

OCENA MEHANSKIH LASTNOSTI BETONA PO IZPOSTAVLJENOSTI POVIŠANIM TEMPERATURAM Z UPORABO RAZLIČNIH REGRESIJSKIH MODELOV

ESTIMATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE AFTER EXPOSURE TO HIGH TEMPERATURES USING DIFFERENT REGRESSION MODELS

Urška Dolinar, mag. inž. grad.

urska.dolinar@fgg.uni-lj.si

izr. prof. dr. Tomaž Hozjan, univ. dipl. inž. grad.

tomaz.hozjan@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo
in geodezijo

Jamova 2, 1000 Ljubljana

doc. dr. Gregor Trtnik, univ. dipl. inž. grad.

IGMAT, d. d., Inštitut za gradbene materiale

Polje 351 c, 1260 Ljubljana Polje

Znanstveni članek

UDK 691.32:539.411

Povzetek | V članku predstavimo možnost ocene mehanskih lastnosti betona po izpostavljenosti povišanim temperaturam z uporabo različnih regresijskih modelov in rezultatov neporušnih preiskav. Iz nabora različnih neporušnih preiskav smo uporabili ultrazvočno (UZ) metodo in metodo določanja sklerometričnega indeksa, ki se lahko uporabi neposredno na armiranobetonski (AB) konstrukciji po požaru. S poznavanjem mehanskih lastnosti betona po požaru, določenih z omenjenima metodama, lahko kasneje ocenimo nosilnost preiskane konstrukcije. Rezultati temeljijo na lastni, obsežni eksperimentalni raziskavi, ki je zajemala izdelavo preizkušancev različnih betonskih mešanic. Te so se med seboj razlikovale po vodocementnem (v/c) razmerju, vrsti uporabljenega cementa ter količini dodanega superplastifikatorja. Preizkušanci so bili izpostavljeni različnim povišanim temperaturam, in sicer 200 °C, 400 °C, 600 °C in 800 °C. Po ohlaiditvi na sobno temperaturo smo na preizkušancih opravili različne neporušne in porušne preiskave. Eksplicitne zveze med rezultati neporušnih in porušnih preiskav, opravljenih na betonskih preizkušancih po izpostavljenosti povišanim temperaturam, smo izboljšali z uporabo umetnih nevronske mreže. Izkaže se, da na ta način lahko podamo dobro oceno mehanskih lastnosti betona po izpostavljenosti povišanim temperaturam. Hkrati je ta ocena dovolj dobra že v primeru uporabe rezultatov UZ-metode. Oceno pa lahko izboljšamo z dodajanjem informacij o mešanici betona ali najvišji doseženi temperaturi.

Ključne besede: beton, povišane temperature, ultrazvočna metoda, metoda sklerometričnega indeksa, nevronske mreže, tlačna trdnost

Summary | The paper presents the estimation of predicting mechanical properties of concrete after exposure to elevated temperatures using different regression models and the results from non-destructive test techniques. From a set of different non-destructive techniques, the ultrasonic (US) and rebound number techniques were selected, as

they can be used directly on a reinforced concrete (RC) structure after exposure to fire. Based on known mechanical properties of concrete after exposure to fire the residual load-bearing capacity of the structure can be estimated. The results are based on extensive experimental study that was carried out on concrete specimens of different concrete mixtures that differed in water to cement (w/c) ratio, the type of used cement, and the amount of added superplasticizer. Next, the specimens were exposed to various high temperatures, i.e. 200 °C, 400 °C, 600 °C, and 800 °C. After the specimens had cooled down to the ambient temperature, non-destructive test techniques were performed, followed by destructive ones. The explicit relationships between the results of non-destructive and destructive test techniques, performed on concrete specimens after exposure to high temperatures, were improved by using artificial neural network (ANN) approach. It was established that by using the ANN approach, good estimation of the mechanical properties of concrete after exposure to high temperatures can be made. At the same time, this estimation is good enough only if the results of the US method are used. However, the estimation can be improved by adding information about the concrete mixture or the maximum temperature reached.

Key words: concrete, high temperatures, ultrasonic method, determination of rebound number, neural networks, compressive strength

1 • UVOD

Armiranobetonske (AB) konstrukcije predstavljajo pomemben del grajenega okolja predvsem zaradi njihove trajnosti in cenovno dostopne gradnje. V njihovi življenjski dobi pomembno nevarnost pojava večjih poškodb oziroma porušitve, poleg potresa, predstavlja izpostavljenost teh konstrukcij požaru. Med požarom se v betonu odvijajo različne mehanske, kemične in termične spremembe, ki povzročijo nastanek dodatnih napetosti in posledično mikrorazpok znotraj betonske matrice (Arioz, 2007). Vse te spremembe neugodno vplivajo na nosilnost AB-konstrukcij po požaru in možnost njihove obnove, zaradi česar je ključno poznavanje mehanskih lastnosti betona po izpostavljenosti povišanim temperaturam. Te lastnosti imenujemo preostale mehanske lastnosti, saj se razlikujejo od mehanskih lastnosti materiala med izpostavljenostjo povišanim temperaturam (Hertz, 2005). Različne eksperimentalne raziskave so pokazale, da so glavni parametri, ki vplivajo na preostalo tlačno trdnost betona vrsta uporabljenega cementa, vrsta in velikost agregata, vodo-cementno (v/c) razmerje in nivo obtežbe (dos Santos, 2016). Posledično se različne vrste

betona po izpostavljenosti povišanim temperaturam obnašajo različno (Ma, 2015).

Narejenih je veliko eksperimentalnih raziskav na betonskih vzorcih po izpostavljenosti povišanim temperaturam, pri čemer v ospredje prihaja uporaba različnih neporušnih preiskav. Med njimi so najpogostejše uporabljene metoda resonančne frekvence (Park, 2016), metoda širjenja udarnih vibracij (Kerzemien, 2015), metoda sklerometričnega indeksa (Savva, 2005), nelinearna resonančno vibracijska metoda (Park, 2017) in metoda vzratnega širjenja ultrazvočnih (UZ) valov (Chaix, 2003). Na podlagi rezultatov neporušnih preiskav, opravljenih na betonskih preizkušancih po izpostavljenosti povišanim temperaturam in vzporednim porušnim preizkušanjem, so določeni različni regresijski modeli za napoved preostalih mehanskih lastnosti betona. Park s sodelavci (Park, 2016) je podal zvezo med preostalim dinamičnim elastičnim modulom, določenim z metodo resonančne frekvence, in preostalo tlačno trdnostjo betona. Eksperimentalno delo Dolinarjeve in sodelavcev (Dolinar, 2019) kaže, da preostalo tlačno trdnost betona iz apnenčevega agregata najbolj napove-

mo na podlagi strižnega modula, določenega z metodo resonančne frekvence.

Tako kot na mnogih drugih področjih, se tudi na področju raziskovanja betona za izboljšanje napovedovanja mehanskih lastnosti na podlagi rezultatov neporušnih preiskav, uspešno uporabljajo umetne nevronske mreže. Trtnik s sodelavci (Trtnik, 2009) je z uporabo umetnih nevronskih mrež podal zvezo med hitrostjo preleta vzdolžnih UZ-valov in tlačno trdnostjo mladega betona. Na podlagi lastnega eksperimentalnega dela je Chan s sodelavci (Chan, 1998) z umetnimi nevronskimi mrežami napovedal preostalo tlačno trdnost betona. Abbas s sodelavci (Abbas, 2019) je podal zvezo med preostalo tlačno trdnostjo betona visoke trdnosti in znanim razmerjem med agregatom in cementom, v/c-razmerjem in temperaturo.

