

doc. dr. Gregor Trtnik, univ. dipl. inž. grad.
grega.trtnik@igmat.eu
Igmata, d. d.,
Zadobrovska cesta 4, 1000 Ljubljana



dr. Jakob Šušteršič, univ. dipl. inž. grad.
jakob.sustersic@irma.si
Irma, d. o. o.,
Špruha 18, 1236 Trzin



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



Znanstveni članek
UDK 620.17:691.328

ANALIZA VPLIVA RAZLIČNIH PARAMETROV NA STIK MED REBRAS TO ARMATURO IN BETONOM

INFLUENCE OF DIFFERENT PARAMETERS ON THE BOND BETWEEN REINFORCEMENT STEEL BARS AND CONCRETE

Povzetek

Prispevek prikazuje rezultate obsežne eksperimentalne študije vpliva različnih parametrov betona in armature na velikost izvlečne sile oziroma sprijemne napetosti med rebrasto armaturno palico in okoliškim betonom. Analiziran je vpliv premera armaturnih palic, starosti betona oziroma njegove tlačne trdnosti ter vsebnosti jeklenih vlaken v betonu. Poleg omenjenih parametrov je podrobno analiziran tudi vpliv predhodnega bentonitnega premaza armaturnih palic na sprijemnost med betonom in armaturo. Preiskave so izvedene skladno z veljavnimi standardi pri laboratorijskih pogojih, pri čemer smo za merjenje pomikov pri preiskavi izvlečne sile uporabili najnovejši laserski sistem. Vse preiskave smo izvedli na večjem številu vzorcev, kar nam je poleg analize z osnovnimi statističnimi parametri omogočilo tudi izvedbo analize z naprednejšo statistično tehniko analize variance (AnoVa). Rezultati kažejo, da predhodni bentonitni premaz armaturnih palic v večini primerov ni statistično značilno vplival na zmanjšanje sprijemne napetosti med vgrajeno armaturo in okoliškim betonom. Podobne ugotovitve veljajo tudi v primeru analize vpliva premera armaturnih palic ter vsebnosti jeklenih vlaken v betonu, medtem ko je višja starost betona statistično značilno vplivala na povečanje sprijemne napetosti med vgrajeno armaturno palico in okoliškim betonom.

Ključne besede: beton, rebrasta armatura, sprejemna napetost, izvlečna sila

Summary

The paper presents the results of a comprehensive experimental study aimed at analyzing the influence of various parameters of concrete and reinforcement on the pull-out force (bond strength) between rebar reinforcement and the surrounding concrete. The influence of reinforcement diameter, concrete age (and thus compressive strength), and amount of steel microfibers on pull-out force (bond strength) is discussed. Moreover, the influence of bentonite suspension on reinforcement bars is also studied. The experiments were performed according to valid standards under standard laboratory conditions. In order to determine slip, i.e. displacements between concrete and reinforced bar, a sophisticated optical laser device was used. All the tests were performed on a large number of specimens, which allowed us to analyze the results using the Anova statistical technique. The results show that bentonite suspension has generally no statistically significant influence on the bond strength between concrete and reinforcement. Similar results were determined when the influence of reinforcement diameter and the amount of microfibers in concrete were analyzed. On the other hand, the influence of concrete age (and thus concrete compressive strength) on bond strength between concrete and reinforcement was statistically significant.

Key words: concrete, reinforcement, bond strength, pull-out force

1 UVOD

Armiranobetonske konstrukcije so projektirane tako, da beton (po večini) prevzema tlačne, jeklena armatura v betonu pa natezne napetosti. Vzajemno delovanje betona in vgrajene armature je možno predvsem zaradi podobnega temperaturnega raztezka betona in jeklene armature, alkalnega okolja, ki ga okoliški beton nudi vgrajeni armaturi in jo s tem ščiti pred korozijskimi procesi, ter dobrega stika oziroma sprijemnosti med vgrajeno (rebrasto) armaturo in okoliškim betonom.

