskimi vlakni, občutno manjše od krčenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature. Vzrok za to je v tem, da polipropilenska vlakna ovirajo krčenje neotrdele in otrdele cementne paste. Iz prikaza meritev je razvidno, da je v začetnem času, do 14. dne po izdelavi preskušancev, krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona visoke trdnosti, ki je mikroarmiran z 0,75 % polipropilenskih vlaken, največje. Ocenjujemo, da se 14. dan po izdelavi preskušancev vzpostavi neko ravnotežje vlage preskušanca in okolnega medija, zato je krčenje vlaknastega betona za vse tri obravnavane vsebnosti polipropilenskih vlaken približno enako. Krčenje vlaknastega betona z 0,50 % polipropilenskih vlaken je v prvih 7 dneh večje od krčenja vlaknastega betona z 0,25 % polipropilenskih vlaken in manjše od krčenja vlaknastega betona z 0,75 % polipropilenskih vlaken. Zaradi manjše vsebnosti polipropilenskih vlaken, ki zadržujejo ustrezno manj vode, se krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona z 0,50 % polipropilenskih vlaken že sedmi dan po zabetoniranju izenači s krčenjem zaradi sušenja vlaknastega betona z 0,25 % polipropilenskih vlaken. Krčenje vlaknastega betona z 0,75 % polipropilenskih vlaken pa se s krčenjem zaradi sušenja vlaknastega betona z 0,25 % polipropilenskih vlaken izenači približno 14 dni po izdelavi preskušancev. Glede na rezultate meritev ocenjujemo, da pri 0,75 % deležu polipropilenskih vlaken ugoden vpliv oviranja krčenja z vsebovanimi vlakni prevladuje nad neugodnim vplivom izhlapevanja vlage iz kompozita. Pri 0,25 % deležu polipropilenskih vlaken pa vpliv izhlapevanja vode iz kompozita prevlada nad vplivom oviranja krčenja z vsebovanimi polipropilenskimi vlakni, zato je krčenje kompozita z 0,25 % vlaken večje od krčenja kompozita z 0,75 % vlaken.

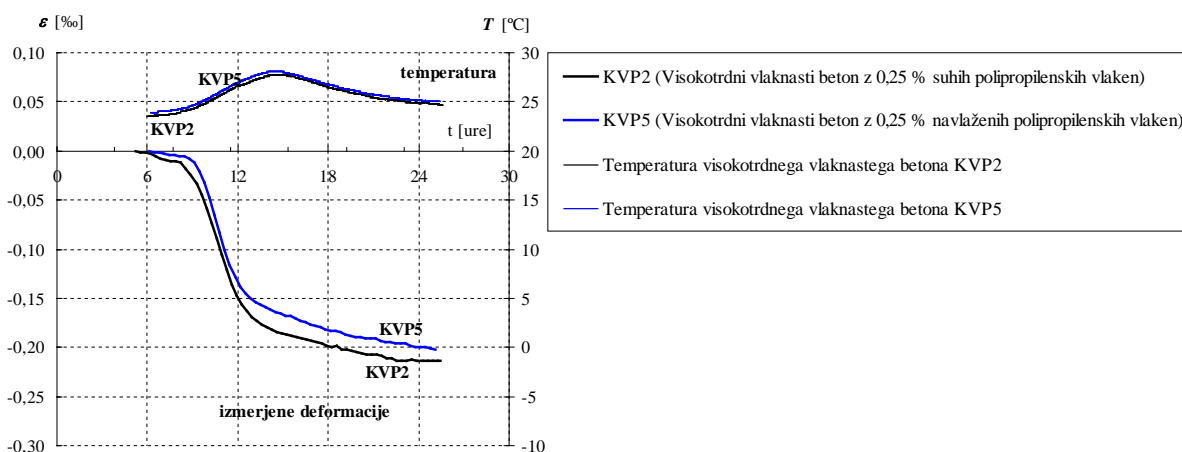
Večje krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti, ki je mikroarmiran s predhodno navlaženimi polipropilenskimi vlakni, od krčenja enakega vlaknastega betona, ki je mikroarmiran s suhimi polipropilenskimi vlakni, je posledica večje vsebnosti skupne vode v kompozitu s prehodno navlaženimi vlakni, ki med sušenjem izhlapi iz betona. Prvih 42 dni je krčenje vlaknastega betona z 0,75 % navlaženih polipropilenskih vlaken najmanjše, ker vodo, ki izhlapi iz cementnega kamna, delno nadomesti voda, ki iz polipropilenskih vlaken prehaja v okolni cementni kamen in tako zmanjšuje krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona. Krčenje vlaknastih betonov z 0,25 % in 0,50 % vlaken je večje od krčenja vlaknastega betona z 0,75 % vlaken zaradi manjše vsebnosti polipropilenskih vlaken, ki ovirajo krčenje, in zaradi posledično manjše količine v vlaknih vsebovane rezervne vode, ki s prehodom v cementni kamen delno nadoknadi vodo, ki med sušenjem izhlapi iz

vlaknastega betona. Po krčenju se vlaknasti betoni z različnimi deleži polipropilenskih vlaken od 42. pa vse do 350. dneva med seboj minimalno razlikujejo. Predpostavljamo, da je tudi pri najmanjši vsebnosti vlaken nakopičene toliko vode, da lahko s prehodom iz vlaken v okolni cementni kamen v celoti nadomesti vodo, ki med sušenjem izhlapi iz kompozita. Dopuščamo pa tudi možnost, da bo pozneje lahko prišlo do vnovičnega intenzivnejšega krčenja kompozita zaradi sušenja in do večjih razlik v krčenju, na katerega vpliva sušenje zaradi vsebnosti vlaken.

Vpliv navlaženih in suhih polipropilenskih vlaken na avtogeno krčenje vlaknastega betona v prvih 24 urah od izdelave preskušancev

Na slikah 4.59 do 4.62 so prikazane srednje vrednosti časovnega poteka temperature in avtogenega krčenja ter izmerjenih deformacij vlaknastih betonov z velikim in majhnim prostorninskim deležem suhih in navlaženih polipropilenskih vlaken v prvih 24 urah po izdelavi preskušancev.

Na sliki 4.59 je prikazano časovno spreminjanje temperature preskušancev in izmerjene deformacije vlaknastega betona visoke trdnosti pri majhnem prostorninskem deležu 0,25 % dodanih navlaženih in 0,25 % suhih polipropilenskih vlaken v prvih 24 urah po izdelavi preskušancev. Iz primerjave izmerjenih deformacij krčenja vlaknastih visokotrdnih betonov KVP2 in KVP5 je razvidno, da so deformacije vlaknastega betona z 0,25 % navlaženih polipropilenskih vlaken pri 24 urah od zamešanja za približno 7 % manjše od deformacij vlaknastega betona z enako vsebnostjo suhih polipropilenskih vlaken.

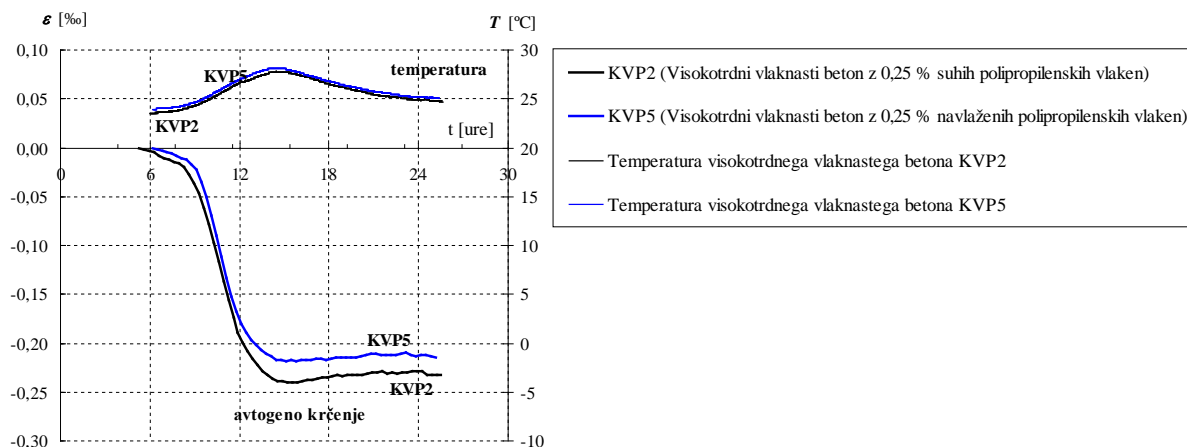


Slika 4.59: Izmerjene deformacije vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % suhih oziroma 0,25 % navlaženih polipropilenskih vlaken.

Figure 4.59: Measured deformations of high performance fibre reinforced concrete containing 0,25 % of dry or 0,25 % of moistened polypropylene fibres.

Na sliki 4.60 je prikazano avtogeno krčenje preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti, ki vsebujejo 0,25 % predhodno navlaženih oziroma 0,25 % suhih polipropilenskih vlaken. Zgodnje avtogeno krčenje vlaknastih betonov KVP2 in KVP5 se v začetnih 12 urah po zamešanju le malo razlikuje. Po 12 urah od zamešanja pa je razvidno, da je zgodnje avtogeno krčenje vlaknastega betona

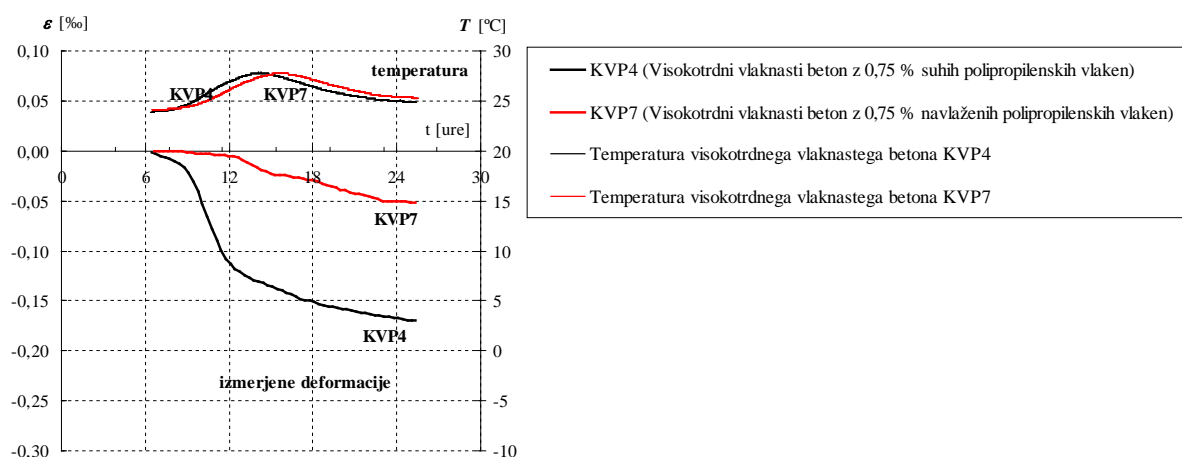
s predhodno navlaženimi polipropilenskimi vlakni za 8 % manjše od avtogenega krčenja vlaknastega betona s suhimi vlakni.



Slika 4.60: Avtogeno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % suhih oziroma 0,25 % navlaženih polipropilenskih vlaken.

Figure 4.60: Autogenous shrinkage of high performance fibre reinforced concrete containing 0,25 % of dry or 0,25 % of moistened polypropylene fibers.

Na sliki 4.61 so rezultati meritev izmerjenih deformacij krčenja vlaknastega betona z 0,75 % deležem suhih oziroma 0,75 % deležem navlaženih polipropilenskih vlaken. Deformacije vlaknastega betona KVP7 z 0,75 % navlaženih polipropilenskih vlaken so pri 24 urah od zamešanja za približno 70 % manjše od deformacije vlaknastega betona z enakim deležem suhih polipropilenskih vlaken.

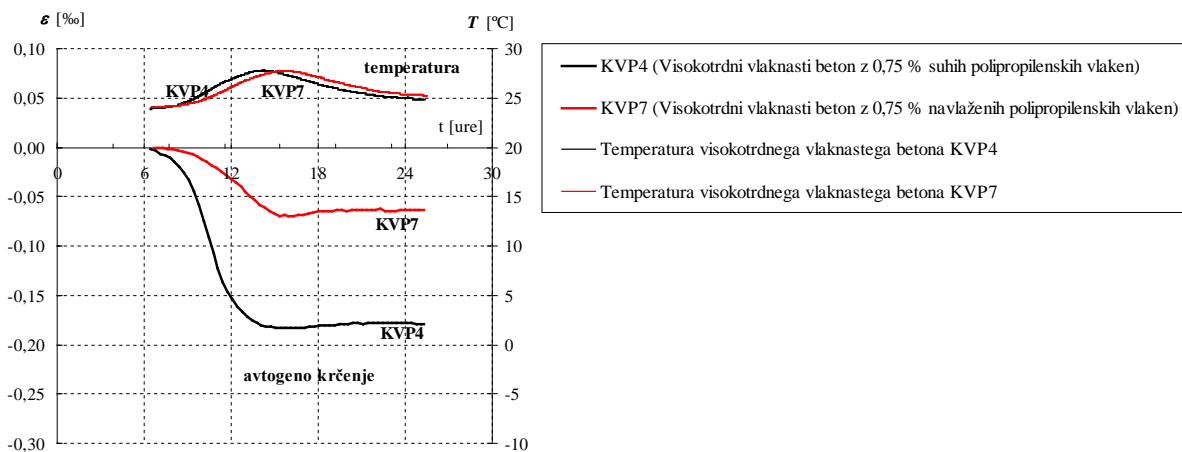


Slika 4.61: Izmerjene deformacije vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,75 % navlaženih oziroma 0,75 % suhih polipropilenskih vlaken.

Figure 4.61: Measured deformations of high performance fibre reinforced concrete containing 0,75 % of dry or 0,75 % moistened polypropylene fibres.

Na sliki 4.62 je prikazano avtogeno krčenje vlaknastega betona z 0,75 % predhodno navlaženih oziroma 0,75 % suhih polipropilenskih vlaken v 24 urah od izdelave preskušancev. 24 ur od izdelave preskušancev je zgodnje avtogeno krčenje visokotrdnega vlaknastega betona z navlaženimi

polipropilenski vlakni za približno 65 % manjše od avtogenega krčenja vlaknastega betona s suhimi polipropilenski vlakni.



Slika 4.62: Avtogeno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,75 % suhih oziroma 0,75 % navlaženih polipropilenskih vlaken.

Figure 4.62: Autogenous shrinkage of fibre reinforced high performance concrete containing 0,75 % of dry or 0,75 % of moistened polypropylene fibers.

Iz eksperimentalnih rezultatov meritev zgodnjega avtogenega krčenja vlaknastih visokotrdnih betonov je razvidno, da je avtogeno krčenje vlaknastega betona z dodanimi navlaženimi vlakni manjše od avtogenega krčenja vlaknastega betona z dodanimi suhimi vlakni. Razlika se veča z večanjem deleža vlaken v kompozitu. Predvidevamo, da je to posledica večje količine vode v kompozitu z navlaženimi vlakni, ki imajo funkcijo notranjega rezervoarja in omogočajo cementni pasti dodatno vodo. V kompozitih z navlaženimi polipropilenski vlakni je pri enakomerni razporeditvi vlaken po cementni pasti enakomerneje razporejena tudi dodatno nevezana voda, ki je v sorazmerju z deležem vsebovanih navlaženih vlaken. Zaradi tega so v svežem kompozitnem betonu kapilarne sile manjše, zato je manjše tudi avtogeno krčenje v prvih 24 urah po izdelavi preskušancev.

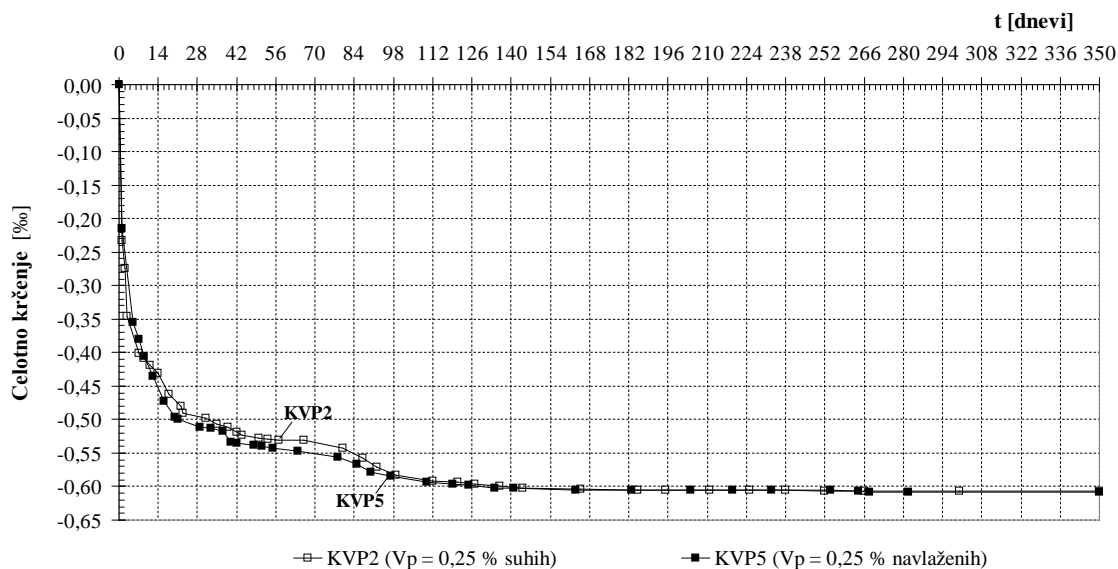
Iz eksperimentalnih rezultatov meritev zgodnjega avtogenega in celotnega krčenja vlaknastih betonov z dodanimi suhimi oziroma navlaženimi vlakni (sliki 4.59 do 4.62) je razvidno, da so dodana navlažena vlakna pri zmanjšanju zgodnjega avtogenega krčenja učinkovitejša kot suha. Ta vpliv je izrazitejši pri večjem deležu vlaken v kompozitu.

Vpliv suhih oziroma navlaženih polipropilenskih vlaken na celotno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti

Na slikah od 4.63 do 4.66 je prikazan časovni razvoj celotnega in avtogenega krčenja vlaknastega betona pri majhnem in velikem deležu suhih oziroma navlaženih polipropilenskih vlaken.

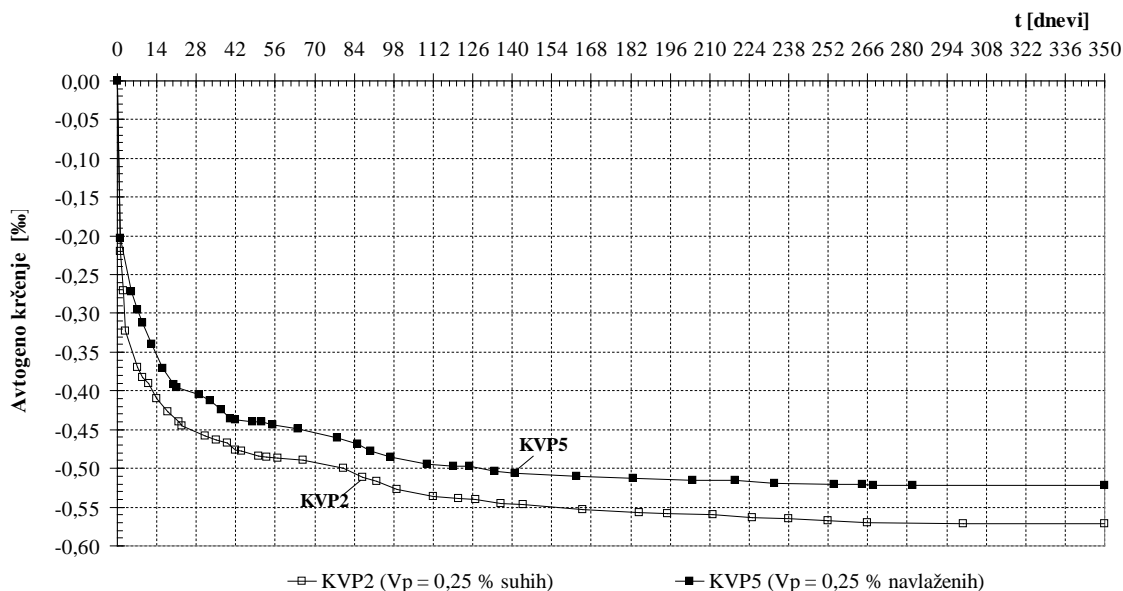
Na sliki 4.63 je prikazano celotno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti pri majhnem prostorninskem deležu dodanih suhih oziroma navlaženih polipropilenskih vlaken. Časovna poteka

celotnega krčenja z 0,25 % suhih oziroma 0,25 % navlaženih polipropilenskih vlaken tako rekoč sovpadata. Rahlo odstopanje, za približno 3 %, je opazno od 14. do 90. dne od izdelave preskušancev.



Slika 4.63: Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % suhih oziroma 0,25 % navlaženih polipropilenskih vlaken.

Figure 4.63: Time development of total shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0,25 % of dry or 0,25 % of moisted polypropylene fibres.



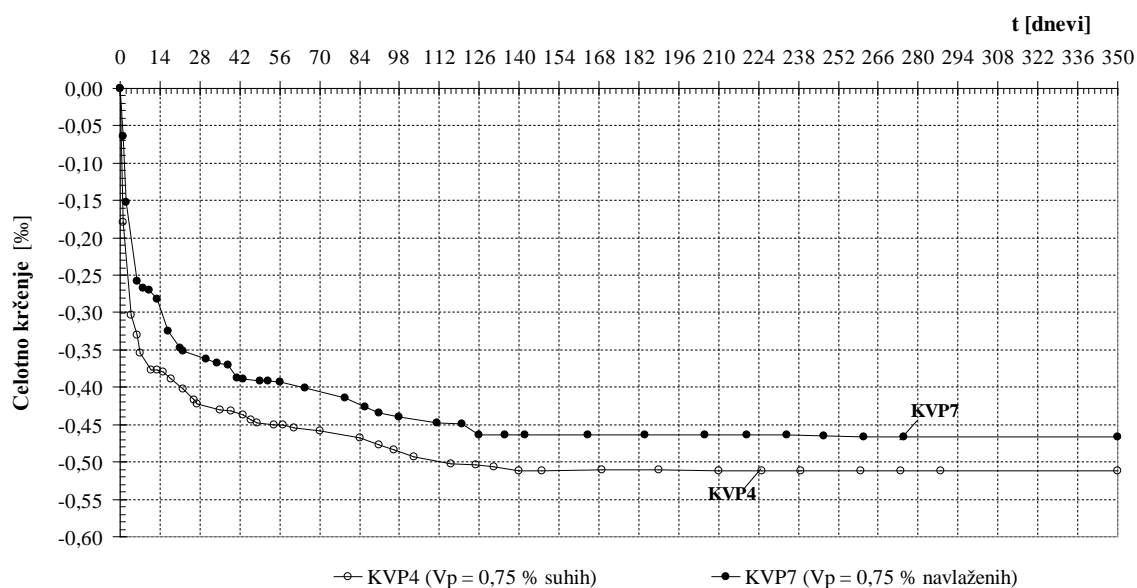
Slika 4.64: Časovni razvoj avtogenega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % suhih oziroma 0,25 % navlaženih polipropilenskih vlaken.

Figure 4.64: Time development of autogenous shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0,25 % of dry or 0,25 % of moisted polypropylene fibres.

Časovna razvoja avtogenega krčenja visokotrdnih vlaknastih betonov z 0,25 % navlaženih oziroma 0,25 % suhih polipropilenskih vlaken sta prikazana na sliki 4.64. Avtogeno krčenje vlaknastih betonov z 0,25 % navlaženih polipropilenskih vlaken je v celotnem času meritev manjše od avtogenega krčenja z enako vsebnostjo suhih polipropilenskih vlaken. Po 14 dneh od izdelave preskušancev je avtogeno krčenje kompozita s predhodno navlaženimi polipropilenskimi vlakni za 10 % manjše, 28. dan pa za 12 % manjše od avtogenega krčenja kompozita pri enakem deležu suhih polipropilenskih vlaken. S časom trajanja meritve avtogenega krčenja se ta razlika ohranja in pri 350 dneh od zamešanja znaša približno 11 %.

Na sliki 4.65 in 4.66 sta prikazana časovna razvoja avtogenega in celotnega krčenja vlaknastih betonov visoke trdnosti z 0,75 % navlaženih oziroma 0,75 % suhih polipropilenskih vlaken.

Na sliki 4.65 je prikazan časovni razvoj celotnega krčenja vlaknastih betonov z 0,75 % suhih oziroma 0,75 % navlaženih polipropilenskih vlaken. V prvih 10 dneh od izdelave preskušancev je razvidno, da je celotno krčenje visokotrdnega vlaknastega betona z navlaženimi polipropilenskimi vlakni rahlo manjše od celotnega krčenja vlaknastega betona z vsebovanimi suhimi vlakni. Ta razlika se po 10 dneh od izdelave preskušancev povečuje tako, da po 14. dnevu od izdelave preskušancev naraste na 25 %, 28. dan od izdelave preskušancev se zmanjša na 14 %, zadnji dan meritev pa na 9 %.

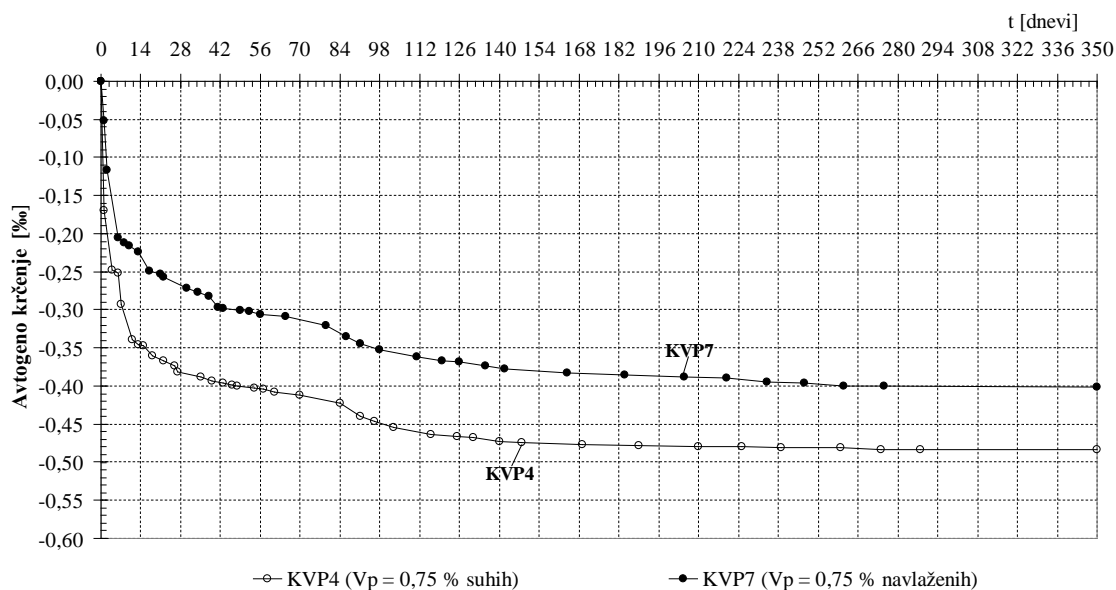


Slika 4.65: Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastih betonov visoke trdnosti z 0,75 % suhih oziroma 0,75 % navlaženih polipropilenskih vlaken.

Figure 4.65: Time development of total shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0,75 % of dry or 0,75 % of moistened polypropylene fibres.

Avtogeno krčenje visokotrdnega vlaknastega betona z 0,75 % navlaženih oziroma 0,75 % suhih polipropilenskih vlaken je prikazano na sliki 4.66. V prvih 7 dneh od priprave preskušancev je razlika med avtogenim krčenjem vlaknastega betona s suhimi polipropilenskimi vlakni in avtogenim krčenjem z navlaženimi polipropilenskimi vlakni manjša kot pozneje. S časovnim potekom meritve

avtogenega krčenja se razlika med avtogenim krčenjem visokotrdnih betonov z navlaženimi oziroma suhimi vlakni izenači. Avtogeno krčenje vlaknastega betona z 0,75 % navlaženih polipropilenskih vlaken je 14. dan od priprave preskušancev za 35 % manjše, 28. dan za 28 % manjše in pri koncu meritev avtogenega krčenja pa za 17 % manjše od končnega krčenja betona z enako vsebnostjo suhih polipropilenskih vlaken.



Slika 4.66: Časovni razvoj avtogenega krčenja preskušancev iz vlaknastih betonov visoke trdnosti z 0,75 % suhih oziroma 0,75 % navlaženih polipropilenskih vlaken.

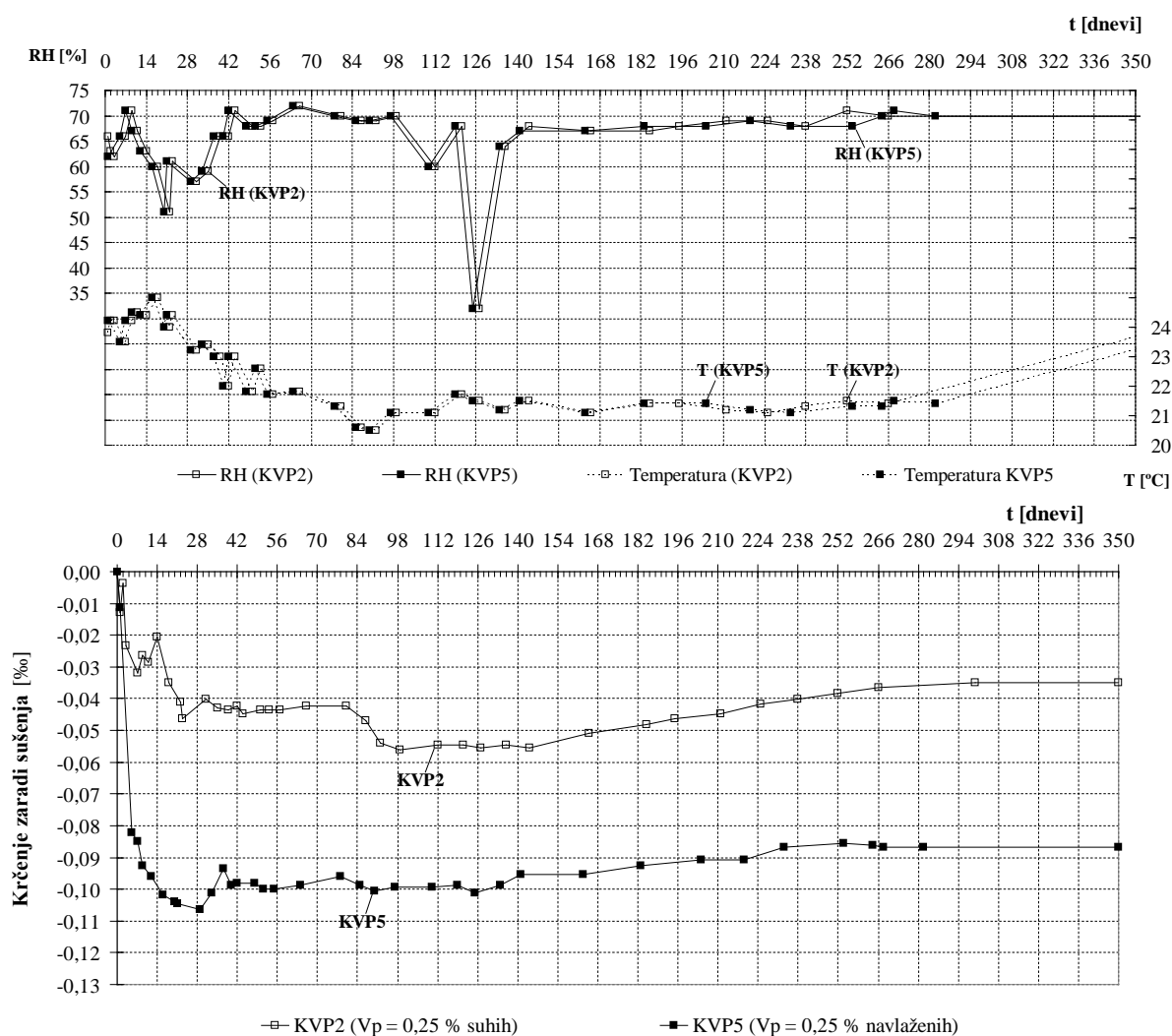
Figure 4.66: Time development of autogenous shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0,75 % of dry or 0,75 % of moisted polypropylene fibres.

Vpliv navlaženih in suhih polipropilenskih vlaken na krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona visoke trdnosti

Na slikah 4.67 in 4.68 je prikazan časovni razvoj krčenja zaradi sušenja vlaknastega betona visoke trdnosti s suhimi oziroma navlaženimi polipropilenskimi vlakni z 0,25 % in 0,75 % prostorninskim deležem vlaken v kompozitu.

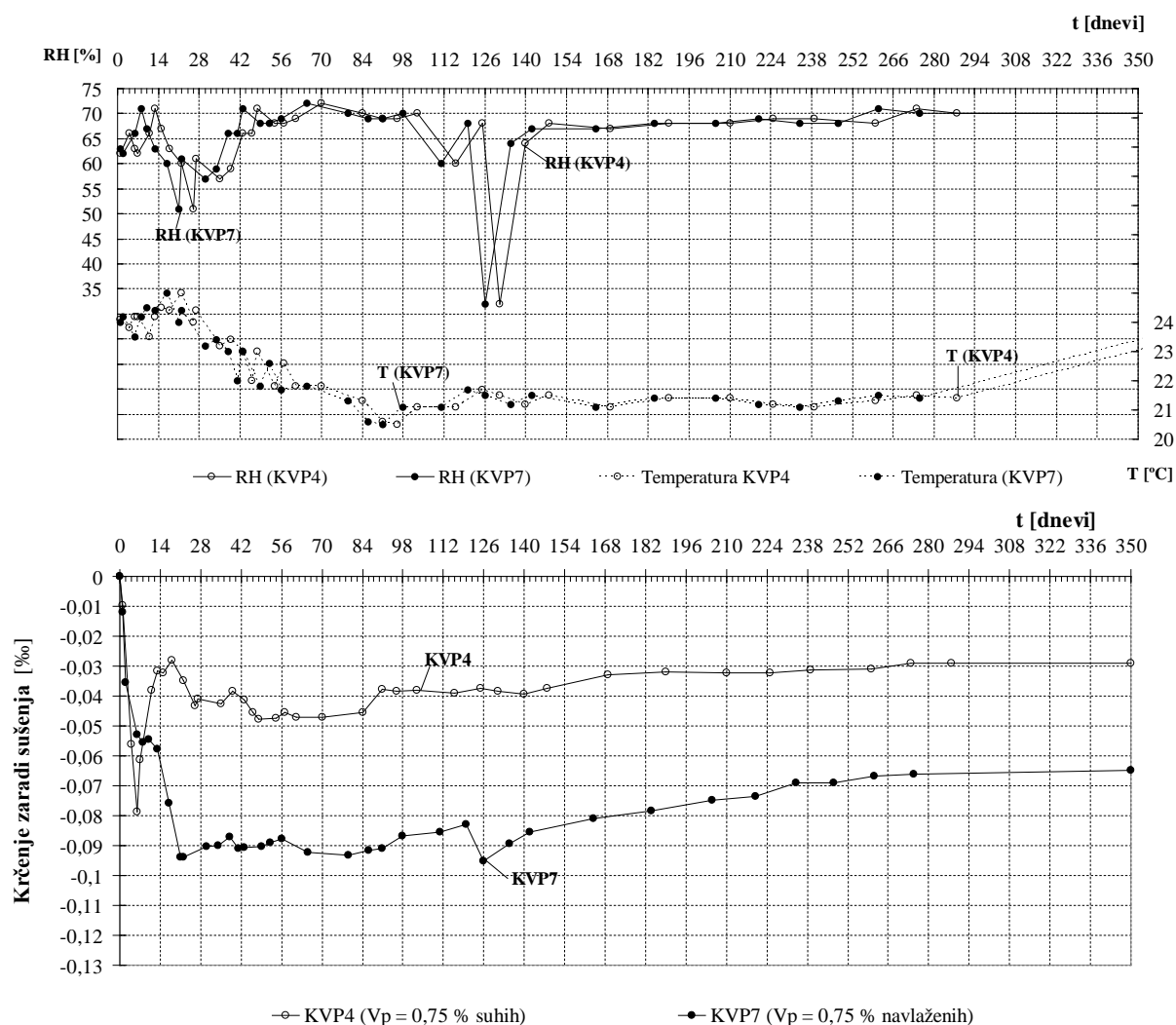
Na sliki 4.67 je prikazano krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % navlaženih oziroma 0,25 % suhih polipropilenskih vlaken. V prvih nekaj dneh ni bistvene razlike med krčenjem zaradi sušenja kompozita s suhimi oziroma navlaženimi polipropilenskimi vlakni (KVP2 in KVP5), pozneje pa je krčenje zaradi sušenja kompozita z navlaženimi vlakni večje. 14. dan od izdelave preskušancev je krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona z 0,25 % suhih vlaken za 80 % manjše, po 28 dneh za 65 % manjše, zadnji dan pa za 58 % manjše od krčenja zaradi sušenja vlaknastega betona z enakim deležem predhodno navlaženih polipropilenskih vlaken.

Krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona z velikim deležem suhih oziroma navlaženih polipropilenskih vlaken je prikazano na sliki 4.68. V prvih 7 dneh od izdelave preskušancev se krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona s suhimi polipropilenskimi vlakni le minimalno razlikuje od krčenja zaradi sušenja vlaknastega betona z navlaženimi polipropilenskimi vlakni. Pozneje je krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona z 0,75 % deležem suhih polipropilenskih vlaken občutno manjše. Ta razlika je 14. dan po izdelavi preskušancev 44 %, 28. dan pa približno 54 %.



Slika 4.67: Časovni razvoj krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastih betonov visoke trdnosti z 0,25 % suhih oziroma 0,25 % navlaženih polipropilenskih vlaken.

Figure 4.67: Time development of drying shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0,25 % of dry or 0,25 % of moisted polypropylene fibres.



Slika 4.68: Časovni razvoj krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastih betonov visoke trdnosti z 0,75 % suhih oziroma 0,75 % navlaženih polipropilenskih vlaken.

Figure 4.68: Time development of drying shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0,75 % of dry or 0,75 % of moisted polypropylene fibres.

Na podlagi primerjave dobljenih eksperimentalnih rezultatov časovnega poteka krčenja visokotrdnega vlaknastega betona pri velikem in majhnem deležu dodanih suhih oziroma navlaženih polipropilenskih vlaken ugotavljamo, da dodana vlakna pomembno vplivajo tako na avtogeno krčenje kot na krčenje zaradi sušenja kompozita. Navlažena polipropilenska vlakna pomembno vplivajo na avtogeno krčenje pri majhnem in pri velikem prostorninskem deležu vlaken. Navlažena vlakna imajo vlogo notranjega rezervoarja vode.

Navlažena vlakna, ki so enakomerno razporejena v vlaknastem betonu, imajo dodatno vodo enakomerno razporejeno po cementni pasti. Posledica tega so manjše kapilarne sile v svežem vlaknastem betonu in s tem manjše zgodnje avtogeno krčenje v prvih 24 urah po zabetoniranju. Dodatna voda iz navlaženih polipropilenskih vlaken ugodno vpliva na zgodnje avtogeno krčenje in tudi na časovni razvoj celotnega avtogenega krčenja, predvsem pri velikem deležu vlaken. To se zgodi zaradi povečane količine dodatne vode, ki je v obratnem sorazmerju s kapilarnimi silami. Čim večji je

delež dodane vode v svežem kompozitu, tem manjše so kapilarne sile in zaradi tega je manjše avtogeno krčenje.

Na podlagi eksperimentalnih rezultatov, ki so prikazani na slikah 4.67 in 4.68, lahko sklenemo, da dodana navlažena vlakna močno vplivajo na krčenje kompozita zaradi sušenja. Z njimi se poveča delež dodatne vode, ki sodeluje pri hidrataciji cementa in vpliva na krčenje zaradi sušenja. Krčenje kompozita z dodanimi navlaženimi vlakni se poveča v primerjavi s krčenjem vlaknastega betona z dodanimi suhimi vlakni. Iz rezultatov meritev, predstavljenih na slikah 4.67 in 4.68, je razvidno, da se z večanjem deleža dodanih navlaženih vlaken krčenje kompozita zaradi sušenja povečuje. To je posledica povečane količine dodane vode v navlaženih vlaknih. Pri vlaknastih betonih z dodanimi navlaženimi vlakni je v primerjavi z vlaknastimi betoni z dodanimi suhimi polipropilenskimi vlakni avtogeno krčenje manjše, povečano pa je krčenje zaradi sušenja.

Vpliv majhne vsebnosti kombinacije jeklenih in polipropilenskih vlaken na časovni potek krčenja vlaknastega betona

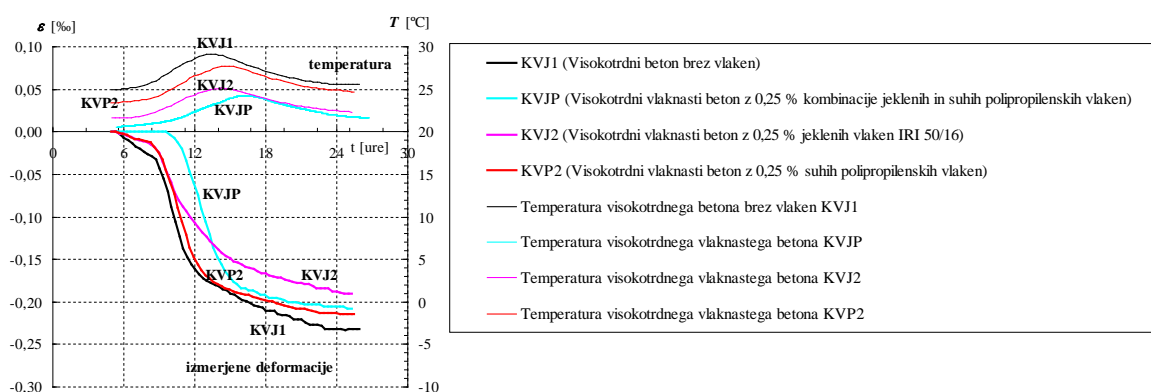
Sveže mešanice visokotrdnega vlaknastega betona z 0,25 % deležem suhih polipropilenskih in jeklenih vlaken IRI 50/16 (KVJP), z 0,25 % deležem jeklenih vlaken IRI 50/16 (KVJ2) in z 0,25 % deležem suhih polipropilenskih vlaken KVP2 imajo enako vodovozivno razmerje, enako količino grobega in drobnega agregata ter enako količino cementa. Imajo enak prostorninski delež vlaknaste armature, vendar iz različnega materiala. Pri majhni vsebnosti vlaken v kompozitu smo raziskovali vpliv različne vlaknaste armature pri istem deležu na krčenje vlaknastega betona in primerjali krčenje vlaknastih betonov s krčenjem betona brez mikroarmature. Podrobno smo proučevali vpliv vlaknaste armature na zgodnje avtogeno krčenje v prvih 24 urah po pripravi preskušancev. Med celotnimi meritvami smo primerjali celotno in avtogeno krčenje ter krčenje zaradi sušenja vlaknastih betonov s krčenjem primerjalnih betonov brez vlaknaste armature (slike 4.71, 4.72 in 4.73).

Vpliv kombinacije jeklenih in polipropilenskih vlaken na zgodnje avtogeno krčenje betona visoke trdnosti

Na sliki 4.69 oziroma 4.70 so v večjem merilu prikazane izmerjene deformacije oziroma avtogeno krčenje vlaknastih betonov visoke trdnosti z majhnim deležem jeklenih, polipropilenskih in kombinacije jeklenih in polipropilenskih vlaken 24 ur po izdelavi preskušancev.

Vpliv majhnega prostorninskega deleža jeklenih, polipropilenskih in kombinacije jeklenih in polipropilenskih vlaken na izmerjene deformacije visokotrdnega betona je prikazan na sliki 4.69. Izmerjene deformacije vlaknastega betona z 0,25 % kombinacije vlaken, z razmerjem jeklenih in polipropilenskih vlaken 1 : 1, so manjše od deformacij primerjalnega visokotrdnega betona brez dodane vlaknaste armature. Iz prikazanih rezultatov je razvidno, da so deformacije vlaknastega betona z 0,25 % jeklenih in suhih polipropilenskih vlaken v prvih 13 urah od izdelave preskušancev najmanjše. Od 13. ure pa vse do konca meritev so izmerjene deformacije kompozitov z 0,25 % suhih polipropilenskih vlaken KVP2 oziroma 0,25 % kombinacije suhih polipropilenskih in jeklenih vlaken

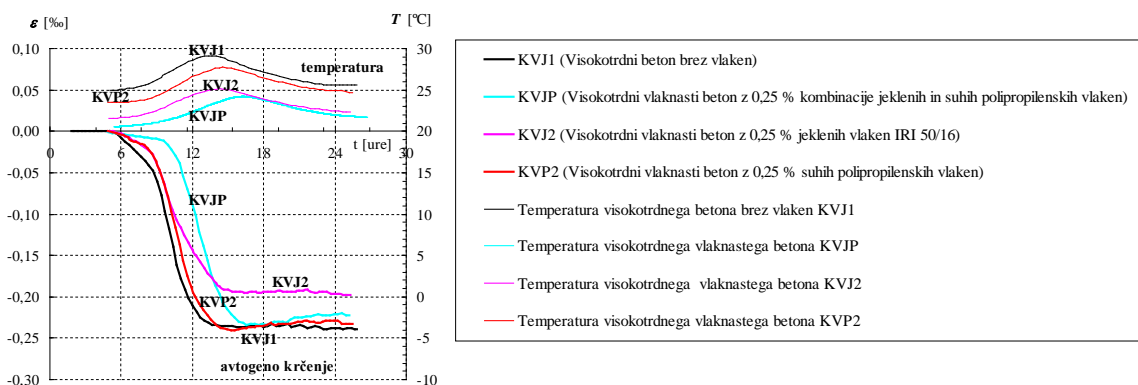
KVJP približno enake in so pri koncu meritev za približno 12 % manjše od končnega krčenja primerjalnega betona brez vlaken. Izmerjene deformacije visokotrdnega betona KVJ1 in kompozita z 0,25 % suhih polipropilenskih vlaken KVP2 so v prvih 14 urah od priprave preskušancev približno enake, pozneje pa opazamo manjše deformacije kompozita z 0,25 % suhih polipropilenskih vlaken. Izmerjene deformacije vlaknastega betona KVJ2 z 0,25 % jeklenih vlaken so od 13. ure od priprave preskušancev pa do konca meritev najmanjše in so ob koncu za približno 19 % manjše od izmerjenih deformacij visokotrdnega betona brez vlaken KVJ1.



Slika 4.69: Izmerjene deformacije preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % suhih polipropilenskih, 0,25 % jeklenih oziroma 0,25 % kombinacije jeklenih in suhih polipropilenskih vlaken ter izmerjene deformacije primerjalnega visokotrdnega betona brez vlaken.

Figure 4.69: Measured deformations of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0,25 % of polypropylene or 0,25 % of steel or 0,25 % of combination of steel and dry polypropylene fibres and comparable concrete without fibres.

Iz poteka zgodnjega avtogenega krčenja, ki je prikazano na sliki 4.70, ugotavljamo, da sta časovna poteka avtogenega krčenja vlaknastega betona z 0,25 % polipropilenskih vlaken in 0,25 % kombinacije jeklenih in polipropilenskih vlaken kvalitativno podobna, kvantitativno pa različna. Zgodnje avtogeno krčenje visokotrdnega betona brez vlaken KVJ1 je le minimalno večje od avtogenega krčenja vlaknastega betona KVP2 z 0,25 % polipropilenskih vlaken. Avtogeno krčenje vlaknastega betona z 0,25 % kombinacije jeklenih in polipropilenskih vlaken je v prvih 10 urah po izdelavi preskušancev le minimalno manjše od avtogenega krčenja primerjalnega visokotrdnega betona KVJ1. Pozneje se razlika med velikostma avtogenega krčenja obeh kompozitov povečuje. Kvantitativno pa je v prvih 10 urah od izdelave preskušancev avtogeno krčenje vlaknastega betona z 0,25 % polipropilenskih vlaken KVP2 najmanjše, pozneje pa je najmanjše avtogeno krčenje kompozita, ki vsebuje 0,25 % jeklenih vlaken KVJ2.



Slika 4.70: Avtogeno krčenje preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % suhih polipropilenskih, 0,25 % jeklenih oziroma 0,25 % kombinacije jeklenih in suhih polipropilenskih vlaken ter avtogeno krčenje primerjalnega visokotrdnega betona brez vlaken.

Figure 4.70: Autogenous shrinkage of test specimens of fibre reinforced high performance concrete containing 0,25 % of dry polypropylene or 0,25 % of steel or 0,25 % of combination of steel and dry polypropylene fibres and autogenous shrinkage of comparable concrete without fibres.