V članku analiziramo možnost uporabe različnih regresijskih modelov za napoved nekaterih osnovnih preostalih mehanskih lastnosti betona, predhodno izpostavljenega povišanim temperaturam, na podlagi rezultatov neporušnih preiskav, ki se lahko izvedejo neposredno na konstrukciji. V ta namen smo uporabili regresijska modela z eksplicitnimi zvezami in umetnimi nevronskimi mrežami. Rezultati temeljijo na obsežnem lastnem eksperimentalnem delu, opravljenem na inštitutu za gradbene materiale IGMAT, d. d.

2 • EKSPERIMENTALNI DEL

2.1 Material in priprava preizkušancev

V okviru preiskave smo pripravili pet različnih betonskih mešanic, pripravljenih s port-

landskim cementom visoke (CEM I 52,5 R) in normalne (CEM I 42,5 N) trdnosti, pitno vodo in apnenčevim agregatom z zaobljenimi agre-

gatnimi zrni največjega nazivnega premera 16 mm. Mešanici M1 in M2 sta bili izdelani s cementom visoke trdnosti in superplastifikatorjem, razlikovali pa sta se v v/c-razmerju. Le-to je za mešanico M1 znašalo 0,47, za mešanico M2 pa 0,34. Mešanica M3 je bila izdelana s cementom visoke trdnosti, mešanica M4

pa s cementom normalne trdnosti. V obeh mešanicah je v/c-razmerje znašalo 0,49. Mešanica M5 je bila izdelana s cementom visoke trdnosti in v/c-razmerjem 0,45. Podrobno sestavo uporabljenih betonskih mešanic prikazujemo v preglednici 1.

znotraj peči, 5 mm pod površino preizkušanca ter v središču preizkušanca, smo spremljali s temperaturno odpornimi termočleni. Tipični razvoj temperature T s časom t v središču betonskih preizkušancev prikazujemo na sliki 1. Število posameznih preizkušancev, izpostav-

ljenih izbrani povišani temperaturi, prikazujemo v preglednici 2.

2.3 Postopek preizkušanja

Pred segrevanjem smo na vseh preizkušancih opravili meritve z metodo prehoda vzdolžnih UZ-valov skladno s standardom (SIST EN 12504-4, 2004). Hitrost preleta vzdolžnih UZ-valov skozi preizkušane V_p smo določili s komercialnim instrumentom Pundt Lab proizvajalca Proceq z oddajno in sprejemno sondo premera 25 mm in frekvenco valovanja 150 kHz. Po ohlaiditvi preizkušancev na sobno temperaturo smo UZ-meritve ponovili, dodatno pa z instrumentom Digi-Schmidt 2000 proizvajalca Proceq na betonskih kockah določili sklerometrični indeks (SIST EN 12504-2, 2002). Površinsko trdnost betona $f_{c,surf}$ smo ocenili na podlagi izmerjenega sklerometričnega indeksa in krivulje, ki jo podaja proizvajalec za beton, starejši od 14 dni (Digi-Schmidt 2000, 2017). Sledila je meritev elastičnega modula betona E na prizmatičnih preizkušancih skladno s standardom (ISO 1920-10, 2010). Po opravljenem neporušnem preizkušanju smo izvedli standardni tlačni in upogibni preizkus. Tlačno trdnost f_c smo določili na betonskih kockah skladno s standardom (SIST EN 12390-3, 2009), upogibno natezno trdnost f_{ct} pa na prizmatičnih preizkušancih po standardu (SIST EN 12390-5, 2009). Obe porušni preiskavi smo izvedli z univerzalno preizkuševalno napravo Zwick Z400 pri nadzorovanem povečevanju obremenitve.

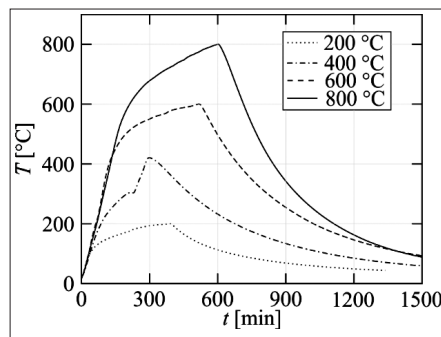
Material	Vrsta	M1	M2	M3	M4	M5
Cement	CEM I 52,5 R	360	360	360	-	360
	CEM I 42,5 R	-	-	-	360	-
Voda	Iz pipe	169	122	175	177	161
Superplastifikator	PCE	2,16	2,16	-	-	-
Apnenčev agregat	0 – 4 mm	931				
	4 – 8 mm	280				
	8 – 16 mm	652				

Preglednica 1 • Sestava preizkušanih betonskih mešanic v (kg).

Skupno smo izdelali 126 betonskih preizkušancev v obliki kock s stranico 10 cm in 107 preizkušancev v obliki prizem dimenzij 4/4/16 cm. Pred izpostavitvijo povišanim temperaturam so bili preizkušanci 28 dni negovani v vodi, naslednjih 28 dni pa izpostavljeni standardnim laboratorijskim pogojem pri temperaturi $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ in relativni vlažnosti nad 65%. Preizkušance posamezne betonske mešanice smo razdelili v pet skupin. Preizkušanci prve skupine pred izvedbo preiskav niso bili izpostavljeni povišanim temperaturam, na njih pa smo določili referenčne vrednosti neporušnih preiskav in mehanskih lastnosti betona.

2.2 Protokol segrevanja

Preostale skupine preizkušancev smo izpostavili različnim povišanim temperaturam, za kar je bila uporabljena posebna električna peč z možnostjo nastavitve najvišje temperature 1000°C . Segrevanje je trajalo do vzpostavitve izotermnega stanja znotraj betonskih vzorcev pri temperaturah 200°C , 400°C , 600°C ali 800°C . Časovni razvoj temperature



Slika 1 • Tipičen razvoj temperature v središču betonskih preizkušancev.

	M1		M2		M3		M4		M5	
T (°C)	K	P	K	P	K	P	K	P	K	P
20	5	3	3	3	9	7	4	5	5	4
200	3	3	3	3	9	7	5	6	5	4
400	3	3	3	3	9	7	8	5	5	4
600	3	3	3	3	8	7	8	5	5	4
800	3	3	3	3	3	3	5	5	6	4

Preglednica 2 • Število betonskih kock (K) in prizmatičnih preizkušancev (P) posamezne mešanice, izpostavljenih izbrani povišani temperaturi.