Ustrezna kvaliteta stika med betonom in vgrajeno rebrasto armaturo tako poleg lastnosti betona samega in armature pomembno vpliva na nosilnost armiranobetonskega elementa oziroma konstrukcije kot celote, še posebej pri konstrukcijah, ki so med fazo uporabe dinamično obremenjene. Temu primerno današnji standardi (predvsem standardi potresno varnega projektiranja) določajo, da se kot armatura v betonu uporablja izključno rebrasta armatura. V tem primeru je ustrezen stik med armaturo in okoliškim betonom zagotovljen preko treh mehanizmov, in sicer z adhezijo, trenjem med armaturno palico in okoliškim betonom ter zaklinjanjem reber armaturne palice v okoliški beton ([Bilek, 2017], [Saje, 2021], [Yoo, 2018]). Adhezija, ki nastane v zgodnji fazi hidratacije betona s sprijemanjem hidratizirajočih se cementnih delcev na površino jeklene armature predstavlja prevladujoč mehanizem v prvi fazi, tj. pri nizkih obremenitvah armiranobetonskega elementa. Pri višjih obremenitvah mehanizem adhezije odpove, stik med betonom in vgrajeno armaturo pa od tod dalje zagotavlja predvsem mehanizem trenja in zaklinjanja [Saje, 2021]. Naaman [Naaman, 2003] je ugotovil, da predvsem zaklinjanje reber armaturnih palic v okoliški beton predstavlja prevladujoč mehanizem pri zagotavljanju sprijemne trdnosti med vgrajeno armaturno palico in okoliškim betonom v primeru večjih obremenitev.

Zaradi pomembnosti kvalitetnega stika med okoliškim betonom in vgrajeno armaturo z vidika nosilnosti, stabilnosti in trajnosti armiranobetonskih konstrukcij številni raziskovalci pogosto preučujejo vpliv različnih parametrov betona in armature na velikost izvlečne (angl. »pull out«) sile F_{izvl} oziroma sprijemne napetosti τ med vgrajeno armaturo in okoliškim betonom. Sprijemno napetost τ med okoliškim betonom in armaturno palico določimo po enačbi (1), kjer je ϕ nazivni premer armaturne palice, l_e pa sidrna dolžina, tj. dolžina, na kateri je armaturna palica v neposrednem stiku z okoliškim betonom. Sprijemna napetost τ_{max} označuje največjo sprijemno napetost, ki se pojavi pri izvlečni sili F_{max} skladno z enačbo (2).

$$\tau = \frac{F_{izvl}}{\pi \phi l_e} \quad (1)$$

$$\tau_{max} = \frac{F_{max}}{\pi \phi l_e} \quad (2)$$

Saje in Lopatič [Saje, 2021] sta analizirala vpliv običajne rebraste jeklene armature in različne bazaltne armature na sprijemno trdnost τ_{max} med vgrajeno armaturo ter betonom običajne in visoke trdnosti. Ugotovila sta, da ima tako pri preizkušancih z jekleno kakor tudi pri preizkušancih z bazaltno armaturo premera 12 mm tlačna trdnost betona pomemben vpliv na sprijemno trdnost med betonom in armaturo. V obeh primerih so bile vrednosti τ_{max} v primeru uporabe betona visoke trdnosti za približno 70–80 % višje kot v primeru betona običajne trdnosti. Preizkušanci z vgrajeno bazaltno armaturo so sicer dosegali za

približno 30 % nižje vrednosti τ_{max} v primerjavi s preizkušanci z rebrastimi jeklenimi armaturnimi palicami. Gangolu s sodelavci [Gangolu, 2007] je analiziral vpliv različne vrste reber na sprijemno trdnost τ_{max} v primeru betonov visoke trdnosti in ugotovil, da je bila vrednost τ_{max} v primeru gladkih armaturnih palic (brez reber) za približno 40–50 % nižja od vrednosti τ_{max} v primeru armaturnih palic s spiralno orientiranimi rebri. Prav tako je bila vrednost τ_{max} v primeru spiralno orientiranih reber višja kot vrednost τ_{max} v primeru reber, ki so bila orientirana horizontalno oziroma pravokotno na os armaturne palice. Vpliv premera armaturnih palic na velikost τ_{max} je bil majhen, z večanjem sidrne dolžine le pa se je vrednost τ_{max} zmanjševala. Do podobnih ugotovitev je prišel Bashir s sodelavci [Bashir, 2019], ki je analiziral vpliv premera ϕ in sidrne dolžine l_e armaturnih palic z različnimi oblikami reber na vrednost τ_{max} . Ugotovil je, da se je velikost izvlečne sile F_{max} z večanjem premera in sidrne dolžine sicer povečevala, medtem ko se je velikost τ_{max} z večanjem premera in sidrne dolžine v splošnem zmanjševala ne glede na vrsto in orientacijo reber.