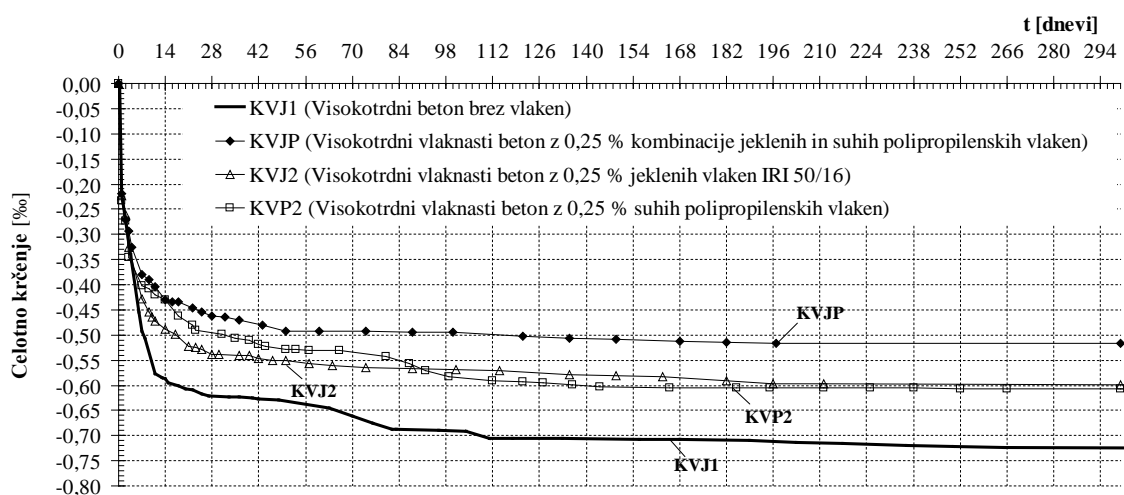
Na podlagi primerjave krčenja vlaknastih betonov z majhno vsebnostjo jeklenih, polipropilenskih ter kombinacije jeklenih in polipropilenskih vlaken ugotavljamo, da dodana polipropilenska vlakna ne vplivajo bistveno na zmanjšanje avtogenega in celotnega krčenja betona. Kombinacija jeklenih in polipropilenskih vlaken najbolj vpliva v prvih 13 urah od izdelave preskušancev. Od 13. do 24. ure od izdelave preskušancev pa je vpliv 0,25 % deleža kombinacije jeklenih in polipropilenskih vlaken skupaj na zmanjšanje avtogenega krčenja kompozita približno enak vplivu 0,25 % deleža polipropilenskih vlaken v kompozitu. V zgodnjem obdobju mladega kompozita sta togost in nosilnost vlaken v primerjavi z neotrdelo cementno pasto razmeroma veliki. Vložena jeklena mikroarmatura zaradi večje togosti močnejše vpliva na zmanjšanje krčenja mladega kompozita kot polipropilenska oziroma kombinacija iz jeklene in polipropilenske mikroarmature. Na podlagi predstavljenih eksperimentalnih rezultatov zgodnjega krčenja in izmerjenih deformacij kompozita ugotavljamo, da je za redukcijo avtogenega krčenja kompozita pri majhnem deležu vlaken smiselna uporaba jeklenih vlaken.

Vpliv kombinacije jeklenih in polipropilenskih vlaken na časovni potek avtogenega in celotnega krčenja ter krčenja zaradi sušenja vlaknastih betonov visoke trdnosti

Na slikah 4.71, 4.72 in 4.73 so prikazani časovni poteki celotnega in avtogenega krčenja ter krčenja zaradi sušenja visokotrdnega vlaknastega betona z 0,25 % jeklenih, 0,25 % polipropilenskih oziroma 0,25 % kombinacije jeklenih in polipropilenskih vlaken skupaj. Pri tem je v kombinaciji vlaken razmerje jeklenih in polipropilenskih vlaken 1 : 1.

Celotno krčenje vseh proučevanih vlaknastih betonov in primerjalnih betonov brez dodane vlaknaste armature, ki je prikazano na sliki 4.71, je v prvih 5 dneh od izdelave preskušancev skoraj enako. Pozneje pa je celotno krčenje vlaknastih betonov manjše od celotnega krčenja visokotrdnega betona brez vlaknaste armature. Celotno krčenje vlaknastega betona z 0,25 % kombinacije jeklenih in

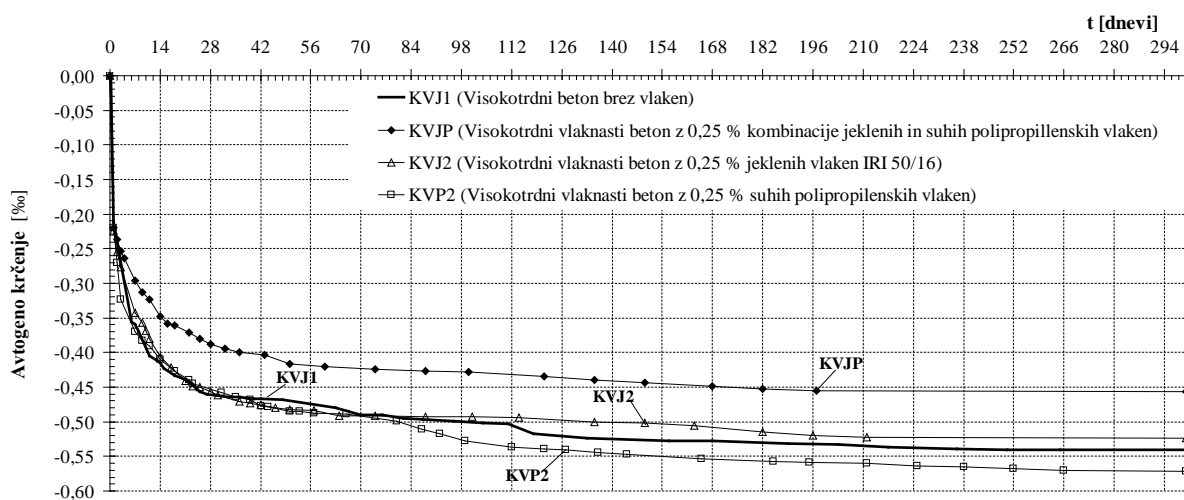
polipropilenskih vlaken je izmed vseh proučevanih vlaknastih betonov najmanjše in je 28. dan od izdelave preskušancev za 20 % manjše, na koncu meritev pa za 25 % manjše od celotnega krčenja betona brez dodane vlaknaste armature. 7. dan od izdelave preskušancev je celotno krčenje vlaknastega betona z 0,25 % polipropilenskih vlaken KVP2 enako celotnemu krčenju vlaknastega betona z 0,25 % kombinacije jeklenih in polipropilenskih vlaken KVJP. Od 7. dne po izdelavi preskušancev pa vse do konca meritev je celotno krčenje vlaknastega betona z 0,25 % kombinacije polipropilenskih in krajših jeklenih vlaken približno za 35 % manjše od celotnega krčenja primerjalnega betona brez vlaken in je najmanjše izmed krčenja vseh obravnavanih kompozitov. 300. dan od izdelave preskušancev se celotno krčenje vlaknastih betonov z 0,25 % jeklenih vlaken KVJ2 oziroma 0,25 % polipropilenskih vlaken KVP2 med seboj le minimalno razlikuje in je približno za 17 % manjše od krčenja primerjalnega visokotrdnega betona brez mikroarmature.



Slika 4.71: Časovni potek celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % polipropilenskih, 0,25 % jeklenih oziroma 0,25 % kombinacije suhih polipropilenskih in krajših jeklenih vlaken ter celotnega krčenja primerjalnega visokotrdnega betona brez vlaknaste mikroarmature.

Figure 4.71: Time development of total shrinkage of test specimens made of fibre reinforced high performance concrete containing 0,25 % of polypropylene or 0,25 % of steel or 0,25 % of combination of shorter steel and dry polypropylene fibres and time development total shrinkage of comparable high performance concrete without fibres.

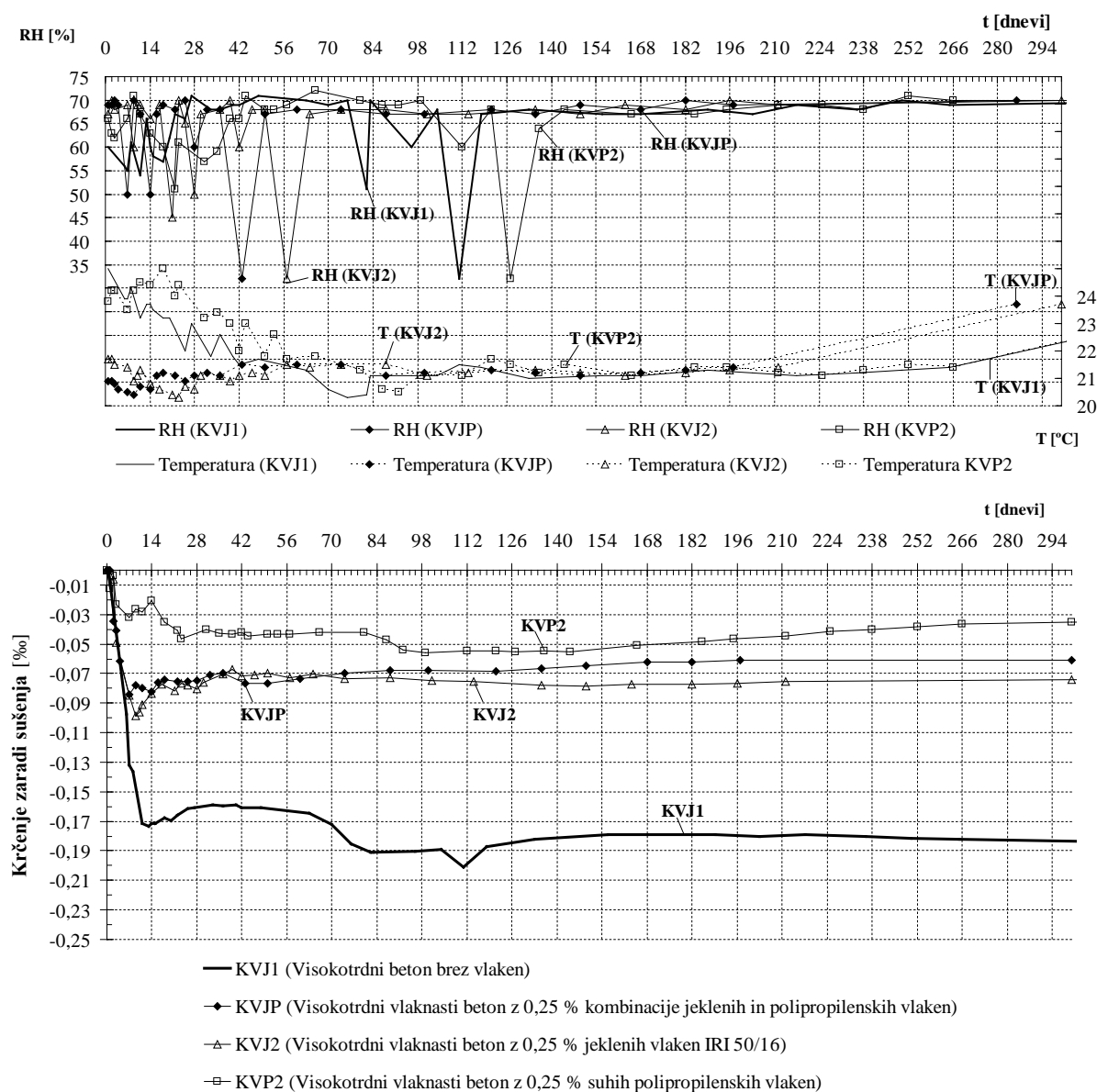
Na sliki 4.72 je prikazan časovni potek avtogenega krčenja vlaknastih betonov visoke trdnosti z 0,25 % jeklenih, 0,25 % polipropilenskih oziroma 0,25 % kombinacije krajših jeklenih in suhih polipropilenskih vlaken ter časovni potek avtogenega krčenja primerjalnega visokotrdnega betona brez vlaken. Avtogeno krčenje vlaknastega betona z 0,25 % kombinacije jeklenih in polipropilenskih vlaken je najmanjše in je 14. dan po izdelavi preskušancev za 12 %, 28. dan za 11 %, ob koncu meritev pa za 12 % manjše od avtogenega krčenja primerjalnega visokotrdnega betona brez vlaken. V 77 dneh od izdelave preskušancev je avtogeno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % krajših jeklenih vlaken in vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % suhih polipropilenskih vlaken ter avtogeno krčenje primerjalnega visokotrdnega betona približno enako. Pozneje je avtogeno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % krajših jeklenih vlaken približno za 5 % manjše, avtogeno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % suhih polipropilenskih vlaken pa približno za 5 % večje od avtogenega krčenja primerjalnega betona visoke trdnosti brez vlaknaste mikroarmature.



Slika 4.72: Časovni potek avtogenega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % suhih polipropilenskih, 0,25 % krajših jeklenih oziroma 0,25 % kombinacije suhih polipropilenskih in krajših jeklenih vlaken ter avtogeno krčenje primerjalnega betona brez dodane vlaknaste mikroarmature.

Figure 4.72: Time development of autogenous shrinkage of test specimens made of fibre reinforced high performance concrete containing 0,25 % or polypropylene, or 0,25 % of shorter steel, or 0,25 % combination of shorter steel fibres and dry polypropylene fibres and time development autogenous shrinkage of comparable concrete without fibres.

Časovni poteki krčenja zaradi sušenja vlaknastih betonov z 0,25 % krajših jeklenih oziroma polipropilenskih oziroma kombinacije krajših jeklenih in suhih polipropilenskih vlaken ter časovni potek krčenja zaradi sušenja primerjalnega betona visoke trdnosti brez dodane vlaknaste armature so prikazani na sliki 4.73. Najmanjše krčenje zaradi sušenja izkazuje vlaknasti beton visoke trdnosti z 0,25 % suhih polipropilenskih vlaken, ki je 14 dni po izdelavi preskušancev za 87 %, 28. dan za 75 %, ob koncu meritev pa za 80 % manjše od krčenja zaradi sušenja primerjalnega visokotrdega betona brez vlaken. Krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona z 0,25 % kombinacije krajših jeklenih in suhih polipropilenskih vlaken KVJP se v času do 14. dne po izdelavi preskušancev le minimalno razlikuje od krčenja zaradi sušenja vlaknastega betona z 0,25 % krajših jeklenih vlaken. Od 14. do 140. dne je razlika nekoliko večja, od 140. dne do konca meritev pa je krčenje zaradi sušenja obeh kompozitov enako in je na koncu meritev približno za 60 % manjše od krčenja zaradi sušenja primerjalnega visokotrdega betona brez vlaknaste armature.



Slika 4.73: Časovni potek krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % suhih polipropilenskih, 0,25 % krajših jeklenih oziroma 0,25 % kombinacije suhih polipropilenskih in krajših jeklenih ter krčenje zaradi sušenja primerjalnega betona brez dodane vlaknaste armature.

Figure 4.73: Time development of drying shrinkage of test specimens made of fibre reinforced high performance concrete containing 0,25 % of dry polypropylene, or 0,25 % of short steel, or 0,25 % combination of shorter steel and dry polypropylene fibres and time development of drying shrinkage of comparable concrete without fibres.

Iz eksperimentalnih rezultatov meritev časovnega poteka celotnega krčenja (slika 4.71) in avtogenega krčenja (slika 4.72) ter krčenja zaradi sušenja (slika 4.73) kompozitov je razvidno, da dodana vlaknasta mikroarmatura omogoča zmanjšanje krčenja kompozita glede na krčenje primerjalnega visokotrdnega betona brez vlaken.

Iz prikaza rezultatov eksperimentalnih raziskav je razvidno, da je celotno krčenje (slika 4.71) in avtogeno krčenje (slika 4.72) visokotrdnega vlaknastega betona z 0,25 % vlaknaste armature

najmanjše pri uporabi kombinacije jeklenih in polipropilenskih vlaken. Poleg tega vsebnost kombinacije jeklenih in polipropilenskih vlaken ugodno vpliva tudi na povečano duktilnost kompozita. K povečanju duktilnosti prispeva jeklena vlaknasta mikroarmatura (Balaguru in Shah, 1992).

Vpliv kombinacije jeklenih in polipropilenskih vlaken na zmanjšanje avtogenega (slika 4.72) in celotnega krčenja (slika 4.71) vlaknastega betona je večji od vpliva jeklene oziroma polipropilenske mikroarmature. Pri kombinaciji jeklenih in polipropilenskih vlaken, pri kateri daljša, bolj toga in bolj nosilna jeklena vlakna ovirajo nastanek makrorazpok, bolj deformabilna in krajša polipropilenska vlakna pa ovirajo nastanek mikrorazpok, povečujejo žilavost in duktilnost ter natezno trdnost vlaknastega betona (Qian in Stroeven, 1999).

Krčenje zaradi sušenja visokotrdnega vlaknastega betona z 0,25 % vlaknaste armature je najmanjše pri uporabi polipropilenskih vlaken. Predvidevamo, da je vlaknasti beton pri uporabi polipropilenskih vlaken manj propusten kot pri uporabi jeklenih vlaken, posledica česar je manjše krčenje zaradi sušenja.

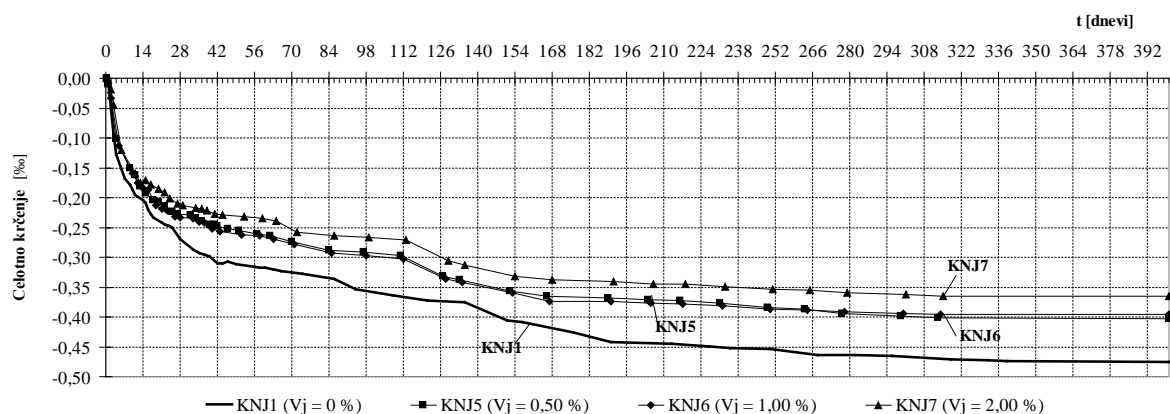
4.8 Rezultati in analiza meritev celotnega in avtogenega krčenja vlaknastih betonov normalne trdnosti z dodanimi jeklenimi vlakni

Eksperimentalne raziskave celotnega in avtogenega krčenja vlaknastih betonov normalne trdnosti so potekale na preskušancih z različnimi deleži daljših in krajših jeklenih vlaken in na preskušancih betonov normalne trdnosti brez mikroarmature. Krčenje zaradi sušenja smo določili z razliko izmerjenega celotnega in avtogenega krčenja kompozita. Meritve krčenja so bile opravljene na različno negovanih preskušancih vlaknastega betona. Preskušanci primerjalnega betona oziroma vlaknastega betona KNJ1, KNJ2, KNJ3, KNJ4, KNJ5, KNJ6 in KNJ7 so bili 24 ur od izdelave preskušancev pokriti s polietilensko folijo. Preostale preskušance vlaknastega betona KNVJ1, KNVJ2, KNVJ3, KNVJ4, KNVJ5, KNVJ6, KNVJ7, KNVJ8 in KNVJ9 pa smo po 24-urni negi, ki smo jo zagotovili s polietilensko folijo, za 6 dni položili v vodo. Po končani negi smo preskušance izpostavili okolju z vlažnostjo $70\% \pm 3\%$ in temperaturo $22\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$. Rezultati celotnih meritev avtogenega, celotnega krčenja in krčenja zaradi sušenja so podani v grafični obliki v celotnem času trajanja meritev. V prvih 24 urah od izdelave preskušancev smo merili avtogeno krčenje vlaknastih betonov normalne trdnosti, ki je v primerjavi s celotnim krčenjem obravnavanega kompozita zanemarljivo majhno.

Vpliv prostorninskega deleža jeklenih vlaken na časovni potek avtogenega in celotnega krčenja vlaknastega betona, negovanega 24 ur po izdelavi preskušancev

Na slikah 4.74, 4.75, 4.76 in 4.77 so rezultati meritev avtogenega in celotnega krčenja vlaknastega betona normalne trdnosti pri različni vsebnosti daljših in krajših jeklenih vlaken.

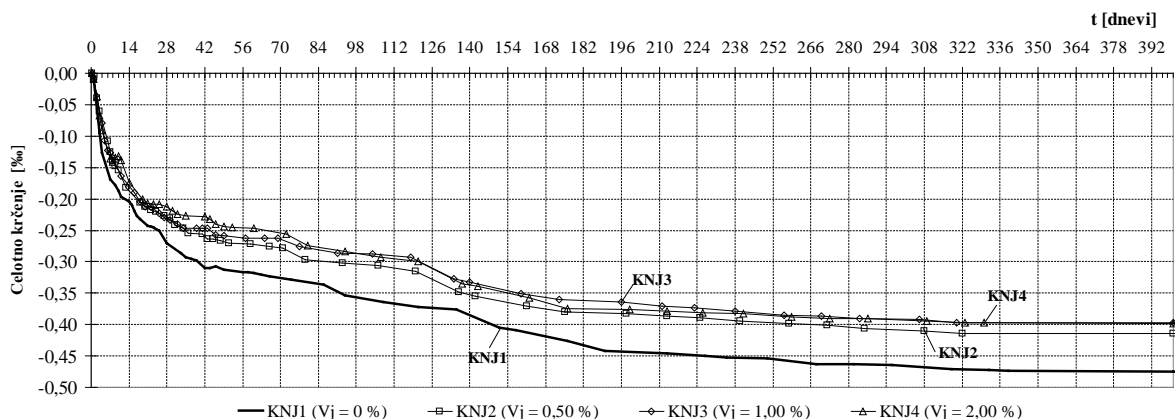
Na sliki 4.74 so prikazani rezultati meritev celotnega krčenja preskušancev vlaknastega betona z 0,50 %, 1,00 % in 2,00 % krajših jeklenih vlaken IRI 50/16 ter celotno krčenje primerjalnega betona brez vlaken. 14 dni od izdelave preskušancev se krčenje vlaknastih betonov normalne trdnosti z različnimi deleži vlaken le minimalno razlikuje in je 14. dan od izdelave preskušancev približno 10 % manjše od celotnega krčenja primerjalnega betona brez vlaken. Od 14. dne po izdelavi preskušancev do konca meritev je celotno krčenje kompozita z 2,00 % vlaken (KNJ7) najmanjše in je ob koncu meritev približno za 22 % manjše od celotnega krčenja primerjalnega betona brez vlaken. Krčenje vlaknastega betona normalne trdnosti z 0,50 % in 1,00 % krajših jeklenih vlaken se med celotnimi meritvami ne razlikuje bistveno in je 28. dan od izdelave preskušancev za 13 % manjše, ob koncu meritev pa za 16 % manjše od krčenja primerjalnega betona brez vlaken.



Slika 4.74: Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona normalne trdnosti z 0 %, 0,50 %, 1,00 % in 2,00 % prostorninskim deležem krajših jeklenih vlaken IRI 50/16.

Figure 4.74: Time development of total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete test specimens with volume content of 0 %, 0,50 %, 1,00 % and 2,00 % of shorter steel fibres IRI 50/16.

Celotno krčenje preskušancev z 0 %, 0,50 %, 1,00 % in 2,00 % daljših jeklenih vlaken je prikazano na sliki 4.75. Razvidno je, da je krivulja, ki opisuje potek celotnega krčenja vlaknastih betonov, podobna krivulji, ki opisuje krčenje betona brez mikroarmature. V prvih 14 dneh od izdelave preskušancev se krčenje vlaknastih betonov ne razlikuje in je za 9 % manjše od krčenja betona normalne trdnosti brez vlaken. Od 28. dne pa vse do konca meritev krčenja se celotno krčenje vlaknastih betonov razlikuje za največ 9 %. 28. dan od izdelave in na koncu meritev je celotno krčenje vlaknastih betonov za približno 15 % manjše od krčenja betona brez vlaken.



Slika 4.75: Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona normalne trdnosti z 0 %, 0,50 %, 1,00 % in 2,00 % prostorninskim deležem daljših jeklenih vlaken IRI 50/30.

Figure 4.75: Time development of total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete test specimens with volume content of 0 %, 0,50 %, 1,00 % and 2,00 % of longer steel fibres IRI 50/30.

Celotno krčenje kompozita, mikroarmiranega s krajšimi jeklenimi vlakni (slika 4.75), je najmanjše pri 2,00 % vlaken, pri 0,50 % in 1,00 % vlaken pa se le minimalno razlikuje in je približno za 7 % večje od celotnega krčenja kompozita z 2,00 % jeklenih vlaken.

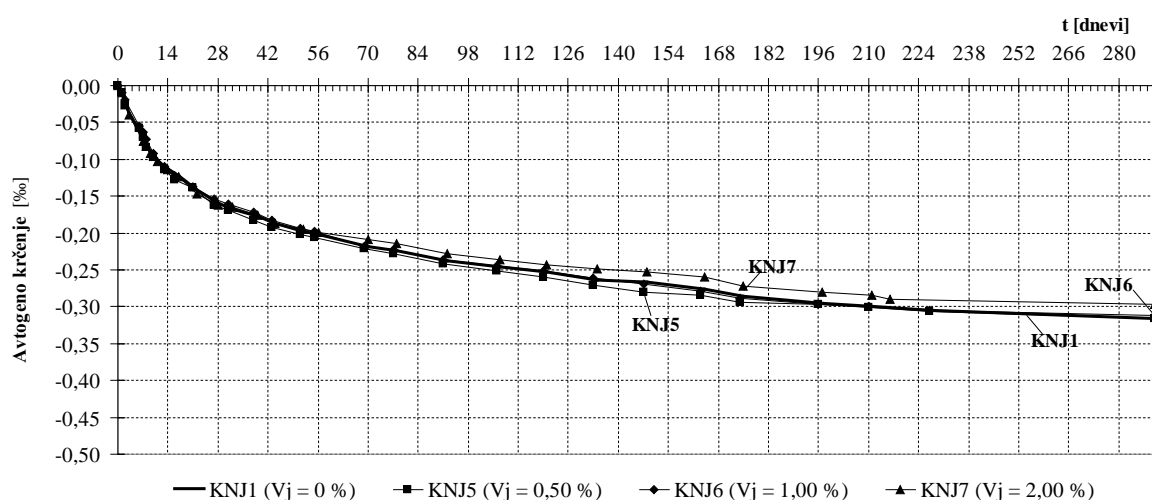
Iz prejšnjih navedb je razvidno, da se s povečevanjem deleža vlaknaste armature prek 1,00 % krčenje kompozita le minimalno zmanjšuje, vendar ne linearno proporcionalno s povečevanjem vsebnosti vlaken. Večja vsebnost vlaken po eni strani zagotavlja večjo trdnost in togost kompozita, hkrati pa poslabšuje vgradljivost sveže mešanice kompozita oziroma homogenost izdelanih preskušancev, kar zmanjšuje trdnost in togost kompozita. Ker je razmerje med ugodnim in neugodnim učinkom vlaknaste mikroarmature odvisno zlasti od prostorninskega deleža vlaken, povečevanje vsebnosti vlaknaste armature prek optimalne vrednosti poslabšuje lastnosti kompozita. Krčenje kompozitov s prevelikim deležem vlaknaste mikroarmature je v tem primeru celo večje od krčenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature. Na podlagi rezultatov eksperimentalnih raziskav ugotavljamo, da je za zmanjšanje krčenja kompozita optimalni prostorninski delež jeklenih vlaken v vlaknastem betonu normalne trdnosti približno 0,50 %.

Lomi oziroma nezveznosti časovnih potekov celotnega krčenja kompozita oziroma primerjalnega betona brez vlaknaste mikroarmature so posledica nastajanja mikrorazpok in posledičnega sproščanja notranjih napetosti, ki se kaže v izmerjeni deformaciji preskušanca v nekem časovnem trenutku, ter nihanja relativne vlage in temperature okrog nominalnih vrednosti.

Časovni razvoj avtogenega krčenja kompozita normalne trdnosti, ki je mikroarmiran s krajšimi jeklenimi vlakni, in primerjalnega betona brez vlaknaste armature je prikazan na sliki 4.76, krčenje kompozita, mikroarmiranega z daljšimi jeklenimi vlakni, pa na sliki 4.77.

Avtogeno krčenje kompozita z 0,50 %, 1,00 % in 2,00 % krajših jeklenih vlaken (slika 4.76) je vse do 56. dne po izdelavi preskušancev skoraj enako avtogenemu krčenju primerjalnega betona brez vlaknaste armature. Od 56. dne do konca obravnavanega intervala pa je avtogeno krčenje kompozita z

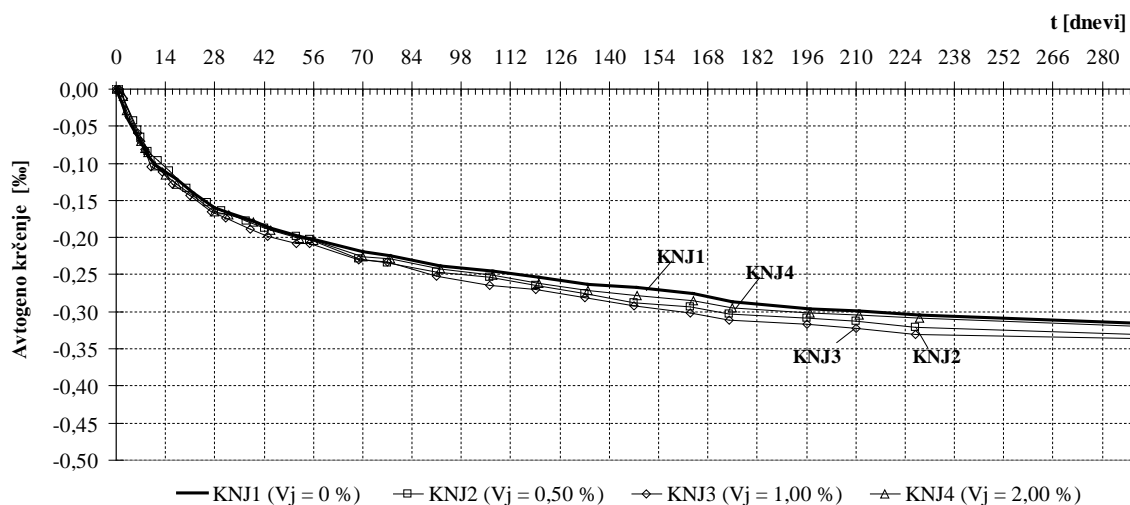
2 % krajših jeklenih vlaken do največ 7 % manjše od avtogenega krčenja primerjalnega betona, avtogeno krčenje kompozita z 0,50 % vlaken pa največ do 5 % večje od avtogenega krčenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature. Avtogeno krčenje kompozita z 1,00 % vlaken pa je v celotnem obravnavanem časovnem obdobju približno enako avtogenemu krčenju primerjalnega betona brez vlaknaste armature. Zaradi zadostne količine vode v betonu normalne trdnosti z vodo-cementnim razmerjem 0,52, avtogenega krčenja v prvih 24 urah v okviru natančnosti meritev 10^{-3} mm ni bilo. Pozneje pa sta bili trdnost in togost kompozita že tolikšni, da je bil vpliv vložene vlaknaste mikroarmature na avtogeno krčenje kompozita minimalen.



Slika 4.76: Časovni razvoj avtogenega krčenja zatesnjenih preskušancev iz vlaknastega betona normalne trdnosti z 0 %, 0,50 %, 1,00 % in 2,00 % prostorninskim deležem krajših jeklenih vlaken v celotnem času izvajanja meritev.

Figure 4.76: Time development of autogenous shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete test sealed specimens with volume content of 0 %, 0,50 %, 1,00 % and 2,00 % short steel fibres IRI 50/16.

Iz časovnega poteka avtogenega krčenja z daljšimi jeklenimi vlakni mikroarmiranega kompozita normalne trdnosti (slika 4.77) je razvidno, da je v začetnem obdobju do 28. dne od izdelave preskušancev avtogeno krčenje kompozita tako rekoč enako avtogenemu krčenju primerjalnega betona brez vlaknaste mikroarmature. Pozneje je avtogeno krčenje kompozita z vsemi tremi deleži jeklenih vlaken nekoliko večje od avtogenega krčenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature, in sicer največ do 8 % pri 146 dni starem kompozitu. Pri daljših vlaknih je neugoden vpliv poslabšanja vgradljivosti svežega kompozita in manjše zgoščenosti ter homogenosti preskušancev večji od ugodnega vpliva povečanja togosti in trdnosti kompozita zaradi vlaknaste armature. Pri največ 56 dni starem kompozitu sta ugodni in neugodni vpliv vložene vlaknaste armature približno izenačena, zato je do te starosti avtogeno krčenje kompozita in primerjalnega betona brez vlaknaste mikroarmature enako. Od 56. dneva do konca meritev pa neugodni učinek dodane vlaknaste mikroarmature rahlo presega ugodnega, zato je avtogeno krčenje kompozita nekoliko večje od avtogenega krčenja primerjalnega betona brez vlaknaste mikroarmature.



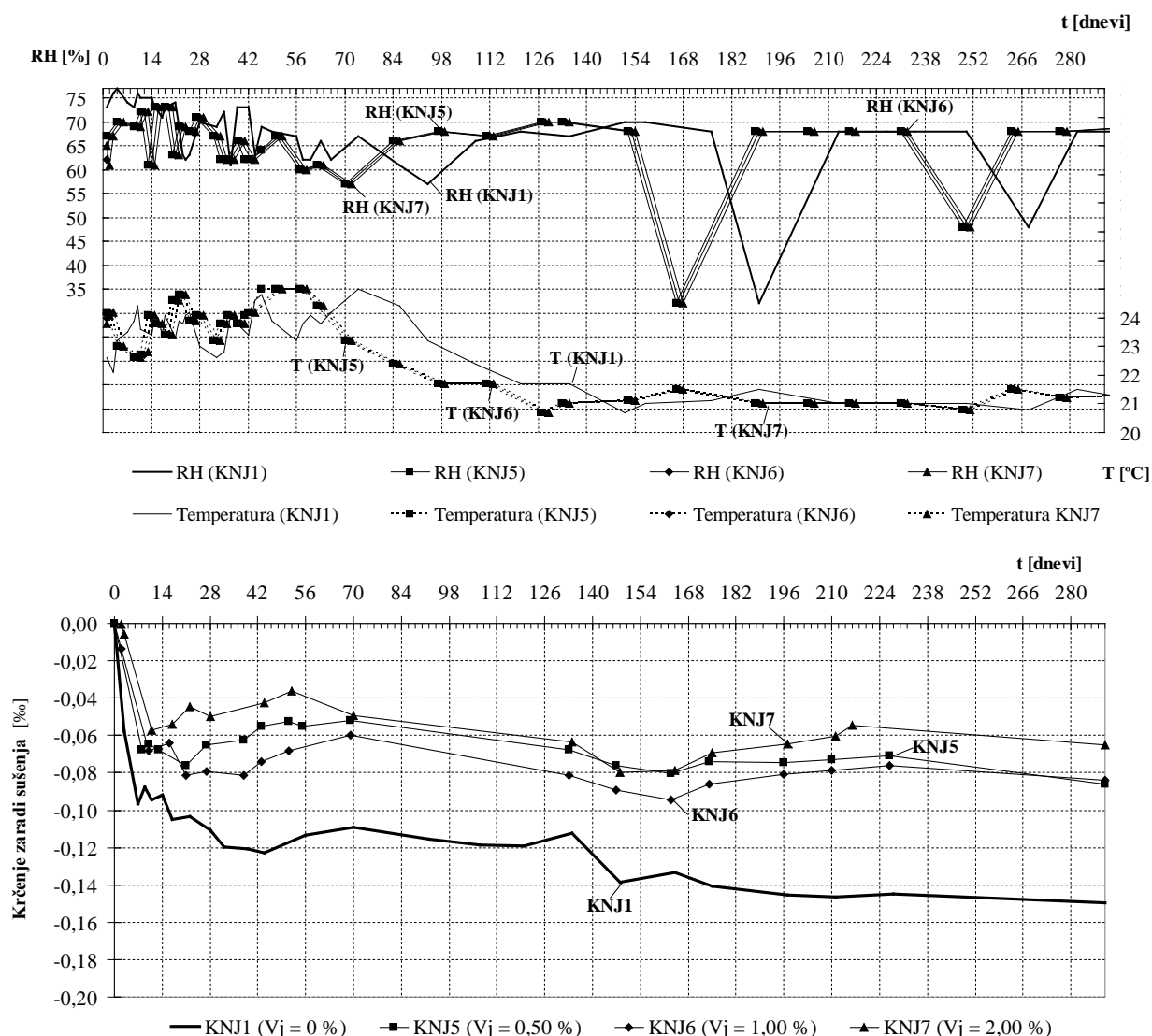
Slika 4.77: Časovni razvoj avtogenega krčenja zatesnjenih preskušancev iz vlaknastega betona normalne trdnosti z 0 %, 0,50 %, 1,00 % in 2,00 % prostorninskim deležem daljših jeklenih vlaken IRI 50/30 v celotnem času izvajanja meritev.

Figure 4.77: Time development of autogenous shrinkage of test sealed specimens of fibre reinforced normal strength concrete with volume content of 0 %, 0,50 %, 1,00 % and 2,00 % longer steel fibres IRI 50/30.

Krčenje zaradi sušenja z jeklenimi vlakni mikroarmiranega kompozita, ki je bil prvih 24 ur po betoniranju v kalupu in zatesnjen s polietilensko folijo, po 24 urah pa izpostavljen sušenju

Z razliko izmerjenega celotnega in izmerjenega avtogenega krčenja s krajšimi in daljšimi jeklenimi vlakni mikroarmiranega kompozita je bilo za vse obravnavane vsebnosti vlaken določeno krčenje kompozita in primerjalnega betona brez vlaknaste armature zaradi sušenja. Dobljeni rezultati so pri uporabi krajših vlaken prikazani na sliki 4.78, pri uporabi daljših vlaken pa na sliki 4.79.

Pri mikroarmiranju kompozita s krajšimi jeklenimi vlakni je krčenje zaradi sušenja pri vseh obravnavanih vsebnostih vlaken med celotnimi meritvami manjše od krčenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature. Pri tem je krčenje zaradi sušenja kompozita z 2,00 % vlaken najmanjše in je 28. dan po izdelavi preskušancev za 55 % manjše, krčenje zaradi sušenja kompozita z 1,00 % vlaken pa je največje in je 28. dan po izdelavi preskušancev za 28 % manjše od krčenja zaradi sušenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature. Krčenje zaradi sušenja kompozita z 0,50 % prostorninskim deležem vlaken pa je med krčenjem zaradi sušenja kompozitov z 1,00 % oziroma 2,00 % deležem jeklenih vlaken. Od 70. do 170. dne od izdelave preskušancev je krčenje zaradi sušenja kompozitov s prostorninskima deležema 0,50 % in 2,00 % približno enako in je 70. dan za 52 % manjše od krčenja zaradi sušenja primerjalnega betona. Krčenje zaradi sušenja kompozita z 1,00 % vlaken pa je največje in ob koncu meritev znaša približno 45 % krčenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature.

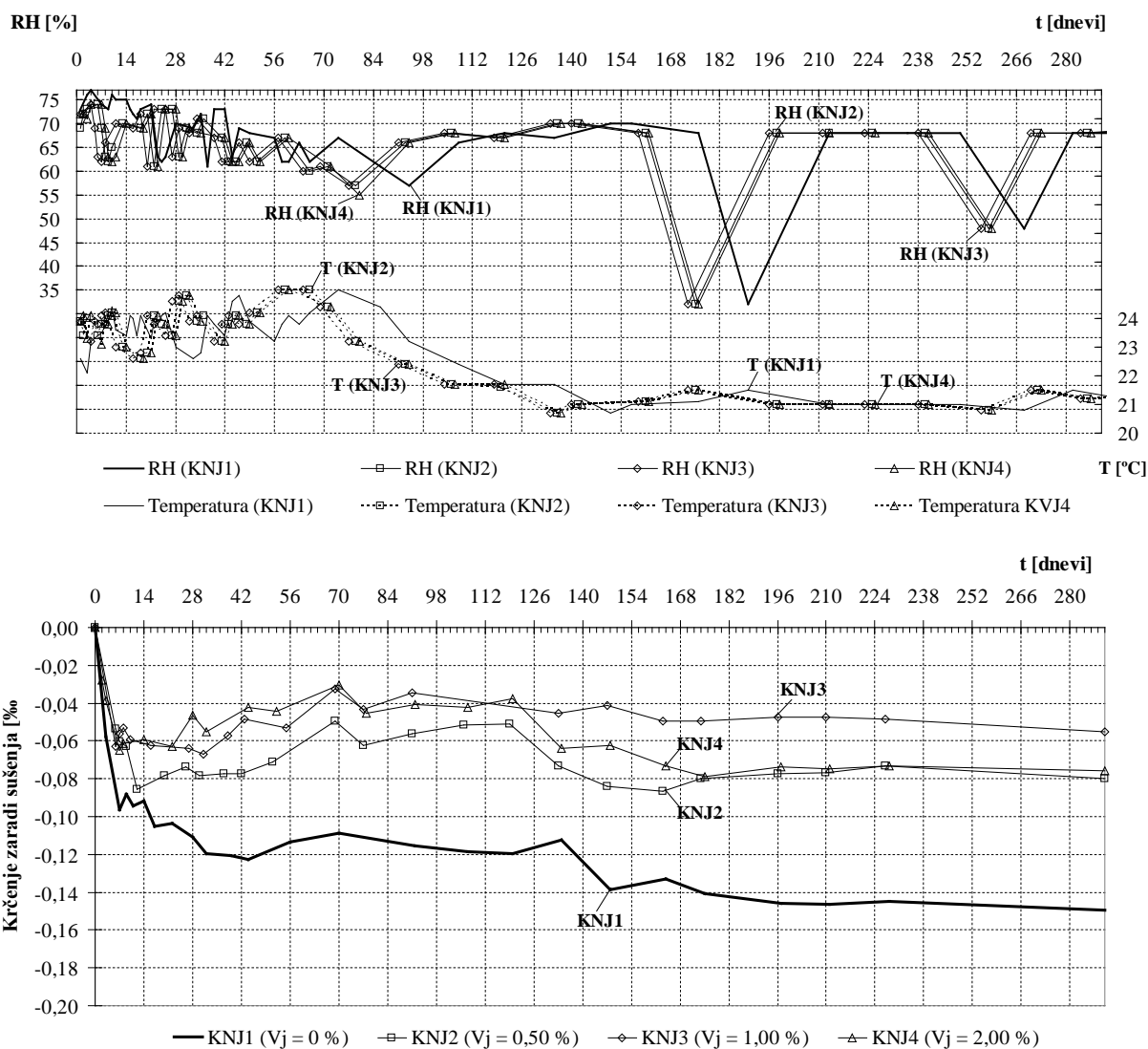


Slika 4.78: Časovni razvoj krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastega betona normalne trdnosti z 0 %, 0,50 %, 1,00 % in 2,00 % prostorninskim deležem krajših jeklenih vlaken IRI 50/16.

Figure 4.78: Time development of drying shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete test specimens containing 0 %, 0,50 %, 1,00 % and 2,00 % volume content of short steel fibres IRI 50/16.

Krčenje zaradi sušenja kompozita, ki je mikroarmiran z daljšimi jeklenimi vlakni, je pri vseh vsebnostih vlaken za 44 % do 68 % manjše od krčenja zaradi sušenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature (slika 4.79). Po 70 dneh od izdelave preskušancev je izmerjeno najmanjše krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona z 2,00 % daljših jeklenih vlaken, ki je pri 14 dneh od izdelave preskušancev za 35 % manjše, 28. dan pa za 59 % manjše od krčenja zaradi sušenja primerjalnega betona brez vlaken. Od 70. dne pa vse do konca meritev je izmerjeno najmanjše krčenje vlaknastega betona z 1,00 % daljših jeklenih vlaken, ki je ob koncu meritev za 67 % manjše od krčenja zaradi sušenja primerjalnega betona brez vlaken. Krčenje vlaknastega betona z 0,50 % daljših jeklenih vlaken je od vseh preiskovanih vlaknastih betonov največje in je 14. dan od izdelave preskušancev za 7 %

manjše, 28. dan za 29 % manjše, ob koncu meritev pa za 45 % manjše od krčenja zaradi sušenja primerjalnega betona brez vlaken. Krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona z 2,00 % daljših jeklenih vlaken je od 70. do 120. dne od izdelave preskušancev približno enako krčenju vlaknastega betona z 1,00 % jeklenih vlaken, med 120. in 170. dnem od izdelave preskušancev pa je nekako med krčenjem zaradi sušenja vlaknastega betona z 0,50 % in 1,00 % daljših jeklenih vlaken. Na koncu meritve je krčenje zaradi sušenja vlaknastih betonov z 0,50 % in 2,00 % vlaken približno enako.



Slika 4.79: Časovni razvoj krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastega betona normalne trdnosti z 0 %, 0,50 %, 1,00 % in 2,00 % prostorninskim deležem daljših jeklenih vlaken IRI 50/30.

Figure 4.79: Time development of drying shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete test specimens containing 0 %, 0,50 %, 1,00 % and 2,00 % volume content of long steel fibres IRI 50/30.

Da je krčenje zaradi sušenja s krajšimi oziroma daljšimi jeklenimi vlakni mikroarmiranega kompozita (slika 4.78 oziroma slika 4.79), ki je dobljeno z razliko celotnega krčenja (slika 4.74 oziroma 4.75) in

avtogenega krčenja (slika 4.76 oziroma 4.77) kompozitov, v celotnem intervalu meritev manjše od krčenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature, je razumljivo. Celotno krčenje obeh vrst kompozitov je namreč v celotnem intervalu meritev veliko manjše od celotnega krčenja primerjalnega betona brez vlaken. Po absolutni vrednosti pa je celotno krčenje obeh kompozitov veliko večje od njunega avtogenega krčenja, ki je med meritvami sicer nekaj časa približno enako avtogenemu krčenju primerjalnega betona, nekaj časa pa večje oziroma manjše od avtogenega krčenja primerjalnega betona.

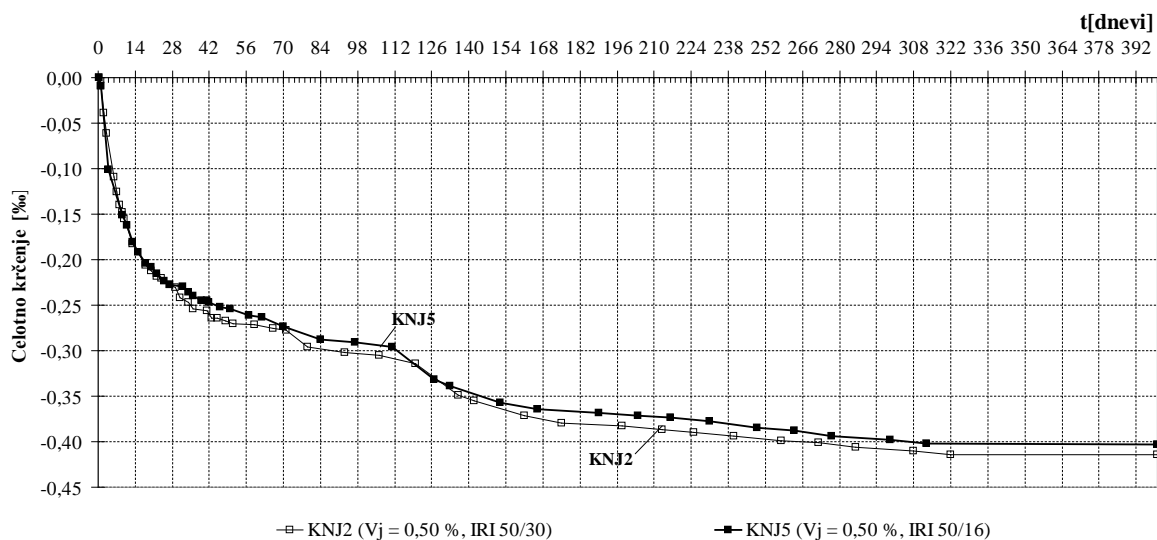
Prvih 14 dni od izdelave preskušancev je krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona posledica izhlapevanja vode iz preskušancev. Ocenjujemo, da se v tem času zaradi izhlapevanja vode prek površine in zaradi porabe vode pri hidrataciji na površini preskušancev približno ustvari ravnotežje med vlago kompozita in okolnega medija. Zaradi trajanja hidratacije in posledične notranje porabe vode se pozneje v preskušancih ustvari nasproten gradient vlage, ki povzroči prehajanje vlage iz okolja v preskušance in s tem rahlo nabrekanje preskušancev. Pri 50 dni oziroma 70 dni starih preskušancih pa se vzpostavi približno globalno ravnovesje med vlago preskušancev in vlago okolnega medija, zaradi česar se prenos vlage iz preskušancev in vanje skoraj ustavi. Zato je krčenje zaradi sušenja kompozitov pozneje minimalno. Manjše nezveznosti časovnega poteka krčenja zaradi sušenja kompozitov in primerjalnega betona pa so posledica nihanja relativne vlage okolnega zraka okoli referenčne relativne vlage RH v komori.

Najmanjše krčenje zaradi sušenja je bilo izmerjeno pri vlaknastem betonu z 2,00 % jeklenih vlaken.