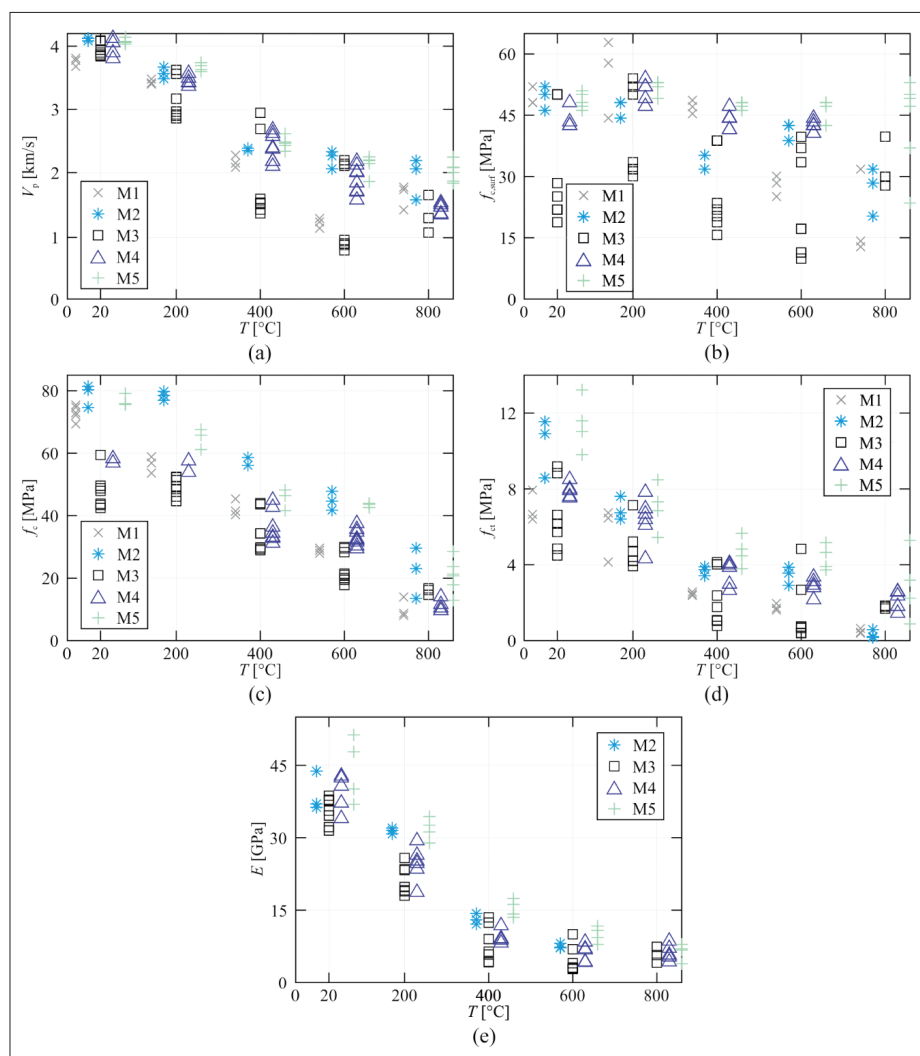
3 • REZULTATI NEPORUŠNEGA IN PORUŠNEGA PREIZKUŠANJA BETONA PO SEGREVANJU

3.1 Statistična analiza eksperimentalnih rezultatov

Eksperimentalni rezultati, pridobljeni s porušnim in neporušnim preizkušanjem betona po izpostavljenosti povišanim tempe-

raturam, so razdeljeni v skupine v odvisnosti od temperature T , dosežene med segrevanjem, in jih prikazujemo na sliki 2. Za vsako posamezno betonsko mešanico je bila opravljena osnovna statistična analiza eksper-

imentalnih rezultatov, ki zajema določitev povprečne vrednosti, standardne deviacije σ ter minimalne in maksimalne vrednosti. Rezultate osnovne statistične analize prikazujemo v dodatku A, preglednice A.1 do A.5. Za mešanici M1 in M2 pa je obsežnejša statistična analiza predstavljena v (Dolinar, 2019).



Slika 2 • Razsevni diagram posamezne betonske mešanice v odvisnosti od temperature T za naslednje eksperimentalne rezultate: (a) V_p (b) $f_{c,surf}$ (c) f_c (d) f_{ct} in (e) E .

3.2 Analiza variance

Analiza variance oz. ANOVA se uporablja za preverjanje domnev, kjer je postavljena izbrana domneva o populacijskem parametru, vzorčna statistika pa se uporabi za določitev vrednosti, ali je ničelna domneva napačna. Domneva temelji na razpoložljivih informacijah in populacijskih parametrih. Metoda je razvil Fisher (Fisher, 1921), podroben opis pa je na voljo v številnih statističnih učbenikih, npr. ((Scheffé, 1999), (Gamst, 2008)). V obravnavanem primeru eksperimentalni rezultati niso normalno porazdeljeni, poleg tega se pojavlja heteroskedastičnost, zaradi česar je primerna uporaba neparametričnih testov. Eden izmed njih je Kruskal-Wallisov test ((Kruskal, 1952), (Corder, 2009)), s katerim ugotovimo, ali se pri intervalu zaupanja 5% srednja vrednost vsaj enega izmed razredov razlikuje od ostalih. S tem testom smo preverili dve ničelni

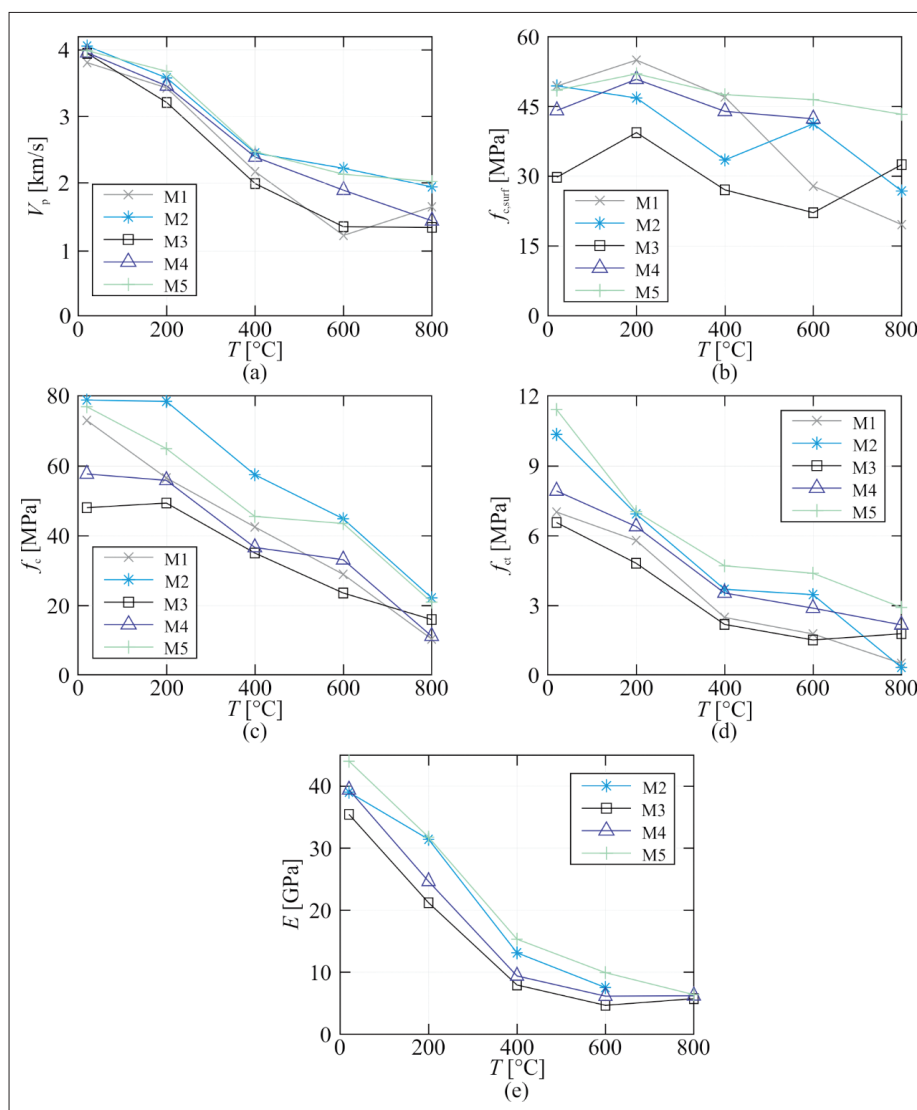
domnevi, in sicer: (i) temperatura T ne vpliva na vrednosti V_p , $f_{c,surf}$, f_c , f_{ct} in E in (ii) mešanica betona ne vpliva na vrednosti V_p , $f_{c,surf}$, f_c , f_{ct} in E . Izkáže se, da Kruskal-Wallisov test zazna statistično značilen vpliv temperature T pri vseh merjenih vrednostim, medtem ko je vpliv betonske mešanice statistično značilen le pri vrednostih $f_{c,surf}$ in f_c . Z Dunn-Sidakovim testom (Cramer, 2004) pa smo nato preverili še, katere skupine se statistično značilno razlikujejo med seboj. Pri preverjanju prve ničelne domneve smo s posteriori testom pri vrednostih V_p , f_{ct} in E opazili, da se skupini pri temperaturi 20 °C in 200 °C med seboj statistično značilno ne razlikujeta. Enako velja tudi za skupine pri temperaturi 400 °C, 600 °C in 800 °C. Pri vrednosti f_c se med seboj statistično značilno ne razlikujeta skupini pri temperaturi 20 °C in 200 °C, 400 °C in 600 °C ter 600 °C in 800 °C. Pri vrednosti $f_{c,surf}$ do statistično značilnih razlik pride med skupinama pri