Kljub številnim študijam in rezultatom, prikazanim v literaturi, je vpliv posameznih parametrov vgrajenih armaturnih palic in okoliškega betona na stik med vgrajenimi armaturnimi palicami in okoliškim betonom še vedno dokaj neraziskan oziroma so si rezultati različnih študij med seboj nasprotujoči. To je deloma posledica dejstva, da obstoječi rezultati ne zajemajo dovolj velikega števila posameznih preskušancev za korektno oziroma naprednejšo statistično analizo dobljenih rezultatov. V tem prispevku z napredno statistično tehniko analize variance (AnoVa) analiziramo rezultate obsežnega eksperimentalnega dela, s ciljem ugotoviti vpliv različnih parametrov armature in okoliškega betona na sprijemnost med vgrajeno armaturo in okoliškim betonom. Tako analiziramo vpliv premera vgrajenih armaturnih palic, starosti (in s tem tlačne trdnosti) betona ter vsebnosti jeklenih vlaken v strukturi betona na stik med vgrajeno armaturo in okoliškim betonom. Dodatno v vseh primerih analiziramo tudi vpliv predhodnega bentonitnega premaza na armaturnih palicah na stik med vgrajeno armaturo in okoliškim betonom. Eksperimentalno delo je potekalo v laboratorijih za beton inštitutov Igmat, d. d., in Irma, d. o. o.

2 MATERIALI IN METODE

2.1 Uporabljeni materiali

2.1.1 Beton

Za izdelavo vzorcev smo uporabili kontraktorski beton, pri katerem sta vezivno komponento predstavljala dva cementa, in sicer CEM I 42,5 N SRO (20 % skupnega deleža cementa) ter CEM III/B 32,5 N – LH/SR (80 %) v skupni količini 470 kg/m³. Dodana je bila mikrosilika v suspenziji v količini 3,2 % skupne mase cementa in sveži betonski mešanici. Efektivno vodo/vezivno razmerje $(v/v)_{ef}$ smo določili po naslednji enačbi:

$$(v/v)_{ef} = \frac{\text{(dodana voda + voda v suspenziji + voda v kemijskih dodatkih)}}{\text{(skupna količina cementa + suhi delež mikrosilike v suspenziji)}} \quad (3)$$

Za agregat smo uporabili drobljeni apnenčev agregat iz separacije Calcit Kamnik nazivnih frakcij 0/2 (30 % celotne vsebnosti agregata v betonu), 0/4 (29 %), 4/8 (16,5 %), 8/16 in 16/32 mm (skupaj 24,5 %) ter kameno moko v količini 15 % mase cementa. Betonu smo dodali tri kemijske dodatke, in sicer hiperpla-

stifikator, zavlačevalec vezanja in stabilizator. Delež posameznih dodatkov smo določili eksperimentalno na način, da je konsistenca sveže betonske mešanice, določena z metodo razleza, s posedom znašala 550 ± 100 mm, vsebnost zraka v sveži betonski mešanici pa $< 3,0\%$. V primeru mikroarmiranega betona smo uporabili kratka jeklena vlakna s sidri, ki nimajo pomembnega vpliva na obdelovalnost svežega betona. Dolžina vlaken je znašala 16 mm, njihov premer pa 0,5 mm. Uporabljena vlakna so prikazana na sliki 1d v nadaljevanju.

Svežemu betonu smo pred vgradnjo v kalupne preizkušance določili nekatere osnovne lastnosti skladno z veljavnimi standardi. Rezultati izmerjenih lastnosti svežega betona so prikazani v preglednici 1, pri čemer so bile vse lastnosti določene pri standardnih laboratorijskih pogojih. Rezultati, prikazani v preglednici 1, predstavljajo povprečne rezultate treh preizkušancev.