Vpliv daljših in krajših jeklenih vlaken na časovni potek celotnega in avtogenega krčenja vlaknastega betona, negovanega 24 ur po zamešanju

Na slikah od 4.80 do 4.83 je prikazano celotno in avtogeno krčenje vlaknastega betona normalne trdnosti z 0,50 % oziroma 2,00 % daljših oziroma krajših jeklenih vlaken.

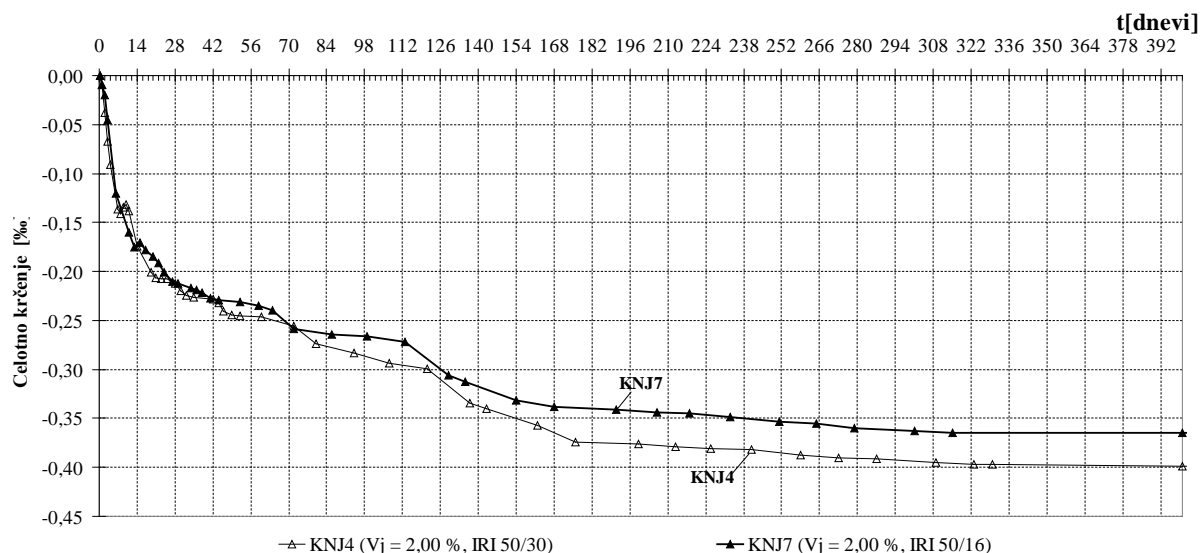
Na sliki 4.80 je prikazano celotno krčenje vlaknastega betona normalne trdnosti z 0,50 % daljših oziroma krajših jeklenih vlaken. 28 dni od izdelave preskušancev je celotno krčenje vlaknastega betona normalne trdnosti z 0,50 % daljših jeklenih vlaken približno enako celotnemu krčenju vlaknastega betona z enako vsebnostjo krajših jeklenih vlaken. Po 28 dneh pa vse do konca meritev pa je celotno krčenje vlaknastega betona z 0,50 % daljših jeklenih vlaken približno za 4 % večje od celotnega krčenja vlaknastega betona z enako vsebnostjo krajših jeklenih vlaken.



Slika 4.80: Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastih betonov normalne trdnosti z 0,50 % daljših oziroma krajših jeklenih vlaken.

Figure 4.80: Time development of total shrinkage of test specimens of fibre reinforced normal strength concrete containing 0,50 % of longer or shorter steel fibres.

Celotno krčenje kompozita z 2,00 % daljših jeklenih vlaken (slika 4.81) je 28 dni od izdelave preskušancev približno enako celotnemu krčenju kompozita z enako vsebnostjo krajših jeklenih vlaken. Po 28 dneh od izdelave preskušancev vse do konca izvajanja meritev pa je celotno krčenje kompozita z 2,00 % daljših jeklenih vlaken približno za 3 % do 8 % večje od celotnega krčenja kompozita z enako vsebnostjo krajših jeklenih vlaken.



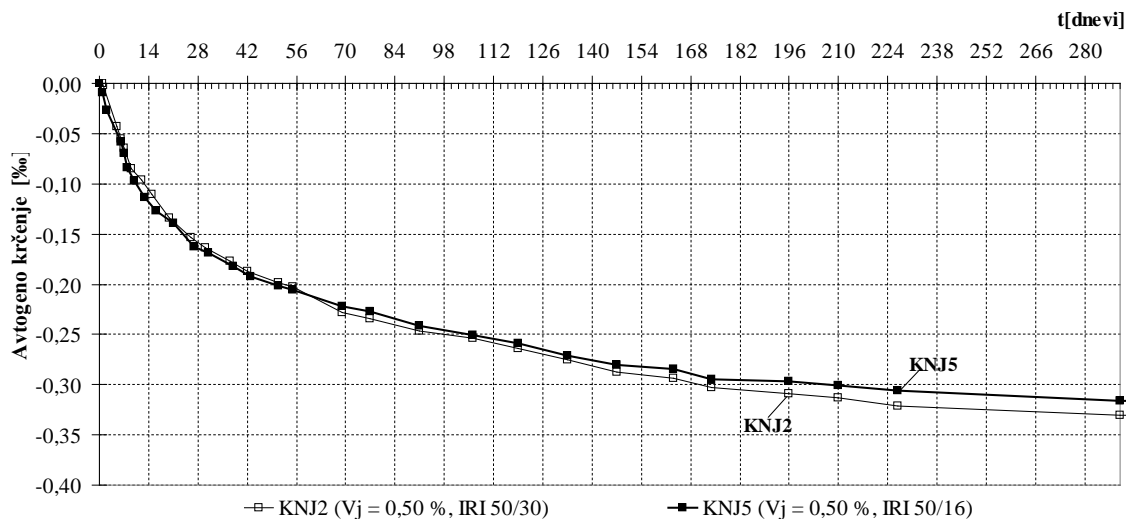
Slika 4.81: Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastih betonov normalne trdnosti z 2,00 % daljših oziroma krajših jeklenih vlaken.

Figure 4.81: Time development of total shrinkage of test specimens of fibre reinforced normal strength concrete containing 2,00 % of longer or shorter steel fibres.

Lomi časovnih potekov krčenja kompozita, ki so posledica pojavljanja drobnih površinskih razpok preskušancev in spreminjanja relativne vlage okolnega medija okrog referenčne vrednosti, se pojavijo približno pri istih starostih kompozita. Primerjava avtogenega krčenja vlaknastih betonov normalne trdnosti, ki sta mikroarmirana z 0,50 % krajših oziroma daljših jeklenih vlaken, je razvidna s slike 4.82, primerjava avtogenega krčenja vlaknastih betonov normalne trdnosti z 2,00 % krajših oziroma daljših jeklenih vlaken pa s slike 4.83.

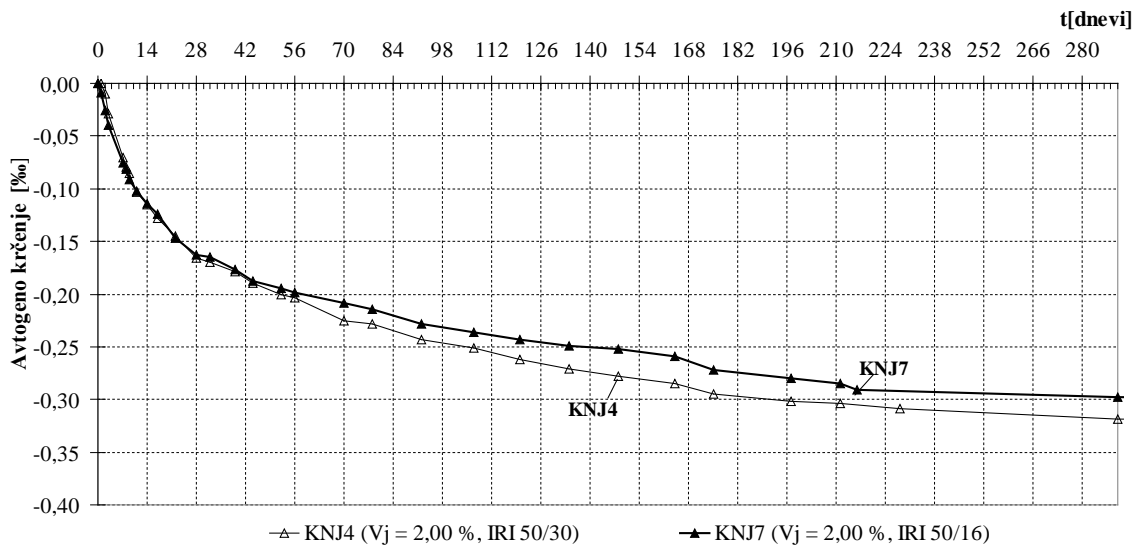
Avtogeno krčenje kompozita z 0,50 % daljših jeklenih vlaken je 140 dni od izdelave preskušancev približno enako avtogenemu krčenju kompozita z enako vsebnostjo krajših jeklenih vlaken (slika 4.82). Po 140 dneh od izdelave preskušancev pa vse do konca meritev je avtogeno krčenje kompozita s krajšimi jeklenimi vlakni približno za 4 % manjše od avtogenega krčenja kompozita z daljšimi jeklenimi vlakni.

V 42 dneh od izdelave preskušancev je avtogeno krčenje vlaknastega betona z vsebnostjo 2,00 % daljših jeklenih vlaken enako avtogenemu krčenju vlaknastega betona z enako vsebnostjo krajših jeklenih vlaken. Od 42. dne od izdelave preskušancev pa vse do konca meritev je avtogeno krčenje kompozita s krajšimi jeklenimi vlakni manjše od avtogenega krčenja kompozita z daljšimi jeklenimi vlakni. Iz rezultatov meritev (slika 4.83) je razvidno, da je 150. dan od izdelave preskušancev razlika med avtogenim krčenjem primerjalnih vlaknastih betonov z daljšimi oziroma s krajšimi jeklenimi vlakni največja in znaša približno 10 %.



Slika 4.82: Časovni razvoj avtogenega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona normalne trdnosti z 0,50 % daljših oziroma krajših jeklenih vlaken.

Figure 4.82: Time development of autogenous shrinkage of test specimens made of fibre reinforced normal strength concrete containing 0,50 % of longer or shorter steel fibres.



Slika 4.83: Časovni razvoj avtogenega krčenja preskušancev vlaknastega betona normalne trdnosti z 2,00 % daljših oziroma krajših jeklenih vlaken.

Figure 4.83: Time development of autogenous shrinkage of test specimens made of fibre reinforced normal strength concrete containing 2,00 % of longer or shorter steel fibres.

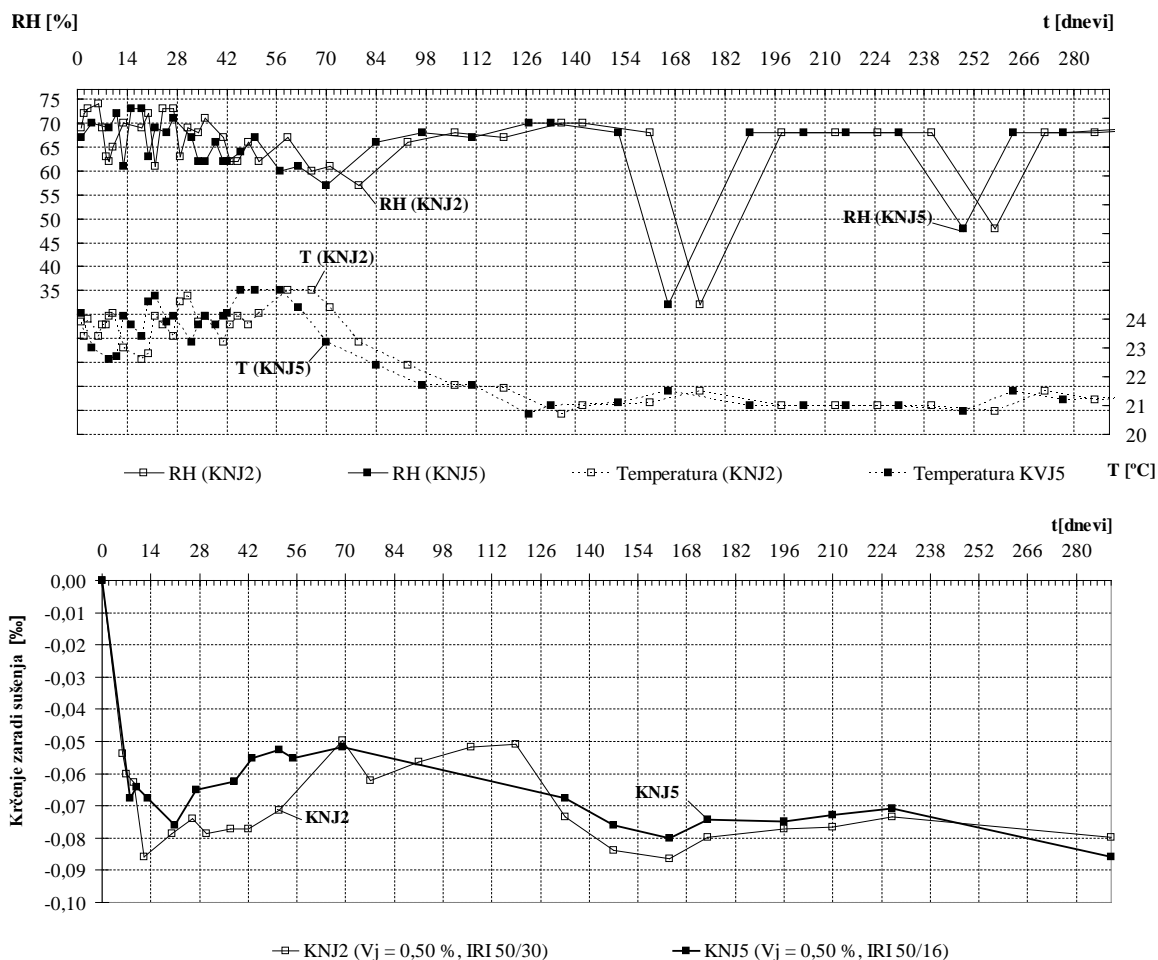
Iz prikaza rezultatov meritev celotnega in avtogenega krčenja vlaknastega betona normalne trdnosti (slike 4.80 do 4.83) je razvidno, da se avtogeno in celotno krčenje vlaknastega betona, ki je mikroarmiran z daljšimi jeklenimi vlakni, sorazmerno malo razlikuje od avtogenega in celotnega krčenja vlaknastega betona, ki je mikroarmiran s krajšimi jeklenimi vlakni.

Vpliv daljših oziroma krajših jeklenih vlaken na avtogeno in celotno krčenje strjenega kompozita je pri majhnem, 0,50 % deležu vlaken v kompozitu skoraj enak. Število krajših jeklenih vlaken (IRI 50/16) je pri 0,50 % deležu vlaken v kompozitu večje od števila daljših jeklenih vlaken (IRI 50/30) pri isti vsebnosti vlaken v kompozitu. Togost krajših jeklenih vlaken je enaka togosti daljših jeklenih vlaken, zato je vpliv obojih na krčenje strjenega kompozita skoraj enak. Predvidevamo, da se s povečevanjem deleža mikroarmature (slika 4.83) poslabšuje vgradljivost in zmanjšuje homogenost kompozita, še posebno če uporabimo daljša jeklena vlakna (IRI 50/30), v primerjavi s krajšimi vlakni (IRI 50/16), zato je krčenje kompozita z daljšimi jeklenimi vlakni za približno 10 % večje .

Vpliv daljših in krajših jeklenih vlaken na časovni potek krčenja zaradi sušenja vlaknastega betona, negovanega 24 ur po izdelavi preskušancev

Časovni razvoj krčenja zaradi sušenja vlaknastega betona normalne trdnosti, ki je mikroarmiran z 0,50 % krajših jeklenih vlaken, in krčenja zaradi sušenja vlaknastega betona z enakim deležem daljših jeklenih vlaken je prikazan na sliki (4.84). Krčenje zaradi sušenja vlaknastih betonov pri mikroarmiranju z (2 %) daljšimi oziroma krajšimi jeklenimi vlakni pa je na sliki (4.85).

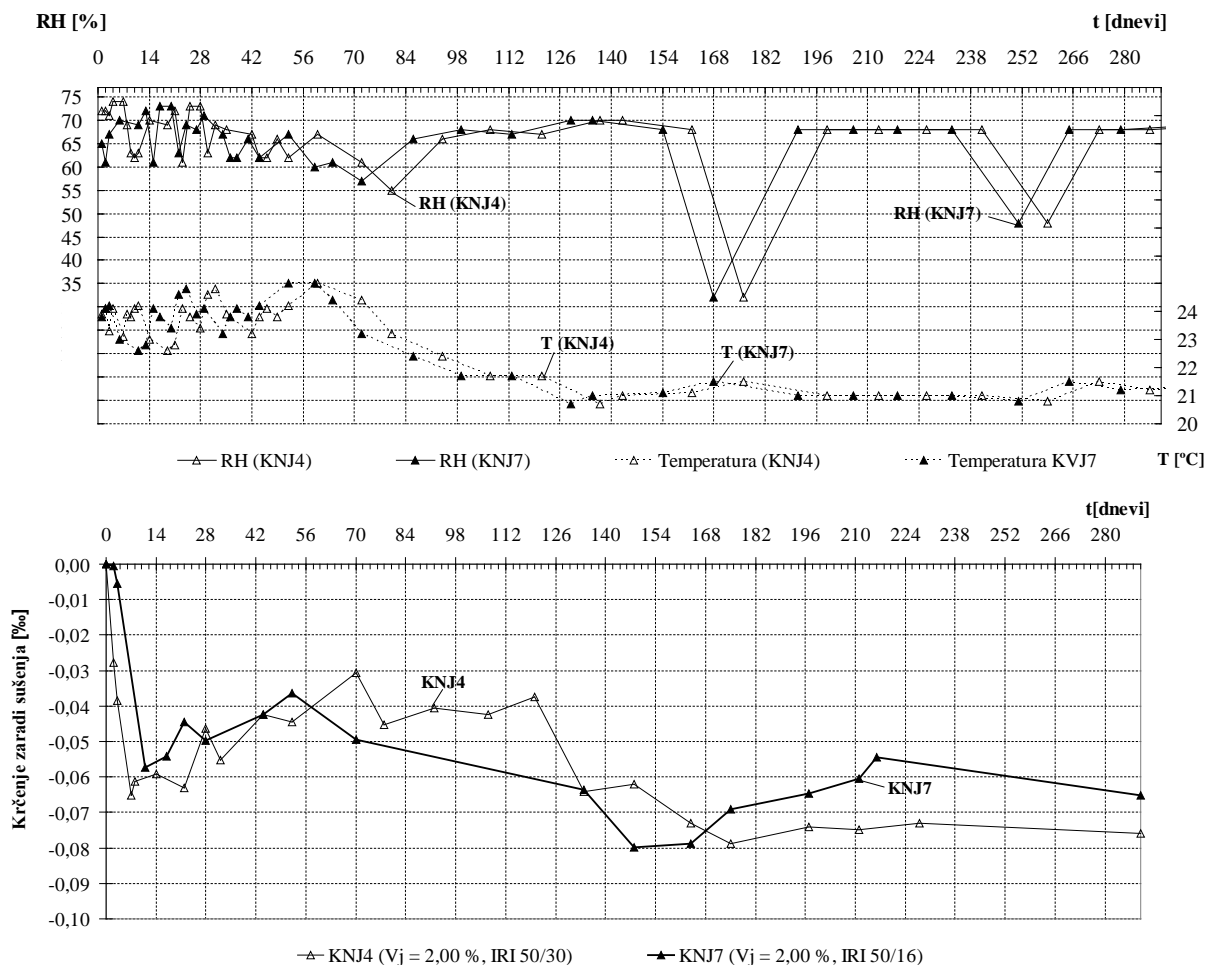
Krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona z 0,50 % jeklenih vlaken predstavlja manjši del (1/7 do 1/5) celotnega krčenja kompozita. Krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona normalne trdnosti z 0,50 % krajših jeklenih vlaken (slika 4.84) je v 7 dneh od izdelave preskušancev približno enako krčenju zaradi sušenja vlaknastega betona z enako vsebnostjo daljših jeklenih vlaken. Od 7. pa do 90. dne od izdelave preskušancev pa je krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona s krajšimi jeklenimi vlakni za 3 % do 26 % manjše od krčenja zaradi sušenja vlaknastega betona z enako vsebnostjo daljših jeklenih vlaken. Od 90. do 130. dne od izdelave preskušancev je krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona z 0,50 % daljših jeklenih vlaken največ za 22 % manjše od krčenja vlaknastega betona z enakim deležem krajših jeklenih vlaken. Od 130. dne pa vse do konca meritev je krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona z 0,50 % krajših jeklenih vlaken manjše od krčenja vlaknastega betona z enako vsebnostjo daljših jeklenih vlaken.



Slika 4.84: Časovni razvoj krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastega betona normalne trdnosti z 0,50 % daljših oziroma krajših jeklenih vlaken.

Figure 4.84: Time development of drying shrinkage of test specimens made of fibre reinforced normal strength concrete containing 0,50 % of longer or shorter steel fibre.

Primerjava časovnega razvoja krčenja zaradi sušenja vlaknastega betona normalne trdnosti z 2,00 % daljših oziroma krajših jeklenih vlaken je razvidna s slike 4.85. Krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona z 2,00 % krajših jeklenih vlaken je v prvih 60 dneh od izdelave preskušancev za največ 30 % manjše od krčenja zaradi sušenja vlaknastega betona z enakim deležem daljših jeklenih vlaken. Od 60. do 170. dne od izdelave preskušancev je krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona s krajšimi jeklenimi vlakni za 8 % do največ 41 % manjše od krčenja zaradi sušenja vlaknastega betona z daljšimi jeklenimi vlakni. Od 170. dne pa vse do konca meritev je krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona s krajšimi jeklenimi vlakni manjše od krčenja zaradi sušenja vlaknastega betona z daljšimi jeklenimi vlakni. Ob koncu meritev je bilo krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona z 2,00 % krajših jeklenih vlaken za 13 % manjše od krčenja zaradi sušenja vlaknastega betona z enakim deležem daljših jeklenih vlaken.



Slika 4.85: Časovni razvoj krčenja zaradi sušenja preskušancev iz vlaknastega betona normalne trdnosti z 2,00 % daljših in 2,00 % krajših jeklenih vlaken.

Figure 4.85: Time development of drying shrinkage of test specimens of fibre reinforced normal strength concrete containing 2,00 % of longer and 2,00 % shorter steel fibre.

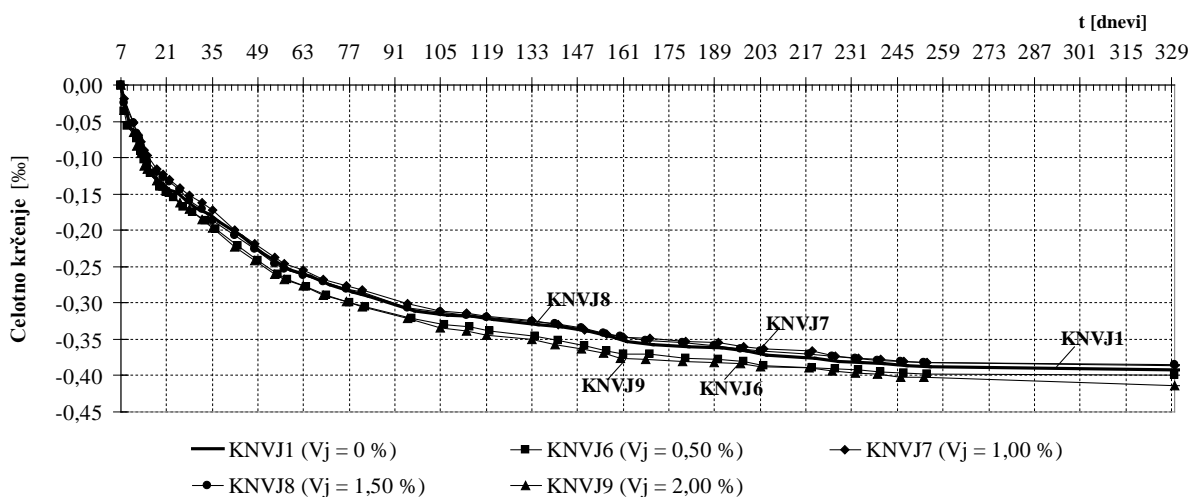
Vpliv krajših jeklenih vlaken na krčenje kompozita zaradi sušenja je pomembnejši od vpliva daljših jeklenih vlaken, kar si razlagamo s povečanim deležem povezanih por, ki pospešujejo izhlapevanje vode iz kompozita in s tem povečujejo krčenje kompozita zaradi sušenja. Ker daljša jeklena vlakna bolj prispevajo k nastanku sistema povezanih por v kompozitu kot krajša, so krajša vlakna pri oviranju krčenja kompozita zaradi sušenja učinkovitejša od daljših.

Lomi časovnih potekov krčenja zaradi sušenja kompozitov na slikah 4.84 in 4.85 so posledica nihanja relativne vlage zraka okoli referenčne relativne vlage v komori. Nagle lokalne spremembe časovnega poteka krčenja zaradi sušenja vlaknastega betona so v prvih 80 dneh od izdelave preskušancev posledica spreminjanja vlage okoli referenčne relativne vlage v komori zaradi intenzivnega laboratorijskega dela. Hitre lokalne spremembe krčenja zaradi sušenja vlaknastega betona v poznejšem času pa so posledica kratkotrajnih težav z napravo za vzdrževanje relativne vlage v komori. Kratkotrajne spremembe relativne vlage okolja in posledično lokalna odstopanja časovnega poteka

krčenja od srednjih vrednosti le minimalno vplivajo na globalni časovni potek referenčnega krčenja zaradi sušenja vlaknastega betona.

Celotno krčenje z jeklenimi vlakni mikroarmiranega vlaknastega betona, ki je bil po odstranjevanju opaža 24 ur po izdelavi preskušancev pred meritvami še 6 dni v vodi

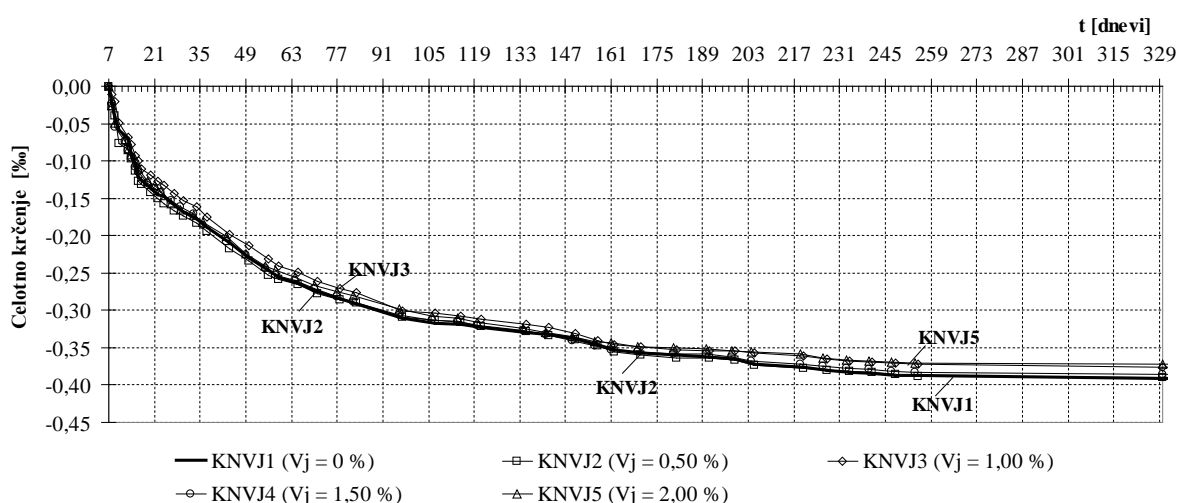
Na slikah 4.86 in 4.87 so prikazani rezultati eksperimentalnih raziskav celotnega krčenja kompozita normalne trdnosti, ki je mikroarmiran z različnimi deleži krajših in daljših jeklenih vlaken in je po razkalupljenju preskušancev 24 ur po zabetoniranju 6 dni odležal v vodi. Časovni potek celotnega krčenja mikroarmiranega kompozita z 1,00 % in 1,50 % prostorninskim deležem krajših jeklenih vlaken se med celotno meritvijo skoraj ujema s časovnim potekom krčenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature (slika 4.86), krčenje kompozita z 0,50 % in 2,00 % prostorninskim deležem jeklenih vlaken pa je od 21. dne od izdelave preskušancev dalje do 6 % večje od krčenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature.



Slika 4.86: Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona normalne trdnosti z 0 %, 0,50 %, 1,00 %, 1,50 % in 2,00 % prostorninskimi deleži krajših jeklenih vlaken IRI 50/16.

Figure 4.86 Time development of total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete test specimens with volume content of 0 %, 0,50 %, 1,00 %, 1,50 % and 2,00 % of shorter steel fibres IRI 50/16.

Časovni poteki celotnega krčenja kompozita z vsemi tremi deleži daljših jeklenih vlaken se minimalno razlikujejo in le od 10. do 70. dne minimalno presežejo velikosti krčenja primerjalnega betona (slika 4.87).



Slika 4.87: Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona normalne trdnosti z 0 %, 0,50 %, 1,00 %, 1,50 % in 2,00 % prostorninskimi deleži daljših vlaken IRI 50/30.

Figure 4.87: Time development of total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete test specimens with volume content of 0 %, 0,50 %, 1,00 %, 1,50 % and 2,00 % of longer steel fibres IRI 50/30.

Celotno krčenje kompozita z različnimi deleži krajših oziroma daljših jeklenih vlaken (slika 4.86 oziroma 4.87), ki so bili pred izvajanjem meritev po 24 urah razkalupljeni in so potem še 6 dni odležali v vodi, se razmeroma malo razlikuje od krčenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature in je bistveno manjše od krčenja enakega kompozita, ki pred meritvami po razkalupljenju ni odležal v vodi dodatnih 6 dni (slika 4.74 oziroma 4.75).

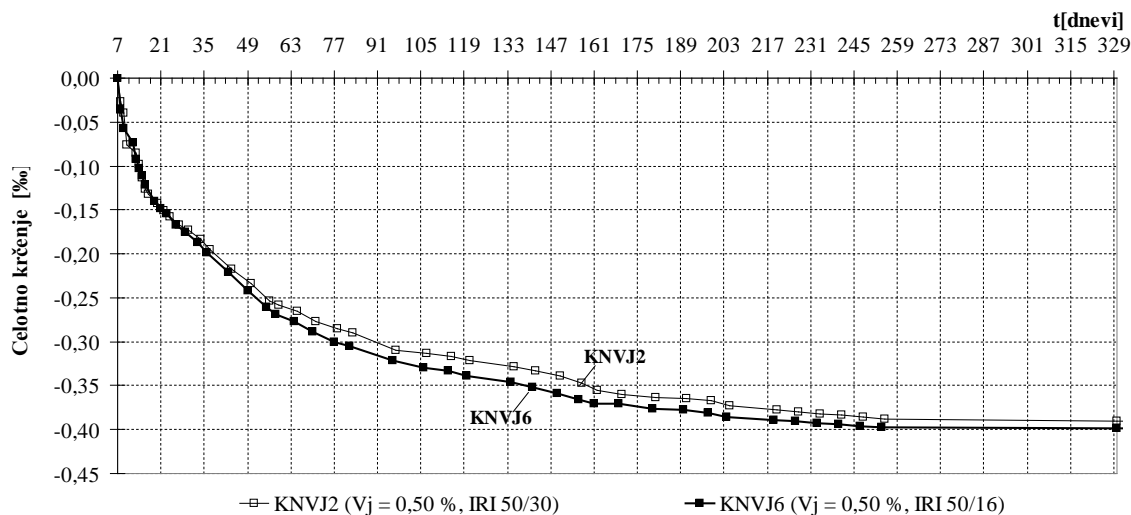
Vložena mikroarmatura občutno vpliva na zmanjšanje krčenja mladega kompozita, ko je trdnost in togost kompozita še sorazmerno majhna, pri starejšem kompozitu pa je vpliv mikroarmature na krčenje kompozita sorazmerno majhen. Zato je vpliv jeklene mikroarmature na časovni potek krčenja kompozita, ki je bil po razkalupljenju še 6 dni negovan v vodi, izrazito manjši od vpliva vlaken na krčenje kompozita, ki ni bil tako negovan.

Na krčenje preskušancev vlaknastih betonov z različnim deležem daljših in krajših jeklenih vlaken ter na preskušance primerjalnega betona brez vlaken pomembno vpliva šestdnevna nega preskušancev v vodi. Neville (1995) navaja, da ima nega betona pomembno vlogo na krčenje, saj lahko z ustrezno nego zmanjšamo krčenje. Ugotavljamo, da pri ustrezni negi preskušancev vlaknasta mikroarmatura ne vpliva na krčenje kompozita.

Vpliv daljših in krajših jeklenih vlaken na časovni potek celotnega krčenja kompozita, ki je bil po razopaženju 24 ur po izdelavi preskušancev pred meritvami še 6 dni v vodi

Na sliki 4.88 je prikazano celotno krčenje vlaknastega betona normalne trdnosti z 0,50 % daljših oziroma krajših jeklenih vlaken. Od 7. do 28. dneva od izdelave preskušancev se celotno krčenje vlaknastega betona normalne trdnosti z 0,50 % daljših jeklenih vlaken minimalno razlikuje od celotnega krčenja vlaknastega betona normalne trdnosti z isto vsebnostjo krajših jeklenih vlaken. Po 28 dneh od izdelave preskušancev pa vse do konca meritev je celotno krčenje vlaknastega betona s

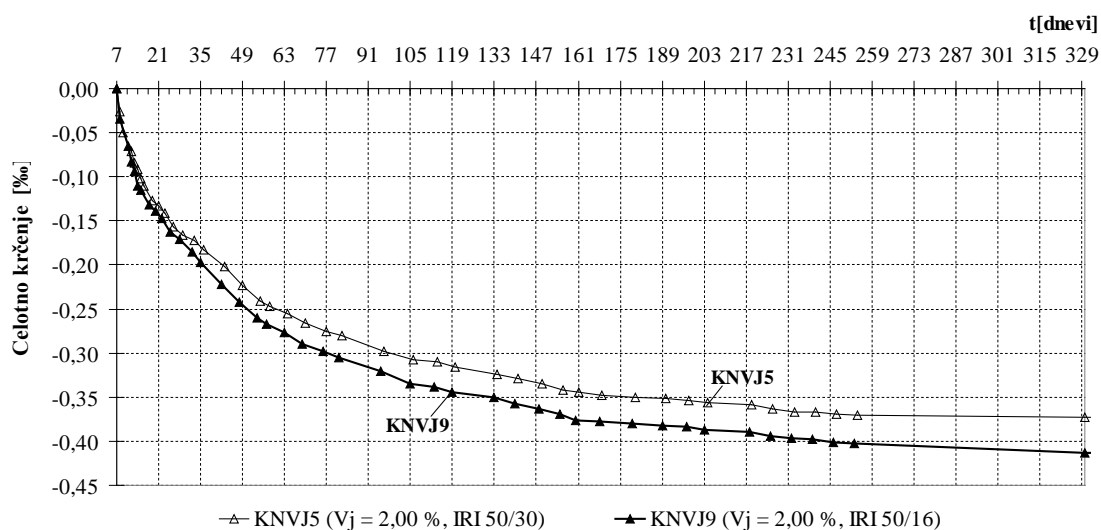
krajšimi jeklenimi vlakni večje od celotnega krčenja vlaknastega betona normalne trdnosti z enakim deležem daljših jeklenih vlaken. Največje odstopanje med celotnim krčenjem vlaknastega betona z 0,50 % daljših oziroma krajših jeklenih vlaken je med 77. in 230. dnevom od izdelave preskušancev in je največ 5 %.



Slika 4.88: Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona normalne trdnosti z 0,50 % daljših oziroma krajših jeklenih vlaken.

Figure 4.88: Time development of total shrinkage of test specimens made of fibre reinforced normal strength concrete containing 0,50 % of longer or shorter steel fibre.

Celotno krčenje kompozita z 2,00 % daljših jeklenih vlaken (slika 4.89) je od 7. do 28. dne od izdelave preskušancev približno enako celotnemu krčenju kompozita z enako vsebnostjo krajših jeklenih vlaken. Po 28 dneh od izdelave preskušancev pa vse do konca meritev se celotno krčenje vlaknastega betona normalne trdnosti z daljšimi jeklenimi vlakni manjša. Ob koncu meritev je bilo celotno krčenje vlaknastega betona z 2,00 % daljših jeklenih vlaken za približno 9 % manjše od celotnega krčenja vlaknastega betona z enakim deležem krajših jeklenih vlaken.



Slika 4.89: Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz vlaknastega betona normalne trdnosti z 2,00 % daljših oziroma krajših jeklenih vlaken.

Figure 4.89: Time development of total shrinkage of test specimens made of fibre reinforced normal strength concrete containing 2,00 % of longer or shorter steel fibre.

Iz prikaza rezultatov meritev celotnega krčenja vlaknastega betona normalne trdnosti (sliki 4.88 in 4.89) s preskušanci, ki so po razkalupljenju 24 ur po betoniranju še 6 dni odležali v vodi, je razvidno, da se celotno krčenje vlaknastega betona, ki je mikroarmiran z daljšimi jeklenimi vlakni, sorazmerno malo razlikuje od celotnega krčenja vlaknastega betona, ki je mikroarmiran s krajšimi jeklenimi vlakni. Vložena mikroarmatura občutno vpliva le na zmanjšanje krčenja mladega kompozita, ko sta trdnost in togost kompozita še sorazmerno majhni, pri starejšem kompozitu pa je vpliv mikroarmature na krčenje kompozita sorazmerno majhen. Zato je vpliv jeklene mikroarmature na časovni potek celotnega krčenja kompozita, ki je bil po razkalupljenju še 6 dni negovan v vodi, izrazito majhen. Iz eksperimentalnih rezultatov izhaja, da so daljša jeklena vlakna v poznejšem obdobju glede omejitve krčenja kompozita učinkovitejša kot krajša jeklena vlakna pri isti vsebnosti.

Primerjava vpliva prostorninskega deleža jeklene vlaknaste armature na celotno krčenje vlaknastega betona normalne trdnosti glede na rezultate naših in tujih eksperimentalnih raziskav

Vpliv jeklene mikroarmature na celotno krčenje vlaknastega betona normalne trdnosti po naših eksperimentalnih raziskavah smo primerjali z vplivom enakega deleža vlaken na celotno krčenje vlaknastega betona normalne trdnosti po raziskovalcih Barru in Badnu (2003) ter Swamyju in Stavridesu (1979). Tlačna trdnost 28 dni starega betona, ki so ga pri raziskavah krčenja proučevali tuji raziskovalci, in tlačna trdnost betona v našem eksperimentu sta bili enaki in sta znašali 40 MPa.

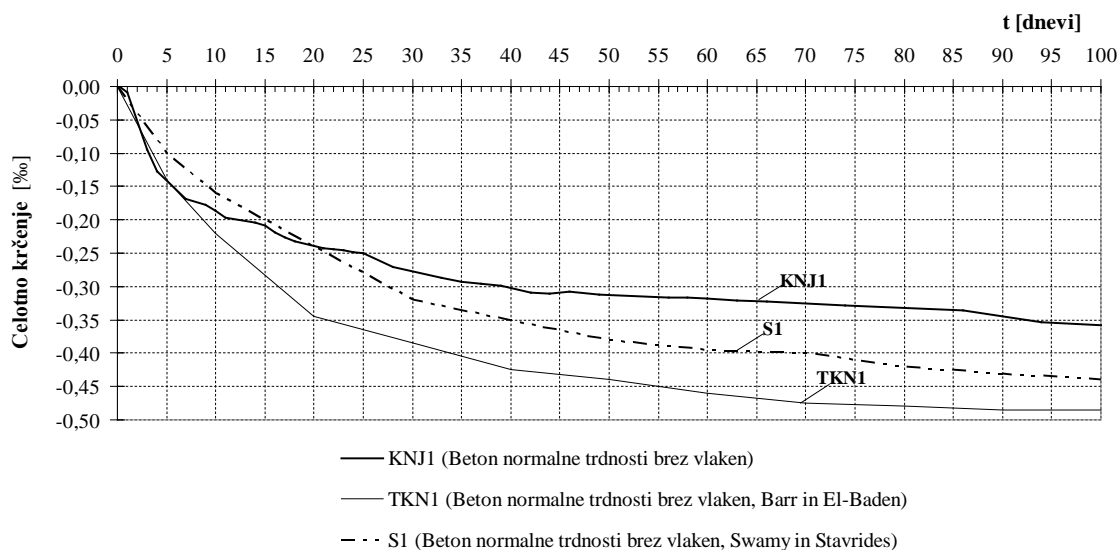
Svežo betonsko mešanico brez vlaken KNJ1, ki smo jo uporabili v svojih eksperimentalnih raziskavah in je vsebovala 400 kg veziva na m^3 betona, smo primerjali z betonsko mešanico brez vlaken TKN1 raziskovalcev Barra in Badna (2003). Raziskovalca Swamy in Stavrides (1979) ne navajata količine cementa za svežo betonsko mešanico S1, ampak podajata sestavo sveže betonske mešanice v razmerju 1 : 1,18 : 2,25 (masa cementa : masa grobega agregata : masa drobnega agregata). Grobega agregata v sveži betonski mešanici TKN1 pri Barru in Badnu je bilo $1000 \text{ kg}/m^3$ in ga je bilo (za 24,2 %) več kot pri primerjalni betonski mešanici KNJ1 našega eksperimenta. Drobnege agregata je bilo pri betonski mešanici TKN1 $800 \text{ kg}/m^3$ in ga je bilo (za 29,7 %) manj kot pri primerjalni betonski mešanici našega eksperimenta. Raziskovalca Swamy in Stavrides ne navajata podatkov o količini grobega in drobnega agregata v betonski mešanici S1. Vodovezivno razmerje pri sveži betonski mešanici KNJ1 našega eksperimenta je znašalo 0,52 in je bilo manjše kot vodovezivno razmerje primerjalne betonske mešanice TKN1 pri Barru in Badnu, kjer je znašalo 0,56. Primerjalna betonska mešanica Swamyja in Stevradesa ima manjše vodovezivno razmerje (0,42) kot primerjalna betonska mešanica KNJ1 v našem eksperimentu. Swamy in Stavrides sta raziskovala vpliv jeklenih vlaken s premerom 0,51 mm in dolžine 38,1 mm pri prostorninskem deležu 0,50 % in 1,00 % na celotno krčenje vlaknastega betona. Barr in Baden pa sta raziskovala vpliv jeklenih vlaken pri prostorninskem deležu od 1,00 % do 3,00 % na celotno krčenje vlaknastega betona normalne trdnosti. V svojem prispevku ne navajata geometrijskih značilnosti uporabljenih jeklenih vlaken.

Barr in Baden (2003) sta raziskovala celotno krčenje vlaknastega betona na preskušancih v obliki prizem dimenzij 76 x 76 x 254 mm, izpostavljenih okolju s temperaturo $20 \text{ }^\circ\text{C}$ in relativno vlažnostjo $65 \pm 5 \%$. Preskušanci vlaknastega betona, uporabljeni v naši eksperimentalni raziskavi celotnega krčenja, pa so bili dimenzij 100 x 100 x 400 mm in so bili izpostavljeni okolju s temperaturo $22 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ in relativno vlažnostjo $70 \pm 5 \%$. Swamy in Stavrides sta preskušance v obliki prizem dimenzij 102 x 102 x 508 mm, brez vlaknaste armature in z njo po 24 urah od zamešanja izpostavila okolju s temperaturo $16 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ in relativno vlažnostjo $50 \pm 2 \%$. Pogoji izvedbe primerjanih raziskav so različni, kar zmanjšuje vrednost primerjave rezultatov. Žal pa tujih eksperimentalnih raziskav, ki bi bile skladnejše z našimi eksperimenti, v literaturi nismo našli.

S slike 4.90 je razvidna primerjava med celotnim krčenjem betona normalne trdnosti brez vlaken KNJ1 v našem eksperimentu in celotnim krčenjem primerjalnih betonov raziskovalcev Barra in Badna (TKN1) ter Swamyja in Stavridesa (S1).

Celotno krčenje betona normalne trdnosti TKN1 Barra in Badna je od vseh primerjalnih betonov največje in je pri 20 dneh od priprave preskušancev za 30 % večje, pri 70 dneh od izdelave preskušancev pa za 33 % večje od celotnega krčenja primerjalnega betona brez vlaken KNJ1 (slika 4.90). Potek krivulje, ki prikazuje celotno krčenje betona normalne trdnosti Swamyja in Stavridesa, je večinoma med krivuljo celotnega krčenja betona brez vlaken (KNJ1) v našem eksperimentu in krivuljo celotnega krčenja primerjalnega betona (TKN1) Barra in Badna. 20. dan od izdelave preskušancev je celotno krčenje betona brez vlaken raziskovalca Swamyja in Stavridesa (S1) približno enako celotnemu krčenju primerjalnega betona v našem eksperimentu (KNJ1) in za približno 30 % manjše od celotnega krčenja betona (TKN1) Barra in Badna. Po 70 dneh od izdelave preskušancev pa je celotno krčenje betona raziskovalcev Swamyja in Stavridesa (S1) za 15 % manjše od celotnega krčenja betona (TKN1) pri Barra in Badnu in za 20 % večje od celotnega krčenja primerjalnega betona (KNJ1) v našem eksperimentu.

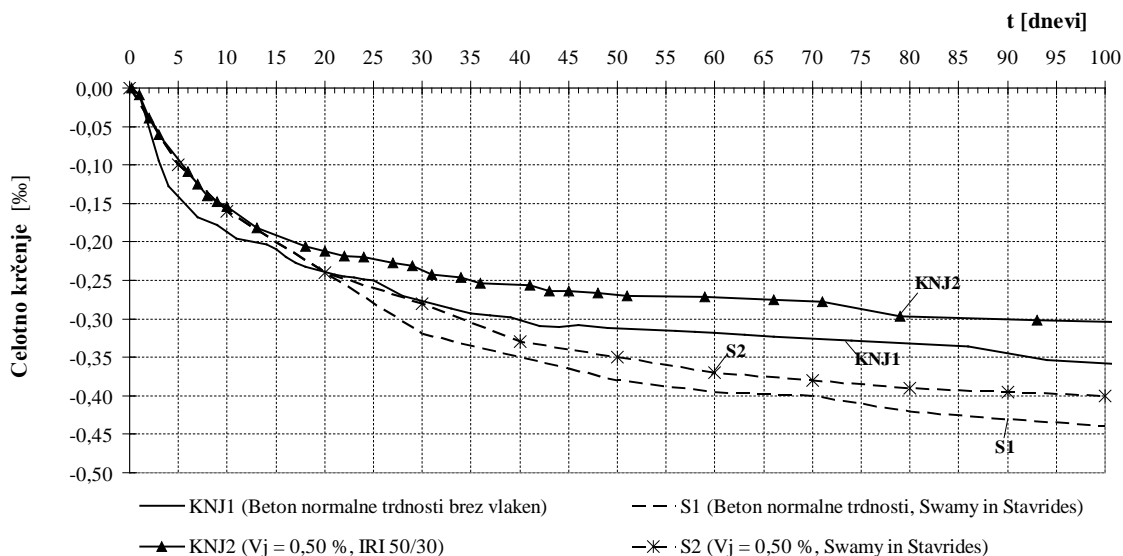
Preskušanci betona normalne trdnosti Barra in Badna imajo manjše razmerje med prostornino in površino preskušanca kot preskušanci v naši eksperimentalni raziskavi krčenja. Predvidevamo, da je večje celotno krčenje betona normalne trdnosti (TKN1) Barra in Badna pri približno enaki sestavi sveže betonske mešanice kot (KNJ1) v našem eksperimentu delno lahko tudi posledica manjšega razmerja med prostornino in površino preskušancev. Mehta (2006) navaja, da je krčenje preskušancev z manjšim razmerjem med prostornino in površino pri konstantni vlagi okolja zaradi krajše poti pri prenosu vlage v okolico večje od krčenja preskušancev z večjim razmerjem med prostornino in površino. Predvidevamo, da je krčenje betona brez vlaken (S1) pri Swamyju in Stavridesu večje od krčenja primerjalnega betona (KNJ1) v našem eksperimentu, delno tudi zaradi manjše relativne vlage okolja.



Slika 4.90: Časovni razvoj celotnega krčenja preskušancev iz betona normalne trdnosti naših (KNJ1) in tujih (TKN1 in S1) eksperimentalnih raziskav.

Figure 4.90: Time development of total shrinkage of test specimens made of normal strength concrete of own (KNJ1) and literature (TKN1 in S1) experimental results.