temperaturi 200 °C in 600 °C ter med skupinama pri 200 °C in 800 °C. Pri preverjanju druge ničelne domneve pri vrednosti $f_{c,surf}$ opazimo statistično značilne razlike med mešanicami M1 in M3, M3 in M4 ter med M3 in M5. Pri vrednosti f_c se med seboj statistično značilno razlikujeta le mešanici M2 in M4.

3.3 Preostale mehanske lastnosti betona

Na sliki 3 prikazujemo povprečne izmerjene vrednosti količin V_p , $f_{c,surf}$, f_c , f_{ct} in E v odvisnosti od najvišje dosežene temperature T med segrevanjem. V vseh primerih, razen pri preostali površinski trdnosti betona $f_{c,surf}$, opazimo intenziven padec obravnavanih količin v odvisnosti od najvišje dosežene temperature T . V večini primerov je do najvišjega relativnega znižanja merjenih veličin prišlo v območju med temperaturama 200 °C in 400 °C, kar dobro sovпада s pojavom prvih lasastih mrežastih razpok na betonskih vzorcih (Dolinar, 2018).

Opazimo, da višje v/c-razmerje (M3) v kombinaciji s cementom visokih trdnosti daje nižje rezultate meritev na preizkušancih po izpostavljenosti povišanim temperaturam kot v primeru uporabe cementa normalnih trdnosti in enakega v/c-razmerja. Nasprotno pri nižjem v/c-razmerju (M2) v kombinaciji s cementom visoke trdnosti in dodanim superplastifikatorjem dosežemo višje tlačne trdnosti po izpostavitvi povišani temperaturi v primerjavi z ostalimi mešanicami. Najmanjši vpliv temperature na vrednosti količin $f_{c,surf}$, f_{ct} in E opazimo pri meritvah, opravljenih na betonskih preizkušancih mešanice M5, kjer je bil uporabljen cement visokih trdnosti z v/c-razmerjem 0,45. Najvišje vrednosti V_p po izpostavitvi povišanim temperaturam so izmerjene na preizkušancih mešanice M2 in M5.



Slika 3 • Povprečne vrednosti eksperimentalnih meritev: (a) hitrost preleta vzdolžnih UZ-valov V_p , (b) preostala površinska trdnost $f_{c,surf}$, (c) preostala tlačna trdnost f_c , (d) preostala upogibna natezna trdnost f_{ct} in (e) preostali elastični modul betona E .

4 • REGRESIJSKI MODEL Z EKSPLICITNIMI ZVEZAMI

4.1 Splošno

Regresijska analiza je statistični proces, znotraj katerega preverjamo vpliv ene ali več neodvisnih spremenljivk glede na odvisno spremenljivko. Uspešnost regresijskega modela običajno merimo s koeficientom determinacije R^2 , prilagojenim koeficientom determinacije $\bar{R}^2$, in korenomo povprečne kvadratne napake (RMSE) ((Bronštejn, 1997), (Moore, 2006), (Anderson, 2013)), ki ga poleg podane zveze med neodvisnimi in odvisno spremenljivko prikazujemo v preglednicah od 8 do 10. V našem primeru analiziramo zvezo med

rezultati neporušnih preiskav ter preostalo tlačno trdnostjo f_c (predstavljeno v poglavju 4.2), preostalo upogibno natezno trdnostjo f_{ct} (predstavljeno v poglavju 4.3) in preostalim elastičnim modlom betona E (predstavljeno v poglavju 4.4).

Pri obravnavanih regresijskih modelih z eksplicitnimi zvezami smo spreminjali obseg uporabljenih vhodnih podatkov za napoved izbrane preostale mehanske lastnosti betona. Tako smo v prvem primeru (a) izbrano preostalo mehansko lastnost betona napovedali zgolj s poznavanjem vrednosti V_p v nasled-

njem primeru (b) s poznavanjem vrednosti $f_{c,surf}$ in v tretjem primeru (c) s poznavanjem obeh predhodno predstavljenih vhodnih podatkov.

Regresijski modeli z eksplicitnimi zvezami so bili izdelani na vseh razpoložljivih eksperimentalnih rezultatih, pri čemer je bilo preverjeno, da so koeficienti izbranih regresijskih modelov statistično značilno različni od nič (Turk, 2012). Poleg tega je bilo tudi preverjeno izpolnjevanje pogoja o normalni porazdelitvi ostankov (Moore, 2006). V primeru, da pogoj ni bil izpolnjen, so bile uporabljene robustne metode določanja koeficientov regresijskih modelov (Maronna, 2006), kot sta metoda najmanjših absolutnih vrednosti in B-kvadratna funkcija, pri čemer je bilo opaženo minimalno

razlikovanje. Poglobljena analiza z eksplicitnimi zvezami za določitev preostalih mehanskih lastnosti betona, vendar na manjšem obsegu eksperimentalnih rezultatov, je prikazana v delu (Dolinar, 2019).

4.2 Preostala tlačna trdnost betona

Za vsak obravnavani primer (a, b in c) v preglednici 3 podajamo regresijski model

	Regresijski model z eksplicitnimi zvezami	$\bar{R}^2$	R^2	RMSE
(a)	$f_c = 15,07 e^{0,3835 V_p}$	0,7034	0,7065	10,12
(b)	$f_c = 0,7593 f_{c,surf} + 11,36$	0,2964	0,3037	15,58
(c)	$f_c = 1,161 f_{c,surf} + 0,4214 V_p f_{c,surf} - 0,02741 f_{c,surf}^2$	0,7966	0,8008	8,38

Preglednica 3 • Regresijski modeli z eksplicitnimi zvezami za oceno preostale tlačne trdnosti betona.

z eksplicitnimi zvezami za oceno preostale tlačne trdnosti betona f_c z najvišjim doseženim prilagojenim koeficientom determinacije in pripadajočim koeficientom determinacije. Izkaže se, da vrednost f_c najbolje ocenimo v primeru (c), ko v nabor neodvisnih spremenljivk vključimo oba razpoložljiva vhodna podatka. V tem primeru znaša prilagojeni koeficient determinacije 0,7966, pripadajoči koeficient determinacije 0,8008 in koren povprečne kvadratične napake 8,38. Z upoštevanjem zgolj hitrosti V_p (primer a) je ocena preostale tlačne trdnosti betona nekoliko slabša, medtem ko zgolj poznavanje površinske trdnosti betona $f_{c,surf}$ (primer b) ne zadošča za natančno oceno iskane količine.