Pri starosti betona 28 oziroma 90 dni smo pri običajnih laboratorijskih pogojih skladno z veljavnimi standardi določili nekatere osnovne lastnosti strjenega betona, rezultate teh preiskav pa prikazujemo v preglednici 2. V vseh primerih so prikazani povprečni rezultati treh preizkušancev. Tlačna trdnost betona je bila določena na preizkušancih v obliki kocke s stranico 15 cm.

Lastnost	Oznaka	Rezultat	Standard
Temperatura betona	T_b	25,5°C	SIST EN 12350-1:2019 [SIST, 2019a]
Razlez s posedom		600/620 mm	SIST EN 12350-8:2019 [SIST, 2019d]
Tečenje	H2; $t_{končni}$	61 mm; 1,16 sek	SIST EN 12350-10:2010 [SIST, 2010]
Vsebnost zraka	Ac	1,4 % v/v	SIST EN 12350-7:2019 [SIST, 2019c]
Prostorninska masa	r	2368 kg/m ³	SIST EN 12350-6:2019 [SIST, 2019b]
vodo/vezivno razmerje	$(v/v)_{eff}$	0,417	SIST 1026:2016, NC [SIST, 2016]

Preglednica 1. Rezultati preiskav svežega betona.

Lastnost	Oznaka	Rezultat 28 dni	Rezultat 90 dni	Standard
tlačna trdnost	f_{cm}	68,4 MPa	79,3 MPa	SIST EN 12390-3:2019 [SIST, 2019f]
statični modul elastičnosti	E	42,6 Gpa	42,5 GPa	DIN 1048 [DIN, 1991]
odpornost proti prodoru vode	e	9,7 mm	8,0 mm	SIST EN 12390-8:2019 [SIST, 2019g]

Preglednica 2. Rezultati preiskav strjenega betona pri starosti 28 in 90 dni.

2.1.2 Armatura

Uporabljena je bila jeklena armatura v obliki rebrastih armaturnih palic dveh različnih premerov, in sicer $\varnothing 12$ mm in $\varnothing 22$ mm. Osnovne lastnosti uporabljenih armaturnih palic, določene s standardnim nateznim preskusom skladno s SIST EN 6892-1:2020 [SIST, 2020], ter delež reber, določen skladno s standardom SIST EN ISO 15630-1:2019 [SIST, 2019h], so prikazani v preglednici 3. Pri tem $R_{p0,2}$, R_m , $R_m/R_{p0,2}$, d_{fmax} in A_{gt} označujejo napetost na meji tečenja, natezno trdnost, razmerje med natezno trdnostjo in napetostjo na meji tečenja ter raztezek pri največji doseženi natezni sili F_{max} . Delež reber označuje oznaka f_R in predstavlja delež reber glede na prečni prerez armaturne palice.

Φ (mm)	$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A_{gt} (%)	f_R
12	596,5	716,1	9,04	0,067
22	566,0	699,5	10,12	0,088

Preglednica 3. Osnovne lastnosti uporabljenih armaturnih palic.

2.1.3 Bentonitni premaz

Bentonitni premaz se uporablja pri izdelavi diafragem. Pri tem se izkopani segment najprej zapolni z bentonitno izplako, nato pa se vgrajuje beton po kontraktorski metodi. Kontraktorski beton izpodriva bentonitno izplako, pri čemer mora biti zagotovljen ustrezen stik med betonom in vgrajeno armaturo. Za pripravo bentonitnega premaza smo uporabljali bentonit, sestavljen iz visokokonzentrirane bentonitne gline, natrija in dodatka suhega polimera. V 1 m³ vode smo dodali 60 kg bentonita.