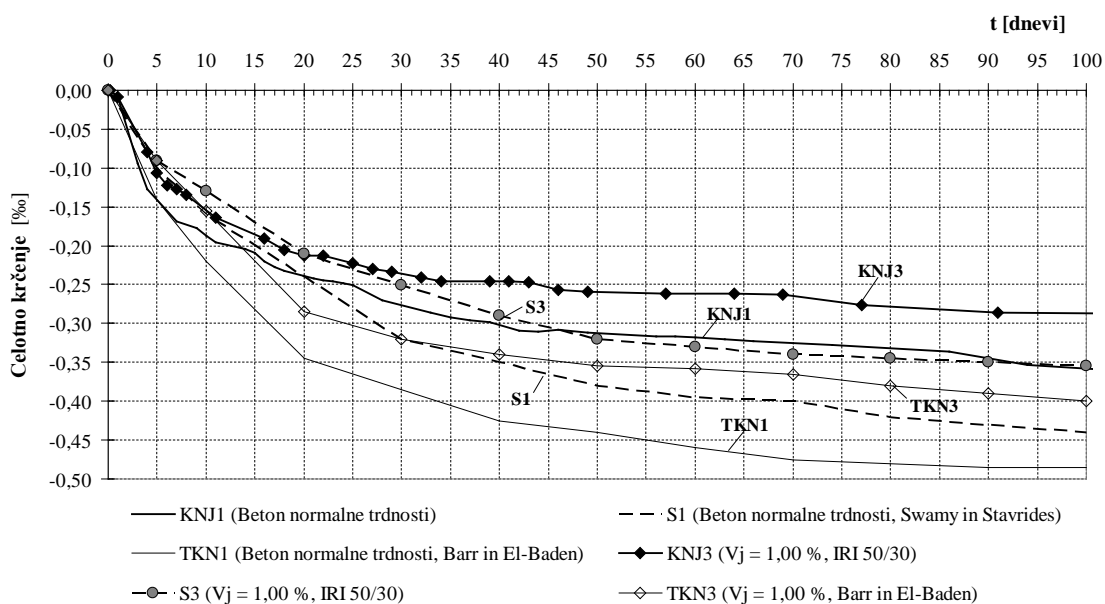
Na sliki 4.91 so prikazani rezultati naših eksperimentalnih raziskav celotnega krčenja vlaknastega betona (KNJ2) z 0,50 % jeklenih vlaken in rezultati celotnega krčenja pri enaki vsebnosti vlaken v kompozitu po raziskavah Swamya in Stevridesa. Celotno krčenje vlaknastih betonov z 0,50 % jeklenih vlaken je tako po naših kakor tudi po tujih eksperimentalnih raziskavah celotnega krčenja vlaknastega betona, ki sta jih opravila Swamy in Stevrides, manjše od celotnega krčenja primerjalnih betonov normalne trdnosti brez vlaknaste armature.



Slika 4.91: Potek celotnega krčenja vlaknastih betonov normalne trdnosti z 0,50 % jeklenih vlaken in primerjalnega betona brez vlaken po tujih in naših eksperimentalnih raziskavah.

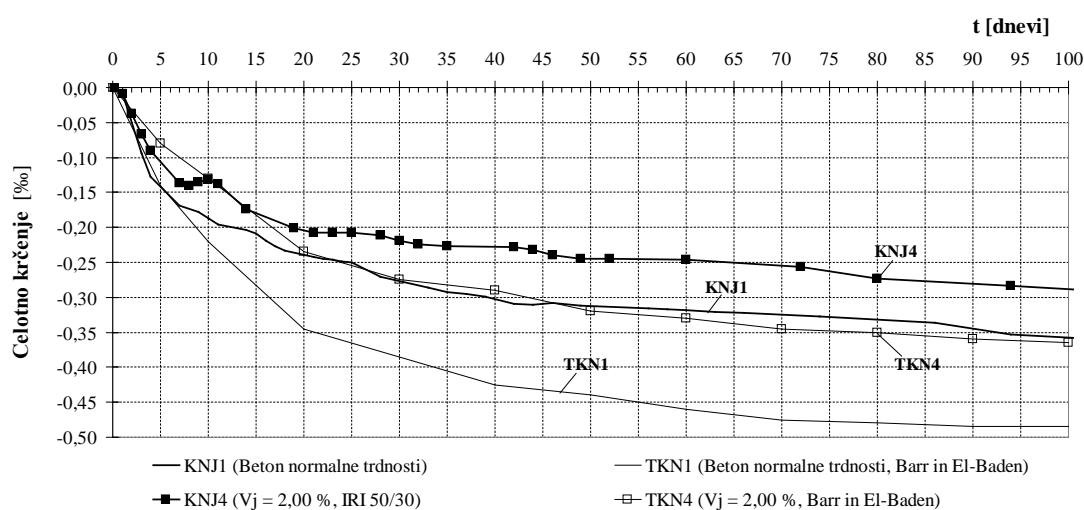
Figure 4.91: Time development of total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete containing 0,50 % steel fibre and comparable concrete without fibre at foreign and own experimental research.

Rezultati naših eksperimentalnih raziskav celotnega krčenja vlaknastega betona z 1,00 % jeklenih vlaken (KNJ3) in rezultati celotnega krčenja kompozitov S3 in TKN3 z enako vsebnostjo jeklenih vlaken po raziskovalcih Swamyju in Stevridesu oziroma Barra in Badnu so na sliki 4.92 prikazani skupaj s celotnim krčenjem primerjalnih betonov brez vlaken. Celotno krčenje vlaknastega betona pri 2,00 % deležu jeklenih vlaken in celotno krčenje betona brez vlaken po naših eksperimentalnih raziskavah in po raziskavah Barra in Badna je prikazano na sliki 4.93.



Slika 4.92: Potek celotnega krčenja vlaknastih betonov normalne trdnosti z 1,00 % vlaken in primerjalnega betona brez vlaken po tujih in naših eksperimentalnih raziskavah.

Figure 4.92: Time development of total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete containing 1,00 % fibres and comparable concrete without fibres; comparison of literature and own experimental results.



Slika 4.93: Potek celotnega krčenja vlaknastih betonov normalne trdnosti z 2,00 % vlaken in primerjalnega betona brez vlaken po tujih in naših eksperimentalnih raziskavah.

Figure 4.93: Time development of total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete containing 2,00 % of fibres and comparable concrete without fibres; comparison of literature and own experimental results.

Iz primerjave krčenja vlaknastega betona normalne trdnosti po tujih in naših raziskavah (slika 4.92 in slika 4.93) ugotavljamo, da je celotno krčenje kompozitov z jekleno vlaknasto armaturo manjše od celotnega krčenja primerjalnega betona brez vlaknaste mikroarmature. Pri tem pa je celotno krčenje kompozita oziroma betona brez vlaknaste mikroarmature po naših raziskavah nekoliko manjše kot po tujih raziskavah. Ocenjujemo, da so te kvantitativne razlike posledica neenake sestave svežih mešanic in različnih pogojev okolja. Podobnejših rezultatov tujih eksperimentalnih preiskav kompozitov in betonov ter pogojev okolja, ki smo primerjali z rezultati svojih raziskav, v strokovni literaturi nismo našli.

Primerjava in ocena, vrednotenje naših in tujih eksperimentalnih rezultatov

Vpliv vsebnosti 0,50 %, 1,00 % in 2,00 % jeklenih vlaken na zmanjšanje celotnega krčenja vlaknastega betona normalne trdnosti v primerjavi s celotnim krčenjem primerjalnega betona po naših in tujih eksperimentalnih raziskavah, ki so jih opravili Barr in Baden ter Swamy in Stevrides, je razviden na sliki 4.94.

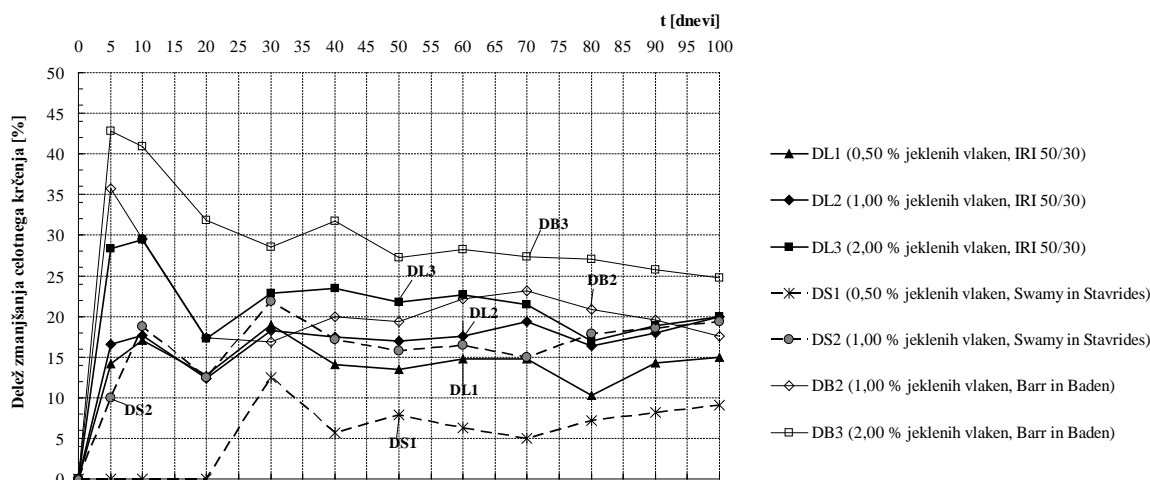
Vpliv 0,50 % deleža jeklenih vlaken IRI 50/30 na zmanjšanje celotnega krčenja kompozita po naših eksperimentalnih raziskavah je večji od vpliva istega deleža jeklenih vlaken na zmanjšanje celotnega krčenja po raziskavah Swamyja in Stevridesa. V prvih 20 dneh od priprave preskušancev 0,50 % delež jeklenih vlaken po Swamyju in Stevridesu le minimalno vpliva na zmanjšanje celotnega krčenja kompozita, medtem ko se po naših eksperimentalnih raziskavah celotno krčenje kompozita zaradi enake vsebnosti jeklenih vlaken v kompozitu v primerjavi s celotnim krčenjem betona brez vlaken zmanjša za najmanj 12 %. Od 20. do 100. dne od priprave preskušancev se celotno krčenje kompozita zaradi 0,50 % deleža jeklenih vlaken po Swamyju in Stevridesu zmanjša za najmanj 6 %. Po naših eksperimentalnih raziskavah pa se od 20. do 100. dne od priprave preskušancev celotno krčenje kompozita zaradi 0,50 % deleža jeklene mikroarmature v primerjavi s celotnim krčenjem primerjalnega betona brez vlaken zmanjša za najmanj 10 % (slika 4.90).

Kou in Poon (2007) navajata, da se z uporabo elektrofiltrskega pepela za delno nadomeščanje cementa v betonu normalne trdnosti krčenje zaradi sušenja zmanjša. Primerjalni beton S1 in vlaknasti beton S2 Swamyja in Stavridesa poleg cementa vsebuje tudi elektrofiltrski pepel. Predvidevamo, da ta pomembno dodatno vpliva na krčenje betona in kompozita. Jeklena vlakna vplivajo na zmanjšanje krčenja kompozita, elektrofiltrski pepel pa povzroči še dodatno zmanjševanje krčenja. Zato je vpliv 0,50 % vsebnosti jeklenih vlaken na zmanjšanje celotnega krčenja kompozita po naših eksperimentalnih raziskavah večji od vpliva enake vsebnosti vlaken po raziskavah Swamyja in Stevridesa.

S primerjavo vpliva 1,00 % jeklene vlaknaste armature na celotno krčenje kompozita po naših eksperimentalnih raziskavah in po raziskavah Swamyja in Stevridesa ugotavljamo, da je vpliv iste vsebnosti jeklenih vlaken na celotno krčenje kompozita med celotnimi meritvami po raziskavah Swamyja in Stevridesa nekoliko večji. Vpliv 1,00 % deleža jeklene vlaknaste mikroarmature na celotno krčenje kompozita pri Barru in Badnu je večji kot vpliv iste vsebnosti jeklenih vlaken v našem

eksperimentu in raziskavi, ki sta jo opravila Swamy in Stevrides. Največje odstopanje (za največ 19 %) med vplivom 1,00 % deleža jeklenih vlaken v eksperimentalnih raziskavah celotnega krčenja kompozita pri Barru in Badnu ter vplivom iste vsebnosti jeklenih vlaken glede na celotno krčenje v našem eksperimentu opazamo v prvih 20 dneh od priprave preskušancev. Vpliv 2,00 % deleža jeklene vlaknaste armature na celotno krčenje kompozita je po naših eksperimentalnih raziskavah v prvih 20 dneh od priprave preskušancev za približno 14 %, na koncu meritev pa približno za 9 % večji od vpliva enake vsebnosti jeklenih vlaken na celotno krčenje kompozita po raziskavah Barra in Badna.

Predvidevamo, da se vplivi enakega deleža vlaken na celotno krčenje kompozita po raziskavah Barra in Badna, Swamyja in Stevridesa ter po naših eksperimentalnih raziskavah med seboj razlikujejo predvsem zaradi neenakih sestav svežih mešanic betonov oziroma kompozitov, neenakih dimenzij preskušancev, neenakih pogojev okolja. Poleg tega Barr in Baden ne definirata geometrijskih značilnosti vlaken.



Slika 4.94: Vpliv 0,50 %, 1,00 % in 2,00 % deleža jeklenih vlaken na zmanjšanje celotnega krčenja kompozita normalne trdnosti po naših in tujih eksperimentalnih raziskavah.

Figure 4.94: Influence of 0,50 %, 1,00 % and 2,00 % of steel fibres content on reduction of total shrinkage of normal strength composite; comparison of own and literature experimental results.

Na podlagi primerjave vpliva različnih deležev jeklenih vlaken na celotno krčenje kompozita po naših in tujih eksperimentalnih raziskavah celotnega krčenja vlaknastega betona normalne trdnosti ugotavljamo, da se s povečevanjem vsebnosti jeklenih vlaken v kompozitu celotno krčenje kompozita zmanjšuje.

4.9 Lezenje vlaknastih betonov normalne trdnosti

Pri eksperimentalnih raziskavah lezenja vlaknastega betona normalne trdnosti smo ugotavljali vpliv različne vsebnosti daljših in krajših jeklenih vlaken. Za vse preiskovane vlaknaste betone smo izdelali po štiri prizme z dimenzijami 10 x 10 x 40 cm in po tri kocke z robom 15 cm. Preskušance vlaknastega betona normalne trdnosti smo po 24 urah od izdelave še 6 dni negovali v vodi. Po 7 dneh od izdelave pa smo preskušance izpostavili okolju s temperaturo $22^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ in relativno vlažnostjo $70\% \pm 3\%$.

Na preskušance smo pred eksperimentalno raziskavo lezenja namestili merilne reperje. Postavili smo jih na vzdolžni nasprotni stranici preskušancev, med seboj oddaljeni 25,4 cm. Na vsako izmed nasproti ležečih ploskev preskušancev smo s sekundnim lepilom prilepili po dva reperja. Izmerili smo začetno vrednost med reperjema in ju naslednji dan dodatno utrdili z dvokomponentnim lepilom za sveži beton proizvajalca Sika.

Izmerjeni časovni prirastek deformacije preiskovanega vlaknastega betona vsebuje časovni prirastek lezenja in prispevka deformacije zaradi lezenja ter časovni prirastek deformacije zaradi krčenja vlaknastega betona. Dejansko deformacijo zaradi lezenja vlaknastega betona normalne trdnosti dobimo tako, da od izmerjene skupne deformacije odštejemo deformacijo zaradi krčenja kompozita, ki smo jo izmerili na vzporednih neobremenjenih preskušancih iz enakega kompozita, hranjenih v istih pogojih. Na dveh neobremenjenih prizmah iz vsake mešanice vlaknastega betona smo tako merili krčenje vlaknastega betona, na preostalih dveh prizmah, ki smo ju v ustreznih jarmih (slika 4.95) obremenili z 10 MPa trajne tlačne napetosti, pa celotne deformacije oziroma časovne prirastke celotnih deformacij vlaknastega betona. Iz razlike izmerjenih medsebojnih oddaljenosti merskih reperjev pred in takoj po vnosu trajne tlačne napetosti 10 MPa, ki predstavlja 22 % nominalne srednje tlačne trdnosti 28 dni starega vlaknastega betona, smo določili začetno elastično deformacijo vlaknastega betona. Časovni potek lezenja vlaknastega betona smo določili z razliko izmerjenih časovnih prirastkov deformacije obremenjenih preskušancev in časovnih prirastkov izmerjenega krčenja vzporednih neobremenjenih preskušancev iz iste mešanice kompozita, hranjenih v istih pogojih.



Slika 4.95: Prizme iz vlaknastega betona, vpete v jeklene jarme za preiskavo lezenja vlaknastega betona.
Figure 4.95: Prism of fibre reinforced concrete fixed in steel frame for creep research of fibre reinforced concrete.

Jarmi, ki so prikazani na sliki 4.95, so konstruirani tako, da omogočajo dolgotrajno vzdrževanje konstantne obremenitve preskušancev kljub majhnim časovnim spremembam njihovih dolžin. Kljub temu pa smo za primerjavo merili tudi časovno spreminjanje tlačne obremenitve oziroma napetosti preskušancev. Predpisano obtežbo smo na preskušance nanašali s hidravličnim batom kapacitete 250 kN. Raven vnesene tlačne osne sile v preskušancih smo ves čas elektronsko spremljali z odmerki, ki so bili nameščeni med zgornjimi preiskovanimi preskušanci jarmov vlaknastega betona. Izmerjeno časovno spreminjanje tlačne sile v preskušancih je bilo zanemarljivo. Poleg tega pa gre pri obravnavanih raziskavah lezenja vlaknastega betona zaradi nizke ravni tlačne napetosti ($\sigma_c = 0,20 f_{ck}$) za linearno teorijo lezenja, pri kateri je količnik lezenja vlaknastega betona $\varphi(t, t_0)$ neodvisen od stopnje napetosti. Zaradi tega pri izbrani ravni nazivnih tlačnih napetosti preskušancev majhno spreminjanje tlačne osne sile oziroma napetosti ne vpliva na lezenje preskušancev.

Meritve lezenja in krčenja smo izvajali z nasadnim deformetrom z natančnostjo 0,001 mm (slika 4.6). Z meritvami krčenja in lezenja smo začeli po 24-urnem odležanju preskušancev v kalupih in dodatni 6-dnevni negi v vodi. Meritve celotnih deformacij krčenja kompozita smo izvajali v dnevnikih, pozneje pa v nekajdnevnikih oziroma tedenskih presledkih.

Rezultati meritev lezenja in krčenja vlaknastih betonov normalne trdnosti z jeklenimi vlakni

Rezultati eksperimentalnih meritev lezenja in krčenja preskušancev vlaknastega betona normalne trdnosti z različnimi deleži daljših oziroma krajših jeklenih vlaken so v nadaljevanju predstavljeni v tabelarni in grafični obliki. V preglednici so podane povprečne vrednosti krčenja in lezenja preskušancev, izpostavljenih sušenju pri temperaturi $22 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ in relativni vlagi okolja $70 \% \pm 3 \%$. Srednja vrednost krčenja vlaknastega betona zaradi sušenja je določena kot povprečje izmerjenega krčenja na dveh nasprotnih stranicah preskušancev vlaknastega betona. Rezultati meritev krčenja in lezenja vlaknastega betona so v preglednici 4.18 ter na slikah 4.96 in 4.97.

Rezultati meritev lezenja in krčenja betonov normalne trdnosti z dodanimi jeklenimi vlakni

Srednje vrednosti krčenja in lezenja vlaknastega betona z različno vsebnostjo daljših in krajših jeklenih vlaken po 7, 8, 28 in 90 dneh od izdelave preskušancev so v preglednici 4.18.

Preglednica 4.18: Krčenje in lezenje vlaknastih betonov normalne trdnosti z jeklenimi vlakni v ‰o pri času t.

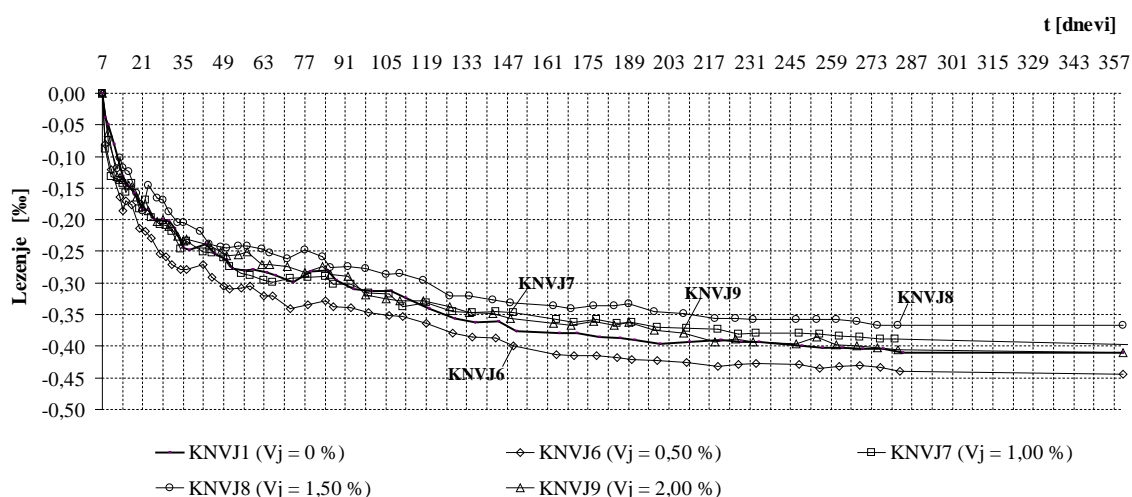
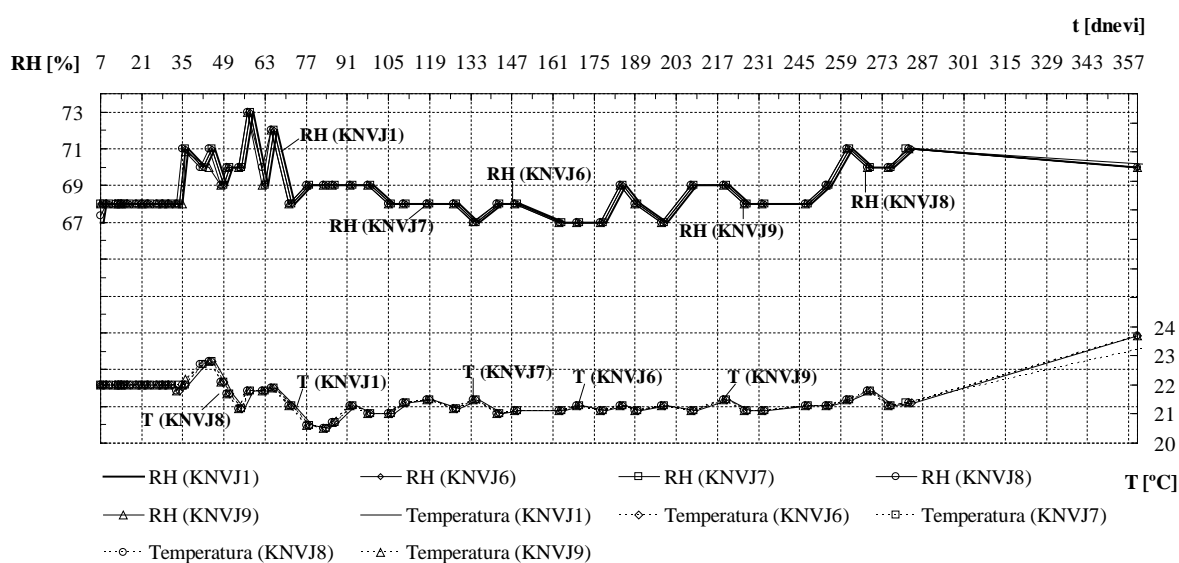
Table 4.18: Shrinkage and creep of normal strength steel fibres reinforced concrete in ‰o at time t

Kompozit	Srednja vrednost in standardni odklon krčenja preskušancev pri RH = 70 % [‰o]							
	Srednja vrednost in standardni odklon lezenja preskušancev pri RH = 70 % [‰o]							
	Starost kompozita v času meritve t							
	7 dni		8 dni		28 dni		90 dni	
KNVJ1	0,000	±0,000	-0,008	±0,006	-0,156	±0,011	-0,274	±0,011
	0,000	±0,000	-0,038	±0,013	-0,200	±0,018	-0,295	±0,033
KNVJ2	0,000	±0,000	-0,004	±0,011	-0,138	±0,019	-0,259	±0,015
	0,000	±0,000	-0,038	±0,011	-0,181	±0,014	-0,251	±0,017
KNVJ3	0,000	±0,000	-0,004	±0,000	-0,125	±0,001	-0,236	±0,011
	0,000	±0,000	-0,049	±0,011	-0,230	±0,012	-0,370	±0,019
KNVJ4	0,000	±0,000	-0,024	±0,008	-0,153	±0,007	-0,154	±0,006
	0,000	±0,000	-0,031	±0,014	-0,220	±0,001	-0,334	±0,015
KNVJ5	0,000	±0,000	-0,018	±0,006	-0,136	±0,000	-0,230	±0,019
	0,000	±0,000	-0,053	±0,033	-0,247	±0,001	-0,330	±0,017
KNVJ6	0,000	±0,000	-0,022	±0,019	-0,144	±0,036	-0,256	±0,033
	0,000	±0,000	-0,080	±0,032	-0,254	±0,014	-0,340	±0,035
KNVJ7	0,000	±0,000	-0,005	±0,001	-0,165	±0,014	-0,256	±0,013
	0,000	±0,000	-0,089	±0,013	-0,210	±0,057	-0,302	±0,067
KNVJ8	0,000	±0,000	-0,027	±0,004	-0,172	±0,010	-0,277	±0,001
	0,000	±0,000	-0,075	±0,004	-0,168	±0,008	-0,275	±0,008
KNVJ9	0,000	±0,000	-0,026	±0,003	-0,194	±0,006	-0,260	±0,011
	0,000	±0,000	-0,062	±0,004	-0,200	±0,018	-0,289	±0,019

Vpliv prostorninskega deleža krajših jeklenih vlaken na časovni potek lezenja vlaknastega betona normalne trdnosti

Časovne prirastke deformacij zaradi lezenja kompozita smo določili z razliko izmerjenih časovnih prirastkov celotnih deformacij obremenjenih preskušancev in deformacij zaradi krčenja neobremenjenih preskušancev, ki smo jih izmerili na vzporednih preskušancih proučevanega kompozita. Rezultati meritev celotnega krčenja vlaknastega betona z različnimi deleži krajših oziroma daljših jeklenih vlaken, ki je pred začetkom meritev en dan odležal v kalupih, naslednjih 6 dni pa v vodi, so prikazani na sliki 4.86 oziroma 4.87.

Lezenje vlaknastih betonov z 1,00 % (KNVJ7), 1,50 % (KNVJ8) oziroma 2,00 % (KNVJ9) prostorninskim deležem krajših jeklenih vlaken (slika 4.96) je med celotnimi meritvami do 11 % manjše kot lezenje primerjalnega betona brez vlaken. Lezenje vlaknastega betona z 0,50 % (KNVJ6) prostorninskim deležem krajših jeklenih vlaken pa je približno do 8 % večje od lezenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature.



Slika 4.96: Časovni razvoj lezenja vlaknastega betona normalne trdnosti z 0 %, 0,50 %, 1,00 %, 1,50 % oziroma 2,00 % prostorninskim deležem krajših jeklenih vlaken IRI 50/16.

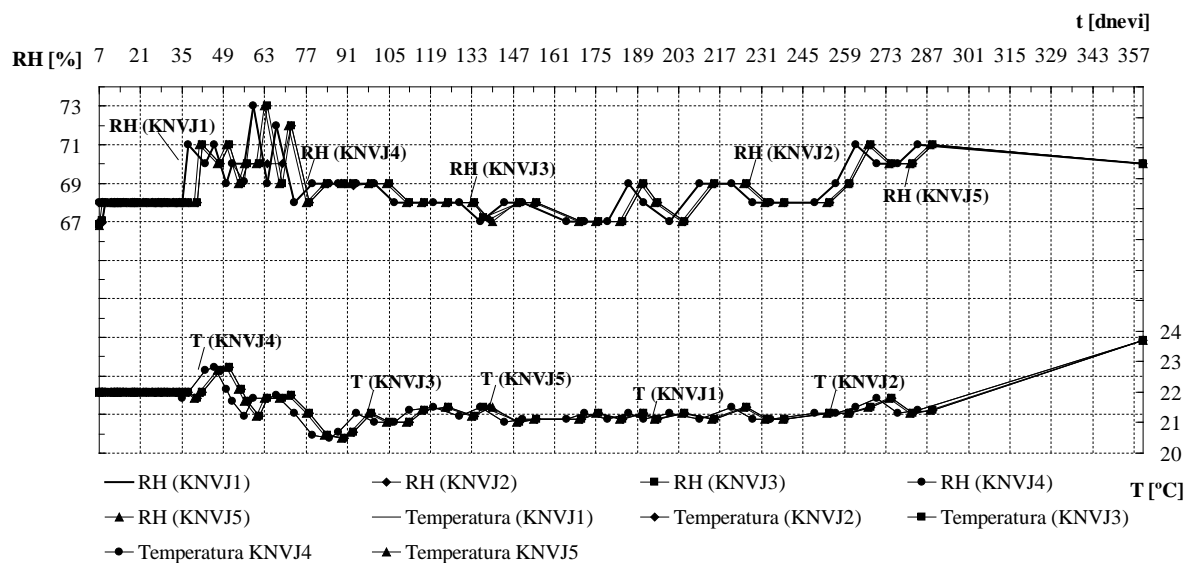
Figure 4.96: Time development of creep of fibre reinforced normal strength concrete containing 0 %, 0,50 %, 1,00 %, 1,50 % or 2,00 % of shorter steel fibres IRI 50/16.

Pri 0,50 % krajših jeklenih vlaken neugoden učinek zmanjšanja homogenosti kompozita zaradi vsebovanih vlaken prevlada nad ugodnim učinkom povečanja togosti in trdnosti kompozita. To povzroči povečanje lezenja kompozita, ki je v povprečju približno za 8 % večje od lezenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature. Pri kompozitih z 1,00 % oziroma 2,00 % kratkih jeklenih vlaken pa ugoden učinek povečanja trdnosti in togosti kompozita zaradi vsebovanih vlaken prevlada nad neugodnim učinkom vlaken zaradi zmanjšanja homogenosti kompozita. Iz tega razloga je lezenje kompozita z 1,00 % in 1,50 % kratkih vlaken v povprečju približno za 11 % manjše od lezenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature. Razlika v časovnem poteku lezenja kompozita z 2,00 % prostorninskim deležem krajših jeklenih vlaken in lezenjem primerjalnega betona brez vlaken je sorazmerno majhna. Vpliv ugodnega učinka povečanja togosti in trdnosti, ki zmanjšuje lezenje

kompozita, je pravzaprav enak neugodnemu učinku zmanjšanja homogenosti kompozita, ki povečuje njegovo lezenje.

Vpliv prostorninskega deleža daljših jeklenih vlaken na časovni potek lezenja vlaknastega betona normalne trdnosti

Lezenje vlaknastih betonov z 1,00 %, 1,50 % oziroma 2,00 % daljših jeklenih vlaken (slika 4.97) je v celotnem obravnavanem časovnem območju enako ali večje od lezenja primerjalnega betona brez vlaknaste mikroarmature. Lezenje vlaknastega betona z 1,50 % vlaken je med tremi obravnavanimi kompoziti najmanjše in je do 49. dne od izdelave preskušancev približno enako lezenju primerjalnega betona brez vlaken, od 49. do 127. dne od izdelave preskušancev pa je v povprečju približno za 6 % večje od lezenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature. Za kompozite z 2,00 % daljših jeklenih vlaken je v celotnem času izvajanja meritev med vsemi tremi obravnavanimi kompoziti značilno največje lezenje. Od 7. do 20. dne se razlika med lezenjem kompozita z 1,00 % vlaken in lezenjem primerjalnega betona brez vlaknaste armature povečuje tako, da 20. dan po zabetoniranju preskušancev znaša približno 20 %. V preostalem času meritev se ta razlika rahlo spreminja, v povprečju pa znaša okoli 14 %. Lezenje kompozitov z 1,00 %, 1,50 % in 2,00 % dolgih jeklenih vlaken je od 127. dne do konca meritev skoraj enako in za 11 % večje kot lezenje primerjalnega betona brez vlaken. Lezenje kompozita z 0,50 % vlaken pa je do 12 % manjše od lezenja primerjalnega betona brez vlaken.

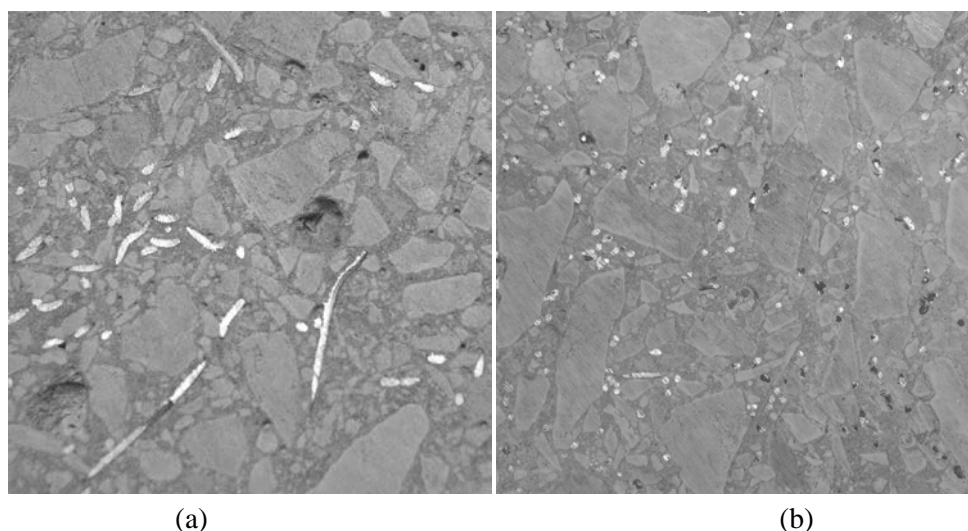


Slika 4.97: Časovni razvoj lezenja preskušancev vlaknastega betona normalne trdnosti z 0 %, 0,50 %, 1,00 % 1,50 % oziroma 2,00 % prostorninskim deležem daljših jeklenih vlaken IRI 50/30.

Figure 4.97: Time development of creep of fibre reinforced normal strength concrete containing 0 %, 0,50 %, 1,00 %, 1,50 % or 2,00 % of longer steel fibres IRI 50/30.

Iz rezultatov eksperimentalnih raziskav lezenja z jeklenimi vlakni mikroarmiranega kompozita izhaja, da je vpliv jeklene vlaknaste mikroarmature na lezenje kompozita sorazmerno majhen. Pri tem pa je vpliv krajših jeklenih vlaken, pri katerih se s povečevanjem deleža vlaken lezenje kompozita zmanjšuje (slika 4.96), ugodnejši od vpliva daljših jeklenih vlaken, pri katerih se s povečevanjem vsebnosti jeklenih vlaken prek 0,50 % lezenje kompozita celo povečuje (slika 4.97). Vpliv jeklene vlaknaste mikroarmature na mehanske lastnosti kompozita je večplasten. Po eni strani jeklena vlakna, ki delno prečkajo mikrorazpoke, prevzamejo del cepilnih sil kompozita, s čimer se tlačna trdnost in togost kompozita (s povečevanjem vsebnosti vlaken) povečujeta, s tem pa se lezenje kompozita zmanjšuje. Po drugi strani se s povečevanjem vsebnosti vlaknaste armature poslabšuje vgradljivost in zmanjšuje homogenost kompozita, še posebno ob gnezdenju vlaken, kar povzroči zmanjševanje tlačne trdnosti in togosti ter s tem večanje lezenja kompozita.

S svojimi eksperimentalnimi raziskavami smo ugotovili, da se pri vgrajevanju kompozita velik del vlaken usmeri približno pravokotno na smer vgrajevanja (slika 4.98), kar je izrazitejše pri daljših kot pri krajših vlaknih. To našo ugotovitev potrjujejo tudi raziskave drugih avtorjev (Soroushian in Lee, 1990, ter Edgington in Hannant, 1972). Naši preskušanci so bili izdelani tako, da se je kompozit vgrajeval v ležeče kalupe, zato ocenjujemo, da se je večji delež vlaken v preskušancih usmeril vzdolžno, kar ustreza smeri tlačne obremenitve preskušancev. Iz tega sledi, da le manjši del vlaken prečka vzdolžne razpoke v preskušancih, ki zaradi prečnih nateznih napetosti oziroma cepilnih sil v preskušancih potekajo približno vzporedno s smerjo prevladujočih tlačnih napetosti preskušancev. Zaradi tega vlakna v kompozitu zelo malo prispevajo k zmanjšanju vzdolžnih razpok in k povečanju tlačne trdnosti in togosti ter k posledičnemu zmanjšanju lezenja kompozita. Kateri izmed omenjenih nasprotujočih si vplivov vlaken v kompozitu prevlada, pa je odvisno zlasti od vrste in količine vlaken ter stopnje zgostitve oziroma homogenosti kompozita.



Slika 4.98: (a) Vzdolžni horizontalni prerez betonskega preskušanca, ki vsebuje daljša jeklena vlakna IRI 50/30, (b) in prečni prerez betonskega preskušanca, ki vsebuje krajša jeklena vlakna IRI 50/16.

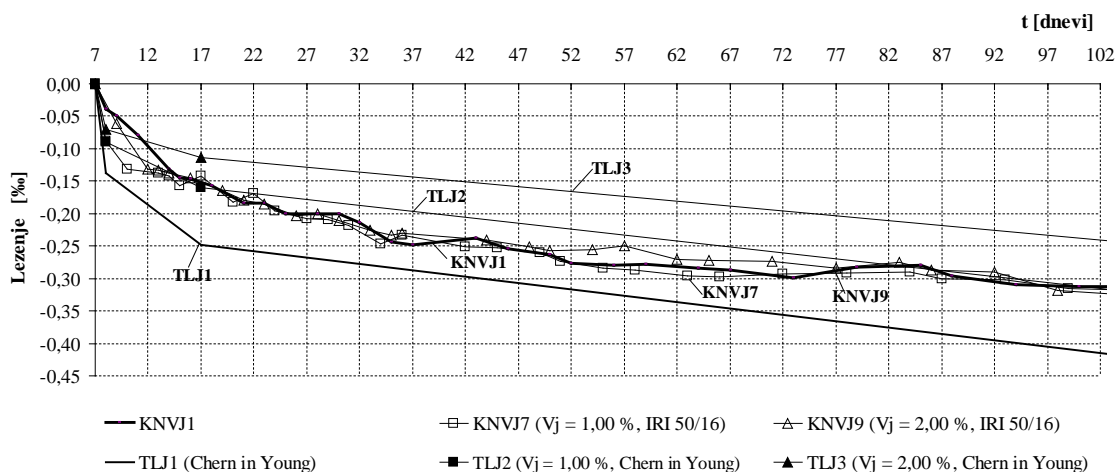
Figure 4.98: (a) Longitudinal horizontal section of concrete specimen containing longer steel fibers IRI 50/30 (b) and cross section of concrete specimen containing shorter steel fibers IRI 50/16.

Primerjava naših in tujih rezultatov eksperimentalnih raziskav lezenja vlaknastih betonov normalne trdnosti z različnimi deleži krajših jeklenih vlaken

Rezultate svojih eksperimentalnih raziskav lezenja vlaknastih betonov in primerjalnih betonov normalne trdnosti smo primerjali z dosegljivimi rezultati eksperimentalnih raziskav lezenja vlaknastih betonov in primerjalnih betonov brez mikroarmature tujih raziskovalcev.

Chern in Young (1989) sta raziskovala vpliv 1,00 % oziroma 2,00 % deleža dodanih karbonskih vlaken na lezenje vlaknastega betona normalne trdnosti. Sveža mešanica primerjalnega betona normalne trdnosti (TLJ1) Cherna in Younga je vsebovala 427,8 kg veziva, 855,6 kg grobega agregata in 855,6 kg drobnega agregata na 1 m³ kompozita. Vodovezivno razmerje pa je bilo 0,50. Primerjalni beton brez vlaken (KNVJ1), ki smo ga v naših eksperimentalnih raziskavah uporabili za primerjalne preskušance, pa je vseboval 400 kg veziva, 702 kg grobega agregata in 1054 kg drobnega agregata v 1 m³ betona. Vodovezivno razmerje je bilo 0,52. V svojih eksperimentalnih raziskavah smo uporabili jeklena vlakna dolžine 16 mm, ki so bila zakrivljena na konceh, medtem ko sta Barr in Baden, katerih eksperimentalne rezultate bomo primerjali s svojimi, uporabila ravna karbonska vlakna dolžine 19 mm. Chern in Young sta preskušance v obliki valjev dimenzij 150 x 300 mm 24 ur po izdelavi izpostavila okolju s temperaturo 23 °C in relativno vlažnostjo 50 %, medtem ko smo mi preskušance primerjalnega betona v obliki prizem dimenzij 100 x 100 x 400 mm 24 ur po njihovi izdelavi 6 dni negovali v vodi in jih izpostavili okolju s temperaturo 22 °C ± 2 °C in relativno vlažnostjo 70 % ± 3 %. Chern in Young sta preskušance primerjalnega betona normalne trdnosti in vlaknastega betona z 1,00 % in 2,00 % karbonskih vlaken po 7 dneh od njihove izdelave obremenila s tlačno napetostjo 9 MPa, ki predstavlja 25 % nominalne srednje tlačne trdnosti 28 dni starega vlaknastega betona. V naših raziskavah smo 7 dni preskušance po izdelavi obremenili s tlačno napetostjo 10 MPa, ki predstavlja 22 % nominalne srednje tlačne trdnosti 28 dni starega vlaknastega betona.

Sveži mešanici betona normalne trdnosti v naših raziskavah in v eksperimentalnih raziskavah Cherna in Younga po sestavi nista podobni, zato smo primerjali vpliv 1,00 % in 2,00 % deleža vlaken na lezenje kompozita v primerjavi z lezenjem primerjalnega betona brez vlaknaste mikroarmature.



Slika 4.99: Časovni razvoj lezenja vlaknastega betona normalne trdnosti z 0 %, 1,00 % in 2,00 % prostorninskim deležem jeklenih vlaken po naših oziroma z enakimi deleži karbonskih vlaken po tujih eksperimentalnih raziskavah.

Figure 4.99: Time development of creep of fibre reinforced normal strength concrete containing 0 %, 1,00 % and 2,00 % steel fibre in own or with the same content of carbon fibres in literature experimental results.

Lezenje vlaknastega betona z 1,00 % karbonskih vlaken, ki sta ga raziskovala Chern in Young, je 17. oziroma 72. dan od izdelave preskušancev približno za 35 % oziroma 25 % manjše od lezenja primerjalnega betona normalne trdnosti (TLJ1) brez mikroarmature. V končnem času je lezenje vlaknastega betona z 1,00 % karbonskih vlaken (TLJ2) približno za 25 % manjše od lezenja primerjalnega betona brez vlaken (TLJ1). Lezenje vlaknastega betona (KNVJ7) z 1,00 % krajših jeklenih vlaken IRI 50/16 je po naših eksperimentalnih raziskavah 17. oziroma 72. dan od izdelave preskušancev skoraj enako kot lezenje primerjalnega betona brez vlaken KNVJ1. Končno lezenje vlaknastega betona (KNVJ7) z 1,00 % jeklenih vlaken je 102. dan od izdelave preskušancev približno enako lezenju primerjalnega betona brez vlaken KNVJ1. Lezenje vlaknastega betona raziskovalcev Cherna in Younga z 2,00 % karbonskih vlaken (TLJ3) je 17. oziroma 72. dan od izdelave preskušancev za 54 % oziroma 43 % manjše od lezenja primerjalnega betona (TLJ1) brez vlaken. Končno lezenje kompozita z 20 % karbonskih vlaken (TLJ3) je po raziskavah Cherna in Younga za 41 % manjše od končnega lezenja primerjalnega betona (TLJ1) brez vlaken. Lezenje vlaknastega betona z 2,00 % jeklenih vlaken (KNVJ9) se po naših eksperimentalnih raziskavah med celotnimi meritvami sorazmerno malo razlikuje od lezenja primerjalnega betona brez vlaken (KNVJ1).

Na podlagi primerjave vpliva jeklene vlaknaste mikroarmature na lezenje kompozita po naših eksperimentalnih raziskavah in eksperimentu vpliva karbonske vlaknaste armature na lezenje kompozita po eksperimentalnih raziskavah lezenja po Chernu in Youngu ugotavljamo, da sta učinka jeklenih in karbonskih vlaken na lezenje kompozita različna.

Uporabljena karbonska vlakna pri raziskavah Cherna in Younga so daljša za približno 15 %. Sklepamo, da različna dolžina in material vlaken pri Chernu in Youngu vplivata na lezenje kompozita, vendar je ta vpliv v primerjavi z drugimi vplivi sorazmerno majhen. Pomemben razlog za razliko med vplivom jeklenih vlaken v naših raziskavah in vplivom karbonskih vlaken v raziskavah Cherna in Younga pa je verjetno tudi različna oblika preskušancev in smer, potek vlaken v preskušancih. Jeklena

vlakna potekajo v preskušnicah v obliki prizem pretežno v smeri vzdolžne osi preskušancev. Tako usmerjena vlakna sorazmerno malo vplivajo na zmanjšanja lezenja kompozita, ker so usmerjena v smeri delujoče obtežbe. Pri raziskavah Cherna in Younga pa so vlakna v valjastih preskušancih pretežno usmerjena v smeri premera valjastega preskušanca. Sklepamo, da tako orientirana vlakna bolj prispevajo k zmanjšanju lezenja vlaknastega betona, kar se še posebno pozna pri kompozitih z 2,00 % vsebnostjo vlaken. Vlakna v preskušancih v obliki valjev prevzamejo cepilne natezne sile, ki se pojavijo pod vplivom vnesene vzdolžne tlačne napetosti. Iz rezultatov tlačne trdnosti 28 dni starih preskušancev ter iz raziskav Cherna in Younga, je razvidno, da se s povečevanjem deleža vlaken tlačna trdnost valjev kompozita povečuje, kar posredno vpliva na zmanjšanje lezenja kompozita.

5 NUMERIČNO MODELIRANJE CELOTNEGA KRČENJA VLAKNASTIH BETONOV NORMALNE IN VISOKE TRDNOSTI

Na podlagi rezultatov svojih eksperimentalnih raziskav celotnega krčenja vlaknastega betona normalne in visoke trdnosti smo razvili ustrezna numerična modela za simuliranje časovnega razvoja celotnega krčenja vlaknastega betona normalne in visoke trdnosti, mikroarmiranega z jeklenimi vlakni. Pri pripravi predlagane numerične simulacije celotnega krčenja vlaknastih betonov normalne in visoke trdnosti smo izhajali iz tujih modelov. Pri tem smo vpliv vlaknaste armature na celotno krčenje kompozita upoštevali z ustreznimi vplivnimi parametri, ki smo jih določili na podlagi rezultatov svojih eksperimentalnih raziskav krčenja vlaknastega betona.

5.1 Predlogi numeričnega modeliranja celotnega krčenja vlaknastega betona z jeklenimi vlakni

V strokovni literaturi obstajajo različni predlogi numeričnega simuliranja časovnega razvoja krčenja, tako za betone normalne in visoke trdnosti brez vlaknaste armature kakor tudi za betonske kompozite normalne in visoke trdnosti z različnimi vlakni. V nadaljevanju tega dela je prikazanih nekaj predlogov za numerično simulacijo časovnega razvoja krčenja vlaknastih betonskih kompozitov normalne in visoke trdnosti, ki temeljijo na ustreznih bazah eksperimentalnih podatkov.

Predlog Juna Zhanga in Lija (2001)

Razviti model temelji na predpostavki, da se strižne napetosti razvijejo med naključno usmerjenimi vlakni in okolno cementno pasto. Strižna napetost na stiku se pojavi zaradi krčenja cementne paste. Za razviti model je značilno, da temelji na neodvisnih parametričnih značilnostih vlaken, ki so določene in primerjane z eksperimentalnimi meritvami krčenja vlaknastega betona normalne trdnosti. Pri določitvi krčenja zaradi sušenja poljubnega vlaknastega betona je treba poznati končno krčenje ε_{mu} betona brez dodane vlaknaste armature (Zhang in Li, 2001).

Prosto krčenje vlaknastega betonskega kompozita je določeno po enačbi (5.01), (Zhang in Li, 2001):

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{mi} \left[1 - \eta \frac{kV_f}{1 - kV_f(1 + 1/\gamma_1)} \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta \cdot \gamma} \tanh \beta\gamma \right) \right] \quad (5.01)$$

V enačbi (5.01) je zajet vpliv lastnosti vlaken (dolžina, premer, prostorninski delež in distribucija vlaken) in lastnosti cementne paste.

Krčenje betona normalne trdnosti v poljubnem času določimo po enačbi (5.02), (Branson, 1977):

$$\varepsilon_{mt} = \frac{t}{35+t} \varepsilon_{mu} \quad (5.02)$$

Pri tem je

t poljubni čas [dnevi]

ε_{mu} končno krčenje betona brez dodane vlaknaste armature [‰]

Parametre η , γ , γ_1 , β in γ_2 določimo po enačbah (5.03) in (5.04):

$$\eta = \frac{E_f}{E_{m,t}}, \quad \gamma = \frac{kl_f}{2r_f}, \quad \gamma_1 = \frac{kl_f}{2R} \quad (5.03)$$

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{1}{(1+\nu_m)\eta \log \gamma_2} \right)}, \quad \gamma_2 = \sqrt{\left(\frac{1}{kV_f(1+1/\gamma_1)} \right)} \quad (5.04)$$

Pri tem je

E_f elastični modul vlakna [GPa]

$E_{m,t}$ elastični modul betona [GPa]

l_f dolžina vlakna [mm]

ν_m Poissonov koeficient cementne paste

Radij reprezentativnega cilindra določimo po naslednjem izrazu:

$$R = \frac{r_f}{\sqrt{k \cdot V_f}} \quad (5.05)$$

Pri tem je:

r_f radij vlakna [mm]

k orientacijski faktor (odvisen od prostora)

V_f prostorninski delež vlaken v kompozitni mešanici [%]

Orientacijski faktor k je odvisen od dimenzije prostora in je za enodimenzionalni prostor $k = 1$, za dvodimenzionalni prostor $k = 2/\pi$ in za trodimenzionalni prostor $k = 1/2$.