4.3 Preostala upogibna natezna trdnost betona

V preglednici 4 za vsak obravnavani primer (a, b in c) podajamo regresijski model z

eksplicitnimi zvezami za oceno upogibne natezne trdnosti betona f_{ct} z najvišjim prilagojenim koeficientom determinacije. Podobno kot v prejšnjem tudi v tem primeru preostalo mehansko lastnost najbolje ocenimo na podlagi poznavanja tako vrednosti V_p kot vrednosti $f_{c,surf}$ (primer c). Prilagojeni koeficient determinacije znaša 0,9688, koeficient determinacije 0,9692, koren povprečne kvadratične napake

malenkost slabša, medtem ko poznavanje zgolj površinske trdnosti betona $f_{c,surf}$ (primer b) ne zadošča za natančno oceno iskane količine.

4.4 Preostali elastični modul betona

V preglednici 5 za dva obravnavana primera podajamo regresijski model z eksplicitnimi zvezami za oceno preostalega elastičnega modula betona E z najvišjim prilagojenim koeficientom determinacije. Opazimo, da lahko preostalo mehansko lastnost zelo dobro ocenimo zgolj na podlagi poznavanja vrednosti V_p (primer a). V primeru hkratnega poznavanja V_p in $f_{c,surf}$ (primer c) $f_{c,surf}$ ne prispeva k izboljšanju omenjenega regresijskega modela. Podobno kot v prejšnjih dveh primerih tudi v tem primeru zgolj s poznavanjem površinske trdnosti

	Regresijski model z eksplicitnimi zvezami	$\bar{R}^2$	R^2	RMSE
(a)	$f_{ct} = 0,584 V_p^2$	0,8596	0,8596	1,06
(b)	$f_{ct} = 0,1154 f_{c,surf}$	0,3659	0,3659	2,26
(c)	$f_{ct} = 0,3341 V_p^2 + 0,01784 V_p f_{c,surf}$	0,9688	0,9692	0,50

Preglednica 4 • Regresijski modeli z eksplicitnimi zvezami za oceno preostale upogibne natezne trdnosti betona.

	Regresijski model z eksplicitnimi zvezami	$\bar{R}^2$	R^2	RMSE
(a)	$E = 4,01 V_p^2 - 8,44 V_p + 8,32$	0,9407	0,9421	3,36
(b)	$E = 4,25 e^{0,03681 f_{c,surf}}$	0,2214	0,2307	12,16

Preglednica 5 • Regresijski modeli z eksplicitnimi zvezami za oceno preostalega elastičnega modula betona.

pa 0,50. Tudi pri oceni vrednosti f_{ct} opazimo, da je zgolj s poznavanjem hitrosti V_p (primer a) ocena preostale tlačne trdnosti betona le

$f_{c,surf}$ (primer b) ne moremo zanesljivo oceniti vrednosti preostalega elastičnega modula betona.

5 • REGRESIJSKI MODELI Z UMETNIMI NEVRONSKIMI MREŽAMI

5.1 Splošno

Ena izmed nelinearnih regresijskih modelov so tudi umetne nevronske mreže, ki so napredno numerično orodje za obdelavo podatkov. Obdelava poteka na način, da nevronska mreža na podlagi učenja iz znanih primerov pridobi informacije, ki jih nato uporabi pri svojem nadaljnjem delovanju, s čimer posnema delovanje biološkega živčnega sistema. Sestavlja jo veliko število nevronov, ki jih je treba pri vsaki novi aplikaciji posebej prilagoditi preko procesa učenja (Haykin, 2009). Ti nevroni so

razporejeni v vhodno, eno ali več skritih, in izhodno plast. Poglobljeno teoretično ozadje umetnih nevronske mreže je detajlno opisano v številni literaturi (na primer (Chan, 1998), (Shah, 2012), (Abbas, 2019)).

Pri analizah smo poleg števila skritih plasti in števila nevronov v posamezni plasti, spreminjali tudi število nevronov v prvi, vhodni plasti posamezne nevronske mreže. Tako smo v prvem primeru (a) izbrano preostalo mehansko lastnost betona določili zgolj na podlagi vrednosti V_p , v naslednjem primeru

(b) pa na podlagi vrednosti V_p in $f_{c,surf}$. V nasprotju s predhodno opisanimi regresijskimi modeli z eksplicitnimi zvezami smo v primeru regresijskih modelov z umetnimi nevronske mreže v nabor vplivnih parametrov vključili še podatek o v/c-razmerju mešanice (primer c), v četrtem primeru (d) smo podatek o v/c-razmerju nadomestili s podatkom o najvišji doseženi temperaturi T med segrevanjem, v zadnjem primeru (e) pa smo izbrano preostalo mehansko lastnost betona ocenili na podlagi vseh predhodno navedenih parametrov. Eksperimentalne rezultate smo naključno razdelili v učno (80 % podatkov) in testno (20 %) skupino. Učni proces smo izvedli z Levenberg-Marquardtovim algoritmom z računal-

niškim programom Matlab (Matlab, 1999). Na tem mestu bi bralca želeli opozoriti, da v primeru majhnega števila podatkov tvegamo preveliko prilagojenost nevronske mreže (angl. overfitting), kar pomeni, da se nevronska mreža izjemno izkaže pri izbrani skupini podatkov, pri vnosu drugačnih vhodnih podatkov pa je ocena slaba (Hudobivnik, 2017), zaradi česar je treba pri učenju nevronske mreže ustrezno postopati. Skladno s postopki, podanimi v ((Vakharia, 2019), (Hagan, 2014)), smo pri učenju umetne nevronske mreže upoštevali in nadzirali število iteracij, ki mora biti relativno majhno, in opravili petkratno navzkrižno validacijo (angl. cross-validation method), pri čemer smo eksperimentalne rezultate razdelili v pet skupin ((Vakharia, 2019), (Hagan, 2014)). V nadaljevanju prikazujemo rezultate ene izmed teh skupin.

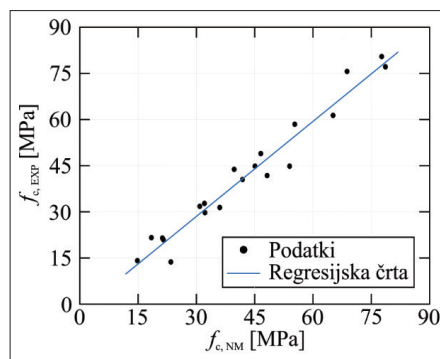
Za oceno posamezne preostale mehanske lastnosti betona smo skupno opravili več tisoč analiz z različnimi geometrijami nevronske mreže ter različnim obsegom vhodnih podatkov, pri čemer v nadaljevanju prikazujemo le nevronske mreže z najvišjim doseženim koeficientom determinacije v posameznem primeru (a–e). Rezultate posameznih analiz smo prikazali v preglednicah od 6 do 8, pri čemer v stolpcih prikazujemo različne primere glede na število podatkov v vhodni plasti, v vrsticah pa različne geometrije uporabljenih umetnih nevronske mreže (geometrija NM). Posamezna številka predstavlja število nevronov v posamezni plasti, odebeljena števila v preglednicah 6 do 8 pa predstavljajo najvišji doseženi koeficient determinacije pri različnih vhodnih podatkih.