2.2 Priprava preizkušancev

Pred izvedbo preizkusa smo skladno z dodatkom D standarda SIST EN 10080:2005 [SIST, 2005] pripravili testne preizkušance v obliki betonske kocke s stranico 20 cm z vgrajeno armaturno palico v središčni osi betonskega preizkušanca, za kar smo uporabili posebne kalupe z izvedeno odprtino za vgradnjo jeklene armaturne palice (slika 1a). Omenjeni standard predpisuje velikost stranice kocke betonskega preizkušanca najmanj 20 cm oziroma najmanj 10x premer palice, kar v primeru armaturnih palic premera 22 mm pomeni najmanjšo velikost stranice betonskega preizkušanca 22 cm. Na podlagi dejstva, da v nobenem primeru med izvedbo preizkusa ni prišlo do nobenih poškodb betonskega preizkušanca, ocenjujemo, da nekoliko manjša dimenzija betonskega preizkušanca v primeru palic premera 22 mm ni vplivala na rezultate preizkusa. Dolžina armaturne palice je znašala približno 1,0 m, pri čemer je bil na spodnji strani betonskega preizkušanca prosti del armaturne palice dolžine 50 mm, na zgornji strani pa dolžine 750 mm. Skladno s standardom je bil stik med betonom in armaturno palico zagotovljen le na dolžini 5ϕ (slika 1b), torej na dolžini, ki v primeru palic premera $\varnothing=12$ mm pomeni sidrno dolžino $l_e=60$ mm, v primeru palic premera $\varnothing=22$ mm pa sidrno dolžino $l_e=110$ mm. Na preostali dolžini (tj. 140 mm v primeru palic premera $\varnothing=12$ mm oziroma 90 mm v primeru palic premera



Slika 1. Prikaz izdelave preizkušancev za izvedbo preiskave izvlečne sile F_{izvl} in fotografija uporabljenih vlaken v mikroarmiranih betonskih mešanicah.

($\phi=22$ mm) je bil stik med betonom in armaturo v celoti preprečen z namestitvijo plastične cevke (slika 1b) na ustrezen del armaturne palice. Po ustrezni namestitvi jeklene armaturne palice v posamezne kalupe smo le-te zapolnili z betonom (slika 1c). Vgradnjo kontraktorskega betona, kakršnega smo uporabili pri predmetnih preiskavah je potrebno izvesti brez vibriranja, kar smo upoštevali pri vgradnji betona v preizkušance. Ustrezno vgradnjo brez segregacije in naknadnega izločanja vode ter ustrezno zgoščenost betona smo dosegli s predhodno opisanim ustreznim projektiranjem sveže betonske mešanice in posledičnim doseganjem lastnosti betona v svežem stanju. Po izdelavi smo preizkušance pred razkalupljanjem 24 ur negovali v laboratorijskih pogojih pri relativni vlagi RH $60\pm 5\%$ ter temperaturi okolice $20\pm 2^\circ\text{C}$. Po razkalupljanju smo preizkušance do preiskave (tj. 28 dni oziroma 90 dni) negovali skladno s standardom SIST EN 12390-2:2019 [SIST, 2019e].

preskusom po SIST EN 6892-1:2020 [SIST, 2020]. Za izvedbo preskusa smo uporabili univerzalni preskuševalni stroj Zwick Z400 s posebnimi čeljustmi, ki omogočajo ustrezen oprijem armaturnih palic v smislu popolne preprečitve morebitnega zdrsa armaturne palice na mestu vpenjanja med izvajanjem preiskave. Vzorec armaturne palice smo obremenjevali do porušitve skladno z metodo A224 standarda SIST EN 6892-1:2020 [SIST, 2020], ki določa obremenjevanje s kontroliranim pomikom oziroma kontrolirano deformacijo vzorca. Izvajanje nateznega preskusa armaturne palice skladno s standardom SIST EN 6892-1:2020 [SIST, 2020] prikazuje slika 2. Za merjenje deformacij med izvajanjem preskusa smo uporabili napredne optične senzorje proizvajalca Zwick, model laserXtens Array HP z resolucijo $0,11\ \mu\text{m}$. Rezultati nateznega preskusa kažejo, da uporabljene armaturne palice ustrezajo armaturnemu jeklu kvalitete B500B.