Model Younga in Cherna (1991)

Model Younga in Cherna (1991) je bil razvit z razširitvijo Bazantovega in Panulovega modela krčenja betona normalne trdnosti, za krčenje betona z dodano jekleno vlaknasto armaturo. Razširjeni model krčenja vlaknastega betona poleg osnovnih značilnosti Bazantovega in Panulovega predikcijskega modela (1978), kot je vrsta difuzije, vpliv vlažnosti in hiperbolični zakon krčenja, zajema tudi velikost, obliko, razmerje dolžine in premera vlaken ter prostorninski delež vlaken v kompozitu. Časovno odvisne deformacije, določene po Bazant-Panulovem modelu, temeljijo na naslednjih konceptih: kvadratni-korenski zakon krčenja, dvojni energijski zakon lezenja, difuzijski tip velikosti v

odvisnosti od vpliva vlage, krčenje zaradi sušenja kot dodatni del k lezenju in vpeljava energijskega koncepta za zajemanje termičnih vplivov.

Prosto krčenje betona brez dodane vlaknaste armature določimo po naslednjih enačbah (Bazant in Panul, 1978) in (Bazant idr. 1976):

$$\varepsilon_s(t, t_o) = \varepsilon_{su} \cdot K_h \cdot Q(\bar{t}), \quad (5.06)$$

$$Q(\bar{t}) = \sqrt{\left(\frac{\bar{t}}{\tau_s + \bar{t}}\right)}, \quad (5.07)$$

$$\tau_s = 600 \left(\frac{K_s}{150} \cdot D \right)^2 \frac{C_r}{C(t_o)}, \quad (5.08)$$

$$D = 2 \frac{v_s}{s}, \quad (5.09)$$

$$C(t) = C_7 K' \left[0,05 + \sqrt{\left(\frac{6,3}{t}\right)} \right], \quad (5.10)$$

$$K' = \frac{T}{T_o} \exp\left(\frac{5000}{T_o} - \frac{5000}{T}\right), \quad (5.11)$$

Koeficient C_7 se določi po enačbi (5.12) in velja na intervalu $7 \leq C_7 \leq 21$:

$$C_7 = 0,125(w/c)c - 12, \quad (5.12)$$

Oblikovni koeficient K_s se določi po enačbah (5.13) in (5.14):

$$K_s = 1,55 + 0,45 \left(\frac{D}{H-1} \right), \quad \text{za } 1,25 \leq K_s \leq 1,55, \quad (5.13)$$

$$K_s = 1,30 + 0,23 \left(\frac{D}{H-1} \right), \quad \text{za } 1,15 \leq K_s \leq 1,30, \quad (5.14)$$

Koeficient K_h , s katerim se upošteva vlažnost okolja, se določi po enačbah (5.15) in (5.16):

$$K_h = 1 - h^3, \quad h \leq 0,98, \quad (5.15)$$

$$K_h = -0,2, \quad h = 1,00, \quad (5.16)$$

Končno krčenje se določi po enačbi (5.17):

$$\varepsilon_{su} = \varepsilon_u \frac{E(607)}{E(t_o + \tau_s)}, \quad (5.17)$$

Modul elastičnosti pri obravnavanem času t' se določi po enačbi (5.18):

$$E(t') = E(28) \sqrt{\left(\frac{t'}{4 + 0,85t'} \right)}, \quad (5.18)$$

ε_u določimo po enačbi (5.19):

$$\varepsilon_u = 1210 - 880y, \quad (5.19)$$

pri čemer koeficienta y in z določimo po enačbah (5.20) in (5.21):

$$y = (390z^{-4} + 1)^{-1}, \quad (5.20)$$

$$z = \left[1,25\sqrt{(a/c)} + 0,5(g/s)^2 \right] \cdot \left(\frac{1 + (s/c)}{w/c} \right)^{1/3} \cdot (\sqrt{f'_c}) - 12, \quad (5.21)$$

Trajanje sušenja določimo po enačbi (5.22):

$$\bar{t} = t - t_0 \quad (5.22)$$

Pri tem je:

- t trajanje sušenja [dan]
- t starost betona [dan]
- t_0 začetek sušenja [dan]
- t' izbrana starost betona [dan]
- $Q(t)$ funkcija časa
- τ_s oblika oziroma dimenzijska odvisnost
- D efektivna debelina preskušanca [m]
- H dolžina preskušanca [m]
- v_s prostornina preskušanca [m³]
- s površina preskušanca [m²]
- $C(t)$ funkcija časa
- C_r 10 mm/dan
- K' parameter, ki je odvisen od temperature okolja
- T absolutna temperatura okolja [K]
- T_0 273 K
- w/c vodo-cementno razmerje
- c vsebnost cementa [kg/m³]
- h vlažnost okolja [%]
- $E(28)$ elastični modul 28. dan [GPa]
- $E(607)$ elastični modul v končnem času [GPa]
- a/c masno razmerje agregata proti cementu
- g/s masno razmerje proda proti pesku
- s/c masno razmerje peska proti cementu
- f'_c tlačna trdnost betona 28. dan [MPa]

Prosto krčenje vlaknastega betona določimo po zgornjih enačbah Bazant-Panulovega modela z modifikacijo, ki zajema vpliv dveh pomembnih faktorjev, kot sta prostorninska vsebnost vlaken ter razmerje med dolžino in premerom vlakna. Model temelji na trenjski sili, ki se pojavi na stiku med vlakni in matrico. Z večjim deležem vlaken v kompozitu (v) ali razmerja med dolžino in premerom vlakna (l/d) se poveča trenjska sila v stiku, posledično pa zmanjša krčenje. Young-Chernov model je izpeljan na podlagi primerjave eksperimentalnih rezultatov krčenja vlaknastega betona z jeklenimi vlakni in betona brez vlaknaste armature. Model upošteva razliko med velikostjo krčenja vlaknastega betona z armaturo in betona brez armature ter krčenja s potekom sušenja. Z modifikacijo enačbe (5.19) z enačbo (5.23) je zajeto zmanjšanje končnega krčenja betona zaradi dodatka jeklene vlaknaste armature.

$$\varepsilon_u = 1210 - \Phi(v \cdot l/d) - 880y, \quad (5.23)$$

Φ , ki je funkcija v in l/d , določimo po enačbi (5.24). V enačbi (5.24) ni upoštevan parameter μ , s katerim so upoštevane površinske lastnosti vlakna.

$$\Phi(v \cdot l/d) = 410 \cdot (1 - \exp(-0,014 \cdot (v \cdot l/d))), \quad (5.24)$$

Pri tem je:

- ε_u končno krčenje betona z dodanimi jeklenimi vlakni [%]
 v prostorninski delež jeklenih vlaken v kompozitni mešanici [%]
 l dolžina jeklenega vlakna [mm]
 d premer vlakna [mm]

Model P. S. Mangata in M. Motamedija Azarija (1984)

Razviti model se uporablja za določitev prostega krčenja cementne matrice, armirane z naključno usmerjenimi jeklenimi vlakni. Model temelji na predpostavki, da ustrezna dolžina naključnega vlakna vpliva na zmanjšanje krčenja cilindrične matrice s premerom, ki je enak razmaku med vlakni. Model Mangat-Azarija se uporablja za določitev koeficienta trenja μ , povprečne stične trdnosti λ na stiku med vlakni in matrico. Mangat in Azari (1984) sta izpeljala empirični izraz za določitev krčenja cementne matrice z jeklenimi vlakni, ki temelji na krčenju nearmirane matrice v odvisnosti od vsebovane vlaknaste armature. Za določitev celotnega krčenja poljubnega vlaknastega betona z empiričnimi enačbami je treba poznati celotno krčenje ε_{os} primerjalnega betona brez vlaknaste armature.

Celotno krčenje vlaknastega betona določimo po enačbah (5.25) in (5.26):

$$\varepsilon_{sc} = \varepsilon_{os} [1 - 5,71(\mu vl/d)], \text{ za } \mu vl/d \leq 0,038, \quad (5.25)$$

$$\varepsilon_{sc} = \varepsilon_{os} [0,84 - 1,23(\mu vl/d)], \text{ za } \mu vl/d > 0,038, \quad (5.26)$$

pri tem je:

- ε_{sc} krčenje cementne paste z dodanimi jeklenimi vlakni [%]
 ε_{oc} krčenje betona brez dodane vlaknaste armature [%]

μ koeficient trenja med vlakni in cementno pasto
 v prostorninski delež jeklenih vlaken [%]
 l dolžina jeklenega vlakna [mm]
 d premer vlakna [mm]

5.1.1 Modeliranje eksperimentalno dobljenih rezultatov preiskav celotnega krčenja vlaknastih betonov z obstoječimi predlogi

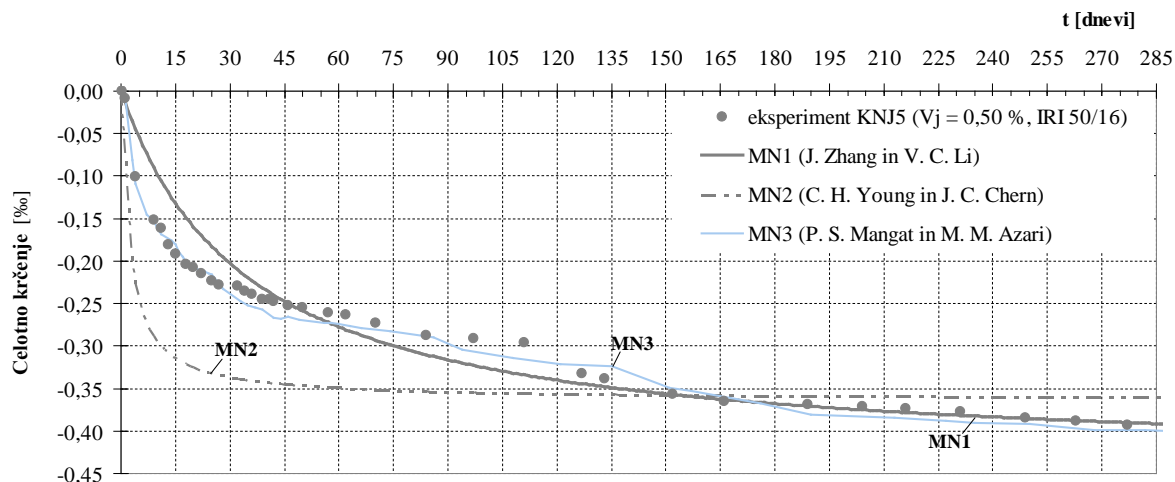
Primerjava numerične simulacije časovnega poteka celotnega krčenja vlaknastega betona, ki smo jo izvedli z uporabo znanih tujih predlogov računskega modeliranja celotnega krčenja vlaknastih betonov iz poglavja 5.1 ter primerjali z rezultati svojih eksperimentalnih raziskav, je za primer majhne vsebnosti (0,50 %) kratkih jeklenih vlaken razvidna na sliki 5.1, za primer velike vsebnosti (2,00 %) kratkih jeklenih vlaken pa na sliki 5.2.

S slike 5.1 je razvidno, da se simuliranje krčenja vlaknastega betona z numeričnima modeloma Zhanga in Lija (2001) ter Younga in Cherna (2001) v prvih 150 dneh po izdelavi preskušancev ne ujema z dejansko izmerjenim rezultatom celotnega krčenja vlaknastega betona normalne trdnosti z dodanim 0,5 % deležem krajših jeklenih vlaken. 150. dan od izdelave preskušancev pa se numerična simulacija s prej omenjenima računskima modeloma krčenja vlaknastega betona ujema z izmerjenim krčenjem vlaknastega betona in mu potem sledi vse do konca meritev. Krčenje vlaknastega betona, simulirano z Mangatovim računskim modelom, se zelo dobro ujema z eksperimentalnimi rezultati krčenja vlaknastega betona z majhnim (0,50 %) deležem krajših jeklenih vlaken v prvih 30 dneh od izdelave preskušancev. Od 30. do 150. dne od izdelave preskušancev pa simulacija krčenja vlaknastega betona s predlaganimi računskimi modeli od eksperimentalnih rezultatov krčenja vlaknastega betona normalne trdnosti z majhnim (0,50 %) deležem krajših jeklenih vlaken odstopa do 12 %.

Simulacija celotnega krčenja vlaknastega betona z računskim modelom Zhanga in Lija (2001) ter Mangata in Azarija (1984) je med celotnimi meritvami kvalitativno zelo podobna časovnemu poteku celotnega krčenja vlaknastega betona, našim eksperimentalnim rezultatom merjenja celotnega krčenja kompozita z majhnim (0,50 %) deležem jeklenih vlaken. Na podlagi primerjave eksperimentalnih rezultatov celotnega krčenja vlaknastih betonov s krčenjem betona brez dodane vlaknaste armature (poglavje 4) ugotavljamo, da je kvalitativno oblika časovnega razvoja celotnega krčenja vlaknastega betona podobna obliki časovnega razvoja celotnega krčenja betona brez dodane vlaknaste armature.

Za napoved časovnega poteka celotnega krčenja vlaknastega betona normalne trdnosti po Zhangovem in Lijevev numeričnem modelu je treba poznati končno vrednost krčenja betona brez dodane vlaknaste armature. Oblika funkcije, s katero je v numeričnem modelu simuliran časovni potek celotnega krčenja vlaknastega betona, se pozneje dobro ujema z našimi eksperimentalnimi rezultati, na začetku merjenja pa od njih precej odstopa, zato bi jo bilo v tem območju treba popraviti. Časovni potek celotnega krčenja vlaknastega betona, dobljen z numeričnim modelom Younga in Cherna, pa bistveno odstopa od eksperimentalnih rezultatov meritev celotnega krčenja vlaknastega betona

normalne trdnosti z majhno (0,50 %) vsebnostjo krajših jeklenih vlaken, zlasti v prvih 150 dneh od izdelave preskušancev.



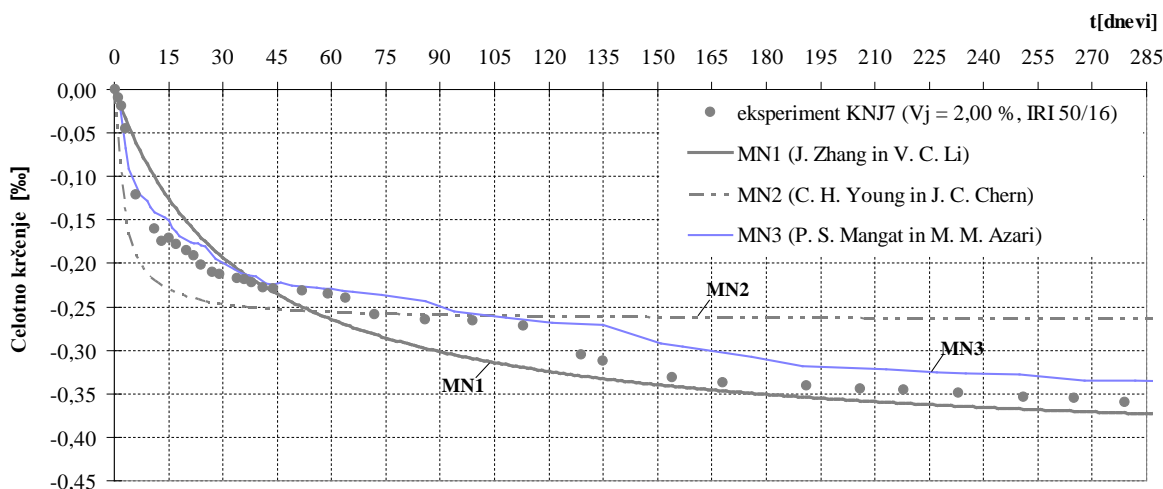
Slika 5.1: Prikaz izmerjenega časovnega poteka celotnega krčenja vlaknastega betona normalne trdnosti z majhnim (0,50 %) deležem krajših jeklenih vlaken in numeričnih simulacij.

Figure 5.1: Comparison of measured time development of total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete with lower content (0,50 %) of shorter steel fibres and results of numerical simulation.

Na sliki 5.2 je prikazan časovni potek celotnega krčenja vlaknastega betona, ki je modeliran z različnimi numeričnimi modeli, in časovni potek celotnega krčenja vlaknastega betona normalne trdnosti z velikim deležem krajših jeklenih vlaken, ki je določen z našimi eksperimentalnimi raziskavami. Časovni potek celotnega krčenja vlaknastega betona, določen z Zhang-Lijevim numeričnim modelom, se od 150. dne po izdelavi preskušancev pa vse do konca meritev sorazmerno dobro ujema z izmerjenim celotnim krčenjem vlaknastega betona normalne trdnosti z velikim (2,00 %) deležem krajših jeklenih vlaken. V prvih 150 dneh od izdelave preskušancev pa se časovni potek krčenja vlaknastega betona, ki je določen z numeričnim modelom Zhang-Lija, ne ujema z eksperimentalno določenim časovnim potekom krčenja vlaknastega betona z veliko (2,00 %) vsebnostjo krajših jeklenih vlaken.

Začetni del časovnega poteka celotnega krčenja vlaknastega betona do približno 120. dne od izdelave preskušancev, ki je določen z Mangat-Azarijevim numeričnim modelom, se sorazmerno dobro ujema z eksperimentalno določenim časovnim potekom celotnega krčenja vlaknastega betona. Po 120. dnevu od izdelave preskušancev pa vse do konca meritve pa se časovni potek krčenja vlaknastega betonane ujema z eksperimentalno določenim časovnim potekom celotnega krčenja obravnavanega vlaknastega betona.

Časovni potek celotnega krčenja obravnavanega vlaknastega betona, ki je določen z uporabo numeričnega modela Younga in Cherna, v celotnem obravnavanem časovnem obdobju tako po obliki časovnega poteka kakor tudi po absolutnih vrednostih krčenja vlaknastega betona bistveno odstopa od eksperimentalno določenega časovnega poteka celotnega krčenja obravnavanega kompozita.



Slika 5.2: Prikaz izmerjenega časovnega poteka celotnega krčenja vlaknastega betona normalne trdnosti z velikim (2,00 %) deležem krajših jeklenih vlaken in numeričnih simulacij.

Figure 5.2: Comparison of measured time development of total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete with higher content (2,00 %) of shorter steel fibre and results of numerical simulation.

5.2 Razvoj numeričnega modela za napovedovanje celotnega krčenja betona normalne trdnosti z dodanimi jeklenimi vlakni

Modificiran računski model za napovedovanje celotnega krčenja vlaknastega betona normalne trdnosti z dodanimi jeklenimi vlakni podobno kot Zhangov in Lijev model temelji na predpostavki, da se sila vlaken prek sprijemnih napetosti prenaša v cementno pasto in obrnjeno: zaradi krčenja cementne paste se na stiku vlaken s cementno pasto pojavijo strižne napetosti. Pri določitvi krčenja poljubnega vlaknastega betona izhajamo iz končnega krčenja betona ε_{mu} brez dodane vlaknaste armature. Pri tem se v odvisnosti od končnega krčenja betona ε_{mu} in časa t celotno krčenje betona brez vlaknaste armature v poljubnem času določi z enačbo 5.02. S slike je razvidno, da numerični model Zhanga in Lija (2001) od eksperimentalnih meritev krčenja vlaknastega betona najbolj odstopa med 45. in 150. dnevom od izdelave preskušancev. Na podlagi analize večjega števila različnih izrazov za izboljšano računsko simulacijo časovnega poteka celotnega krčenja betona brez vlaknaste armature (ε_{mt}) namesto (5.02) predlagamo izraz (5.27).

$$\varepsilon_{mt} = a_m - b_m \sqrt[4]{c_m \cdot t \cdot \varepsilon_{mu}} \quad (5.27)$$

Pri tem je:

t poljubni čas v [dnevi]

ε_{mu} končno krčenje betona brez vlaknaste mikroarmature

Parametre a , b in c smo določili z metodo minimalnih kvadratov odstopanj časovnega poteka krčenja vlaknastega betona, določenega z modificiranim predlaganim računskim modelom Zhanga in Lija (enačba (5.28)), in iz izmerjenega časovnega poteka celotnega krčenja vlaknastega betona.

$$\varepsilon_t = (a_m - b_m \sqrt[4]{c_m \cdot t \cdot \varepsilon_{mu}}) \cdot \left[1 - \eta \frac{kV_f}{1 - kV_f(1 + 1/\gamma_1)} \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta \cdot \gamma} \tanh \beta\gamma \right) \right] \quad (5.28)$$

Za primer upoštevanja eksperimentalno določenega časovnega poteka celotnega krčenja vlaknastega betona normalne trdnosti z 0,50 %, 1,00 % in 2,00 % daljših oziroma krajših jeklenih vlaken, ki so izpostavljeni okolju s temperaturo $T = 22 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ in relativno vlago $RH = 70 \text{ } \% \pm 3 \text{ } \%$, za parametre a_m , b_m in c_m dobimo vrednosti, podane v preglednici 5.1:

Preglednica 5.1: Vrednosti parametrov a_m , b_m in c_m .

Table 5.1: Value of parameters a_m , b_m and c_m .

Vlaknasti beton	a_m	b_m	c_m
KNJ2 ($V_j = 0,5 \text{ } \%$, IRI 50/30)	-0,0018	-2,814	32,44
KNJ3 ($V_j = 1 \text{ } \%$, IRI 50/30)	-0,0016	-2,554	32,44
KNJ4 ($V_j = 2 \text{ } \%$, IRI 50/30)	-0,0017	-2,626	32,44
KNJ5 ($V_j = 0,5 \text{ } \%$, IRI 50/16)	-0,0015	-2,445	32,44
KNJ6 ($V_j = 1 \text{ } \%$, IRI 50/16)	-0,0016	-2,531	32,45
KNJ7 ($V_j = 2 \text{ } \%$, IRI 50/16)	-0,0015	-2,406	32,44
<i>Srednja vrednost</i>	<i>-0,0016</i>	<i>-2,563</i>	<i>32,44</i>

Iz preglednice 5.1 je razvidno, da se parametri a_n , b_n in c_n bistveno ne razlikujejo za posamezne vrste vlaknastih betonov, zato lahko za splošno uporabo privzamemo njihovo srednjo vrednost. Z upoštevanjem srednjih vrednosti parametrov a_n , b_n in c_n v enačbi (5.28) dobimo enačbo (5.29), s katero določimo časovni potek celotnega krčenja vlaknastega betona z 0,50 % do 2,00 % jeklenih vlaken.

$$\varepsilon_{mt} = -0,0016 + 2,563 \cdot \sqrt[4]{32,44 \cdot t} \cdot \left[1 - \eta \frac{kV_f}{1 - kV_f(1 + 1/\gamma_1)} \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta \cdot \gamma} \tanh \beta\gamma \right) \right] \quad (5.29)$$

Parametre η , γ , γ_1 , β , γ_2 , razdaljo med vlakni R in faktor usmerjenosti vlaken k upoštevamo v skladu s predlaganim računskim modelom Zhanga in Lija (enačba (5.03), enačba (5.04) in enačba (5.05)).

Zhang-Lijev numerični model celotnega krčenja vlaknastega betona normalne trdnosti z dodanimi jeklenimi vlakni smo modificirali na podlagi svojih eksperimentalnih rezultatov meritev krčenja vlaknastega betona normalne trdnosti z 0 %, 0,50 %, 1,00 % in 2,00 % krajših oziroma daljših jeklenih vlaken. Velikost končnega krčenja betona normalne trdnosti brez vlaknaste armature, ki jo potrebujemo pri modeliranju časovnega poteka celotnega krčenja vlaknastega betona z izrazom (5.28), smo glede na značilnosti svežega betona in pogojev okolja privzeli po standardu SIST EN 1992-1-1. V

preglednicah 5.2, 5.3 in 5.4 so vrednosti celotnega krčenja preiskovanih vlaknastih betonov z različnimi deleži daljših oziroma krajših jeklenih vlaken, dobljene z našimi eksperimentalnimi meritvami oziroma s predlaganim računskim modelom (enačba (5.28)). Največja razlika med računsko določenimi in izmerjenim celotnim krčenjem vlaknastega betona se pojavi pri vlaknastem betonu z 2,00 % daljših jeklenih vlaken (KNJ4) in je 17,9 %.

Preglednica 5.2: Izmerjeno (ε_{se}) in izračunano (ε_{sm}) celotno krčenje vlaknastega betona z 0,50 % daljših (KNJ2) oziroma 1,00 % daljših (KNJ3) jeklenih vlaken.

Table 5.2: Measured (ε_{se}) and calculated (ε_{sm}) total shrinkage of fibre reinforced concrete with 0.50 % of longer (KNJ2) or 1.00 % of longer (KNJ3) steel fibres.

Vlaknasti beton KNJ2 ($V_f = 0,50\%$, IRI 50/30)				Vlaknasti beton KNJ3 ($V_f = 1,00\%$, IRI 50/30)			
Starost dan	Eksperiment ε_{se}	Račun ε_{sm}	Odstopanje %	Starost dan	Eksperiment ε_{se}	Račun ε_{sm}	Odstopanje %
0	0,000	0,000	0,000	0	0,000	0,000	0,000
3	-0,061	-0,062	1,573	5	-0,106	-0,105	-1,635
6	-0,109	-0,121	11,097	6	-0,122	-0,119	-2,230
7	-0,125	-0,133	6,381	7	-0,127	-0,132	3,572
8	-0,140	-0,144	2,394	8	-0,134	-0,142	5,969
9	-0,147	-0,153	3,536	11	-0,164	-0,166	1,478
10	-0,155	-0,161	3,876	16	-0,190	-0,193	1,474
13	-0,182	-0,180	-1,159	18	-0,205	-0,201	-1,825
18	-0,206	-0,203	-1,198	20	-0,213	-0,208	-2,045
20	-0,212	-0,211	-0,794	22	-0,213	-0,215	1,006
22	-0,218	-0,217	-0,470	25	-0,223	-0,223	0,402
24	-0,220	-0,223	1,333	27	-0,229	-0,229	-0,382
27	-0,228	-0,231	1,607	29	-0,233	-0,233	-0,044
29	-0,231	-0,236	2,227	32	-0,240	-0,240	-0,234
31	-0,242	-0,240	-0,662	34	-0,246	-0,244	-1,032
34	-0,247	-0,246	-0,055	39	-0,246	-0,252	2,540
36	-0,254	-0,250	-1,686	41	-0,246	-0,256	3,829
41	-0,256	-0,258	0,829	43	-0,247	-0,259	4,632
43	-0,264	-0,262	-1,025	46	-0,257	-0,263	2,272
45	-0,264	-0,264	0,068	49	-0,259	-0,267	3,016
48	-0,267	-0,269	0,612	57	-0,262	-0,276	5,415
51	-0,270	-0,272	0,799	64	-0,262	-0,283	8,106
59	-0,271	-0,281	3,646	69	-0,263	-0,288	9,426
66	-0,275	-0,288	4,662	77	-0,276	-0,294	6,725
71	-0,278	-0,293	5,270	91	-0,287	-0,304	6,130
79	-0,296	-0,299	0,916	104	-0,288	-0,312	8,467
93	-0,302	-0,309	2,155	118	-0,293	-0,319	8,756
106	-0,306	-0,316	3,570	134	-0,327	-0,326	-0,168
120	-0,315	-0,324	2,833	140	-0,333	-0,329	-1,198
136	-0,349	-0,331	-5,166	159	-0,351	-0,336	-4,161
142	-0,355	-0,333	-6,226	173	-0,360	-0,341	-5,482
161	-0,371	-0,340	-8,293	196	-0,364	-0,347	-4,622
175	-0,380	-0,345	-9,125	211	-0,370	-0,351	-5,059
198	-0,383	-0,352	-8,115	223	-0,373	-0,354	-5,008
213	-0,386	-0,356	-7,855	238	-0,379	-0,358	-5,562
225	-0,390	-0,359	-7,862	256	-0,385	-0,362	-5,997
240	-0,394	-0,362	-8,044	270	-0,387	-0,365	-5,742
258	-0,399	-0,366	-8,167	284	-0,390	-0,367	-5,768
272	-0,401	-0,369	-8,014			max	9,426
286	-0,406	-0,372	-8,392				

max 11,097

Preglednica 5.3: Izmerjeno (ε_{se}) in izračunano (ε_{sm}) celotno krčenje vlaknastega betona z 2,00 % daljših (KNJ4) oziroma 0,50 % krajših (KNJ5) jeklenih vlaken.

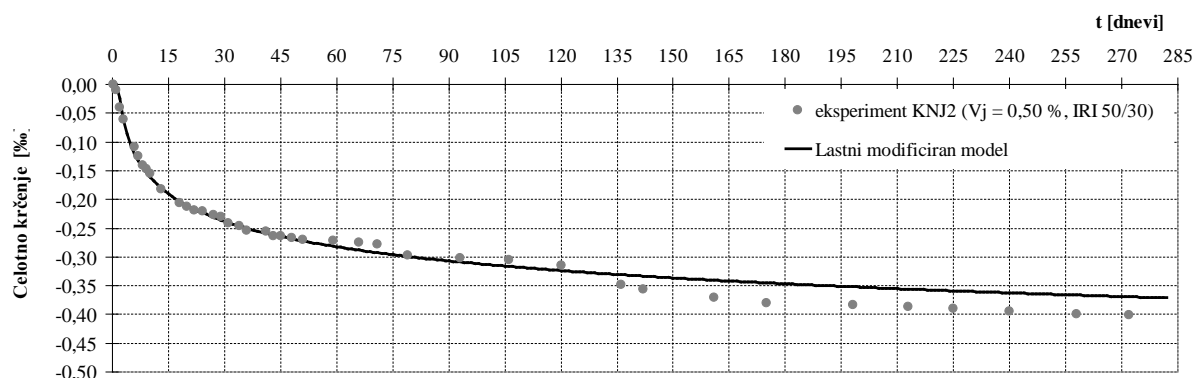
Table 5.3: Measured (ε_{se}) and calculated (ε_{sm}) total shrinkage of fibre reinforced concrete with 2.00 % of longer (KNJ4) or 0.50 % of shorter (KNJ5) steel fibres.

Vlaknasti beton KNJ4 ($V_f = 2,00\%$, IRI 50/30)				Vlaknasti beton KNJ5 ($V_f = 0,50\%$, IRI 50/16)			
Starost	Eksperiment	Račun	Odstopanje	Starost	Eksperiment	Račun	Odstopanje
dan	ε_{se}	ε_{sm}	%	dan	ε_{se}	ε_{sm}	%
0	0,000	0,000	0,000	0	0,000	0,000	0,000
3	-0,067	-0,060	-10,713	9	-0,151	-0,154	1,744
4	-0,091	-0,084	-6,984	11	-0,162	-0,169	4,582
7	-0,136	-0,129	-5,114	13	-0,181	-0,182	0,448
8	-0,141	-0,139	-1,231	15	-0,192	-0,192	0,048
9	-0,135	-0,148	9,605	18	-0,204	-0,205	0,647
10	-0,132	-0,156	17,928	20	-0,208	-0,213	2,305
11	-0,138	-0,163	17,896	22	-0,215	-0,219	1,951
14	-0,174	-0,180	3,105	25	-0,224	-0,228	1,984
19	-0,201	-0,201	-0,082	27	-0,228	-0,233	2,514
21	-0,207	-0,207	0,314	32	-0,229	-0,245	6,589
23	-0,208	-0,214	2,745	34	-0,235	-0,249	5,617
25	-0,208	-0,219	5,383	36	-0,239	-0,252	5,448
28	-0,212	-0,226	6,903	39	-0,245	-0,258	5,318
30	-0,220	-0,231	5,093	41	-0,245	-0,261	6,357
32	-0,225	-0,235	4,626	42	-0,247	-0,262	6,139
35	-0,227	-0,241	6,224	46	-0,252	-0,268	6,519
42	-0,228	-0,252	10,294	50	-0,254	-0,273	7,502
44	-0,232	-0,255	9,661	57	-0,261	-0,282	7,955
46	-0,240	-0,258	7,204	62	-0,264	-0,287	8,864
49	-0,244	-0,261	7,056	70	-0,273	-0,294	7,678
52	-0,245	-0,265	8,098	84	-0,288	-0,305	6,120
60	-0,246	-0,274	11,159	97	-0,291	-0,314	7,876
72	-0,256	-0,284	11,098	111	-0,296	-0,322	8,647
80	-0,274	-0,291	6,153	127	-0,332	-0,330	-0,591
94	-0,284	-0,300	5,743	133	-0,338	-0,333	-1,731
107	-0,293	-0,307	4,704	152	-0,357	-0,340	-4,647
121	-0,299	-0,314	4,945	166	-0,365	-0,345	-5,335
137	-0,335	-0,321	-4,102	189	-0,369	-0,352	-4,367
143	-0,340	-0,323	-4,796	204	-0,371	-0,357	-3,897
162	-0,357	-0,330	-7,605	216	-0,373	-0,360	-3,556
176	-0,374	-0,335	-10,536	231	-0,377	-0,364	-3,582
199	-0,376	-0,341	-9,250	249	-0,384	-0,368	-4,323
213	-0,379	-0,345	-9,001	263	-0,388	-0,371	-4,364
226	-0,381	-0,348	-8,647	277	-0,394	-0,374	-5,084
241	-0,382	-0,351	-7,995			max	8,864
259	-0,388	-0,355	-8,423				
273	-0,390	-0,358	-8,181				
287	-0,391	-0,361	-7,747				
		max	17,928				

Preglednica 5.4: Izmerjeno (ϵ_{se}) in izračunano (ϵ_{sm}) celotno krčenje vlaknastega betona z 1,00 % krajših (KNJ6) oziroma 2,00 % krajših (KNJ7) jeklenih vlaken.**Table 5.4:** Measured (ϵ_{se}) and calculated (ϵ_{sm}) total shrinkage of fibre reinforced concrete with 1.00 % of shorter (KNJ6) or 2.00 % of shorter (KNJ7) steel fibre.

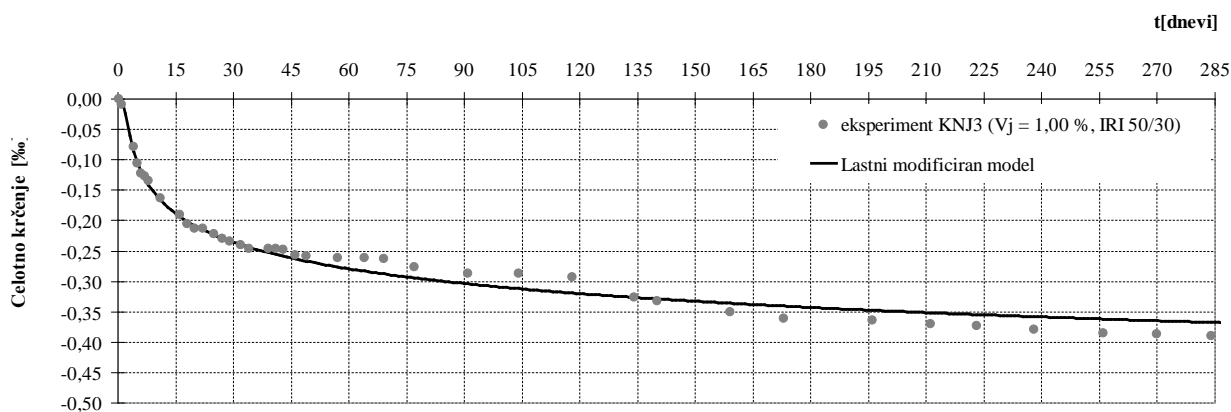
Vlaknasti beton KNJ6 ($V_f = 1,00\%$, IRI 50/16)				Vlaknasti beton KNJ7 ($V_f = 2,00\%$, IRI 50/16)			
Starost	Eksperiment	Račun	Odstopanje	Starost	Eksperiment	Račun	Odstopanje
dan	ϵ_{se}	ϵ_{sm}	%	dan	ϵ_{se}	ϵ_{sm}	%
0	0,000	0,000	0,000	0	0,000	0,000	0,000
5	-0,113	-0,106	-6,161	3	-0,045	-0,050	11,111
10	-0,160	-0,161	0,915	6	-0,121	-0,118	-2,372
12	-0,176	-0,175	-0,362	11	-0,160	-0,163	2,226
14	-0,184	-0,186	1,518	13	-0,175	-0,175	0,264
16	-0,187	-0,196	4,881	15	-0,170	-0,186	8,880
19	-0,213	-0,208	-2,336	17	-0,178	-0,194	8,935
21	-0,218	-0,215	-1,495	20	-0,185	-0,205	11,057
23	-0,222	-0,224	0,885	22	-0,191	-0,212	10,591
26	-0,231	-0,230	-0,774	24	-0,201	-0,217	8,054
28	-0,233	-0,235	0,808	27	-0,210	-0,225	7,011
33	-0,235	-0,246	4,317	29	-0,212	-0,230	8,205
35	-0,241	-0,249	3,363	34	-0,217	-0,240	10,617
37	-0,243	-0,253	4,297	36	-0,219	-0,244	11,278
40	-0,252	-0,258	2,229	38	-0,222	-0,247	11,498
43	-0,256	-0,263	2,471	41	-0,228	-0,252	10,694
51	-0,262	-0,274	4,289	44	-0,229	-0,256	11,657
58	-0,264	-0,282	6,553	52	-0,231	-0,266	15,137
63	-0,269	-0,287	6,633	59	-0,235	-0,274	16,781
71	-0,278	-0,294	5,741	64	-0,239	-0,279	16,574
85	-0,292	-0,305	4,234	72	-0,258	-0,286	10,690
98	-0,296	-0,313	5,702	86	-0,264	-0,296	12,145
112	-0,302	-0,321	6,227	99	-0,266	-0,304	14,359
128	-0,336	-0,329	-2,056	113	-0,271	-0,312	14,916
134	-0,342	-0,332	-3,164	129	-0,306	-0,319	4,518
153	-0,359	-0,339	-5,485	135	-0,313	-0,322	2,916
167	-0,374	-0,344	-7,979	154	-0,332	-0,329	-0,793
190	-0,374	-0,351	-6,213	168	-0,338	-0,334	-1,118
205	-0,377	-0,355	-5,749	191	-0,341	-0,341	-0,029
217	-0,378	-0,359	-5,247	206	-0,344	-0,345	0,199
232	-0,382	-0,362	-5,101	218	-0,345	-0,348	0,885
250	-0,386	-0,366	-5,175	233	-0,349	-0,352	0,761
264	-0,388	-0,369	-4,895	251	-0,353	-0,355	0,564
278	-0,391	-0,372	-4,820	265	-0,355	-0,358	0,996
		max	6,227	279	-0,360	-0,361	0,272
					max		16,781

Na slikah od 5.3 do 5.8 so prikazani rezultati naših meritev celotnega krčenja vlaknastih betonov normalne trdnosti z različnimi deleži daljših oziroma krajših jeklenih vlaken in časovni poteki celotnega krčenja obravnavanih vlaknastih betonov, ki so določeni s predlaganim računskim postopkom.



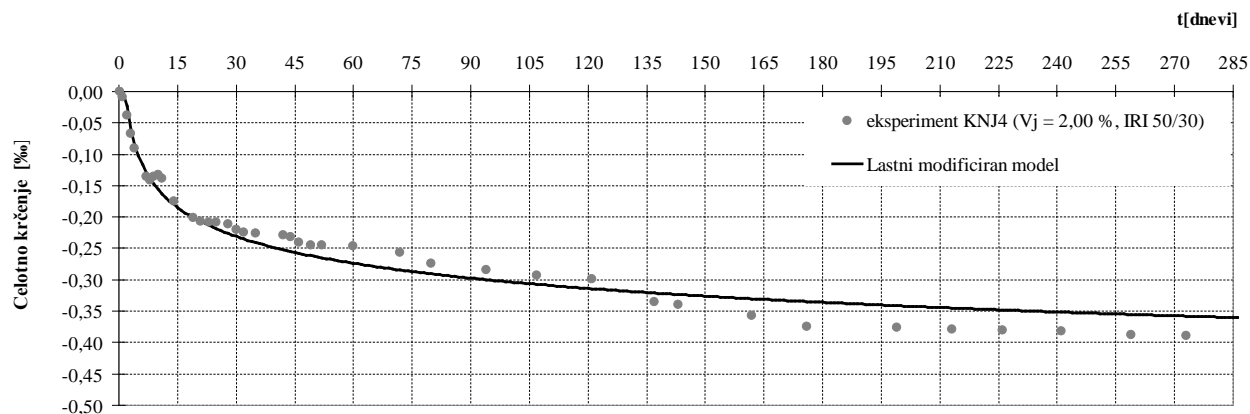
Slika 5.3: Celotno krčenje vlaknastega betona normalne trdnosti z 0,50 % daljših jeklenih vlaken (KNJ2), določeno eksperimentalno oziroma s predlaganim računskim modelom.

Figure 5.3: Total shrinkage of fibre reinforced normal strenght concrete with 0,50 % of longer steel fibre (KNJ2) as obtained with experiment or with proposed numerical model.



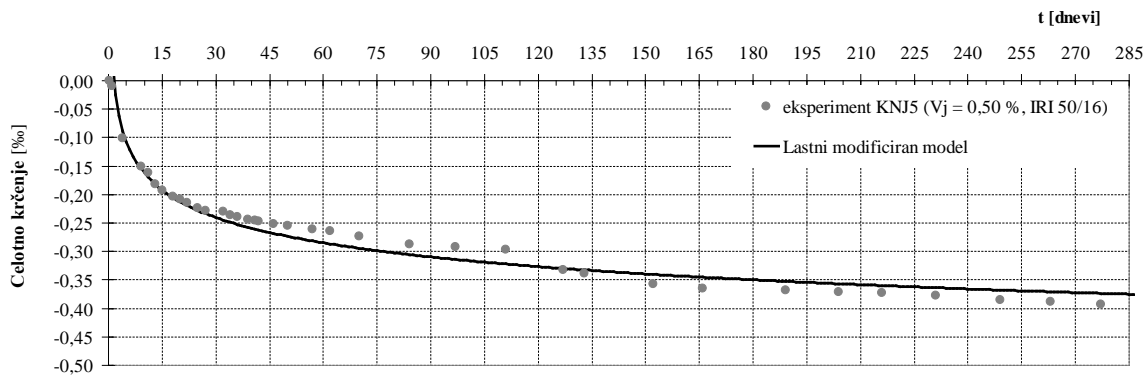
Slika 5.4: Celotno krčenje vlaknastega betona normalne trdnosti z 1,00 % daljših jeklenih vlaken (KNJ3), določeno eksperimentalno oziroma s predlaganim računskim modelom.

Figure 5.4: Total shrinkage of fibre reinforced normal strenght concrete with 1,00 % of longer steel fibre (KNJ3) as obtained with experiment or with the proposed numerical model.



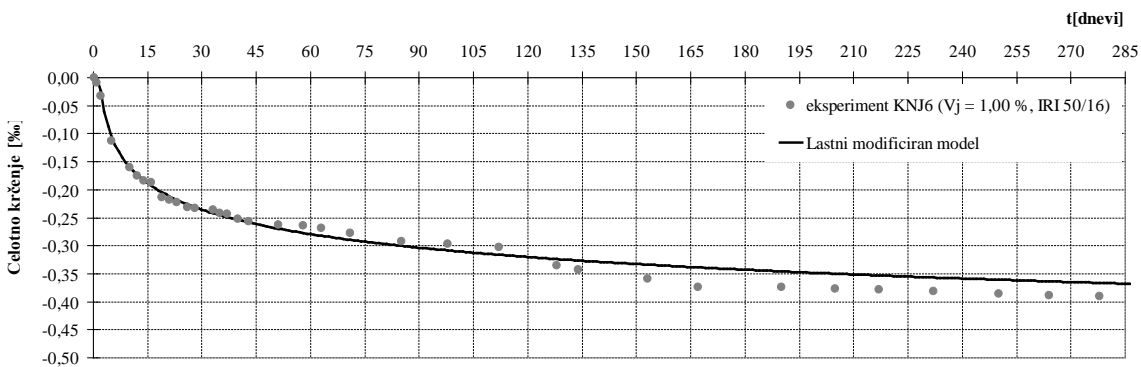
Slika 5.5: Celotno krčenje vlaknastega betona normalne trdnosti z 2,00 % daljših jeklenih vlaken (KNJ4), določeno eksperimentalno oziroma s predlaganim računskim modelom.

Figure 5.5: Total shrinkage of fibre reinforced normal strenght concrete with 2,00 % of longer steel fibre (KNJ4) as obtained with experiment or with the proposed numerical model.



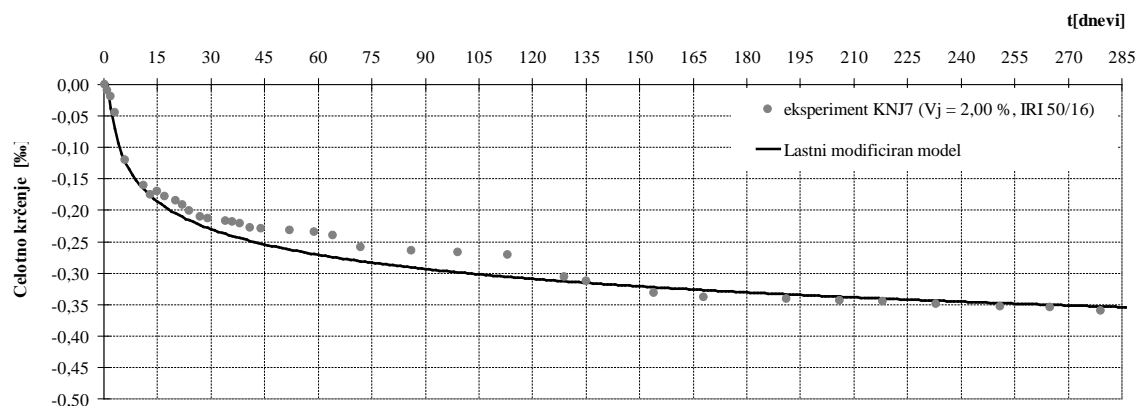
Slika 5.6: Celotno krčenje vlaknastega betona normalne trdnosti z 0,50 % krajših jeklenih vlaken (KNJ5), določeno eksperimentalno oziroma s predlaganim računskim modelom.

Figure 5.6: Total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete with 0,50 % of shorter steel fibre (KNJ5) as obtained with experiment or with the proposed numerical model.



Slika 5.7: Celotno krčenje vlaknastega betona normalne trdnosti z 1,00 % krajših jeklenih vlaken (KNJ6), določeno eksperimentalno oziroma s predlaganim računskim modelom.

Figure 5.7: Total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete with 1,00 % of shorter steel fibre (KNJ6) as obtained with experiment or with the proposed numerical model.



Slika 5.8: Celotno krčenje vlaknastega betona normalne trdnosti z 2,00 % krajših jeklenih vlaken (KNJ7), določeno eksperimentalno oziroma s predlaganim računskim modelom.

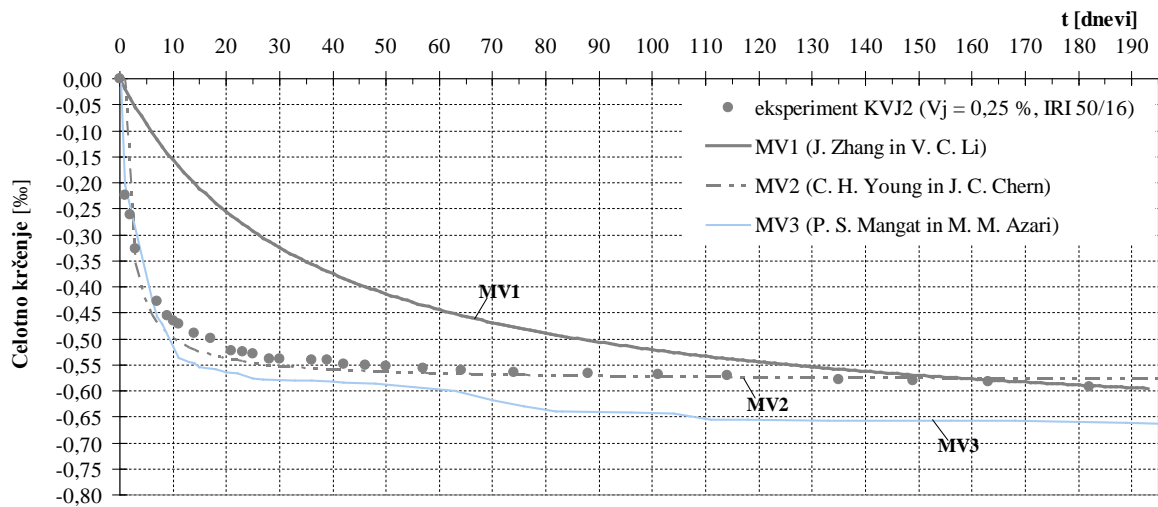
Figure 5.8: Total shrinkage of fibre reinforced normal strength concrete with 2,00 % of shorter steel fibre (KNJ7) as obtained with experiment or with the proposed numerical model.