5.2 Preostala tlačna trdnost betona

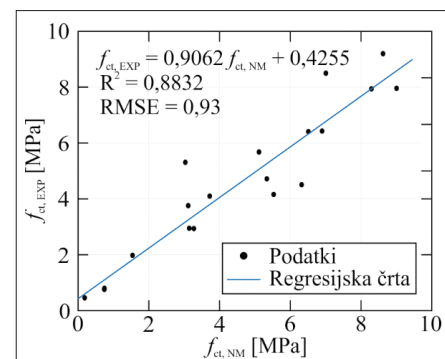
V nadaljevanju prikazujemo rezultate ocene preostale tlačne trdnosti betona z umetnimi nevronske mreže različnih geometrij in z upoštevanjem različnih vhodnih podatkov. Uspešnost učenja prikazujemo v preglednici 6, kjer so prikazani posamezni koeficienti determinacije. Opazimo, da z upoštevanjem vseh vhodnih podatkov (to je $V_p, f_{c,surf}, v/c$ -razmerja in T) najbolje ocenimo preostalo tlačno trdnost betona. Koeficient determinacije v tem primeru znaša 0,9561, koren povprečne kvadratične napake pa 4,38. Zgolj nekoliko nižji koeficient determinacije (0,9225) je bil dosežen v primeru, ko nismo upoštevali temperature (primer c). Na sliki 4, na testni skupini podatkov, prikazujemo primerjavo med dejanskimi $f_{c,EXP}$ in izračunanimi $f_{c,NM}$ vrednostmi z umetno nevronske mreže, ki je dosegla najvišji koeficient determinacije.

	$R^2 (V_p)$	$R^2 (V_p + f_{c,surf})$	$R^2 (V_p + f_{c,surf} + v/c)$	$R^2 (V_p + f_{c,surf} + T)$	$R^2 (V_p + f_{c,surf} + v/c + T)$
Geometrija NM	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
3-2	0,7952	0,8463	0,9015	0,8644	0,9430
3-4	0,7832	0,8130	0,8955	0,8893	0,9456
4-3	0,7799	0,8192	0,8870	0,8508	0,9561
4-4	0,7723	0,8188	0,9225	0,8443	0,9370

Preglednica 6 • Koeficient determinacije, določen na testni skupini podatkov pri različnih geometrijah nevronske mreže in vhodnih podatkih za oceno preostale tlačne trdnosti betona.



Slika 4 • Primerjava med dejanskimi $f_{c,EXP}$ in izračunanimi $f_{c,NM}$ vrednostmi preostale tlačne trdnosti betona z uporabo umetne nevronske mreže na testni skupini podatkov.



Slika 5 • Primerjava med dejanskimi $f_{c,EXP}$ in izračunanimi $f_{c,NM}$ vrednostmi preostale upogibne natezne trdnosti betona z uporabo umetne nevronske mreže na testni skupini podatkov.

5.3 Preostala upogibna natezna trdnost betona

V preglednici 7 prikazujemo rezultate ocene preostale upogibne natezne trdnosti betona z umetnimi nevronske mreže različnih geometrij in z upoštevanjem različnih vhodnih podatkov. Opazimo, da z upoštevanjem vrednosti $V_p, f_{c,surf}$ in T najbolj ocenimo iskano preostalo mehansko lastnost betona. Koeficient determinacije v tem primeru znaša 0,8832, koren povprečne kvadratične napake pa 0,93. Zgolj nekoliko nižji koeficient (0,8621) je dosežen v primeru, ko nismo upoštevali temperature. Na sliki 5, na test-

ni skupini podatkov, prikazujemo primerjavo med dejanskimi $f_{c,EXP}$ in izračunanimi $f_{c,NM}$ vrednostmi z umetno nevronske mreže, ki je dosegla najvišji koeficient determinacije.

5.4 Preostali elastični modul betona

V preglednici 8 prikazujemo uspešnost učenja umetnih nevronske mreže različnih geometrij in z upoštevanjem različnih vhodnih podatkov za oceno preostalega elastičnega modula betona. Opazimo, da z upoštevanjem vseh vhodnih podatkov dosežemo najvišji koeficient determinacije (0,9906), brez upoštevanja temperature pa je ta koeficient zgolj nekoliko nižji (0,9840).

	$R^2 (V_p)$	$R^2 (V_p + f_{c,surf})$	$R^2 (V_p + f_{c,surf} + v/c)$	$R^2 (V_p + f_{c,surf} + T)$	$R^2 (V_p + f_{c,surf} + v/c + T)$
Geometrija NM	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
1	0,7663	0,8347	0,8311	0,7960	0,7255
5	0,7861	0,8337	0,8188	0,8570	0,8550
4-1	0,7701	0,8621	0,8176	0,8257	0,8172
4-4	0,7734	0,8534	0,8281	0,8832	0,8192

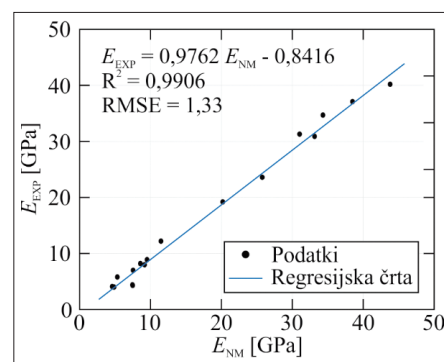
Preglednica 7 • Koeficient determinacije, določen na testni skupini podatkov pri različnih geometrijah nevronske mreže in vhodnih podatkih za oceno preostale upogibne natezne trdnosti betona.

	$R^2 (V_p)$	$R^2 (V_p + f_{c,surf})$	$R^2 (V_p + f_{c,surf} + v/c)$	$R^2 (V_p + f_{c,surf} + T)$	$R^2 (V_p + f_{c,surf} + v/c + T)$
Geometrija NM	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
1-3	0,9798	0,9806	0,9766	0,9802	0,9879
2-2	0,9801	0,9773	0,9840	0,9756	0,9796
3-2	0,9803	0,9773	0,9717	0,9790	0,9857
3-4	0,9800	0,9758	0,9712	0,9775	0,9906
4-4	0,9786	0,9781	0,9768	0,9862	0,9861

Preglednica 8 • Koeficient determinacije, določen na testni skupini podatkov pri različnih geometrijah nevronske mreže in vhodnih podatkih za oceno preostalega elastičnega modula betona.

Pri oceni vrednosti E opazimo, da že zgolj s poznavanjem vrednosti V_p dosežemo primerljivo visok koeficient determinacije (0,9803). Na sliki 6, na testni skupini po-

datkov, prikazujemo primerjavo med dejanskimi E_{EXP} in izračunanimi E_{NM} vrednostmi z umetno nevronske mreže, ki je dosegla najvišji koeficient determinacije.



Slika 6 • Primerjava med dejanskimi E_{EXP} in izračunanimi E_{NM} vrednostmi preostalega elastičnega modula z uporabo umetne nevronske mreže na testni skupini podatkov.

6 • ZAKLJUČKI

V članku smo predstavili možnost uporabe regresijskih modelov z eksplicitnimi zvezami in z umetnimi nevronske mreže za oceno preostale tlačne in upogibne natezne trdnosti ter preostalega elastičnega modula betona na osnovi rezultatov neporušnih preizkusov. V ta namen smo opravili obsežno eksperimentalno raziskavo, ki je vključevala izdelavo petih različnih betonskih mešanic z apnenčevim agregatom.