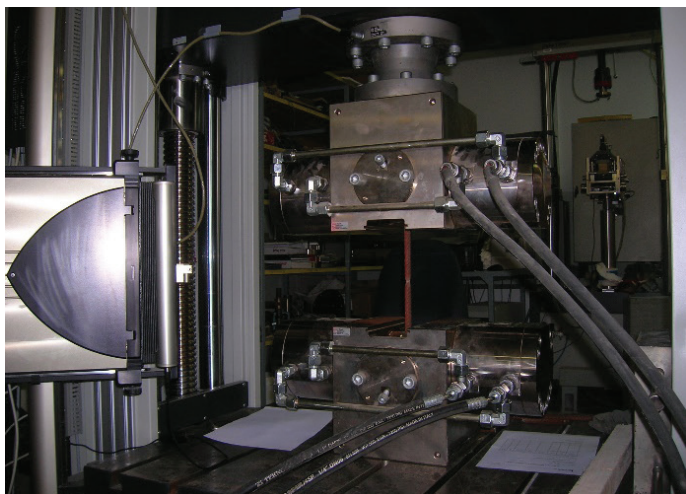
2.3 Uporabljene metode

2.3.1 Določitev osnovnih lastnosti armaturnih palic

Osnovne lastnosti uporabljenih armaturnih palic, prikazane v preglednici 3, so bile določene s standardnim nateznim

2.3.2 Določitev deleža reber na armaturnih palicah

Količino oziroma delež reber glede na obseg palice f_R smo določali s posebnim merilnim sistemom RIB3D turškega proizvajalca PSARON HTI s pripadajočo programsko opremo, pri



Slika 2. Izvajanje nateznega preskusa armaturne palice skladno s standardom SIST EN 6892-1:2020 [SIST, 2020].

čemer so bile te meritve opravljene na Zavodu za gradbeništvo ZAG v Ljubljani. Rezultati kažejo, da je količina reber ustrezna glede na zahteve relevantnega standarda.



Slika 3. Določanje deleža reber na armaturnih palicah.

Optični merilni sistem omogoča zajem 3D-slike armaturne palice s premerom do 50 mm z avtomatsko izmero njenih osnovnih lastnosti (nominalni premer, orientacija, razporeditev in višina reber, površina reber) ter natančno merjenje korozijskih poškodb po izpostavi v agresivnih okoljih. Z natančnimi izmerami globlin lokalnih korozijskih poškodb, obsegom poškodovane površine, njeno topografijo, zmanjšanjem preseka palice in volumnom korodiranega materiala oprema omogoča zanesljivo analizo korozijskih poškodb in izračun lokalnih in generalnih korozijskih hitrosti. Izvajanje preiskave količine reber na rebrasti armaturni palici prikazuje slika 3.

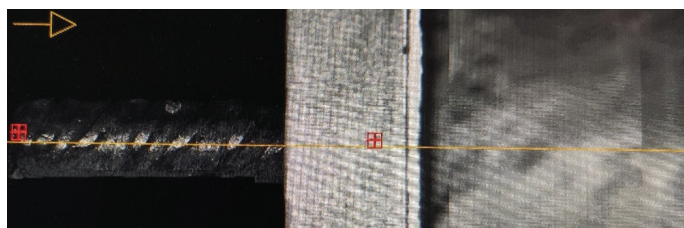
2.3.3 Določanje izvlečne sile med betonom in vgrajeno armaturo

Izvlačni preizkus je bil izveden skladno z dodatkom D-standarda SIST EN 10080:2005 [SIST, 2005]. Za izvedbo preiskave smo vzorec namestili v ustrezen adapter tako, da smo obre-

menitev nanašali na zgornjem, daljšem koncu palice v smeri navzgor (slika 4). Temu primerno smo z ustreznim podpor-nim sistemom popolnoma preprečili morebitni premik betonskega vzorca navzgor med izvajanjem preskusa. Pomi-ke oziroma zdrs med armaturno palico in betonom smo merili s posebnim optičnim laserskim sistemom, kar predstavlja pomembno izboljšavo glede na standard SIST EN 10080:2005 [SIST, 2005], ki navaja spremljanje pomikov z mehansko merilno urico. Medsebojni zdrs med betonom in armaturno palico smo spremljali tako, da smo merili spremembo razdalje med dvema referenčnima točkama (slika 5). Pomična referenčna točka je bila določena na armaturni palici (leva točka na sliki 5), fiksna referenčna točka pa na posebni kovinski ploščici dimenzije 50/50 mm, ki je bila fiksno pritrjena na spodnjo stranico betonske kocke (desna točka na sliki 5). S tem so bili doseženi boljša resolucija in posledično natančnejše meritve pomikov armaturne palice med izvedbo preiskave.