Na podlagi razmeroma dobrega ujemanja naših eksperimentalno izmerjenih vrednosti celotnega krčenja vlaknastih betonov normalne trdnosti z različnim deležem in dolžino jeklenih vlaken z vrednostmi celotnega krčenja vlaknastih betonov enake sestave, ki so določene z našim modificiranim numeričnim računskim modelom, ugotavljamo, da je predlagani modificirani numerični računski model primeren za simuliranje časovnega celotnega krčenja poljubnega vlaknastega betona normalne trdnosti z različno vsebnostjo in dolžino jeklenih vlaken.

5.3 Numerično modeliranje celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti z dodanimi jeklenimi vlakni

Na slikah 5.9, 5.10 in 5.11 so prikazani eksperimentalno določeni časovni poteki celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti z različnimi deleži krajših in daljših jeklenih vlaken ter časovni poteki celotnega krčenja obravnavanih vlaknastih betonov, ki so določeni z uporabo obstoječih računskih postopkov numerične simulacije celotnega krčenja vlaknastih betonov visoke trdnosti.

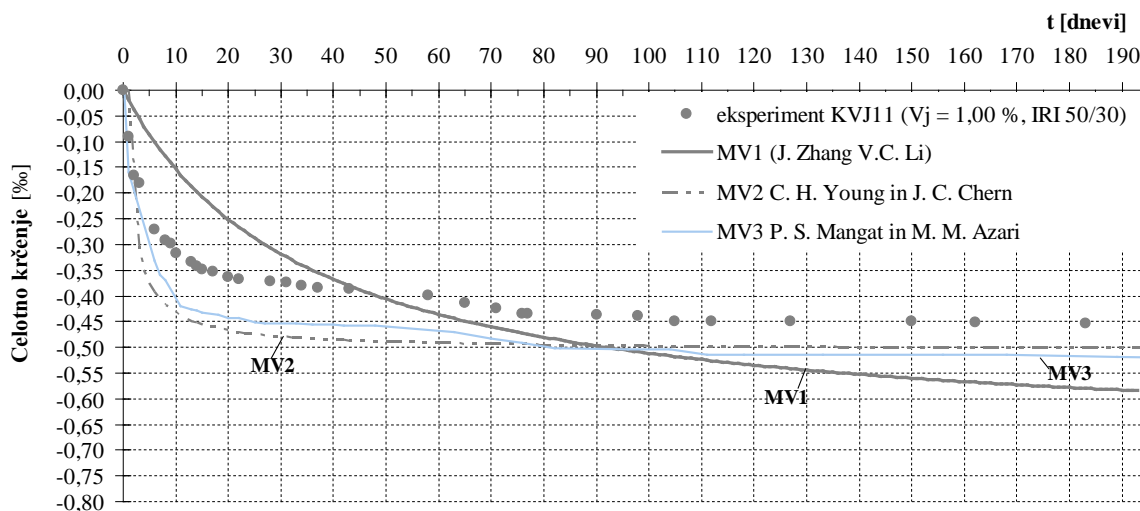
Na sliki 5.9 so prikazani časovni poteki celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % krajših jeklenih vlaken, modelirani z dosegljivimi računskimi postopki, in eksperimentalno določen časovni potek celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % krajših jeklenih vlaken. Časovni potek celotnega krčenja obravnavanega vlaknastega betona, določen z Youngovim in Chernovim numeričnim računskim postopkom, se dobro ujema z našim eksperimentalno določenim potekom celotnega krčenja vlaknastega betona z 0,25 % krajših jeklenih vlaken. Opazne razlike med celotnim krčenjem obravnavanega vlaknastega betona KVJ2, ki je določeno z Youngovim in Chernovim računskim modelom (1991), in izmerjenim krčenjem vlaknastega betona visoke trdnosti se pojavijo med 5. do 30. dnem od izdelave preskušancev. Oblika časovnega poteka celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti pri 0,25 % deležu krajših jeklenih vlaken, določena z numeričnim modelom Zhanga in Lija (2001), je bistveno drugačna od oblike časovnega poteka celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti, določenega z našimi eksperimenti. Modificirani numerični model Zhanga in Lija je primeren za določanje celotnega krčenja vlaknastega betona normalne trdnosti, ne pa za modeliranje celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti. Celotno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti je namreč večje od celotnega krčenja vlaknastega betona normalne trdnosti. Večje celotno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti v primerjavi s celotnim krčenjem vlaknastega betona normalne trdnosti pripisujemo večjemu zgodnjemu avtogenemu krčenju vlaknastega visokotrdnega betona. Časovni potek celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti, določen z Mangat-Azarijevim numeričnim modelom, se sorazmerno dobro ujema z eksperimentalnim časovnim potekom celotnega krčenja vlaknastega betona z 0,25 % deležem krajših jeklenih vlaken (KVJ2) v prvih 8 dneh od izdelave preskušancev. Pozneje pa so vrednosti celotnega krčenja, določene z Mangat-Azarijevim modelom, večje od vrednosti celotnega krčenja, določene z eksperimentom.



Slika 5.9: Eksperimentalno določen in z obstoječimi numeričnimi metodami modeliran časovni potek celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % krajših jeklenih vlaken.

Figure 5.9: Measured and with the existent numerical method calculated time development of total shrinkage of fibre reinforced high strength concrete with 0,25 % content of short steel fibres.

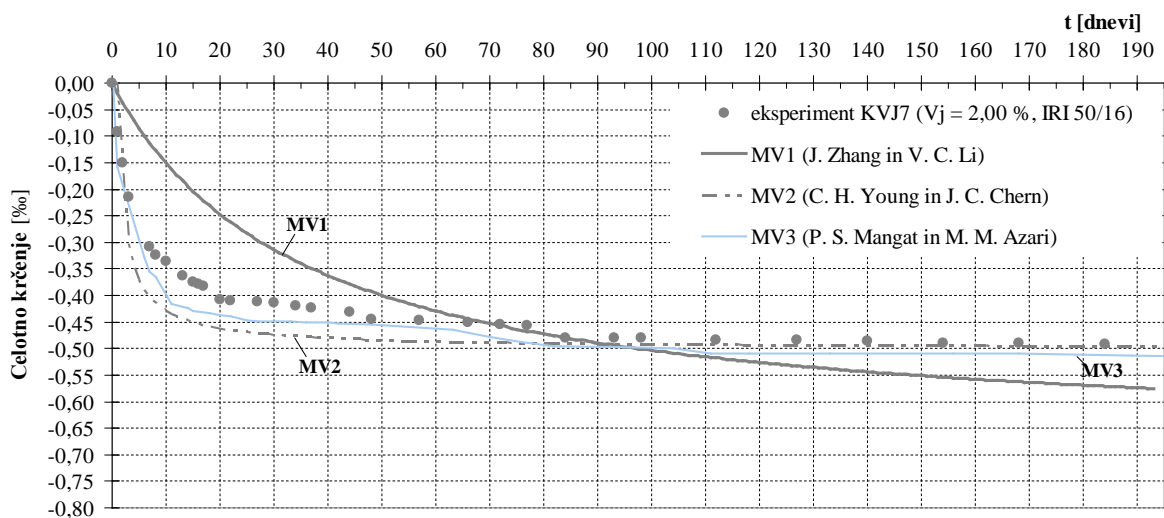
Primerjava med časovnimi poteki celotnega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z 1,00 % daljših jeklenih vlaken, določenimi z dosegljivimi numeričnimi modeli, in celotnim krčenjem obravnavanega vlaknastega betona visoke trdnosti, določenim z našimi eksperimentalnimi raziskavami, je razviden na sliki 5.10. Časovni potek celotnega krčenja vlaknastega betona, določen s Zhang-Lijevim numeričnim postopkom, grobo odstopa od eksperimentalno določenega časovnega poteka celotnega krčenja vlaknastega betona z 1,00 % daljših jeklenih vlaken. Časovna poteka celotnega krčenja vlaknastega betona z 1,00 % daljših jeklenih vlaken (KVJ11), določena z numeričnima postopkoma Young-Cherna in Mangat-Azarija (1984), sta občutno bližja časovnemu poteku celotnega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona, ki je bil določen z našimi eksperimentalnimi raziskavami, kot pa časovni potek celotnega krčenja vlaknastega betona, simuliran z modelom Zhanga in Lija. Velikosti celotnega krčenja kompozita se tudi v tem primeru ne ujemajo z rezultati meritev. V prvih 5 dneh od izdelave preskušancev se celotno krčenje, določeno z numeričnima postopkoma Young-Cherna in Mangat-Azarija, precej dobro ujema s krčenjem, določenim z našim eksperimentom. Po 5. dnevu od izdelave preskušancev in vse do konca meritev pa vrednosti, določene z numeričnima postopkoma, odstopajo od eksperimentalno določenih vrednosti celotnega krčenja kompozita z 1,00 % daljših jeklenih vlaken (KVJ11). Celotno krčenje vlaknastega betona, določeno z Mangat-Azarijevim numeričnim postopkom, je 60. dan od izdelave preskušancev za 15 % večje od eksperimentalno izmerjenega celotnega krčenja. Celotno krčenje vlaknastega betona, določeno po metodi Younga in Cherna, pa 60. dan od izdelave preskušancev od eksperimentalno izmerjenega celotnega krčenja kompozita odstopa za približno 18 %.



Slika 5.10: Eksperimentalno določen in z obstoječimi numeričnimi metodami modeliran časovni potek celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti z 1,00 % daljših jeklenih vlaken.

Figure 5.10: Measured and with the existent numerical method calculated time development of total shrinkage of fibre reinforced high strength concrete with 1.00 % content of long steel fibres.

Na sliki 5.11 so prikazani časovni poteki celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti z velikim deležem krajših jeklenih vlaken (2,00 %), ki so določeni z obstoječimi numeričnimi postopki, in eksperimentalno določeni časovni potek celotnega krčenja enakega vlaknastega betona visoke trdnosti. Časovni potek celotnega krčenja vlaknastega betona, določen z Zhang-Lijevim numeričnim postopkom, je za vlaknasti beton visoke trdnosti z 2,00 % krajših jeklenih vlaken popolnoma neustrezen. Časovna poteka celotnega krčenja vlaknastega betona z 2,00 % krajših jeklenih vlaken (KVVJ7), dobljena z numeričnima modeloma Young-Cherna in Mangat-Azarija, sta podobne oblike kot eksperimentalno določeni časovni potek celotnega krčenja obravnavanega vlaknastega betona. Odstopanje celotnega krčenja obravnavanega vlaknastega betona, ki je določeno z numeričnim postopkom Young-Cherna, je glede na izmerjeno celotno krčenje obravnavanega vlaknastega betona z 2,00 % krajših jeklenih vlaken (KVVJ7) večje od odstopanja celotnega krčenja obravnavanega vlaknastega betona, ki je določeno z numeričnim postopkom Mangat-Azarija. 40. dan od izdelave preskušancev je celotno krčenje vlaknastega betona z 2,00 % krajših jeklenih vlaken (KVVJ7), določeno z numeričnim postopkom Mangat-Azarija, le približno za 6 % večje od eksperimentalno določenega celotnega krčenja obravnavanega vlaknastega betona. Celotno krčenje vlaknastega betona z 2,00 % krajših jeklenih vlaken (KVVJ7), določeno z numeričnim postopkom Young-Cherna, pa je 30. dan od izdelave preskušancev za 12 % večje od izmerjenega celotnega krčenja obravnavanega vlaknastega betona.



Slika 5.11: Eksperimentalno določen in z obstoječimi numeričnimi metodami modeliran časovni potek celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti z 2,00 % krajših jeklenih vlaken.

Figure 5.11: Measured and with the existent numerical method calculated time development of total shrinkage of fibre reinforced high strength concrete with 2,00 % content of short steel fibres.

Na podlagi primerjave prej prikazanih simulacij časovnih potekov celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti z različnimi deleži jeklenih vlaken, s pomočjo obstoječih numeričnih postopkov, z eksperimentalno določenimi časovnimi poteki celotnega krčenja obravnavanih vlaknastih betonov ugotavljamo, da Zhang-Lijev numerični postopek za simuliranje celotnega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z vsebovanimi jeklenimi vlakni ni primeren. Časovni potek celotnega krčenja vlaknastega betona, določen z numeričnima postopkoma Mangat-Azarija in Young-Cherna, predstavlja boljši približek dejanskemu, z eksperimenti določenemu časovnemu poteku celotnega krčenja obravnavanih vlaknastih betonov visoke trdnosti. Pri numeričnem modeliranju celotnega krčenja vlaknastih betonov z različno vsebnostjo jeklenih vlaken je treba pri uporabi Mangat-Azarijevega računskega modela poznati krčenje betona brez dodane vlaknaste armature.

Pri razvoju predlaganega postopka za napoved časovnega poteka krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti z različnimi vsebnostmi jeklenih vlaken smo se odločili za modifikacijo Young-Chernovega numeričnega postopka za napoved krčenja vlaknastega betona z jeklenimi vlakni. Časovni poteki celotnega krčenja vlaknastih betonov visoke trdnosti z različnimi deleži vlaken, ki so določeni z uporabo Chernovega numeričnega postopka, se pozneje po izdelavi preskušancev precej dobro ujemajo z eksperimentalnimi meritvami celotnega krčenja obravnavanih vlaknastih betonov. Modifikacije Young-Chernovega računskega postopka so potrebne le zaradi izboljšanja numerične simulacije zgodnjega celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti. Za numerično napovedovanje celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti po modelu Younga in Cherna ni treba poznati celotnega krčenja visokotrdnega betona brez dodane vlaknaste armature.

5.4 Razvoj izboljšane numeričnega postopka za napovedovanje celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti z dodanimi jeklenimi vlakni

Pri razvoju lastnega predlaganega postopka za napoved časovnega poteka krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z različnimi deleži daljših oziroma krajših jeklenih vlaken smo se odločili za modifikacijo Young-Chernovega numeričnega postopka za napoved krčenja vlaknastih betonov z jeklenimi vlakni. Časovni poteki celotnega krčenja vlaknastih betonov visoke trdnosti z različnimi vsebnostmi jeklenih vlaken, ki so določeni z uporabo Young-Chernovega računskega postopka, se namreč izmed obstoječih računskih postopkov pozneje po izdelavi preskušancev najbolj približajo eksperimentalno določenim časovnim potekom celotnega krčenja vlaknastih betonov visoke trdnosti. Da bi zagotovili čim boljše ujemanje numerične simulacije časovnih potekov krčenja visokotrdnih vlaknastih betonov z eksperimentalno določenimi vrednostmi, smo Young-Chernov računski postopek izboljšali z uvedbo dveh modifikacij. Oblikovno funkcijo, ki je v Young-Chernovem računskem postopku podana z izrazom (5.07), smo zamenjali s funkcijo, ki je podana z izrazom (5.30).

$$Q(\bar{t}) = a_v \cdot (1 - b_v \cdot e^{\left(\frac{t}{c_v} + \frac{\lambda_v}{d_v}\right)}), \quad (5.30)$$

Oblikovna funkcija (5.30) namreč določa obliko časovnega poteka celotnega krčenja visokotrdnega betona brez dodane vlaknaste armature. Po proučitvi ustreznosti različnih oblikovnih funkcij smo ugotovili, da s predlagano oblikovno funkcijo, ki je podana z izrazom (5.30), dosežemo najboljše ujemanje med eksperimentalno določenim in numerično z izrazom (5.31) simuliranim časovnim potekom celotnega krčenja vlaknastega betona v celotnem obravnavanem obdobju.

$$\varepsilon_s(t, t_o) = \varepsilon_{su} \cdot K_h \cdot Q(\bar{t}), \quad (5.31)$$

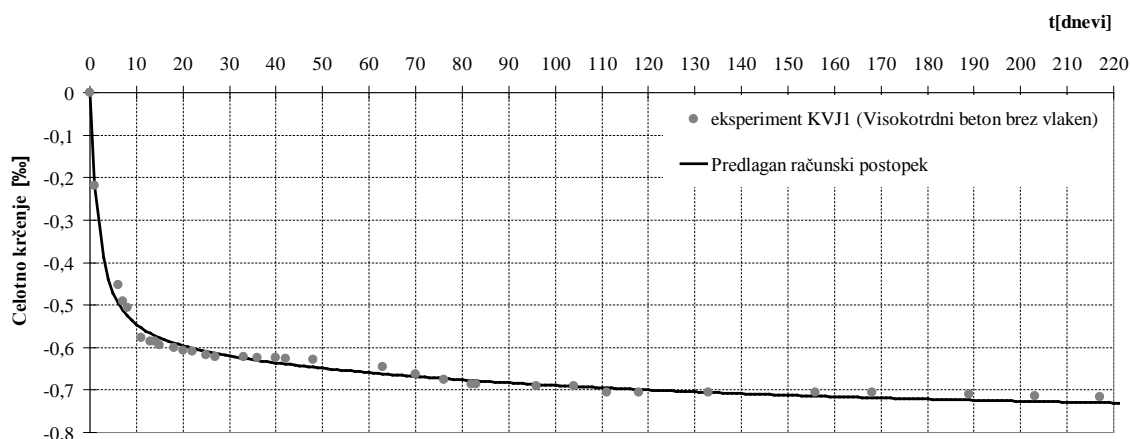
Pri tem je ε_{su} končno krčenje betona visoke trdnosti brez vlaknaste armature.

Parametre α_v , β_v , γ_v in δ_v v enačbi (5.30) smo določili po metodi najmanjših kvadratov odstopanj celotnega krčenja visokotrdnega betona brez vlaknaste mikroarmature, določenega z numeričnim postopkom po enačbi (5.31), in celotnega krčenja obravnavanega visokotrdnega betona brez vlaknaste mikroarmature, določenega s svojimi eksperimentalnimi raziskavami. Tako določeni parametri α_v , β_v , γ_v in δ_v , ki znašajo $\alpha_v = 1.13$, $\beta_v = 0.25$, $\gamma_v = 108.09$, $\delta_v = 2$, so bili določeni za beton visoke trdnosti brez vlaknaste armature, izpostavljen okolju s temperaturo $T = 22 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ in relativno vlago $RH = 70 \% \pm 3 \%$.

Vse druge parametre, ki so potrebni za boljšo simulacijo časovnega poteka celotnega krčenja visokotrdnega betona brez vlaknaste armature z našim računskim postopkom po enačbi (5.31), smo določili po izrazih od (5.08) do (5.22), podanih v predstavitvi računskega postopka po Young-Chernu.

Časovni potek celotnega krčenja visokotrdnega betona brez vlaknaste mikroarmature, določen z našim numeričnim postopkom in eksperimentalnimi rezultati meritev krčenja obravnavanega visokotrdnega

betona brez jeklenih vlaken KVJ1, je prikazan na sliki 5.12. S slike 5.12 je razvidno, da se časovni potek celotnega krčenja visokotrdnega betona brez dodane vlaknaste armature, določen z našim računskim postopkom, zelo dobro ujema z eksperimentalnimi rezultati meritev celotnega krčenja obravnavanega visokotrdnega betona brez vlaken. Oblika krivulje časovnega poteka celotnega krčenja betona brez vlaken KVJ1 je skoraj enaka obliki krivulje, ki jo določimo tako, da med vrednostmi eksperimentalnih meritev napnemo krivuljo, ki opisuje eksperimentalno meritev časovnega poteka celotnega krčenja obravnavanega betona brez vlaken.



Slika 5.12: Prikaz eksperimentalno in z izboljšanim našim numeričnim postopkom določeno celotno krčenje betona visoke trdnosti.

Figure 5.12: Comparison of experimental results with total shrinkage of high strength concrete as calculated with improved numerical procedure.

V predlaganem numeričnem postopku se celotno krčenje vlaknastega betona ne določi po izrazih (5.23) in (5.24), kot priporočata Young in Chern v svojem računskem postopku, ampak po izrazu (5.32). Izraz (5.32) smo razvili z modifikacijo izrazov (5.25) in (5.26), ki ju raziskovalca Mangat in Azari v lastnem numeričnem modelu priporočata za določitev celotnega krčenja vlaknastega betona. V izrazih (5.25) in (5.26) s parametri μ , ν , l in d omenjena raziskovalca upoštevata vpliv koeficienta trenja, prostorninskega deleža, dolžine in premera vlaken v vlaknastem betonu.

$$\varepsilon_{sc} = \varepsilon_s [e_v - f_v (\mu \nu l / d)], \quad (5.32)$$

Parametra e_v in f_v v izrazu (5.32) smo določili po metodi najmanjših kvadratov odstopanj časovnega poteka celotnega krčenja vlaknastega betona, določenega z modificiranim predlaganim računskim modelom, in iz izmerjenega časovnega poteka celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti, tako da je uporaba izraza (5.32) neodvisna od ravni $\mu \nu l / d$.

Za parametra e_v in f_v , ki sta določena za vlaknasti beton visoke trdnosti, mikroarmiran z jeklenimi vlakni dolžine 16 mm oziroma 30 mm in izpostavljen okolju s temperaturo $T = 22 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ in relativno vlažnostjo $RH = 70 \% \pm 3 \%$, dobimo vrednosti, podane v preglednici 5.5.

Preglednica 5.5: Vrednosti parametrov e_v in f_v .**Table 5.5:** Value of parameters e_v and f_v .

Vlaknasti beton	KVJ2	KVJ3	KVJ4	KVJ5	KVJ6	KVJ7	KVJ8	KVJ9	KVJ10	KVJ12	KVJ13
<i>Vrsta vlaken</i>	(VJ1)	(VJ1)	(VJ1)	(VJ1)	(VJ1)	(VJ1)	(VJ2)	(VJ2)	(VJ2)	(VJ2)	(VJ2)
<i>Vsebnost vlaken[%]</i>	0,25	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0	0,25	0,5	0,75	1,5	2,0
<i>Parameter e_v</i>	0,879	0,864	0,826	0,868	0,858	0,768	0,838	0,867	0,874	0,825	0,792
<i>Parameter f_v</i>	1,009	1,009	1,011	1,007	1,007	1,017	1,010	1,009	1,008	1,012	1,018

Legenda

(VJ1) – jeklena vlakna IRI 50/16

(VJ2) – jeklena vlakna IRI 50/30

Pri določitvi svojega izboljšanegega numeričnega računkega postopka za napoved celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti smo uporabili svoje eksperimentalne rezultate meritev celotnega krčenja vlaknastega betona z 0,25 %, 0,50 %, 0,75 %, 1,00 %, 1,50 % in 2,00 % daljših oziroma krajših jeklenih vlaken.

V preglednicah 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 in 5.11 so vrednosti celotnega krčenja preiskovanih vlaknastih betonov visoke trdnosti z različnim deležem daljših oziroma krajših jeklenih vlaken, dobljene z našimi meritvami in s predlaganim izboljšanim računskim postopkom za napoved celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti. Iz preglednic 5.6 do 5.11 je razvidno dobro ujemanje med eksperimentalnimi in numeričnimi vrednostmi celotnega krčenja visokotrdnih betonov brez dodane vlaknate armature KVJ1 in vlaknastih betonov z različno vsebnostjo krajših oziroma daljših jeklenih vlaken. Največja odstopanja med celotnim krčenjem po predlaganem računskem modelu in eksperimentalnimi rezultati so pri vlaknastih betonih visoke trdnosti KVJ5, KVJ7, KVJ12 in KVJ13 z 1,00 % in 2,00 % krajših jeklenih vlaken oziroma 1,50 % in 2,00 % daljših jeklenih vlaken v začetnih časih. Že majhna razlika med izmerjeno in napovedano vrednostjo krčenja pomembno vpliva na relativno vrednost odstopanja.

Preglednica 5.6: Vrednosti celotnega krčenja preiskovanega betona visoke trdnosti brez vlaken (KVJ1) in vlaknastega betona visoke trdnosti z 0,25 % krajših jeklenih vlaken (KVJ2), dobljenih z eksperimentalnimi meritvami in razvitim računskim postopkom.

Table 5.6: Value of total shrinkage of examined high strength concrete without fibres (KVJ1) and fibre reinforced high strength concrete with 0.25 % of shorter steel fibres obtain with experimental measurements and from proposed numerical procedure.

Visokotrdni beton KVJ1				Vlaknasti beton KVJ2 ($V_j = 0,25 \%$, IRI 50/16)			
Starost	Eksperiment	Račun	Odstopanje	Starost	Eksperiment	Model	Odstopanje
dan	ϵ_{se}	ϵ_{sm}	%	dan	ϵ_{se}	ϵ_{sm}	%
0	0	0	0	0	0,000	0,000	0,000
1	-0,219	-0,219	-0,158	3	-0,326	-0,331	1,502
6	-0,454	-0,496	9,253	7	-0,428	-0,437	2,127
7	-0,492	-0,496	0,729	9	-0,455	-0,457	0,528
8	-0,506	-0,496	-2,015	10	-0,465	-0,465	0,087
11	-0,577	-0,554	-3,878	11	-0,471	-0,472	0,114
13	-0,585	-0,567	-2,978	14	-0,489	-0,487	-0,346
14	-0,586	-0,572	-2,391	17	-0,499	-0,499	-0,059
15	-0,594	-0,577	-2,873	21	-0,523	-0,510	-2,411
18	-0,600	-0,589	-1,817	23	-0,525	-0,515	-2,012
20	-0,606	-0,596	-1,683	25	-0,528	-0,519	-1,707
22	-0,608	-0,602	-1,047	28	-0,538	-0,524	-2,469
25	-0,618	-0,609	-1,400	30	-0,538	-0,528	-1,845
27	-0,621	-0,614	-1,150	36	-0,540	-0,537	-0,697
33	-0,623	-0,625	0,373	39	-0,540	-0,540	0,014
36	-0,624	-0,630	1,001	42	-0,548	-0,544	-0,654
40	-0,625	-0,636	1,792	46	-0,550	-0,548	-0,331
42	-0,627	-0,639	1,912	50	-0,552	-0,552	0,165
48	-0,629	-0,646	2,797	57	-0,556	-0,559	0,490
63	-0,645	-0,662	2,715	64	-0,561	-0,565	0,571
70	-0,662	-0,668	0,898	74	-0,565	-0,572	1,153
76	-0,675	-0,673	-0,297	88	-0,566	-0,581	2,578
82	-0,687	-0,678	-1,357	101	-0,568	-0,587	3,442
83	-0,687	-0,678	-1,253	114	-0,570	-0,593	4,142
96	-0,690	-0,687	-0,427	135	-0,578	-0,602	4,020
104	-0,691	-0,692	0,113	149	-0,581	-0,606	4,338
111	-0,705	-0,695	-1,305	163	-0,583	-0,610	4,672
118	-0,705	-0,699	-0,803			max	-2,469
133	-0,706	-0,706	0,020				
156	-0,707	-0,714	1,103				
168	-0,707	-0,718	1,641				
189	-0,710	-0,724	1,880				
203	-0,713	-0,727	1,910				
217	-0,716	-0,730	1,886				
		max	-3,878				

Preglednica 5.7: Izmerjeno (ε_{se}) in izračunano (ε_{sm}) celotno krčenje vlaknastega visokotrdnega betona z vsebnostjo 0,50 % krajših (KVJ3) oziroma 0,75 % krajših (KVJ4) jeklenih vlaken.

Table 5.7: Measured (ε_{se}) and calculated (ε_{sm}) total shrinkage of fibre reinforced high strength concrete with 0.50 % of shorter (KVJ3) or 0.75 % of shorter (KVJ4) steel fibres.

Vlaknasti beton KVJ3 ($V_j = 0,50\%$, IRI 50/16)				Vlaknasti beton KVJ4 ($V_j = 0,75\%$, IRI 50/16)			
Starost	Eksperiment	Račun	Odstopanje	Starost	Eksperiment	Račun	Odstopanje
dan	ε_{se}	ε_{sm}	%	dan	ε_{se}	ε_{sm}	%
0	0,000	0,000	0,000	0	0,000	0,000	0,000
3	-0,293	-0,314	-7,210	4	-0,307	-0,327	6,319
6	-0,383	-0,400	-4,482	5	-0,328	-0,351	6,817
7	-0,396	-0,414	-4,511	6	-0,345	-0,367	6,417
8	-0,409	-0,425	-3,991	7	-0,352	-0,380	8,040
9	-0,414	-0,434	-4,820	8	-0,362	-0,390	7,672
10	-0,419	-0,441	-5,282	11	-0,403	-0,411	1,968
13	-0,457	-0,458	-0,174	13	-0,412	-0,420	2,003
15	-0,459	-0,466	-1,534	18	-0,432	-0,437	1,173
20	-0,478	-0,481	-0,789	21	-0,444	-0,444	0,084
23	-0,487	-0,488	-0,154	25	-0,457	-0,452	-1,107
27	-0,492	-0,496	-0,758	28	-0,468	-0,457	-2,427
30	-0,505	-0,501	0,767	35	-0,475	-0,466	-1,933
37	-0,515	-0,510	0,931	39	-0,488	-0,471	-3,513
41	-0,535	-0,515	3,822	58	-0,490	-0,487	-0,477
50	-0,539	-0,524	2,719	67	-0,497	-0,494	-0,670
59	-0,541	-0,532	1,651	73	-0,500	-0,497	-0,575
65	-0,542	-0,536	1,049	78	-0,503	-0,500	-0,647
70	-0,544	-0,540	0,762	85	-0,518	-0,504	-2,812
77	-0,559	-0,544	2,630	94	-0,522	-0,508	-2,699
86	-0,561	-0,550	2,030	99	-0,522	-0,511	-2,265
91	-0,562	-0,552	1,778	113	-0,522	-0,516	-1,167
105	-0,563	-0,559	0,683	116	-0,522	-0,517	-0,952
120	-0,564	-0,565	-0,195	128	-0,524	-0,522	-0,404
133	-0,566	-0,570	-0,794	141	-0,525	-0,526	0,106
147	-0,567	-0,574	-1,342	155	-0,530	-0,529	-0,052
161	-0,569	-0,578	-1,671	169	-0,534	-0,533	-0,296
177	-0,573	-0,582	-1,642	185	-0,539	-0,536	-0,661
191	-0,576	-0,585	-1,568	199	-0,543	-0,538	-0,805
		max	-7,210			max	8,040

Preglednica 5.8: Izmerjeno (ε_{se}) in izračunano (ε_{sm}) celotno krčenje vlaknastega visokotrdnega betona z vsebnostjo 1,00 % krajših (KVJ5) oziroma 1,50 % krajših (KVJ6) jeklenih vlaken.

Table 5.8: Measured (ε_{se}) and calculated (ε_{sm}) total shrinkage of fibre reinforced high strength concrete with 1.00 % of shorter (KVJ5) or 1.50 % of shorter (KVJ6) steel fibres.

Vlaknasti beton KVJ5 ($V_j = 1,00\%$, IRI 50/16)				Vlaknasti beton KVJ6 ($V_j = 1,50\%$, IRI 50/16)			
Starost	Eksperiment	Račun	Odstopanje	Starost	Eksperiment	Račun	Odstopanje
dan	ε_{se}	ε_{sm}	%	dan	ε_{se}	ε_{sm}	%
0	0,000	0,000	0,000	0	0,000	0,000	0,000
7	-0,305	-0,335	9,879	5	-0,306	-0,326	6,430
8	-0,376	-0,397	5,693	6	-0,318	-0,341	7,400
9	-0,388	-0,405	4,439	7	-0,335	-0,353	5,451
11	-0,401	-0,418	4,234	8	-0,342	-0,363	5,945
14	-0,437	-0,432	-1,079	9	-0,349	-0,370	5,927
16	-0,443	-0,439	-0,978	12	-0,380	-0,387	1,666
17	-0,445	-0,442	-0,737	14	-0,387	-0,394	1,965
18	-0,449	-0,445	-0,842	19	-0,403	-0,408	1,453
21	-0,464	-0,452	-2,644	22	-0,411	-0,415	0,854
23	-0,465	-0,456	-1,894	26	-0,416	-0,421	1,212
28	-0,469	-0,465	-0,873	29	-0,424	-0,426	0,353
31	-0,470	-0,469	-0,219	36	-0,432	-0,434	0,476
38	-0,477	-0,478	0,227	40	-0,447	-0,438	-2,000
45	-0,487	-0,485	-0,319	49	-0,454	-0,446	-1,813
51	-0,497	-0,490	-1,342	58	-0,462	-0,453	-1,903
56	-0,512	-0,495	-3,457	64	-0,464	-0,457	-1,469
67	-0,516	-0,502	-2,669	69	-0,468	-0,460	-1,650
74	-0,520	-0,507	-2,559	76	-0,481	-0,464	-3,520
79	-0,520	-0,510	-1,998	85	-0,485	-0,468	-3,493
86	-0,535	-0,514	-3,935	90	-0,485	-0,471	-3,013
93	-0,537	-0,517	-3,636	104	-0,485	-0,477	-1,802
108	-0,537	-0,524	-2,399	119	-0,490	-0,482	-1,622
114	-0,537	-0,526	-1,957	132	-0,490	-0,486	-0,795
129	-0,540	-0,531	-1,565	146	-0,492	-0,490	-0,416
143	-0,542	-0,536	-1,128	160	-0,493	-0,493	-0,006
156	-0,546	-0,539	-1,199	176	-0,498	-0,496	-0,265
170	-0,548	-0,542	-1,068	190	-0,500	-0,499	-0,156
186	-0,550	-0,546	-0,824			max	-3,520
200	-0,556	-0,548	-1,427				
		max	9,879				

Preglednica 5.9: Izmerjeno (ε_{se}) in izračunano (ε_{sm}) celotno krčenje vlaknastega visokotrdnega betona z vsebnostjo 2,00 % krajših (KVJ7) oziroma 0,25 % daljših (KVJ8) jeklenih vlaken.

Table 5.9: Measured (ε_{se}) and calculated (ε_{sm}) total shrinkage of fibre reinforced high strength concrete with 2.00 % of shorter (KVJ7) or 0.25 % of longer (KVJ8) steel fibres.

Vlaknasti beton KVJ7 ($V_j = 2,00\%$, IRI 50/16)				Vlaknasti beton KVJ8 ($V_j = 0,25\%$, IRI 50/30)			
Starost	Eksperiment	Račun	Odstopanje	Starost	Eksperiment	Račun	Odstopanje
dan	ε_{se}	ε_{sm}	%	dan	ε_{se}	ε_{sm}	%
0	0,000	0,000	0,000	0	0,000	0,000	0,000
7	-0,309	-0,344	11,399	5	-0,342	-0,358	4,743
8	-0,323	-0,353	9,223	8	-0,406	-0,429	5,591
10	-0,336	-0,366	8,990	9	-0,427	-0,438	2,500
13	-0,364	-0,380	4,546	10	-0,449	-0,445	-0,919
15	-0,375	-0,387	3,073	12	-0,454	-0,457	0,714
16	-0,379	-0,390	2,777	15	-0,480	-0,470	-1,910
17	-0,382	-0,393	2,774	17	-0,480	-0,477	-0,622
20	-0,408	-0,400	-1,984	19	-0,484	-0,483	-0,233
22	-0,410	-0,403	-1,663	23	-0,490	-0,493	0,501
27	-0,411	-0,411	0,142	26	-0,493	-0,498	1,155
30	-0,414	-0,416	0,325	30	-0,496	-0,505	1,835
34	-0,419	-0,420	0,359	33	-0,500	-0,509	1,913
37	-0,423	-0,423	0,180	39	-0,505	-0,517	2,374
44	-0,431	-0,430	-0,129	54	-0,530	-0,532	0,401
48	-0,446	-0,433	-2,768	61	-0,539	-0,538	-0,245
57	-0,447	-0,440	-1,576	67	-0,552	-0,542	-1,807
66	-0,452	-0,446	-1,312	73	-0,565	-0,547	-3,248
72	-0,455	-0,449	-1,271	74	-0,565	-0,547	-3,132
77	-0,457	-0,452	-1,115	87	-0,573	-0,555	-3,102
84	-0,480	-0,455	-5,129	95	-0,576	-0,559	-2,918
93	-0,480	-0,459	-4,418	102	-0,587	-0,563	-4,181
98	-0,480	-0,461	-3,987	109	-0,588	-0,566	-3,749
112	-0,484	-0,467	-3,554	124	-0,589	-0,572	-2,935
127	-0,484	-0,471	-2,687	147	-0,590	-0,580	-1,849
140	-0,486	-0,475	-2,333	159	-0,592	-0,583	-1,496
154	-0,490	-0,478	-2,286	180	-0,595	-0,588	-1,190
168	-0,490	-0,481	-1,804	194	-0,596	-0,591	-0,928
184	-0,491	-0,484	-1,329	208	-0,598	-0,593	-0,726
198	-0,496	-0,487	-1,786				
		max	11,399			max	5,591

Preglednica 5.10: Izmerjeno (ε_{se}) in izračunano (ε_{sm}) celotno krčenje vlaknastega visokotrdnega betona z vsebnostjo 0,50 % daljših (KVJ9) oziroma 0,75 % daljših (KVJ10) jeklenih vlaken.

Table 5.10: Measured (ε_{se}) and calculated (ε_{sm}) total shrinkage of fibre reinforced high strength concrete with 0.50 % of longer (KVJ9) or 0.75 % of longer (KVJ10) steel fibres.

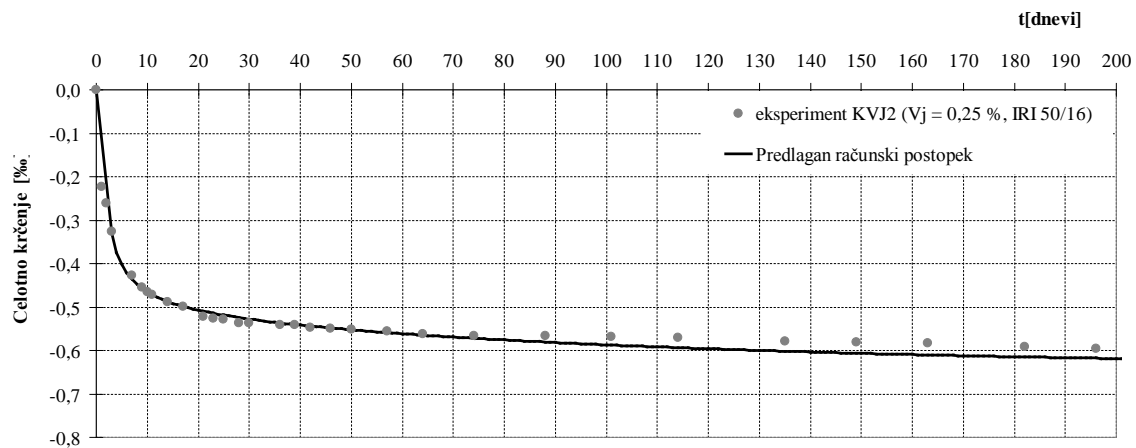
Vlaknasti beton KVJ9 ($V_j = 0,50\%$, IRI 50/30)				Vlaknasti beton KVJ10 ($V_j = 0,75\%$, IRI 50/30)			
Starost	Eksperiment	Račun	Odstopanje	Starost	Eksperiment	Račun	Odstopanje
dan	ε_{se}	ε_{sm}	%	dan	ε_{se}	ε_{sm}	%
0	0,000	0,000	0,000	0	0,000	0,000	0,000
4	-0,357	-0,362	1,587	3	-0,299	-0,313	-4,779
6	-0,379	-0,407	7,548	6	-0,398	-0,399	-0,408
7	-0,414	-0,422	1,747	7	-0,410	-0,413	-0,719
8	-0,426	-0,433	1,531	8	-0,429	-0,424	1,060
11	-0,454	-0,456	0,452	10	-0,440	-0,440	-0,135
12	-0,463	-0,461	-0,330	13	-0,460	-0,457	0,667
13	-0,467	-0,466	-0,252	15	-0,464	-0,465	-0,257
15	-0,471	-0,475	0,829	17	-0,470	-0,472	-0,434
18	-0,487	-0,485	-0,528	21	-0,483	-0,483	0,077
20	-0,494	-0,490	-0,881	24	-0,486	-0,489	-0,708
26	-0,497	-0,503	1,184	27	-0,494	-0,495	-0,088
29	-0,497	-0,508	2,222	30	-0,496	-0,500	-0,670
33	-0,503	-0,514	2,221	36	-0,498	-0,508	-1,940
35	-0,505	-0,517	2,363	51	-0,514	-0,524	-1,909
41	-0,510	-0,524	2,747	58	-0,524	-0,530	-1,132
56	-0,529	-0,539	1,812	64	-0,536	-0,534	0,359
63	-0,541	-0,544	0,627	69	-0,547	-0,538	1,742
69	-0,555	-0,549	-1,201	70	-0,547	-0,539	1,617
74	-0,567	-0,552	-2,549	83	-0,553	-0,547	1,203
75	-0,567	-0,553	-2,434	91	-0,555	-0,551	0,645
88	-0,574	-0,561	-2,306	98	-0,561	-0,555	1,178
96	-0,574	-0,565	-1,681	105	-0,562	-0,558	0,828
103	-0,584	-0,568	-2,645	120	-0,565	-0,564	0,184
110	-0,584	-0,571	-2,103	142	-0,566	-0,572	-0,927
125	-0,585	-0,577	-1,289	155	-0,568	-0,575	-1,359
148	-0,586	-0,585	-0,088	176	-0,571	-0,581	-1,686
160	-0,586	-0,588	0,488	190	-0,574	-0,584	-1,616
181	-0,588	-0,593	0,898	204	-0,574	-0,586	-2,064
195	-0,589	-0,596	1,158			max	-4,779
209	-0,591	-0,599	1,246				
		max	-2,645				

Preglednica 5.11: Izmerjeno (ε_{se}) in izračunano (ε_{sm}) celotno krčenje vlaknastega visokotrdnega betona z vsebnostjo 1,00 % daljših (KVJ11) oziroma 2,00 % daljših (KVJ13) jeklenih vlaken.

Table 5.11: Measured (ε_{se}) and calculated (ε_{sm}) total shrinkage of fibre reinforced high strength concrete with 1.00 % of longer (KVJ11) or 2.00 % of longer (KVJ13) steel fibres.

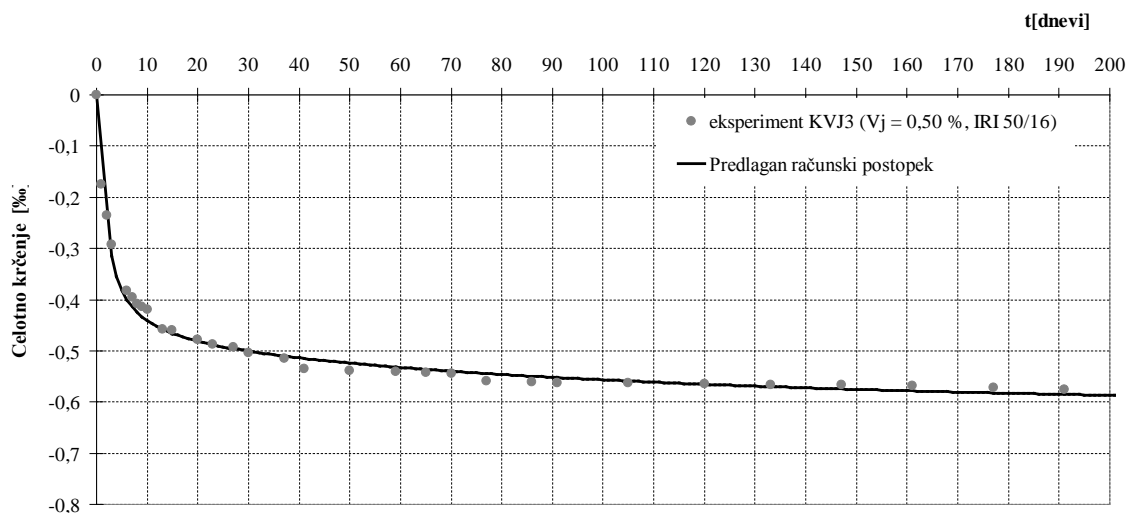
Vlaknasti beton KVJ12 ($V_f = 1,00\%$, IRI 50/30)				Vlaknasti beton KVJ13 ($V_f = 2,00\%$, IRI 50/30)			
Starost	Eksperiment	Račun	Odstopanje	Starost	Eksperiment	Račun	Odstopanje
dan	ε_{se}	ε_{sm}	%	dan	ε_{se}	ε_{sm}	%
0	0,000	0,000	0,000	0	0,000	0,000	0,000
6	-0,310	-0,341	-9,929	7	-0,287	-0,312	-8,921
7	-0,328	-0,353	-7,588	8	-0,309	-0,320	-3,715
8	-0,352	-0,362	-3,007	9	-0,321	-0,327	-1,985
9	-0,354	-0,370	-4,383	12	-0,334	-0,342	-2,333
10	-0,357	-0,376	-5,392	13	-0,346	-0,345	0,294
13	-0,391	-0,391	-0,010	14	-0,348	-0,349	-0,267
15	-0,394	-0,398	-0,956	16	-0,350	-0,354	-1,114
17	-0,408	-0,403	1,200	19	-0,361	-0,361	0,134
21	-0,412	-0,413	-0,078	21	-0,363	-0,365	-0,542
24	-0,416	-0,418	-0,452	27	-0,367	-0,374	-1,744
27	-0,426	-0,423	0,761	30	-0,368	-0,377	-2,560
30	-0,429	-0,427	0,552	33	-0,375	-0,381	-1,463
36	-0,433	-0,434	-0,335	36	-0,376	-0,384	-1,903
51	-0,446	-0,448	-0,429	42	-0,380	-0,389	-2,240
58	-0,459	-0,453	1,333	57	-0,395	-0,400	-1,021
64	-0,471	-0,457	3,108	64	-0,407	-0,404	0,903
70	-0,479	-0,460	3,946	70	-0,413	-0,407	1,547
71	-0,478	-0,461	3,694	75	-0,421	-0,409	2,800
84	-0,480	-0,468	2,665	76	-0,421	-0,410	2,687
92	-0,481	-0,471	2,027	89	-0,427	-0,415	2,701
99	-0,491	-0,474	3,384	97	-0,428	-0,419	2,276
106	-0,491	-0,477	2,821	104	-0,439	-0,421	4,045
121	-0,492	-0,482	1,877	111	-0,439	-0,423	3,661
143	-0,492	-0,489	0,568	126	-0,441	-0,428	3,087
156	-0,493	-0,492	0,184	149	-0,442	-0,433	1,957
177	-0,494	-0,496	-0,574	161	-0,442	-0,436	1,397
190	-0,497	-0,499	-0,376	182	-0,444	-0,440	1,000
204	-0,497	-0,501	-0,818	196	-0,446	-0,442	0,967
		max	-9,929	210	-0,448	-0,444	0,991
					max		-8,921

Na slikah od 5.13 do 5.23 so prikazani časovni poteki, določeni z modificiranim našim numeričnim računskim postopkom, in časovni poteki izmerjenega celotnega krčenja visokotrdnih vlaknastih betonov pri različnih deležih daljših in krajših jeklenih vlaken.



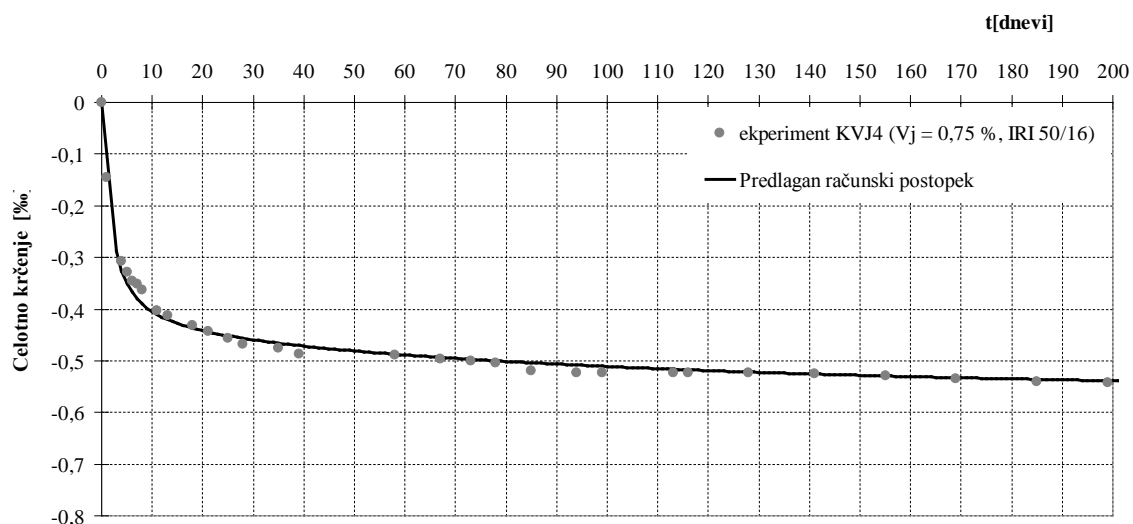
Slika 5.13: Časovna poteka celotnega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z 0,25 % krajših jeklenih vlaken (KVJ2), določena z meritvami oziroma s predlaganim računskim postopkom numerične simulacije.

Figure 5.13: Time development of total shrinkage of high strength fibre reinforced concrete with 0,25 % of shorter steel fibres (KVJ2) as measured or calculated with proposed numerical procedure.