Rezultati kažejo, da v kolikor v vhodni sloj regresijskih modelov z umetnimi nevronske mreže vključimo nabor vseh razpoložljivih vplivnih parametrov (neodvisnih spremenljivk), lahko zelo natančno ocenimo analizirane preostale mehanske lastnosti betona. V tem primeru se je izkazalo, da sta dosežena najviš-

ja koeficienta determinacije pri oceni preostale tlačne trdnosti (0,9561) in elastičnega modula (0,9906). Brez upoštevanja temperature v vhodnem sloju je natančnost primerljiva, brez upoštevanja v/c-razmerja pa nekoliko nižja. Opazimo, da je najvišji koeficient determinacije, pri oceni preostale upogibne natezne trdnosti, dosežen v primeru regresijskega modela z eksplicitno zvezo, ki vključuje meritve hitrosti preleta UZ-valov in površinske trdnosti (0,9692). V primeru ocene preostalega elastičnega modula betona ponovno dosežemo najvišji koeficient determinacije v primeru regresijskega modela z umetnimi nevronske mreže in poznavanjem rezultatov obeh neporušnih meritev, v/c-razmerja in temperature.

Pri pregledu konstrukcije po požaru lahko na terenu opravimo UZ-meritve ter določimo površinsko trdnost betona, podatek o v/c-razmerju pa lahko pridobimo iz ustrezne projektne dokumentacije. Določitev najvišje temperature med požarom je nekoliko zahtevnejša naloga, ki zahteva uporabo ustreznih numeričnih orodij, pri katerih pa moramo predhodno izmeriti pomike konstrukcije na najbolj izpostavljenih delih. Kot vidimo iz prikazanih analiz, lahko tudi v primeru nepoznavanja najvišje temperature z umetnimi nevronske mreže dovolj natančno ocenimo preostalo tlačno trdnost betona na osnovi poznavanja V_p , $f_{c,surf}$ in v/c-razmerja, medtem ko so za določitev preostale upogibne natezne trdnosti in elastičnega modula zadovoljivi že rezultati neporušnih meritev na terenu, to sta V_p in $f_{c,surf}$.

7 • ZAHVALA

Najlepše se zahvaljujemo Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, ki je finančno podprla delo U. Dolinar s sklepom št. 802-7/2016-215 in delo T. Hozjana ter G. Trtnika preko temeljnega raziskovalnega projekta št. P2-0260.

8 • LITERATURA

- Abbas, H., Al-Salloum, Y. A., Elsanadedy, H. M., Almusallam, T. H., ANN models for prediction of residual strength of HSC after exposure to elevated temperatures, Fire safety journal 106: 13-28, 2019.
- Anderson, A., Business statistics for dummies, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2013.
- Arioz, O., Effects of elevated temperatures on properties of concrete, Fire safety journal 42: 516-522, 2007.

- Bronštejn, I. N., Semendjajev, K. A., Musiol, G., Muhlig, H., Matematični priročnik, Ljubljana: Tehniška založba Slovenije, 1997.
- Chaix, J. F., Garnier, V., Corneloup, G., Concrete damage evolution analysis by backscattered ultrasonic waves, *NDT & E international* 36: 461-469, 2003.
- Chan, Y. N., Jin, P., Anson, M., Wang, J. S., Fire resistance of concrete: prediction using artificial neural networks, *Magazine of concrete research* 50 (4): 353-358, 1998.
- Corder, G. W., Foreman, D. I., Nonparametric statistics for non-statisticians: A step-by-step approach, John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- Cramer, D., Howitt, D., The Sage dictionary of statistics: A practical resource for students in the social science, Sage Publications, London, Thousand Oaks, 2004.
- Digi-Schmidt 2000. Operating instructions for concrete test hammer DIGI-SCHMIDT 2000, Modell ND/LD. https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/DigiSchmidt_Operating%20Instructions_Multilingual_high.pdf, 2017.
- Dolinar, U., Trtnik, G., Hozjan, T., Determination of mechanical properties of normal strength limestone concrete after exposure to elevated temperatures, v: Material behaviour in fire, *Journal of physics* 1107: 1-6, ilustr., Bristol: IOP, 2018.
- Dolinar, U., Trtnik, G., Turk, G., Hozjan, T., The feasibility of estimation of mechanical properties of limestone concrete after fire using non-destructive methods, *Concrete and building materials* 228, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116786>, 2019.
- dos Santos, C. C., Rodrigues, J. P. C., Calcareous and granite aggregate concretes after fire, *Journal of building engineering* 8: 231-242, 2016.
- Fisher, R. A., On the "probable error" of a coefficient of correlation deduced from a small sample, *Metron* 1: 3-32, 1921.
- Gamst, G., Meyers, L. S., Guarino, A. J., Analysis of variance designs, Cambridge University Press, 2008.
- Hagan, M. T., Dumuth, H. B., Beale, M. H., De Jesus, O., Neural network design (2nd Edition), self published, 2014.
- Haykin, S., Neural networks and learning machines, Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 906 str., 2009.
- Hertz, K. D., Concrete strength for fire safety design, *Magazine of concrete research* 57 (8): 445-453, 2005.
- Hudobivnik, R., Analiza tveganja za samomor z uporabo globokih nevronske mreže, Diplomsko delo, Fakulteta za računalništvo in informatiko, samozaložba, 2017.
- ISO 1920-10: 2010. Testing of concrete – Part 10: Determination of static modulus of elasticity in compression.
- Kerzemien, K., Hager, I., Post-fire assesment of mechanical properties of concrete with use of the impact-echo method, *Construction and building materials* 96: 155-163, 2015.
- Kruskal, W. H., Wallis, W. A., Use of ranks in one-criterion variance analysis, *Journal of the American statistical association* 47 (260): 583-621, 1952.
- Ma, Q. M., Guo, R. X., Zhao, Z. M., Lin, Z. W., He, K. C., Mechanical properties of concrete at high temperature – a review, *Construction and building material* 93: 371-383, 2015.
- Maronna, R. A., Martin, R. D., Yohai, V. J., Salibián-Barrera, M., Robust statistics: Theory and methods, Wiley, 2006.
- Matlab, The language of technical computing, The Mathworks Inc., 1999.
- Moore, D. S., McCabe, G. P., Introduction to the practice of statistics, Fifth edition, W. H. Freeman and Company, New York, 2006.
- Park, S. J., Yim, H. J., Evaluation of residual mechanical properties of concrete after exposure to high temperatures using impact resonance method, *Construction and building materials* 129: 89-97, 2016.
- Park, G. K., Yim, H. J., Evaluation of fire-damaged concrete: An experimental analysis based on destructive and non-destructive methods, *International journal of concrete structures and materials* 11 (3): 447-457, 2017.
- Savva, A., Manita, P., Sideris, K. K., Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates, *Cement & concrete composites* 27 (2): 239-248, 2005.
- Scheffé, H., The analysis of variance, John Wiley and Sons, United States of America, 1999.
- Shah, A. A., Alsayed, S. H., Abbas, H., Al-Salloum, Y. A., Predicting residual strength of non-linear ultrasonically evaluated damaged concrete using artificial neural network, *Construction and building material* 29: 42-50, 2012.
- SIST EN 12390-3: 2009. Preskušanje strjenega betona – 3. del: Tlačna trdnost preizkušancev.
- SIST EN 12504-2: 2002. Preskušanje betona v konstrukcijah – 2. del: Neporušitveno preskušanje – Določevanje sklerometričnega indeksa.
- SIST EN 12504-4: 2004. Preskušanje betona – 4. del: Določanje hitrosti prehoda ultrazvoka.
- SIST EN 12390-5: 2009. Preskušanje strjenega betona – 5. del: Upogibna trdnost preskušancev.
- Trtnik, G., Kavčič, F., Turk, G., Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks, *Ultrasonics*, 49 (1): 53-60, 2009.
- Turk, G., Verjetnostni račun in statistika, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2012.
- Vakharia, V., Gujar, R., Prediction of compressive strength and portland cement composition using cross-validation and feature ranking techniques, *Construction and building materials*, 225: 292-301, 2019.