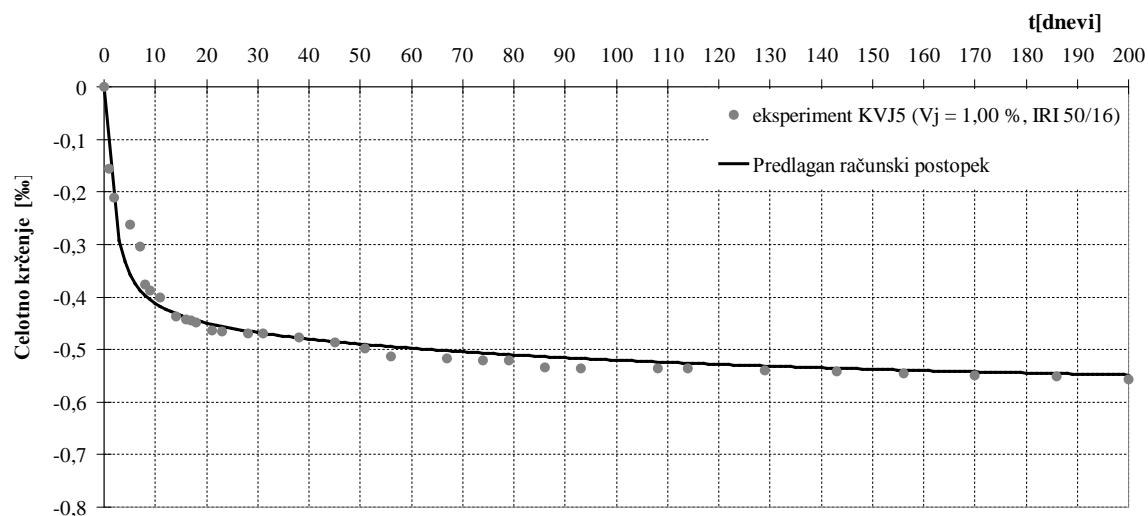
Slika 5.14: Časovna poteka celotnega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z 0,50 % krajših jeklenih vlaken (KVJ3), določena z meritvami oziroma s predlaganim računskim postopkom numerične simulacije.

Figure 5.14: Time development of total shrinkage of high strength fibre reinforced concrete with 0,50 % of shorter steel fibres (KVJ3) as measured or calculated with proposed numerical procedure.



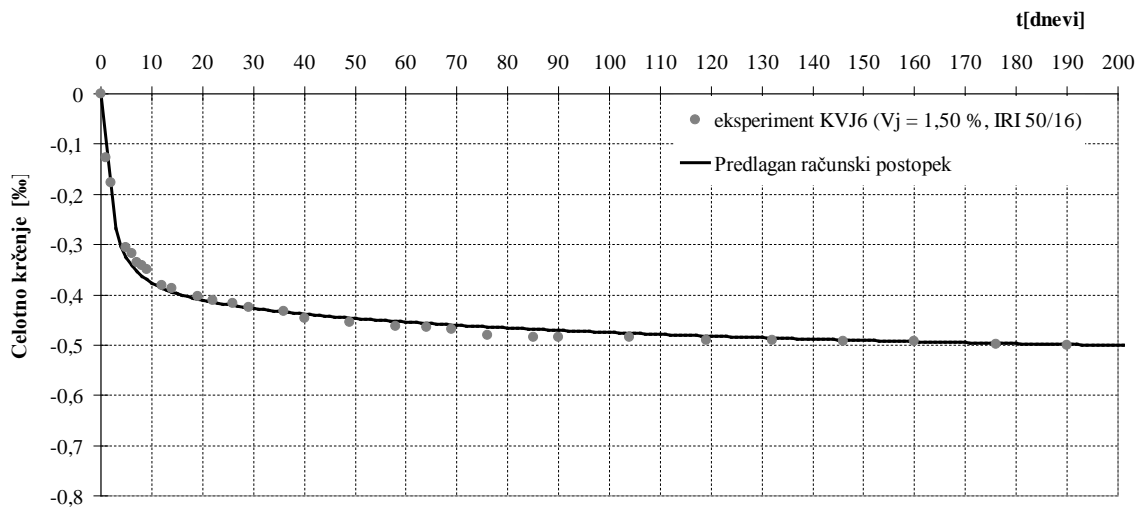
Slika 5.15: Časovna poteka celotnega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z 0,75 % krajših jeklenih vlaken (KVJ4), določena z meritvami oziroma s predlaganim računskim postopkom numerične simulacije.

Figure 5.15: Time development of total shrinkage of high strength fibre reinforced concrete with 0,75 % of shorter steel fibres (KVJ4) as measured or calculated with proposed numerical procedure.



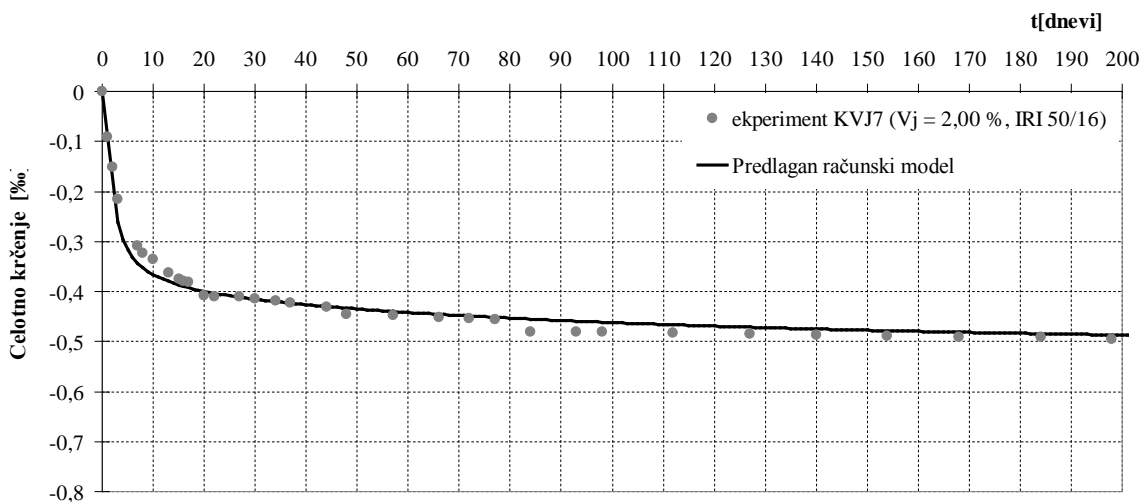
Slika 5.16: Časovna poteka celotnega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z 1,00 % krajših jeklenih vlaken (KVJ5), določena z meritvami oziroma s predlaganim računskim postopkom numerične simulacije.

Figure 5.16: Time development of total shrinkage of high strength fibre reinforced concrete with 1,00 % of shorter steel fibres (KVJ5) as measured or calculated with proposed numerical procedure.



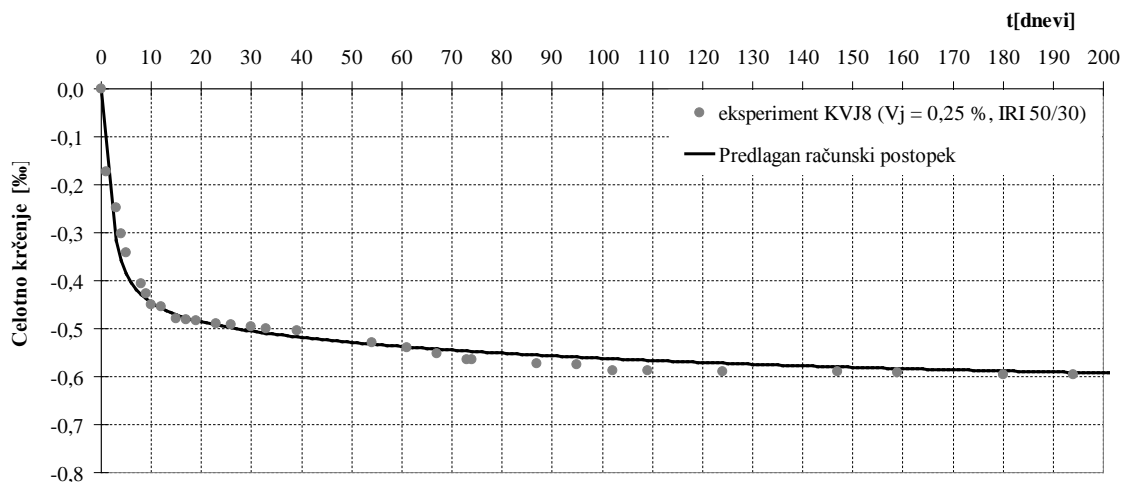
Slika 5.17: Časovna poteka celotnega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z 1,50 % krajših jeklenih vlaken (KVJ6), določena z meritvami oziroma s predlaganim računskim postopkom numerične simulacije.

Figure 5.17: Time development of total shrinkage of high strength fibre reinforced concrete with 1,50 % of shorter steel fibres (KVJ6) as measured or calculated with proposed numerical procedure.



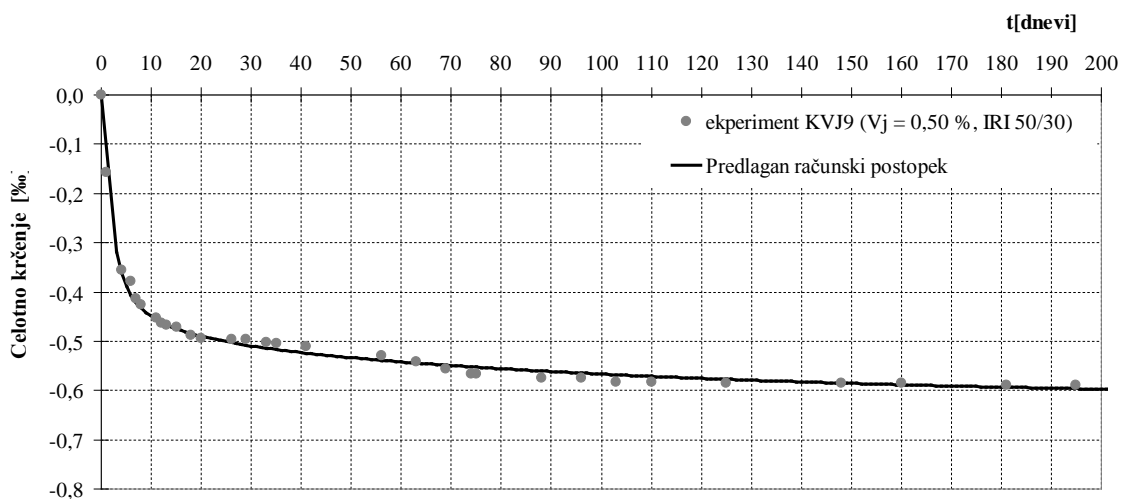
Slika 5.18: Časovna poteka celotnega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z 2,00 % krajših jeklenih vlaken (KVJ7), določena z meritvami oziroma s predlaganim računskim postopkom numerične simulacije.

Figure 5.18: Time development of total shrinkage of high strength fibre reinforced concrete with 2,00 % of shorter steel fibres (KVJ7) as measured or calculated with proposed numerical procedure.



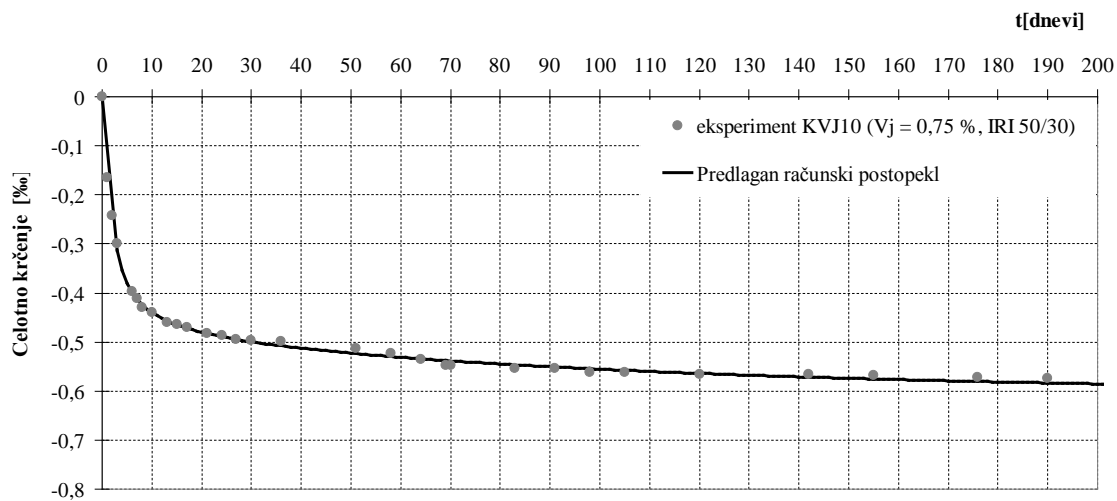
Slika 5.19: Časovna poteka celotnega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z 0,25 % daljših jeklenih vlaken (KVJ8), določena z meritvami oziroma s predlaganim računskim postopkom numerične simulacije.

Figure 5.19: Time development of total shrinkage of high strength fibre reinforced concrete with 0,25 % of longer steel fibres (KVJ8) as measured or calculated with proposed numerical procedure.



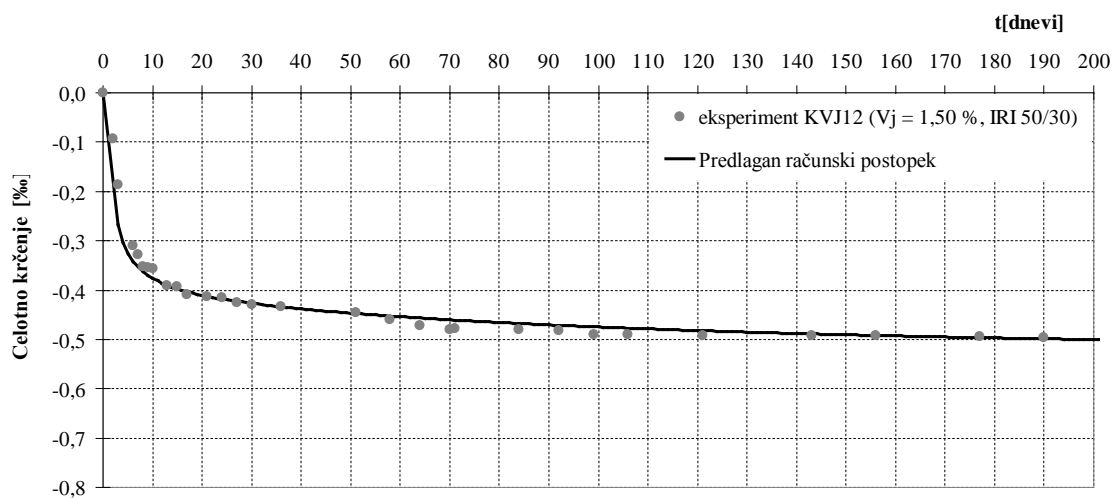
Slika 5.20: Časovna poteka celotnega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z 0,50 % daljših jeklenih vlaken (KVJ9), določena z meritvami oziroma s predlaganim računskim postopkom numerične simulacije.

Figure 5.20: Time development of total shrinkage of high strength fibre reinforced concrete with 0,50 % of longer steel fibres (KVJ9) as measured or calculated with proposed numerical procedure.



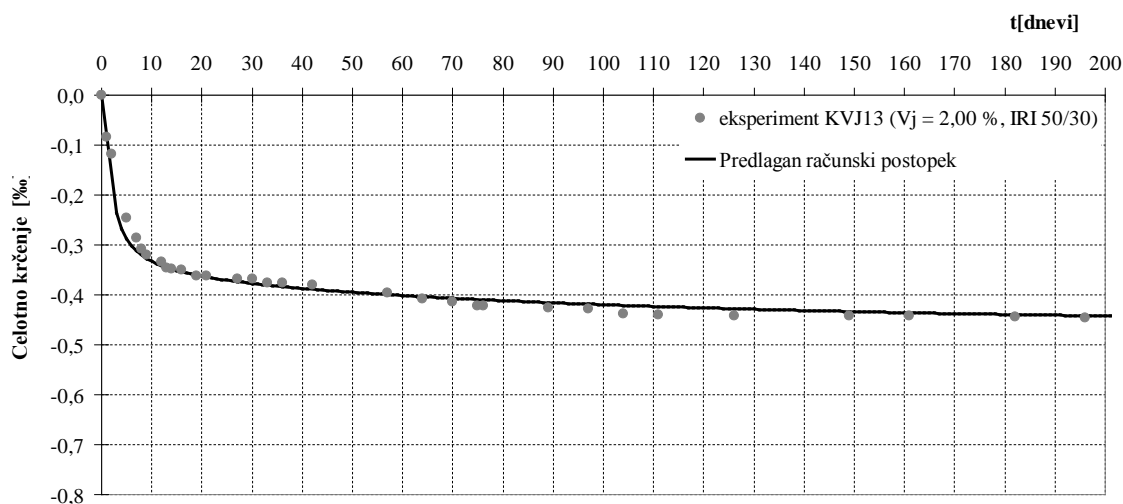
Slika 5.21: Časovna poteka celotnega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z 0,75 % daljših jeklenih vlaken (KVJ10), določena z meritvami oziroma s predlaganim računskim postopkom numerične simulacije.

Figure 5.21: Time development of total shrinkage of high strength fibre reinforced concrete with 0,75 % of longer steel fibres (KVJ10) as measured or calculated with proposed numerical procedure.



Slika 5.22: Časovna poteka celotnega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z 1,50 % daljših jeklenih vlaken (KVJ12), določena z meritvami oziroma s predlaganim računskim postopkom numerične simulacije.

Figure 5.22: Time development of total shrinkage of high strength fibre reinforced concrete with 1,50 % of longer steel fibres (KVJ12) as measured or calculated with proposed numerical procedure.



Slika 5.23: Časovna poteka celotnega krčenja visokotrdnega vlaknastega betona z 2,00 % daljših jeklenih vlaken (KVJ13), določena z meritvami oziroma s predlaganim računskim postopkom numerične simulacije.

Figure 5.23: Time development of total shrinkage of high strength fibre reinforced concrete with 2,00 % long steel fibres (KVJ13) as measured or calculated with proposed numerical procedure.

Iz prikaza časovnih potekov celotnega krčenja visokotrdnih vlaknastih betonov z različnimi deleži krajših in daljših jeklenih vlaken, ki so določeni z našimi eksperimentalnimi raziskavami oziroma računsko simulirani s predlaganim numeričnim postopkom, je razvidno, da se v povprečju izmerjeno in računsko napovedano celotno krčenje vlaknastih betonov med seboj sorazmerno dobro ujema. Začetna krivulja celotnega krčenja je pri betonih visoke trdnosti strma, ker avtogeno krčenje pri visokotrdnih betonih predstavlja velik del celotnega krčenja. Nekoliko večje relativne vrednosti medsebojnih odstopanj celotnega krčenja obravnavanih vlaknastih betonov v začetnem obdobju so po eni strani posledica majhnih absolutnih vrednosti celotnega krčenja vlaknastih betonov v tem časovnem obdobju, pri čemer že majhna absolutna vrednost razlike predstavlja sorazmerno veliko relativno odstopanje rezultatov. Po drugi strani pa je računsko modeliranje časovnega poteka celotnega krčenja vlaknastih betonov v začetnem obdobju, ko krčenje kompozita poteka sorazmerno intenzivno in je krivulja časovnega poteka krčenja obravnavanega vlaknastega betona ustrezno strma, glede na spremenljiv čas t numerično, slabo pogojen problem. V tem časovnem razponu so že pri majhni spremembi časa prirastki celotnega krčenja sorazmerno veliki.

6 NUMERIČNO MODELIRANJE LEZENJA VLAKNASTIH BETONOV NORMALNE TRDNOSTI

6.1 Računski modeli za napovedovanje lezenja vlaknastih betonov

V strokovni literaturi obstajajo različni predlogi za numerično simuliranje časovnega poteka lezenja kompozita z upoštevanjem vpliva vsebovane vlaknaste mikroarmature. Dva značilna predloga sta na kratko predstavljena v nadaljevanju tega dela.

Računski model P. S. Mangata in M. M. Azarija (1985)

Raziskovalca Mangat in Azari (1985) sta razvila numerični model za računsko simuliranje lezenja cementne matrice z naključno usmerjenimi jeklenimi vlakni. Vlaknasti beton je v obravnavanem predlogu računsko modeliran z vlaknom, ki je obdano z valjem cementne matrice. Model upošteva oviro lezenja, ki jo betonski matrici prek ploskovnega stika med vlakni in matrico omogoča vlakno. Model temelji na predpostavki, da je sprjemna trdnost med vlaknom in matrico λ osnovna funkcija krčenja cementne matrice in radialnih deformacij, ki se pojavijo pod vplivom konstantne napetosti. Avtorja sta izpeljala empirični izraz za določitev lezenja betona z jeklenimi vlakni, ki temelji na lezenju nearmirane betonske matrice v odvisnosti od velikosti in prostorninskega deleža vlaken v kompozitu.

Za določitev lezenja betona z različno vsebnostjo jeklenih vlaken avtorja predlagata izraz (6.01):

$$\varepsilon_{fc} = \varepsilon_{oc} - \frac{0.6724l^2 \alpha \mu (\varepsilon_{os} - \varepsilon_{o1}) [(s/2) - (d/2)]}{s^2 \left(\left\{ \frac{(s/2)^2 + (d/2)^2}{(s/2)^2 - (d/2)^2} + \nu \right\} + \frac{(1 - \nu_s)}{(E_s / E_E)} \right)} (0,41l + s) \quad (6.01)$$

Pri tem so:

- ε_{fc} lezenje vlaknastega betona z dodanimi jeklenimi vlakni
- ε_{oc} lezenje primerjalnega betona brez dodanih vlaken
- E_E elastični modul betona [GPa]
- E_c togost sveže matrice [GPa]
- E_s elastični modul jeklenih vlaken [GPa]
- ν_p Poissonov količnik nearmiranega betona
- ν_s poissonov količnik jekla, priporočena vrednost 0,3
- ν_f prostorninski delež jeklenih vlaken [%]
- l dolžina jeklenega vlakna [mm]
- d premer vlakna [mm]
- μ koeficient trenja med vlakni in cementno pasto, ki se določi iz eksperimentalnih rezultatov lezenja (0,08)
- s razdalja med vlakni [mm]
- $\alpha = E_E / E_c$ razmerje elastičnih modulov, betona proti matrici

ε_{os} prosto krčenje neovirane kontrolne matrice
 ε_{01} bočna deformacija nearmirane kontrolne matrice

Razdaljo med vlakni določimo po enačbi (6.02):

$$s^3 + l_e s^2 - B^2 (H - l_e / 2) l / L = 0 \quad (6.02)$$

ekvivalentno dolžino kontinuirnega vlakna pa po enačbi (6.03).

$$L = \frac{4v_f}{\pi d^2} \quad (6.03)$$

Pri tem so:

L ekvivalentna dolžina kontinuirnega vlakna [mm]
 l_e učinkovita dolžina vlakna v smeri napetosti [mm]
B širina preskušanca [mm]
H višina preskušanca [mm]

Učinkovito dolžino vlaken v smeri napetosti določimo po enačbi (6.04):

$$l_e = 0,41 \cdot l \quad (6.04)$$

Avtorja za določitev lezenja kompozita z jekleno vlaknasto armaturo predlagata izraza (6.05) in (6.06). Pri tem sta upoštevala svojo ugotovitev, da obstaja linearna zveza med lezenjem betona z jekleno vlaknasto armaturo in lezenjem nearmirane matrice.

$$\varepsilon_{fc} = m \cdot \varepsilon_{oc} \quad (6.05)$$

$$m = 1 - 1,96 \cdot \mu \cdot v_f \cdot \frac{l}{d} \quad (6.06)$$

Računski model Zhanga (2003)

Zhangov model za računsko določitev lezenja vlaknastega betona je razvit na podlagi teorije strižnega zaostajanja deformacij, z upoštevanjem naključne razporeditve vlaken. Pri tem predpostavljamo, da se pri deformiranju matrice med vlakni in cementno pasto pojavijo strižne napetosti (Zhang, 2003), ki vplivajo na lezenje matrice. To se kaže v makroskopskih deformacijah lezenja vlaken, ki so manjše od deformacij cementne matrice. Razviti model upošteva vpliv elastičnih modulov vlaken in paste ter dimenzije in prostorninski delež vlaken v kompozitu.

Zaradi različnih togosti vlaken in matrice se v kompozitu pod vplivom tlačne napetosti med vlakni in matrico pojavijo strižne napetosti, ki v vlaknih povzročijo povečane tlačne, v matrici pa ustrezne natezne napetosti. Tako vzdolžna vlakna, ki so vzporedna s smerjo vnesenih napetosti, ovirajo lezenje matrice in s tem zmanjšajo lezenje kompozita.

Za določitev lezenja kompozita z upoštevanjem vpliva vsebovane vlaknaste mikroarmature Zhang predlaga izraz (6.07):

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{cm} \left[1 - \eta \frac{k \cdot V_f}{1 - k \cdot V_f (1 + 1/\gamma_1)} \left(1 - \frac{1}{\beta \cdot \gamma} \tanh \beta \cdot \gamma \right) \right] \quad (6.07)$$

kjer so:

$$\eta = \frac{E_f}{E_m}, \quad \gamma = \frac{k \cdot l_f}{2r_f}, \quad \gamma_1 = \frac{k \cdot l_f}{2R} \quad (6.08)$$

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{1}{(1 + \nu_m) \eta \log \gamma_2} \right)}, \quad \gamma_2 = \sqrt{\left(\frac{1}{k \cdot V_f (1 + 1/\gamma_1)} \right)} \quad (6.09)$$

Razdaljo med vlakni določimo po enačbi (6.10):

$$R^2 \left(1 + \frac{2R}{k \cdot l_f} \right) = \frac{r_f^2}{k \cdot V_f} \quad (6.10)$$

Pri tem koeficient, ki upošteva vpliv vlaken, določimo po enačbi (6.11):

$$\varphi = \left[1 - \eta \frac{k \cdot V_f}{1 - k \cdot V_f (1 + 1/\gamma_1)} \left(1 - \frac{1}{\beta \cdot \gamma} \tanh \beta \cdot \gamma \right) \right] \quad (6.11)$$

Iz enačbe (6.07), z upoštevanjem enačbe (6.11), dobimo enačbo (6.12).

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{cm} \varphi \quad (6.12)$$

Pri tem so:

- ε_c lezenje kompozita z jeklenimi vlakni
- ε_{cm} lezenje primerjalnega betona brez dodane vlaknaste armature
- V_f prostorninski delež vlaken [%]
- d premer vlaken [mm]
- r_f radij vlaken [mm]
- l_f dolžina vlaken [mm]
- k faktor, ki upošteva orientacijo vlaken ($k=1$, $2/\pi$ in $1/2$ za enodimenzionalno, dvodimenzionalno in trodimenzionalno orientacijo vlaken)
- ν_m Poissonov količnik matrice
- E_f elastični modul vlaken [GPa]
- E_m elastični modul matrice [GPa]
- γ oblikovno učinkovito razmerje vlaken
- η razmerje elastičnih modulov vlaken in matrice
- $2R$ razdalja med vlakni

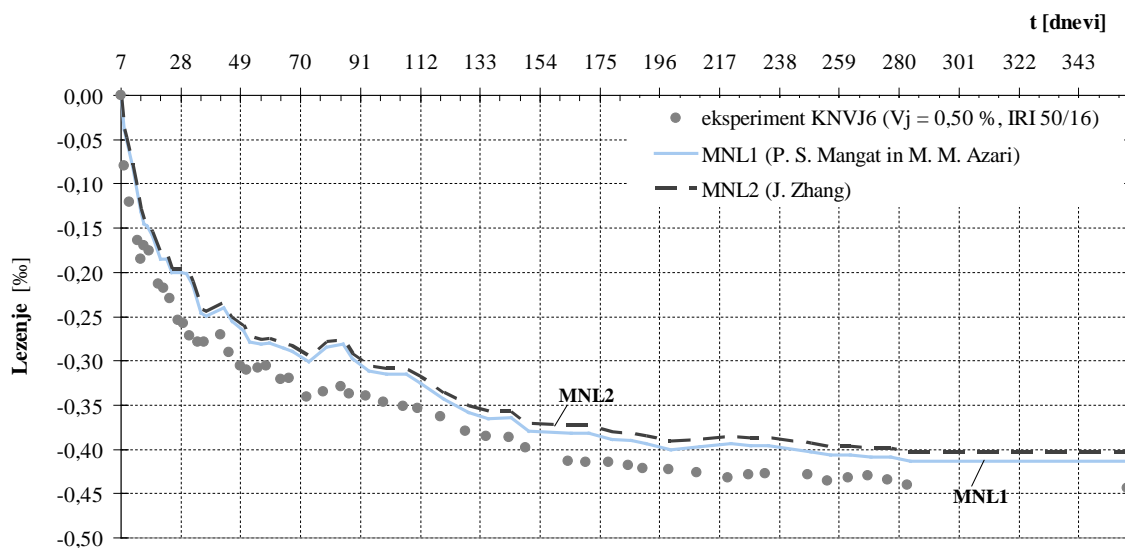
6.2 Modeliranje eksperimentalno dobljenih rezultatov preiskav lezenja betona normalne trdnosti z dodanimi jeklenimi vlakni z obstoječimi numeričnimi postopki

Na sliki 6.1 oziroma 6.2 so prikazani rezultati eksperimentalnih raziskav lezenja in z uporabo numeričnih računskih postopkov P. S. Mangata in M. M. Azarija oziroma J. Zhanga določena časovna poteka lezenja vlaknastega betona z 0,50 % oziroma 1,50 % krajših jeklenih vlaken.

Mangat in Azari (1985) sta razvila numerični računski postopek za napovedovanje lezenja vlaknastega betona z naključno orientiranimi jeklenimi vlakni. Pri razvoju tega postopka izhajata iz predpostavke, da so jeklena vlakna obdana z betonom valjaste oblike. Pri tem upoštevata, da vlaknasta armatura kompozita prek stika z betonom oziroma vnesenih osnih sil v vlaknasti armaturi ovira in zmanjšuje lezenje vlaknastega betona glede na lezenje primerjalnega betona brez vlaknaste mikroarmature. S povečevanjem osne sile v vlaknastem betonu se povečajo tudi strižne oziroma sprijemne napetosti med vlakni in betonom. Za določanje napovedi časovnega poteka lezenja vlaknastega betona normalne trdnosti po obravnavanem računskem postopku je treba poznati časovni potek lezenja betona brez dodane vlaknaste armature (ε_{oc}). Pri tem se v numeričnem postopku simulacija lezenja vlaknastega betona in vpliv jeklene vlaknaste armature na lezenje vlaknastega betona upošteva glede na dolžino (l), premer (d), prostorninski delež vlaken (v_f), medsebojne oddaljenosti vlaken (s) in koeficient trenja med vlakni in betonom (μ).

Zhangov (2003) računski postopek za napoved lezenja temelji na predpostavki, da se med cementno pasto in vlaknom pri deformaciji cementne paste pojavijo strižne napetosti, ki vplivajo na lezenje vlaknastega betona, to pa je zaradi tega nekoliko manjše od lezenja primerjalnega betona brez vlaknaste armature. V Zhangovem računskem postopku simulacije časovnega poteka lezenja vlaknastega betona se vpliv vlaken na lezenje kompozita upošteva z modulom elastičnosti, dimenzijami in prostorninskim deležem vlaken v vlaknastem betonu. Ves računski postopek izhaja iz vnaprejšnjega poznavanja lezenja betona brez vlaknaste mikroarmature.

Na sliki 6.1 so prikazani rezultati eksperimentalnih raziskav lezenja in z uporabo numeričnih računskih postopkov Mangata in Azarija oziroma Zhanga določena časovna poteka lezenja vlaknastega betona normalne trdnosti z 0,50 % krajših jeklenih vlaken. Iz navedene slike je razvidno, da se v začetnem času obe numerični simulaciji časovnega poteka lezenja le minimalno razlikujeta od izmerjenih vrednosti. Od 14. dne po izdelavi preskušancev pa vse do konca meritev se od izmerjenih vrednosti razlikujeta za približno 16 %.

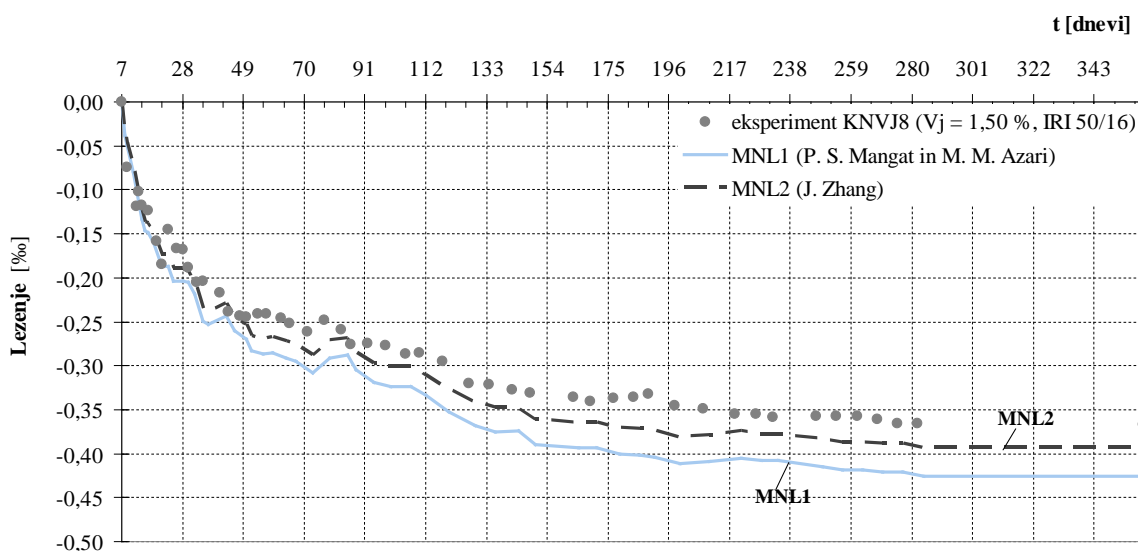


Slika 6.1: Eksperimentalno določeno in z numeričnima postopkoma simulirano lezenje vlaknastega betona normalne trdnosti z 0,50 % krajših jeklenih vlaken.

Figure 6.1: Comparison of measured and with numerical procedure simulated creep of fibre reinforced normal strength concrete with 0,50 % of shorter steel fibres content.

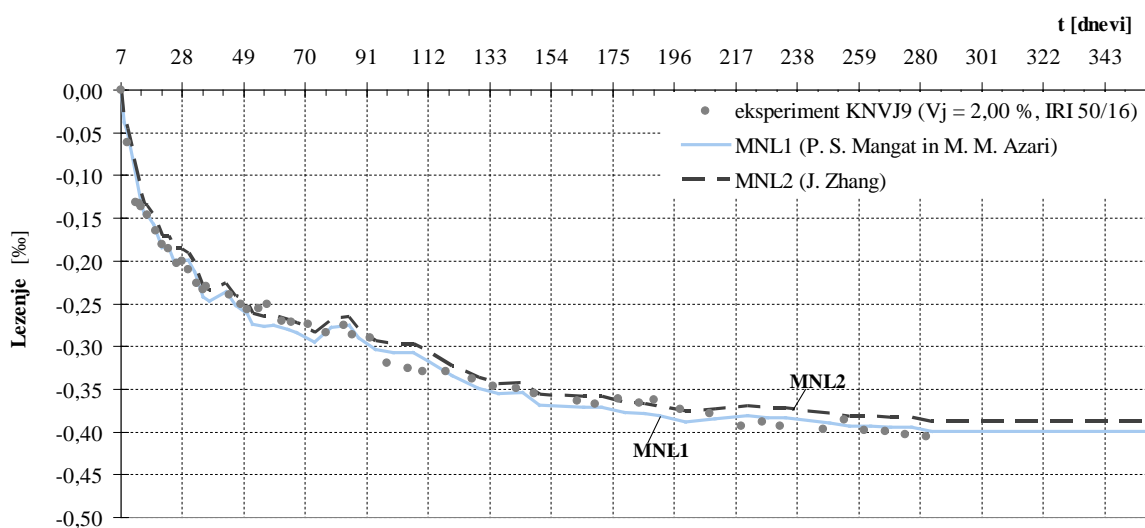
Primerjava med numerično simulacijo časovnih potekov lezenja kompozita z 1,50 % krajših jeklenih vlaken, izvedeno z računskima postopkoma (Mangata in Azarija (1985) in Zhanga (2003)), in izmerjenimi vrednostmi, je na sliki 6.2. V prvih 50 dneh od priprave preskušancev je s slike 6.2 razvidno sorazmerno dobro ujemanje med računsko napovedanim in izmerjenim lezenjem kompozita. Po 50 dneh od priprave preskušancev kompozita pa vse do konca meritev lezenja se razlika med potekom napovedanega in izmerjenega lezenja povečuje. Z računskim postopkom napovedano lezenje kompozita se od rezultatov meritev lezenja razlikuje za največ 10 %, medtem ko se lezenje, določeno po numeričnem postopku Mangata in Azarija, razlikuje za največ 17 %.

Na sliki 6.3 so prikazani časovni poteki lezenja betona normalne trdnosti z 2,00 % krajših jeklenih vlaken, določeni z numeričnima postopkoma Mangata in Azarija ter Zhanga, in rezultati naših meritev lezenja kompozita. Med celotnimi meritvami se časovna poteka lezenja vlaknastega betona, določena z numeričnima računskima postopkoma, sorazmerno zelo dobro ujemata z eksperimentalnimi rezultati naših meritev lezenja kompozita.



Slika 6.2: Eksperimentalno določeno in z numeričnima postopkoma simulirano lezenje vlaknastega betona normalne trdnosti z 1,50 % krajših jeklenih vlaken.

Figure 6.2: Comparison of measured and with numerical procedure simulated creep of fibre reinforced normal strength concrete with 1,50 % of shorter steel fibres content.



Slika 6.3: Eksperimentalno določeno in z numeričnima postopkoma simulirano lezenje vlaknastega betona normalne trdnosti z 2,00 % krajših jeklenih vlaken.

Figure 6.3: Comparison of measured and with numerical procedure simulated creep of fibre reinforced normal strength concrete with 2,00 % of shorter steel fibres content.

Obe numerični simulaciji časovnega poteka lezenja kompozita z različnimi deleži krajših jeklenih vlaken sta si zelo podobni. Odstopanje lezenja kompozita, določeno z numeričnim postopkom Mangat-Azarija, od eksperimentalno določenih vrednosti je nekoliko večje od odstopanja lezenja kompozita, ki je določeno s Zhangovim numeričnim računskim postopkom.

Ujemanje med lezenjem, določenim z numeričnima računskima postopkoma, in našimi meritvami lezenja vlaknastega betona normalne trdnosti je najboljše pri kompozitu z 2,00 % jeklenih vlaken (slika 6.3), medtem ko je pri manjšem deležu jeklenih vlaken odstopanje med napovedanim in izmerjenim lezenjem nekoliko večje (slika 6.1 in slika 6.2).

Lezenje, določeno z numeričnim računskim postopkom Mangat-Azarija, se dobro ujema z našimi eksperimentalnimi rezultati lezenja vlaknastega betona pri večjem deležu vlaken. Pri kompozitu z manjšimi deleži krajših jeklenih vlaken pa napovedano lezenje odstopa od naših meritev lezenja, zato bomo v nadaljevanju tega dela njihov računski postopek z ustrezno modifikacijo izboljšali.

6.3 Razvoj numeričnega modela za napovedovanje lezenja betona normalne trdnosti z dodajanjem različnega deleža krajših jeklenih vlaken

Naš numerični model za napovedovanje lezenja betona normalne trdnosti z dodanimi krajšimi jeklenimi vlakni predstavlja izboljšano modifikacijo računskega postopka numerične simulacije lezenja vlaknastega betona, ki ga predstavljata Mangat in Azari (1985). Vlaknasti beton je v njunem predlogu modeliran z vlaknom, ki je obdano z valjem cementne matrice. Njun računski postopek smo modificirali tako, da smo lezenje betona brez dodane vlaknaste armature določili z ustreznim numeričnim postopkom po modelu evropskih predpisov CEB-FIP (Lopatič, 1997).

Deformacijo lezenja betona brez dodane vlaknaste armature po CEB-FIP določimo z enačbo (6.13).

$$\varepsilon_{cc} = \sigma_c(t_0) \cdot \frac{\varphi(t, t_0)}{E_{ci}} \quad (6.13)$$

Pri tem je E_{ci} modul elastičnosti 28 dni starega betona, $\sigma_c(t_0)$ napetost pri hipnem nanosu v času t_0 in $\varphi(t, t_0)$ količnik lezenja, ki predstavlja razmerje deformacij lezenja, ki se razvije v časovnem intervalu od t_0 do časa t in hipno deformacijo betona v času nanosa enotske napetosti ob upoštevanju elastičnega modula 28 dni starega betona.

Količnik lezenja $\varphi(t, t_0)$ je odvisen od nazivnega koeficienta lezenja φ_0 in funkcije β_c , ki opisuje časovni razvoj lezenja v odvisnosti od trajanja obremenitve $(t - t_0)$.

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0(t_0) \cdot \beta_c(t - t_0) \quad (6.14)$$

Koeficient lezenja φ_0 podaja končno deformacijo lezenja betona zaradi enotske napetosti $\sigma_c = 1$. Na nazivni koeficient lezenja vplivajo še pogoji okolja, vrsta cementa, karakteristična debelina prereza, sestava betona, vodo-cementni dejavnik in količina cementa. Nazivni koeficient lezenja je po modelu evropskih predpisov CEB-FIP določen z izrazom (6.15).

$$\varphi_0(t_0) = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \quad (6.15)$$

Vpliv relativne vlažnosti φ_{RH} in vpliv srednje tlačne trdnosti betona $\beta(f_{cm})$ pri starosti 28 dni, ki nastopata v enačbi (6.15), upoštevamo po enačbah (6.16) in (6.17), privzetih iz CEB-FIP-a.

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH / 100}{0,46 \cdot (h/100)^{1/3}} \quad (6.16)$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5,3}{(f_{cm}/10)^{0,5}} \quad (6.17)$$

Pri razvoju izboljšanega računskega postopka za napoved časovnega poteka lezenja betona brez dodane vlaknaste armature smo enačbo, s katero zajamemo vpliv starosti betona ob obremenitvi (t_0), modificirali z enačbo (6.18). Na podlagi analize ustreznosti več različnih izrazov za opis vpliva starosti betona (t_0) ob nanosu napetosti na količnik lezenja $\varphi(t, t_0)$ smo z upoštevanjem izraza (6.18) dobili najboljše ujemanje med eksperimentalnimi raziskavami in numerično simulacijo lezenja obravnavanega betona z uporabo predlaganega računskega postopka (slika 6.4).

$$\beta(t_0) = \frac{a}{b + t_0^c} \quad (6.18)$$

Funkcijo β_c , ki opisuje razvoj lezenja betona v odvisnosti od trajanja obtežbe ($t - t_0$) v dnevih, smo pri predlaganem računskem postopku izrazili z enačbo (6.19). Z upoštevanjem te funkcije smo namreč izmed več preverjenih možnosti dobili najboljše ujemanje med izmerjenimi in numerično simuliranim lezenjem betona (slika 6.4).

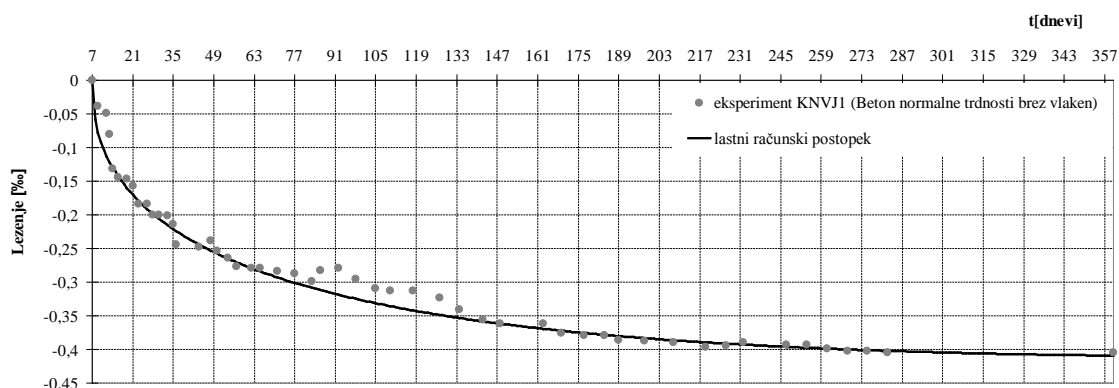
$$\beta_c(t - t_0) = \left[\frac{(t - t_0)^e}{(\beta_H + (t - t_0))^d} \right] \quad (6.19)$$

Parametre a, b, c, d in e, ki nastopajo v enačbah 6.18 in 6.19, smo določili po metodi najmanjših kvadratov odstopanj med dobljenimi vrednostmi celotnega lezenja betona normalne trdnosti, določene z numeričnim računskim postopkom in eksperimentalno izmerjenim lezenjem obravnavanega betona.

Parametre a, b, c, d in e smo določili po metodi najmanjših kvadratov odstopanj za obravnavan beton normalne trdnosti, ki je izpostavljen okolju s temperaturo $T = 22 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ in relativno vlago $RH = 70 \% \pm 3 \%$ znašajo:

$$a = 2,27, b = 0,16, c = -1,89, d = 0,87, e = 0,41 \quad (6.20)$$

Z modifikacijo modela CEB-FIP predpisov iz leta 1990 z enačbama 6.18 in 6.19 ter z upoštevanjem zgornjih vrednosti parametrov a, b, c, d in e smo dobili zelo dobro ujemanje med časovnim potekom lezenja, določenim s predlaganim računskim postopkom, in svojimi eksperimentalnimi rezultati meritev lezenja obravnavanega betona normalne trdnosti (slika 6.4).



Slika 6.4: Eksperimentalno določeno in s predlaganim računskim postopkom simulirano lezenje betona normalne trdnosti.

Figure 6.4: Comparison of measured and with proposed numerical procedure simulated creep of normal strength concrete.

S predlagano enačbo 6.21, ki je povzeta po Mangat-Azarijevem računskem postopku in je ustrezno modificirana s parametroma g in h , smo zajeli vpliv prostorninskega deleža, dolžine in premera vlaken na lezenje vlaknastega betona.

$$m = g - h \cdot \mu \cdot v_f \cdot l / d \quad (6.21)$$

Pri tem je:

- μ koeficient trenja med vlaknom in cementno pasto (0,08)
- v_f prostorninski delež jeklenih vlaken v vlaknasti betonski mešanici [%]
- l dolžina jeklenega vlakna [mm]
- d premer jeklenega vlakna [mm]

Na opisani način sta bila parametra g in h določena za vlaknaste betone normalne trdnosti, mikroarmirane z od 0,50 % do 2,00 % jeklenih vlaken dolžine 16 mm, ki so bili 6 dni negovani v vodi in 7. dan obremenjeni s konstantno napetostjo 10 MPa ter izpostavljeni okolici s temperaturo $T = 22 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ in relativno vlago $\text{RH} = 70 \% \pm 3 \%$.

Vrednosti parametrov g in h za različne vsebnosti krajših jeklenih vlaken so v tabeli 6.1.

Preglednica 6.1: Vrednosti parametrov g in h .

Table 6.1: Value of parameters g and h .

Vlaknasti beton	KNVJ6	KNVJ7	KNVJ8	KNVJ9
Vrsta vlaken	IRI 50/16	IRI 50/16	IRI 50/16	IRI 50/16
Delež vlaken [%]	0,5	1	1,5	2
Parameter g	1,137	1,041	0,979	1,088
Parameter h	1,949	1,950	1,953	1,949

Lezenje vlaknastega betona z različnim deležem krajših jeklenih vlaken ε_{cm} smo določili po enačbi 6.22.

$$\varepsilon_{cm} = m \cdot \varepsilon_{cc} \quad (6.22)$$

Pri tem sta:

m enačba, s katero zajamemo vpliv prostorninskega deleža, dolžine in premera vlaken na lezenje vlaknastega betona

ε_{cc} lezenje betona brez dodane vlaknaste armature

Prednost lastnega numeričnega računskega postopka simulacije časovnega poteka lezenja vlaknastega betona je, da ni treba vnaprej poznati časovnega poteka lezenja betona normalne trdnosti brez dodane vlaknaste armature.

V preglednicah 6.2, 6.3 in 6.4 so vrednosti lezenja vlaknastega betona normalne trdnosti z različnimi deleži krajših jeklenih vlaken, določene z našimi eksperimentalnimi meritvami in s predlaganim numeričnim računskim postopkom. Iz njih je razvidno, da se časovni potek lezenja vlaknastega betona z različnimi deleži krajših jeklenih vlaken, določen s predlaganim numeričnim računskim postopkom, sorazmerno dobro ujema z izmerjenim lezenjem proučevanega vlaknastega betona.

Preglednica 6.2: Izmerjeno in numerično simulirano lezenje preiskovanega betona normalne trdnosti brez vlaken (KNVJ1) in vlaknatega betona z 0,50 % krajših jeklenih vlaken (KNVJ6).**Table 6.2:** Measured and numerical simulated creep of examine normal strength concrete (KNVJ1) and fibre reinforced concrete with 0.50 % short steel fibre (KNVJ6).

Beton normalne trdnosti KNVJ1				Vlaknasti beton KNVJ6 ($V_f = 0,50\%$, IRI 50/16)			
Starost dan	Eksperiment ϵ_{ce}	Račun ϵ_{cm}	Odstopanje %	Starost dan	Eksperiment ϵ_{ce}	Račun ϵ_{cm}	Odstopanje %
7	0,000	0,000	0,000	7	0,000	0,000	0,000
12	-0,049	-0,050	1,600	10	-0,120	-0,110	-8,393
16	-0,145	-0,137	-5,642	15	-0,170	-0,152	-10,857
19	-0,147	-0,143	-2,446	17	-0,176	-0,166	-5,872
21	-0,157	-0,155	-1,661	22	-0,218	-0,194	-10,670
28	-0,200	-0,187	-6,190	34	-0,279	-0,243	-12,927
30	-0,200	-0,199	-0,550	36	-0,279	-0,249	-10,628
33	-0,201	-0,206	2,392	42	-0,271	-0,266	-1,616
35	-0,214	-0,212	-0,716	45	-0,290	-0,274	-5,599
36	-0,244	-0,221	-9,436	49	-0,305	-0,284	-7,004
44	-0,248	-0,227	-8,613	51	-0,310	-0,288	-7,016
48	-0,238	-0,242	1,560	55	-0,308	-0,297	-3,641
50	-0,254	-0,249	-2,035	58	-0,305	-0,303	-0,734
54	-0,264	-0,257	-2,467	63	-0,321	-0,312	-2,689
57	-0,277	-0,261	-5,532	66	-0,320	-0,317	-0,748
62	-0,280	-0,269	-3,824	72	-0,341	-0,327	-3,901
65	-0,279	-0,274	-1,574	78	-0,335	-0,336	0,462
71	-0,283	-0,282	-0,363	84	-0,329	-0,344	4,757
77	-0,287	-0,287	-0,111	87	-0,338	-0,348	3,147
83	-0,299	-0,296	-1,160	93	-0,340	-0,355	4,680
86	-0,282	-0,304	7,495	99	-0,346	-0,362	4,531
92	-0,280	-0,311	11,228	106	-0,351	-0,369	5,115
98	-0,295	-0,314	6,450	111	-0,353	-0,374	5,882
105	-0,309	-0,321	3,783	119	-0,363	-0,381	4,962
118	-0,313	-0,333	6,420	135	-0,385	-0,394	2,269
127	-0,323	-0,337	4,491	143	-0,387	-0,399	3,147
134	-0,341	-0,344	0,903	149	-0,399	-0,403	1,035
142	-0,355	-0,350	-1,481	164	-0,413	-0,411	-0,534
148	-0,362	-0,355	-2,093	170	-0,414	-0,414	-0,041
163	-0,361	-0,359	-0,494	178	-0,414	-0,418	0,866
169	-0,376	-0,363	-3,511	185	-0,418	-0,421	0,644
177	-0,379	-0,370	-2,282	190	-0,421	-0,423	0,425
184	-0,379	-0,373	-1,571	199	-0,422	-0,426	1,005
198	-0,387	-0,383	-0,917	220	-0,432	-0,433	0,305
208	-0,390	-0,386	-0,858	227	-0,429	-0,435	1,462
219	-0,397	-0,390	-1,791	233	-0,427	-0,437	2,306
226	-0,394	-0,391	-0,593	248	-0,429	-0,441	2,680
232	-0,390	-0,393	0,786	255	-0,435	-0,442	1,633
247	-0,393	-0,396	0,866	262	-0,432	-0,444	2,653
254	-0,393	-0,397	1,215	269	-0,430	-0,445	3,426
261	-0,399	-0,399	0,036	276	-0,434	-0,446	2,768
268	-0,403	-0,400	-0,647	283	-0,440	-0,447	1,644
275	-0,403	-0,401	-0,374	360	-0,444	-0,455	2,500
282	-0,405	-0,402	-0,605			max	-12,927
360	-0,405	-0,409	1,164				
		max	-9,436				

Preglednica 6.3: Izmerjeno in numerično simulirano lezenje vlaknastega betona z 1,00 % (KNVJ7) oziroma 1,50 % krajših jeklenih vlaken (KNVJ8).

Table 6.3: Measured and numerically simulated creep of examined fibre reinforced concrete with content of 1.00 % (KNVJ7) or 1.50 % of shorter steel fibres (KNVJ8).

Vlaknasti beton KNVJ7 ($V_f = 1,00\%$, IRI 50/16)				Vlaknasti beton KNVJ8 ($V_f = 1,50\%$, IRI 50/16)			
Starost	Eksperiment	Račun	Odstopanje	Starost	Eksperiment	Račun	Odstopanje
dan	ε_{ce}	ε_{cm}	%	dan	ε_{ce}	ε_{cm}	%
7	0,000	0,000	0,000	7	0,000	0,000	0,000
10	-0,095	-0,091	-4,364	12	-0,065	-0,058	11,062
17	-0,143	-0,148	3,539	16	-0,117	-0,128	-9,421
20	-0,183	-0,164	-10,504	19	-0,124	-0,135	-9,024
22	-0,168	-0,173	2,918	21	-0,158	-0,148	6,750
24	-0,196	-0,182	-7,193	23	-0,185	-0,164	11,456
27	-0,208	-0,193	-6,882	28	-0,166	-0,182	-9,282
31	-0,219	-0,207	-5,238	35	-0,205	-0,207	-1,141
34	-0,246	-0,216	-12,117	41	-0,204	-0,216	-6,138
36	-0,233	-0,222	-4,852	44	-0,218	-0,222	-2,036
42	-0,251	-0,237	-5,417	48	-0,238	-0,237	0,337
45	-0,252	-0,244	-3,036	50	-0,243	-0,244	-0,497
49	-0,261	-0,253	-3,046	54	-0,245	-0,253	-3,184
51	-0,274	-0,257	-6,110	57	-0,241	-0,257	-6,537
55	-0,284	-0,264	-7,016	62	-0,241	-0,264	-9,683
58	-0,287	-0,270	-6,118	65	-0,246	-0,270	-9,654
63	-0,296	-0,278	-6,135	71	-0,252	-0,278	-10,365
72	-0,292	-0,291	-0,341	92	-0,276	-0,306	-11,157
78	-0,291	-0,299	2,687	98	-0,275	-0,310	-12,780
84	-0,289	-0,306	5,864	110	-0,286	-0,322	-12,371
87	-0,301	-0,310	2,829	127	-0,295	-0,332	-12,518
93	-0,302	-0,316	4,585	134	-0,320	-0,338	-5,773
99	-0,316	-0,322	1,869	142	-0,321	-0,345	-7,384
106	-0,318	-0,328	3,204	148	-0,327	-0,349	-6,788
111	-0,338	-0,332	-1,588	163	-0,331	-0,354	-6,911
119	-0,332	-0,338	2,007	169	-0,336	-0,357	-6,295
135	-0,346	-0,349	0,721	184	-0,337	-0,358	-6,287
143	-0,345	-0,354	2,342	189	-0,336	-0,370	-10,101
149	-0,346	-0,357	2,974	198	-0,333	-0,372	-11,837
164	-0,358	-0,357	-0,278	208	-0,345	-0,374	-8,184
170	-0,362	-0,358	-1,222	219	-0,348	-0,377	-8,076
178	-0,358	-0,370	3,144	226	-0,355	-0,379	-6,776
190	-0,362	-0,374	3,186	247	-0,358	-0,384	-7,116
199	-0,370	-0,377	1,753	254	-0,357	-0,385	-7,768
209	-0,371	-0,379	2,245	261	-0,357	-0,388	-8,560
220	-0,373	-0,382	2,448	268	-0,357	-0,389	-8,886
233	-0,380	-0,385	1,346	282	-0,366	-0,391	-6,812
248	-0,379	-0,388	2,357	360	-0,366	-0,392	-7,059
255	-0,381	-0,389	2,133			max	-12,780
262	-0,384	-0,390	1,626				
269	-0,385	-0,391	1,622				
276	-0,389	-0,392	0,825				
281	-0,389	-0,393	0,979				
360	-0,399	-0,398	-0,177				
		max	-12,117				

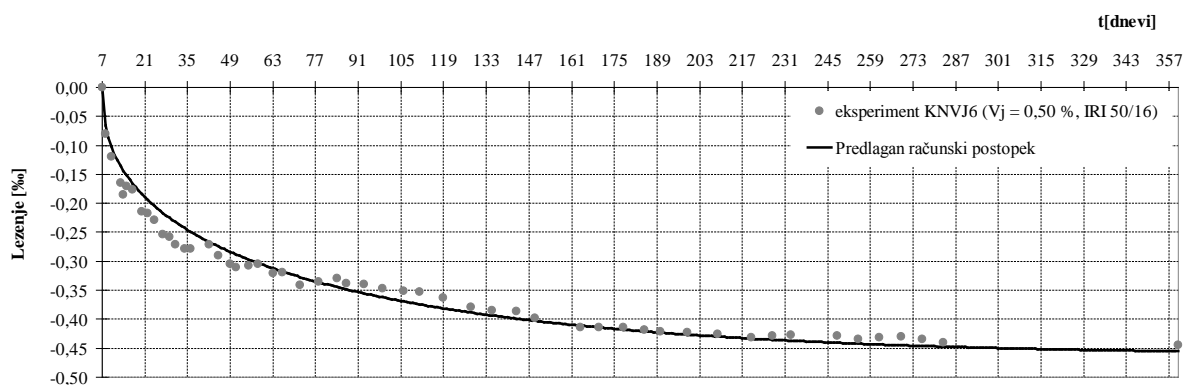
Preglednica 6.4: Izmerjeno in numerično simulirano lezenje vlaknastega betona z 2,00 % krajših jeklenih vlaken (KNVJ9).

Table 6.4: Measured and numerically simulated creep of examined fibre reinforced concrete with content of 2.00 % of shorter steel fibres (KNVJ9).

Vlaknasti beton KNVJ9 ($V_j = 2,00\%$, IRI 50/16)			
Starost dan	Eksperiment ϵ_{ce}	Račun ϵ_{cm}	Odstopanje %
7	0,000	0,000	0,000
12	-0,062	-0,058	-6,771
16	-0,137	-0,128	-6,323
19	-0,146	-0,135	-7,182
21	-0,164	-0,148	-10,100
23	-0,180	-0,164	-9,037
26	-0,185	-0,173	-6,388
28	-0,203	-0,182	-10,347
30	-0,200	-0,193	-3,212
35	-0,226	-0,207	-8,534
36	-0,233	-0,216	-7,297
44	-0,230	-0,222	-3,632
48	-0,240	-0,237	-1,154
50	-0,251	-0,244	-2,656
54	-0,257	-0,253	-1,560
57	-0,256	-0,257	0,390
62	-0,250	-0,264	5,796
65	-0,271	-0,270	-0,314
71	-0,272	-0,278	2,368
77	-0,274	-0,283	3,324
83	-0,283	-0,291	2,773
86	-0,275	-0,299	8,944
92	-0,286	-0,306	6,956
105	-0,319	-0,316	-0,902
110	-0,326	-0,322	-1,209
118	-0,329	-0,328	-0,195
127	-0,329	-0,332	1,064
134	-0,338	-0,338	0,222
142	-0,346	-0,345	-0,548
148	-0,348	-0,349	0,152
163	-0,355	-0,354	-0,493
177	-0,367	-0,357	-2,684
184	-0,361	-0,358	-0,953
189	-0,366	-0,370	0,926
198	-0,362	-0,372	2,720
219	-0,379	-0,377	-0,626
226	-0,393	-0,379	-3,393
232	-0,389	-0,382	-1,701
254	-0,397	-0,385	-2,929
261	-0,386	-0,388	0,529
268	-0,398	-0,389	-2,165
282	-0,403	-0,391	-2,850
360	-0,406	-0,392	-3,335

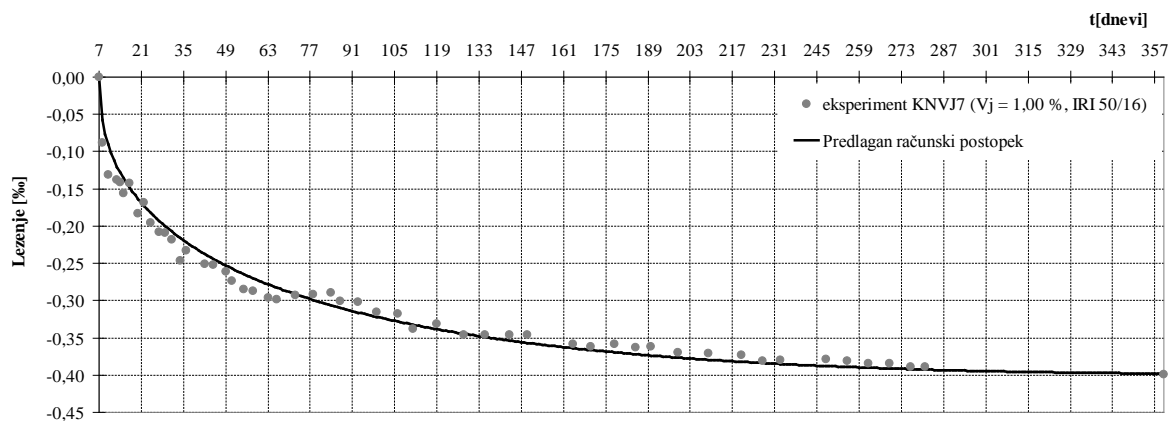
max -10,347

Na slikah od 6.5 do 6.8 je prikazan časovni potek lezenja, dobljen z našim modificiranim numeričnim modelom, in potek izmerjenega lezenja vlaknastih betonov z različno vsebnostjo krajših jeklenih vlaken.



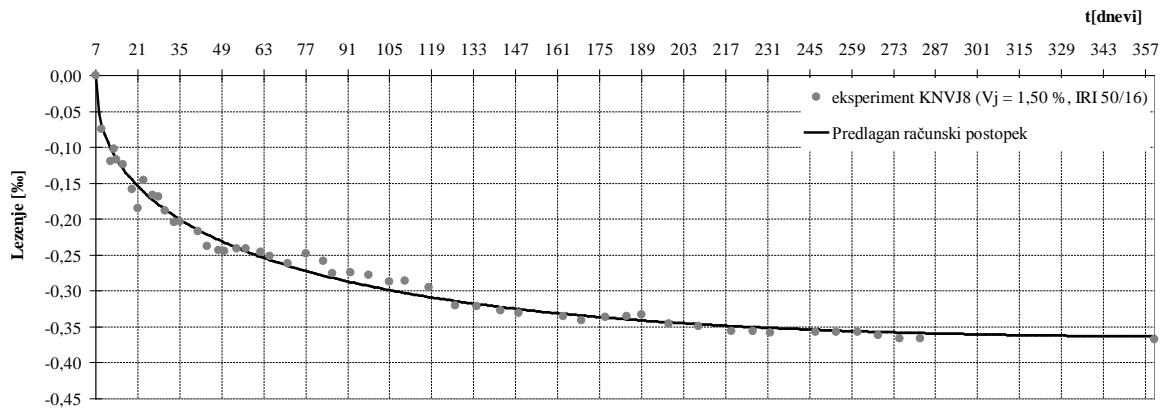
Slika 6.5: Eksperimentalno in s predlaganim numeričnim postopkom določeno lezenje vlaknastega betona z 0,50 % krajših jeklenih vlaken (KNVJ6).

Figure 6.5: Comparison of measured and with proposed numerical procedure defined creep of fibre reinforced concrete with 0,50 % content of shorter steel fibres (KNVJ6).



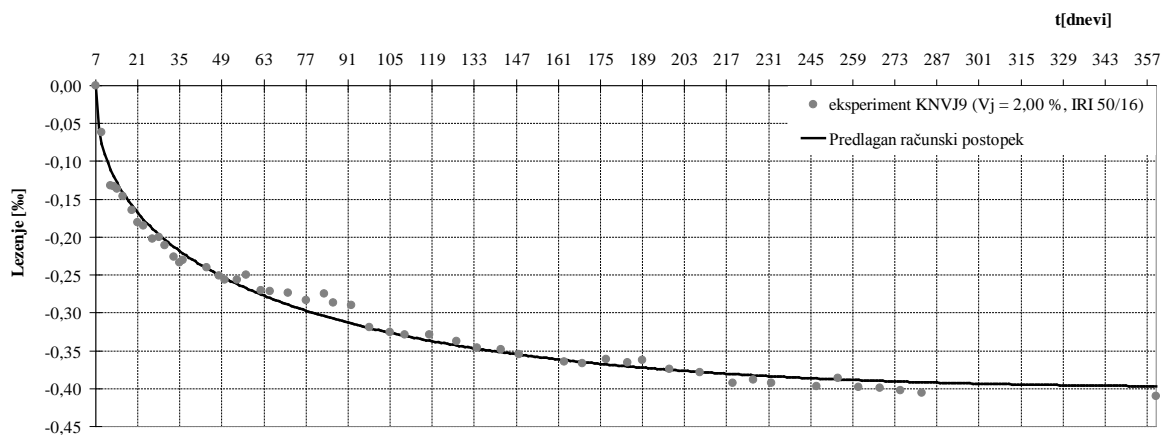
Slika 6.6: Eksperimentalno in s predlaganim numeričnim postopkom določeno lezenje vlaknastega betona z 1,00 % krajših jeklenih vlaken (KNVJ7).

Figure 6.6: Experimental and with proposed numerical procedure defined creep of fibre reinforced with 1,00 % short steel fibre (KNVJ7).



Slika 6.7: Eksperimentalno in s predlaganim numeričnim postopkom določeno lezenje vlaknastega betona z 1,50 % krajših jeklenih vlaken (KNVJ8).

Figure 6.7: Comparison of measured and with proposed numerical procedure defined creep of fibre reinforced concrete with 1,50 % content of shorter steel fibres (KNVJ8).



Slika 6.8: Eksperimentalno in s predlaganim numeričnim postopkom določeno lezenje vlaknastega betona z 2,00 % krajših jeklenih vlaken (KNVJ9).

Figure 6.8: Comparison of measured and with proposed numerical procedure defined creep of fibre reinforced concrete with 2,00 % of shorter steel fibres (KNVJ9).

7 ZAKLJUČEK

V okviru doktorske disertacije smo raziskovali reološke lastnosti vlaknastega betona, ki so še sorazmerno malo raziskane. Disertacija vsebuje rezultate lastnega eksperimentalnega programa, pri katerem smo proučevali vpliv različne vrste, vsebnosti in dolžine vlaken na časovni razvoj avtogenega in celotnega krčenja vlaknastega betona visoke in normalne trdnosti in na časovni razvoj lezenja vlaknastega betona normalne trdnosti.

Krčenje vlaknastega betona visoke in normalne trdnosti se dogaja v cementni pasti. Zrna agregata pri tem predstavljajo določeno oviro krčenju cementne paste. Zaradi tega se z večanjem prostorninskega deleža grobih zrn agregata v betonu krčenje betona manjša. Dodana daljša in krajša jeklena vlakna podobno vplivajo na krčenje betona kot zrna agregata, saj tudi ta predstavljajo določeno oviro prostemu krčenju sveže in otrdele cementne paste. Pri eksperimentalni raziskavi zgodnjega avtogenega krčenja vlaknastih betonov visoke trdnosti pri različnih deležih jeklenih vlaken smo ugotovili, da se z večanjem prostorninskega deleža jeklenih vlaken v kompozitu krčenje kompozita zmanjšuje. Zgodnje avtogeno krčenje preskušancev visokotrdnega vlaknastega betona z 0,25 % prostorninskim deležem daljših jeklenih vlaken je približno za 20 % manjše od zgodnjega avtogenega krčenja primerjalnega betona brez dodanih vlaken, krčenje vlaknastega betona z 2,00 % daljših jeklenih vlaken pa kar za 60 % manjše od zgodnjega avtogenega krčenja primerjalnega betona brez dodanih vlaken.

Raziskave zgodnjega avtogenega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti z različnimi vsebnostmi jeklenih vlaken so pokazale, da se zaznava avtogeno krčenje v vlaknastih betonov začne pozneje kot pri primerjalnem betonu visoke trdnosti brez dodanih vlaken. Z večanjem vsebnosti daljših ali krajših jeklenih vlaken v visokotrdnih vlaknastih betonih se čas privzetega začetka krčenja povečuje. Koeficient toplotne prevodnosti jeklenih vlaken, ki je med 14 in 16,3 W/mK, je približno desetkrat večji kot pri betonu. Odvajanje sproščene hidratacijske toplote iz betona v okolico je zaradi tega pri vlaknastih betonih z jeklenimi vlakni intenzivnejše kot pri betonu brez vlaken. Pa še za enako povečanje temperature vlaknastega betona z jeklenimi vlakni se porabi nekoliko več toplote kot pri betonu brez jeklenih vlaken. Zato se pri vlaknastih betonih pojavi zaznavno povišanje temperature, ki ga štejemo kot pokazatelja privzetega začetka krčenja, nekoliko pozneje kot pri betonih brez jeklenih vlaken.

Zgodnje avtogeno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti z dodanimi daljšimi jeklenimi vlakni je manjše od zgodnjega avtogenega krčenja vlaknastega betona z enako vsebnostjo krajših jeklenih vlaken. Predvidevamo, da je to posledica večje sidrne sile vlaken, ki je pri daljših vlaknih zaradi večje sprijemne ploskve večja. Avtogeno in celotno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti z jeklenimi vlakni je manjše od avtogenega in celotnega krčenja primerjalnega betona brez dodane vlaknaste armature. Z večanjem deleža dodanih daljših ali krajših jeklenih vlaken v vlaknastem betonu visoke trdnosti se krčenje kompozita zmanjšuje.

Celotno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti z dodanimi suhimi polipropilenskimi vlakni je občutno manjše od celotnega krčenja primerjalnega betona brez dodanih vlaken. Iz tega sklepamo, da suha polipropilenska vlakna ovirajo krčenje sveže in otrdele cementne paste. Zgodnje avtogeno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti z dodanimi navlaženimi polipropilenskimi vlakni je manjše od krčenja vlaknastega betona z dodanimi suhimi polipropilenskimi vlakni. Razlika med krčenjem vlaknastega betona visoke trdnosti z dodanimi suhimi in navlaženimi polipropilenskimi vlakni se z večanjem prostorninskega deleža dodanih vlaken v kompozitu povečuje. Navlažena vlakna tvorijo dodatno rezervo kemično nevezane vode v kompozitu, ki pripomore k zmanjšanju kapilarnih sil v svežem vlaknastem betonu in s tem zmanjša zgodnje avtogeno krčenje kompozita v prvih 24 urah po zamešanju betona. Z večanjem deleža navlaženih polipropilenskih vlaken se v vlaknastem betonu povečuje delež dodane nevezane vode v kompozitu, kar povzroči zmanjšanje kapilarnih podtlakov in posledično zmanjšanje avtogenega krčenja kompozita.

Krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona z dodanimi navlaženimi polipropilenskimi vlakni pa je večje od krčenja zaradi sušenja vlaknastega betona z dodanimi suhimi vlakni. Če uporabimo dodatna navlažena polipropilenska vlakna, je delež z vlaken dodane nevezane vode v kompozitu, ki sodeluje pri hidrataciji cementa in vpliva na krčenje zaradi sušenja, večji, kot če dodamo suha vlakna. Zaradi dodatne vode iz navlaženih vlaken je krčenje zaradi sušenja vlaknastega betona z dodanimi navlaženimi vlakni večje od krčenja zaradi sušenja kompozita z dodanimi suhimi vlakni. Povečanje krčenja zaradi sušenja visokotrdnega vlaknastega betona z navlaženimi vlakni pa je v primerjavi s krčenjem zaradi sušenja visokotrdnega vlaknastega betona z dodanimi suhimi vlakni sorazmerno majhno.

Na podlagi svojih eksperimentalnih raziskav krčenja vlaknastih betonov visoke trdnosti z majhno vsebnostjo različnih vrst vlaken smo ugotovili, da je glede na zmanjšanje krčenja pri vlaknastih betonih z majhno vsebnostjo vlaken v kompozitu priporočljiva kombinacija jeklenih in polipropilenskih vlaken. Avtogeno in celotno krčenje visokotrdnih vlaknastih betonov z 0,25 % kombinacije jeklenih in polipropilenskih vlaken je približno od 11 % do 28 % manjše od avtogenega in celotnega krčenja kompozita z enako vsebnostjo jeklenih oziroma polipropilenskih vlaken.

Celotno krčenje vlaknastega betona z 0,50 % daljših jeklenih vlaken je približno za 14 % manjše od celotnega krčenja primerjalnega betona brez dodanih vlaken, celotno krčenje vlaknastega betona z 2,00 % daljših jeklenih vlaken pa je za približno 25 % manjše od celotnega krčenja primerjalnega betona brez vlaknaste mikroarmature. Na podlagi opravljenih raziskav ocenjujemo, da je optimalni prostorninski delež daljših ali krajših jeklenih vlaken v vlaknastih betonih normalne trdnosti približno 0,50 %. Pri večji vsebnosti vlaken je njihova učinkovitost manjša, vgradljivost kompozita pa občutno slabša.

Nega vlaknastih betonov normalne trdnosti pomembno vpliva na celotno krčenje kompozita. Celotno krčenje vlaknastih betonov normalne trdnosti, ki so bili 24 ur po izdelavi preskušancev še šest dni negovani v vodi, je približno enako celotnemu krčenju primerjalnih betonov brez vlaknaste armature pri enaki negi.

Eksperimentalne raziskave lezenja kompozita so pokazale, da je razlika med lezenjem vlaknastih betonov z različno vsebnostjo krajših jeklenih vlaken in lezenjem betonov brez dodane vlaknaste armature razmeroma majhna. Zmanjšanje v primerjavi z lezenjem primerjalnega betona brez vlaknaste mikroarmature je zaznavno le pri vlaknastih betonih z večjimi deleži krajših jeklenih vlaken.

8 POVZETEK

Doktorska disertacija obravnava krčenje in lezenje vlaknastih betonov visoke in normalne trdnosti pri različnih vrstah in deležih uporabljenih vlaken. Zaradi primerljivosti rezultatov je bila za izbiro recepture mešanic kot podlaga izbrana receptura betona brez vlaknaste armature, ki jo je v doktorski disertaciji uporabljal Drago Saje (Saje, 2001). Sveže mešanice preskušanih betonov so bile iz izhodnih mešanic, ki jih je uporabil D. Saje, modificirane z dodatkom vlaken na račun ustreznega zmanjšanja količine agregata. Pri tem so bili za izdelavo mešanic uporabljeni domači mleti kamni agregat, in sicer iz kamnoloma v Kresnicah. Največjo možno vsebnost vlaken v preiskovanih vlaknastih betonih normalne in visoke trdnosti smo določili na podlagi še sprejemljive vgradljivosti kompozita.

Avtogeno krčenje vlaknastih betonov visoke in normalne trdnosti je bilo v prvih 24 urah strjevanja vse od izdelave preskušancev merjeno z neprekinjenimi elektronsko vodenimi meritvami pomikov. Opravljene raziskave se nanašajo na ugotavljanje vpliva različnega deleža in dolžine jeklenih vlaken ter različnega deleža polipropilenskih vlaken na avtogeno krčenje kompozita. Pri vlaknastih betonih visoke trdnosti z dodanimi polipropilenskimi vlakni smo raziskali tako vpliv dodanih suhih kakor tudi pred tem navlaženih vlaken na avtogeno krčenje kompozita. Vse meritve avtogenega krčenja vlaknastega betona in primerjalnega betona brez vlaken so potekale enako in istočasno pri enakih izotermnih in vlažnostnih pogojih okolice.

Analiza eksperimentalnih rezultatov je pokazala, da je avtogeno krčenje vlaknastega betona normalne trdnosti občutno manjše od avtogenega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti. Iz primerjave meritev krčenja vlaknastega betona in primerjalnega betona brez vlaknaste mikroarmature je razvidno, da je avtogeno krčenje vlaknastega betona v splošnem manjše od avtogenega krčenja enakega betona brez vlaken. Največje zmanjšanje avtogenega krčenja vlaknastega betona v primerjavi z avtogenim krčenjem betona enake recepture brez vlaken pa dosežemo z uporabo prej navlaženih polipropilenskih vlaken, ki v strjujoči se cementni pasti predstavljajo dodatno zalogo vode.

Celotno krčenje vlaknastega betona normalne in visoke trdnosti je bilo pri konstantni relativni vlagi, to je 70 %, in izotermnih pogojih okolja merjeno na po treh preskušancih iz vsakega proučevanega kompozita. Iz primerjave rezultatov meritev je razvidno, da je celotno krčenje vlaknastih betonov manjše od celotnega krčenja primerjalnih betonov brez vsebovanih vlaken. S povečevanjem vsebnosti vlaken pod zgornjo mejo vsebnosti se celotno krčenje vlaknastih betonov normalne in visoke trdnosti zmanjšuje. Predvidevamo, da je dodana vlaknasta armatura ovira pri krčenju strjujoče se cementne paste. Začetna nega pomembno vpliva na krčenje kompozita. Pri preskušancih vlaknastih betonov normalne trdnosti z jeklenimi vlakni, ki so bili po razopazanju še šest dni negovani v vodi, se je pozneje, ko so bili izpostavljeni pogojem okolja, pokazalo, da imajo približno enako celotno krčenje kot preskušanci iz primerjalnega betona brez vlaken, ki so bili pred tem enako negovani. Na podlagi prejšnjih ugotovitev, da vlaknasta armatura vpliva na velikost začetnega krčenja preskušancev, ki niso negovani v vodi, sklepamo, da je to posledica sorazmerno majhne natezne trdnosti cementne paste v začetni fazi strjevanja betona, tako da je oviranje krčenja cementne paste zaradi vsebovanih vlaken

občutno. Pri preskušancih, ki so bili po razopaženju še šest dni negovani v vodi, pa je bilo krčenje v tem času sorazmerno majhno, hidratacija pa intenzivna, tako da je cementni kamen v tem času dosegel sorazmerno visoko trdnost. Iz tega bi bilo mogoče sklepati, da je poznejši vpliv vsebovanih vlaken na krčenje cementne paste, ki je po šestih dneh negovanja v vodi dosegla že sorazmerno visoko trdnost, relativno majhen. Posledično je poznejša razlika med krčenjem vlaknastega betona in krčenjem primerjalnega betona brez dodanih vlaken razmeroma majhna.

Lezenje vlaknastega betona je bilo merjeno le na preskušancih kompozita normalne trdnosti. Z opravljenimi eksperimentalnimi preiskavami, ki so potekale pri temperaturi 22 °C in 70 % relativni vlagi okolja, smo ugotavljali vpliv vsebnosti in dolžine jeklenih vlaken na lezenje kompozita. Iz rezultatov meritev je razvidno, da lezenje kompozita z večjim deležem krajših jeklenih vlaken ni bistveno drugačno od lezenja primerjalnega betona brez dodanih jeklenih vlaken.

Rezultati naših in tujih eksperimentalnih raziskav lastnosti vlaknastih betonov normalne in visoke trdnosti so bili uporabljeni za pripravo predloga numerične simulacije reoloških lastnosti kompozita. Za vlaknasti beton z različnim deležem jeklenih vlaken je v disertaciji podan predlog numerične simulacije časovnega razvoja celotnega krčenja in lezenja tovrstnega kompozita. Gre za ustrezno modifikacijo oziroma izboljšanje predlogov za napovedovanje časovnega razvoja krčenja in lezenja vlaknastih betonov, ki so povzeti po strokovni literaturi in prirejeni rezultatom naših in tujih eksperimentalnih raziskav.

9 SUMMARY

The doctoral thesis deals with shrinkage and creep of high and normal strength fibre reinforced concretes with different types and contents of added fibres. To allow comparability of the results, the mixture design of concrete without fibre reinforcement used also in the doctoral thesis by Drago Saje (Saje, 2001) was chosen as the basis for the selection of mixture designs. Fresh mixtures of investigated concretes were modifications of original mixtures used by D. Saje, with added fibres on account of adequate reduction of the aggregate quantity. The mixtures were made from Slovenian ground stone aggregate from the quarries in Kresnice. The largest possible contents of fibres in the mixtures of the investigated normal and high strength fibre reinforced concretes were defined based on still acceptable workability of the composite.

Autogenous shrinkage of high and normal strength fibre reinforced concretes was in the first 24 hours after making test specimens measured with uninterrupted electronically managed displacement measurements. and up to mixing the tested concrete. The aim of the performed investigations was to define the influence of different contents and lengths of steel fibres and different contents of polypropylene fibres on autogenous composite shrinkage. For the case of high strength fibre reinforced concrete with added polypropylene fibres, the influence of dry as well as previously moistened fibres on autogenous shrinkage of the composite was investigated. All the measurements of autogenous shrinkage of fibre reinforced concrete and comparable concrete without fibres were performed in the same way and simultaneously, at the same isothermal and moisture ambient conditions.

The analysis of experimental results shows that autogenous shrinkage of normal strength fibre reinforced concrete is considerably smaller than that of autogenous high strength fibre reinforced concrete. The comparison of measurements of shrinkage of fibre reinforced concrete and shrinkage of concrete with the same mixture design but without fibres shows that autogenous shrinkage of fibre reinforced concrete is in general smaller than that of the same concrete without fibres. However, the largest decrease of autogenous shrinkage of fibre reinforced concrete compared to autogenous shrinkage of concrete with the same recipe without fibres is achieved by using previously moistened polypropylene fibres, which assure additional store of water to the cement paste.

The whole shrinkage of normal and high strength fibre reinforced concrete occurred at constant relative humidity of 70% and isothermal ambient conditions, measured at three samples from each investigated composite. The comparison of the measurement results shows that the total shrinkage of fibre reinforced concretes is smaller than the total shrinkage of comparative concretes without fibres. By increasing the contents of fibres below the upper contents limit, the total shrinkage of normal and high strength fibre reinforced concretes decreases. It is assumed that the added fibre reinforcement functions as an obstacle in the shrinkage process of the hardening cement paste. The initial curing has

a significant effect on the composite shrinkage. Specimens from normal strength fibre reinforced concretes with steel fibres, cured for 6 days in water, showed later on, when exposed to ambient conditions, approximately the same total shrinkage as the specimens from comparable concrete without fibres, but also with with the same curing. Based on previous findings that fibre reinforcement influences the magnitude of initial shrinkage of specimens not cured in water, it can be concluded that this is the consequence of fairly low tensile strength of the cement paste in the initial phase of concrete hardening, which represents a considerable obstacle in the shrinkage of cement paste due to moistened fibres. For the specimens cured for 7 days in water, the shrinkage was in this time fairly small, and the hydration process was intensive. Thus, in this time the hardened cement paste achieved fairly high strength. For this reason it can be concluded that the later influence of fibres on the shrinkage of cement paste that has achieved fairly high strength after 6 days of curing in water is relatively small. As a consequence, the later difference between the shrinkage of fibre concrete and the shrinkage of comparable concrete without added fibres is relatively small.

The creep of fibre reinforced concrete was measured only at composite specimens of normal strength. The aim of experimental investigations, performed at a temperature of 22 °C and relative ambient humidity of 70%, was to determine the influence of the contents and length of steel fibres on composite creep. The results of the measurements show that the creep of composite with different contents of shorter steel fibres is not much different from that of comparable concrete without added steel fibres.

The results of own and foreign experimental investigations of the properties of normal and high strength fibre reinforced concretes were used to prepare a proposal of mathematical simulation of rheological properties of composite. For the fibre reinforced concrete with different contents of steel fibres the thesis gives a proposal for the numerical simulation of the time development of the total shrinkage and creep of such composit. In this respect, the existing proposals for the prediction of the time development of shrinkage and creep of fibre reinforced concrete from literature are adequately adjusted to own and foreign results of experimental investigations.

VIRI

- ACI Committee 209. 2005. Report on Factor Affecting Shrinkage and Creep of Hardened Concrete. Farmington Hills, American Concrete Institute: 12.
- ACI Committee 224R-01. 2001. Control of Cracking in Concrete structures. Farmington Hills, American Concrete Institute: 46.
- ACI 544.1R-96. 1996. Report on Fiber Reinforced Concrete. Farmington Hills, American Concrete Institute: 66.
- ACI Committee 544.4R-88. 1988. Design Consideration for Steel Fiber Reinforced Concrete. Farmington Hills, American Concrete Institute: 18.
- Aly, T., Sanjayan, J. G., Collins, F. 2005. Effect of polypropylene fibers on shrinkage and cracking of concretes. *Materials and Structures*, 41, 10: 1741–1753.
- Balaguru, P. N., Shah, S. P. 1992. *Fiber-Reinforced Cement Composites*. New York, McGraw-Hill: 530.
- Balaguru, P., Ramakrishnan, V. 1988. Properties of Fiber Reinforced Concrete: Workability, Behaviour under Long-Term Loading, and Air-Void Characteristics. *ACI Materials Journal*, 85, 3: 189–196.
- Banthia, N., Gupta, R. 2007. Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. *Cement and Concrete Research*, 36, 7: 1263–1267.
- Bazant, Z. P., Osman, E., Thonguthai, W. 1976. Practical formulation of shrinkage and creep of concrete. *Materials and Structures*, 9, 6: 1359–5997.
- Bazant, Z. P., Panula, L. 1978. Practical prediction of creep and shrinkage of concrete. Parts I and II, *ibid*, 69, 11: 416–434.
- Baroghel-Bouny, V., Aïtcin, P.-C. A. 2000. *International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete Shrinkage 2000*. Paris, RILEM Publications: 551.
- Barr, B., EL-Baden, A. 2003. Shrinkage of normal and High strength fibre reinforced concrete, V: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. London, Structures & Buildings*, 156, 1: 15–25.
- Bažant, Z. P., Panula, L. 1978. New model for practical prediction of creep and shrinkage. *Materials and Structures*, 11, 5: 317–328.
- Beaudoin J.J., 1990. *Handbook of Fibre-reinforced concrete*. New Jersey, Noyes publications: 332.
- Bokan Bosiljkov, V. 1996. *Modificirani betoni pri visokih temperaturah*. Doktorska disertacija, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG.
- Branson, D. E. 1977. *Deformation of concrete structures*. New York, McGraw-Hill: 546.
- Chern, J.-C., Young, C.-H. 1989. Compressive creep and shrinkage of steel fibre reinforced concrete. *The international Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 11, 4: 205–214.

- Chuan, J., Young, C. H. 1990. Study of Factors Influencing Drying Shrinkage of steel Fiber Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal*, 87, 2: 123–139.
- Dilger, W.H., Wang, C. 2000. Creep and Shrinkage of High Performance Concrete. V: Al-Manaseer, A. The Adam Neville Symposium: Creep and Shrinkage-Structural Design Effect. 2000. American Concrete Institute: 361–379.
- Edgington, J., Hannant, D. J. 1972. Steel fibre reinforced concrete. The effect on fibre orientation of compaction by vibration. *Materials and Structures*, 5, 25: 41–44.
- Fédération Internationale du Béton (FIB). *Structural Concrete - Textbook on Behaviour Design and Performance Update knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990*. Switzerland, CEB-FIB: 232.
- Grzybowski, M., Shah, S. P. 1990. Shrinkage Cracking of Fiber Reinforced Concrete. *ACI Material Journal*, 87, 2: 138–148.
- Houde, J., Prezeau, A., Roux, R. 1987. Creep of concrete Containing Fibers and Silica Fume. American Concrete Institute, 105, 101–118.
- IGMAT, d. d., 16. 2. 2009, Poročilo o preiskavi agregata iz kamnoloma Ušenišče, Ljubljana.
- IRMA, d. o. o., 14. 10. 2004, Poročilo o mineraloški petrografski analizi kremenovega peska (MP-GB), Ljubljana.
- IGMAT, d. d., 2. 12. 2008, Poročilo o preiskavi agregata iz kamnoloma Laže, Ljubljana.
- IRMA, d. d., 11. 8. 2005, Poročilo o preskusu jeklenih vlaken JV 50/16 po ASTM A820, Ljubljana.
- IRMA, d. d., 22. 11. 2006, Poročilo o preskusu jeklenih vlaken JV 50/30 po ASTM A820, Ljubljana.
- JIS A 1129. Test method for length change of mortar and concrete. Japan, Japanese Standards Association.
- Johnston, C. D. 1982. Definitions and Measurement of Flexural Toughness Parameters for Fiber Reinforced Concrete. *ASTM Cement and Aggregates*, 4, 2: 53–60.
- Kamen, A. 2006. Time dependent behaviour of ultra high performance fiber reinforced concrete. V: 6th International PhD Symposium in Civil Engineering. Zurich, 23-26 August 2006, CD-ROM with full papers.
- Kovler, K., Bentur, A. 1997. Shrinkage of early age steel fiber reinforced concrete. *Archives of civil engineering*, XLIII, 4: 431–439.
- Koveler, K., Sikuler, J., Bentur, A. 1992. Free and restrained shrinkage of fiber reinforced concrete with low polypropylene fiber content at early age. V: Swamy, R.N. 4th RILEM Int. Symposium Fibre Reinforced Cement and Concrete. Sheffield, RILEM, 91–101.
- Kou, S-C., Poon, C-S. 2007. Influence of Fly Ash as Cement Replacement on the Properties of Recycled Aggregate Concrete. *J. Mat. in Civ. Engrg.*, 19, 9: 709–717.
- Laskar, A. I. 2009. Correlating Slump, Slump Flow, Vebe and Flow Test to Rheological Parameters of High-Performance Concrete. *Materials Research*, 12, 1: 75–81.
- Laura, P. 2003. *Autogenous Deformation and Internal Curing of concrete*. Netherlands, DUP Science: 208.

- L'Hermite, R.G. 1960. Volume changes of concrete, Proceeding Fourth International Symposium on Chemistry of Cements, Washington D. C., pp 659–691.
- Le Chatelier, H. 1904. Recherches experimentales sur la construction des mortiers hydrauliques. Pariz, Dunod, 163–167.
- Lopatič, J. 1997. Časovni odziv ojačanih betonskih konstrukcij pri poljubnem nivoju napetosti. Doktorska disertacija, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG.
- Ma, Y., Tan, M., Wu, K. 2002. Effect of different geometric polypropylene fibers on plastic shrinkage cracking of cement mortar. *Materials and Structures*, 35, 3: 165–169.
- Mangat, P. S., Azari, M. M. 1984. A theory for the free shrinkage of steel fibre reinforced cement matrices. *Journal of Materials Science*, 19, 7: 2183–2194.
- Mangat, P. S., Azari, M. M. 1985. A theory for the creep of steel fibre reinforced cement matrices under compression. *Journal of Materials Science*, 20, 3: 1119–1133.
- Mangat, P. S., Azari, M. 1986. Compression creep behaviour of steel fibre reinforced cement composites. *Materials and Structures*, 19, 5: 361–370.
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. 2006. *Concrete Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill: 659.
- Miloud, B. 2005. Permeability and porosity characteristics of steel fibre reinforced concrete. *Asian Journal of Civil Engineering*, 6, 4: 317–330.
- Mosloy, W. H., Bungey, J. H. 1990. *Reinforced concrete design*. New York, Macmillian Education Ltd: 382.
- Muravljov, M. 2000. *Osnovi teorije i tehnologije betona*. Beograd, Građevinska knjiga: 451.
- Myers, D., Kang, T. H.-K., Ramseyer, C. 2008. Early-Age Properties of Polymer Fibre-Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal*, 2, 1: 9–14.
- Naaman, A. E., Wongtanakitcharoen, T., Hauser, G. 2005. Influence of different fibers on plastic shrinkage cracking of concrete. *ACI Materials Journal*, 102, 1: 49–58.
- Nagabhushanam, M., Ramakrishnan, V., Vondran, G. 1989. Fatigue Strength of Fibrillated Polypropylene Fiber Reinforced Concrete. *Transportation research board*, 1226: 36–47.
- Neville, A. M. 1995. *Properties of concrete*. Harlow, Pearson Education: 844.
- Paillere, A. M., Buil, M., Serrano, J. J. 1989. Effect of fiber Addition on Autogenous Shrinkage of Silica Fume Concrete. *ACI Materials Journal*, 86, 2: 139–144.
- Ramakrishnan, V., Gollapudi, S., Zellers, R. 1987. Performance Characteristic and Fatigue of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete. *American Concrete Institute*, 105, 159–177.
- Rouse, J. M., Billington, S. L. 2007. Creep and Shrinkage of High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites. *ACI Materials Journal*, 104, 2: 129–136.
- Sachan, A. K., Kameswara Rao, C. V. S. 1988. A cone penetration test for workability of fibre reinforced concrete. *Materials and Structures*, 21, 448–452.

- Saje, D., Bandelj, B., Lopatič, J., Saje, F. 2008. Notranja nega betona. V: Lopatič, J., Markelj, V., Saje, F. Zbornik 30. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije. Bled, Hotel Golf, 9.–10. oktober 2008. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 245–252.
- SAJE, F., SAJE, D., KAVČIČ, F. 2000. Time development of shrinkage of high performance concrete. V: JOHAL, L. S. (Paul) (ur.). The economical solution for durable bridges and transportation structures : symposium proceedings. Chicago: Precast/Prestressed Concrete Institute, str. 99–108.
- Saje, D., Saje, F. 2001. Avtogeno krčenje betonov z visoko trdnostjo. Gradbeni vestnik, 50, 167–172.
- Saje, D., Saje, F. 2001. Autogenous shrinkage development in HPC. V: Azizinamini, A. High performance materials in bridges: proceedings of the International Conference. Julij 29- Avgust 3 2001. Kona. Hawaii, American Society of Civil Engineers: 11–20.
- Saje, D. 2001. Tlačna trdnost in krčenje betonov visoke trdnosti, Doktorska disertacija, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG: 157 f.
- Salonit Anhovo, d. d., 7. 8. 2008, Specifikacija proizvoda, Anhovo.
- SIST EN 14889-1: Vlakna za beton – 1. del: Jeklena vlakna – Definicije, specifikacije in skladnost. Ljubljana. Slovenski inštitut za standardizacijo.
- SIST EN 14889-1: Vlakna za beton – 2. del: Polimerna vlakna – Definicije, specifikacije in skladnost. Ljubljana. Slovenski inštitut za standardizacijo.
- Skazlić, M., Bjegović, D. 2004. Effect of Hybrid fibres on the properties of Fibre-reinforced concrete. V: di Prisco, M., Felicetti, R., Plizzari, G. A. Proceedings of the sixth International Rilem Symposium Fibre-Reinforced Concretes. 20-22 September 2004. Bagnaux. France, RILEM: 1381–1390.
- Swamy, R. 1974. The technology of steel fibre-reinforced concrete for practical applications. V: Proceedings of the Institution of Civil Engineers. London, Institution of Civil Engineers, 56, 1: 147–159.
- Swamy, R. N. 1975. Fibre reinforcement of cement and concrete. Materials and Structures, 8, 3: 235–254.
- Swamy, R. N., Stavrides, H. 1979. Influence of Fiber Reinforcement on Restrained Shrinkage and Cracking. ACI journal, 76, 1: 443–460.
- Soroushian, P., Lee, C.-D. 1990. Distribution and orientation of fibres in steel fiber reinforced concrete, ACI Materials Journal, 87, 5: 433–439.
- Swamy, R. N., Al-Ta'an, S., Ali, Sami A.R. 1979. Steel Fibers for Controlling Ceacking and Deflection. Concrete International, 1, 8: 41–49.
- Swamy, R. N. 1986. Steel Fibers for bridge deck and building floor applications. The Structural Engineer, 64A, 6: 149–157.
- Tazawa, E., Kōgaku Kyōkai, N. K. 1999. Autogeonus shrinkage of concrete. London, E & FN Spon: 411.
- Tehnične karakteristike mikrokremenica/mikrosilika TKK, 14. 10. 2008. Serpenica, TKK Serpenica
- Tehnične karakteristike polipropilenskih vlaken, 6. 12. 2000. Denmark, Grace Construction Products

- Zhang, J., Li, V. C. 2001. Influences of Fibers on Drying Shrinkage of Fiber-Reinforced Cementitious Composite. *Journal of Engineering Mechanics*, 127, 1: 37–44.
- Ukrainczyk, V. 1994. *Beton –Struktura Svojstva Tehnologija*. Zagreb, Alcor: 304.
- Zhang, J. 2003. Modeling of the influence of fibers on creep of fiber reinforced cementitious composite. *Composites Science and Technology*, 63, 13: 1877–1884.
- Zhang, M.-H., Li, L., Paramasivam, P. 2005. Shrinkage of High-Strength Lightweight Aggregate Concrete Exposed to Dry Environment. *ACI Material Journal*, 102, 2: 86–92.
- Zollo, RF. 1984. Collated fibrillated polypropylene fibers in FRC. V: *Fiber reinforced concrete – international symposium SP-81*. Detroit, American Concrete Institute, Vol. 81, 397–409.
- Zollo, RF., Ilter, JA. 1986. Plastic and drying shrinkage in concrete containing collated fibrillated polypropylene fibers. V: Swamy, RN., Wagstaffe, RL. *Proceedings RILEM Symposium: Development in fibre reinforced cement and concrete*, Oakley DR, England.
- Weiss, W.J., Borichevsky, B.B., Shah, S.P. 1999. The influence of a shrinkage reducing admixture on the Early-Age Shrinkage reducing admixture on the early –Age shrinkage behaviour of high performance concrete. V: Holand, I., Sellevold, J. *5th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete*. Norway, Norwegian Concrete Association, Vol. 2: 1339–1350.
- Wongtanakitcharoen, T., Naaman, A. E. 2007. Unrestrained early age shrinkage of concrete with polypropylene, PVA, and carbon fibers. *Materials and Structures*, 40, 3: 289–300.
- Yang, Y., Sato, R. 1999. Separation of Autogenous shrinkage from shrinkage of high strength concrete under drying. V: Holand, I., Sellevold, J. *Proceedings of the 5th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete*. Norway, NCA Sandefjord, Vol. 2: 1351–1360.
- Young, C.-H., Chern, J.-C. 1991. Practical prediction model for shrinkage of steel fiber reinforced concrete. *Materials and Structures*, 24, 3: 191–201.