Dodatek A

Rezultat	$T (^{\circ}\text{C})$	Povprečje	σ	Min	Max
V_p (km/s)	20	3,81	0,1738	3,45	4,17
	200	3,43	0,1294	3,23	3,57
	400	2,17	0,0926	2,04	2,30
	600	1,21	0,0717	1,10	1,28
	800	1,64	0,2867	1,07	1,83
$f_{c,\text{surf}}$ (MPa)	20	49,40	2,2517	48,10	52,00
	200	54,97	9,5807	44,30	62,83
	400	47,04	1,6453	45,38	48,67
	600	27,87	2,5423	25,10	30,10
	800	19,60	10,5887	12,80	31,80
f_c (MPa)	20	72,95	2,3874	69,37	75,45
	200	56,45	2,6344	53,63	58,85
	400	42,40	2,6521	40,34	45,39
	600	28,82	0,8416	27,95	29,63
	800	10,25	3,2372	8,05	13,97
f_{ct} (MPa)	20	7,00	0,8208	6,41	7,94
	200	5,78	1,4272	4,14	6,74
	400	2,47	0,0961	2,38	2,57
	600	1,76	0,1803	1,61	1,96
	800	0,49	0,1323	0,39	0,64

Preglednica A.1 • Osnovna statistična analiza eksperimentalnih rezultatov mešanice M1.

Rezultat	$T (^{\circ}\text{C})$	Povprečje	σ	Min	Max
V_p (km/s)	20	3,95	0,1791	3,64	4,42
	200	3,21	0,3488	2,82	3,72
	400	1,99	0,7010	1,20	3,07
	600	1,34	0,6484	0,75	2,33
	800	1,33	0,3930	0,92	2,00
$f_{c,\text{surf}}$ (MPa)	20	29,78	12,8533	18,80	50,10
	200	39,39	10,5627	30,10	54,00
	400	27,08	9,9696	15,70	38,80
	600	22,16	12,4645	9,90	39,70
	800	32,50	6,3700	27,80	39,75
f_c (MPa)	20	47,93	5,8059	42,49	59,44
	200	49,26	3,0356	44,66	52,43
	400	34,93	6,4709	28,94	44,01

Rezultat	$T (^{\circ}\text{C})$	Povprečje	σ	Min	Max
V_p (km/s)	20	4,06	0,1702	3,57	4,35
	200	3,58	0,1285	3,33	3,70
	400	2,45	0,1883	2,33	2,78
	600	2,22	0,1609	2,04	2,44
	800	1,94	0,3514	1,27	2,27
$f_{c,\text{surf}}$ (MPa)	20	49,43	2,9569	46,20	52,00
	200	46,83	2,1939	44,30	48,10
	400	33,50	2,4042	31,80	35,20
	600	41,27	2,1362	38,80	42,50
	800	26,83	5,9079	20,30	31,80
f_c (MPa)	20	78,79	3,6324	74,65	81,43
	200	78,41	1,3935	76,96	79,74
	400	57,38	1,7466	56,14	58,61
	600	44,76	3,0363	41,78	47,85
	800	22,07	8,0859	13,53	29,61
f_{ct} (MPa)	20	10,34	1,5592	8,58	11,54
	200	6,92	0,6199	6,41	7,61
	400	3,68	0,2401	3,42	3,89
	600	3,45	0,4845	2,92	3,87
	800	0,32	0,2272	0,16	0,58
E (GPa)	20	39,03	4,1429	36,30	43,80
	200	31,43	0,6028	30,80	32,00
	400	13,13	1,1060	12,10	14,30
	600	7,53	0,4933	7,20	8,10

Preglednica A.2 • Osnovna statistična analiza eksperimentalnih rezultatov mešanice M2.

Rezultat	$T (^{\circ}\text{C})$	Povprečje	σ	Min	Max
V_p (km/s)	20	3,96	0,1695	3,48	4,52
	200	3,46	0,1371	3,31	3,79
	400	2,39	0,2217	2,05	2,70
	600	1,89	0,2298	1,54	2,29
	800	1,43	0,1121	1,29	1,63
$f_{c,\text{surf}}$ (MPa)	20	44,13	2,6837	42,50	48,10
	200	50,86	2,6904	47,20	54,00
	400	43,96	1,8197	41,50	47,20
	600	42,36	1,2603	40,60	44,30

	600	23,46	4,9691	17,82	29,99
	800	15,86	1,0789	14,66	16,75
f_{ct} (MPa)	20	6,55	1,8290	4,49	9,18
	200	4,80	1,1144	3,93	7,14
	400	2,17	1,4072	0,78	4,14
	600	1,50	1,6739	0,39	4,84
	800	1,77	0,0755	1,69	1,84
E (GPa)	20	35,46	2,8442	31,50	38,70
	200	21,20	2,9654	18,00	25,80
	400	7,94	3,7885	4,20	13,50
	600	4,66	2,7706	2,80	10,00
	800	5,73	1,6503	4,10	7,40

Preglednica A.3 • Osnovna statistična analiza eksperimentalnih rezultatov mešanice M3.

Rezultat	T (°C)	Povprečje	σ	Min	Max
V_p (km/s)	20	3,99	0,2002	3,47	4,29
	200	3,68	0,1438	3,52	3,92
	400	2,47	0,1143	2,22	2,67
	600	2,13	0,2221	1,52	2,28
	800	2,02	0,2053	1,73	2,43
$f_{c,surf}$ (MPa)	20	48,52	1,9967	46,20	51,00
	200	52,02	1,6888	49,10	53,00
	400	47,54	0,8444	46,20	48,10
	600	46,48	2,6837	42,50	48,10
	800	43,32	11,1437	23,50	53,00
f_c (MPa)	20	76,88	1,9630	75,60	79,14
	200	64,85	3,3089	61,17	67,58
	400	45,43	3,4214	41,62	48,24
	600	43,39	0,6937	42,61	43,93
	800	20,85	5,2705	12,94	28,53
f_{ct} (MPa)	20	11,41	1,4157	9,81	13,22
	200	7,02	1,2579	5,44	8,48
	400	4,69	0,7786	3,79	5,66
	600	4,37	0,6682	3,73	5,17
	800	2,90	1,8540	0,88	5,29
E (GPa)	20	44,03	6,6670	36,90	51,30
	200	31,78	2,3215	28,90	34,40
	400	15,33	1,7951	13,50	17,40

f_c (MPa)	20	57,60	0,9829	56,90	58,29
	200	55,76	2,5739	53,94	57,58
	400	36,52	5,2850	31,23	45,00
	600	33,01	2,7567	29,43	37,53
	800	11,09	1,8584	9,63	14,08
f_{ct} (MPa)	20	7,91	0,3863	7,53	8,50
	200	6,38	1,1710	4,32	7,83
	400	3,52	0,6548	2,65	4,08
	600	2,87	0,4514	2,16	3,36
	800	2,15	0,5028	1,45	2,59
E (GPa)	20	39,42	3,7499	34,00	42,80
	200	24,65	3,5399	18,70	29,40
	400	9,40	1,3910	8,20	11,80
	600	6,14	1,8325	4,20	8,40
	800	6,20	1,6763	4,30	8,60

Preglednica A.4 • Osnovna statistična analiza eksperimentalnih rezultatov mešanice M4.

	600	9,93	1,6741	7,90	11,70
	800	6,38	1,7270	3,90	7,90

Preglednica A.5 • Osnovna statistična analiza eksperimentalnih rezultatov mešanice M5.