Slika 4. Prikaz preizkuševalne opreme in izvedbe preizkusa izvlečne sile F_{izvl}



Slika 5. Prikaz referenčnih točk za merjenje zdrsa med betonskim preizkušancem in armaturno palico med izvedbo preizkusa.

2.3.4 Analiza variance in preskušanje hipotez

Poleg osnovnih statistik smo za analizo vpliva posameznih parametrov na velikost $F_{\max}$ oziroma $\tau_{\max}$ ter ovrednotenje rezultatov izvedenih preiskav uporabili naprednejšo statistično tehniko analize variance (AnoVa). Detajlniji opis teoretičnega ozadja metode AnoVa je dostopen v številnih publikacijah, npr. [Turk, 2011]. Izračunali smo statistiko F in kritično vrednost statistike F (oznaka F_{crit}) ter postavili naslednjo ničelno (H_0) in alternativno (H_1) hipotezo:

H_0 - Vpliv analiziranega parametra (tj. starost betona, premer armaturne palice, vsebnost vlaken v betonu ter predhodni bentonitni premaz) na vrednost $F_{\max}$ (oziroma $\tau_{\max}$) je statistično značilen.

H_1 - Vpliv analiziranega parametra (tj. starost betona, premer armaturne palice, vsebnost vlaken v betonu ter predhodni bentonitni premaz) na vrednost $F_{\max}$ (oziroma $\tau_{\max}$) ni statistično značilen.

V primeru $F \geq F_{\text{crit}}$ ničelno hipotezo sprejmemo in trdimo, da je vpliv analiziranega parametra na vrednost $F_{\max}$ (oziroma $\tau_{\max}$) statistično značilen, v primeru $F < F_{\text{crit}}$ pa ničelno hipotezo zavrnilo in ugotovimo, da vpliv parametra na vrednost $F_{\max}$ (oziroma $\tau_{\max}$) ni statistično značilen. Za stopnjo zaupanja smo izbrali faktor $\alpha=0,05$, ki se običajno uporablja pri podobnih študijah.

3 REZULTATI PREISKAV

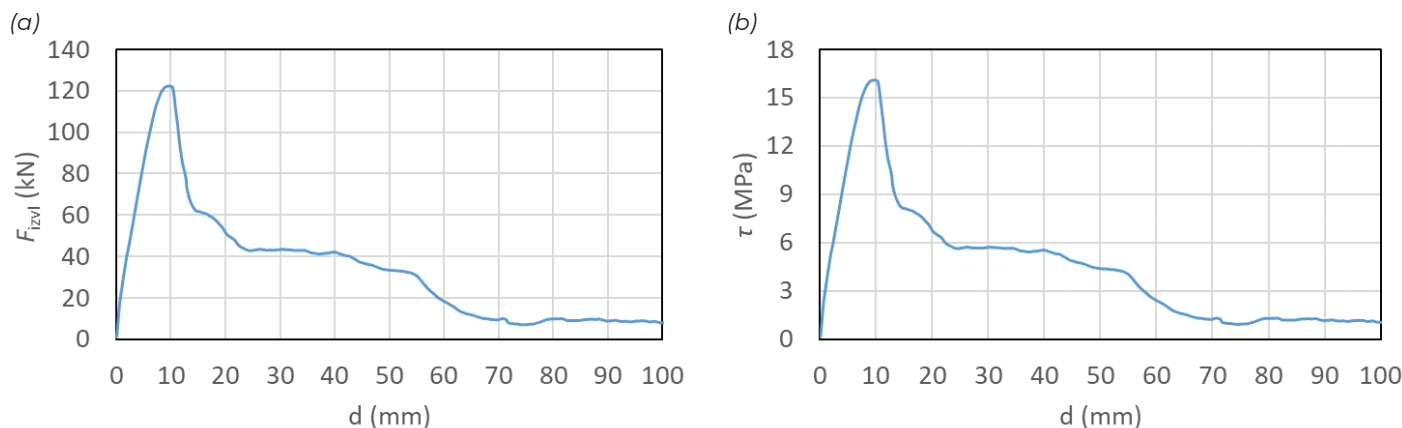
3.1 Splošen potek diagrama $d - F_{\text{izvl}}$ in $d - \tau$

Slika 6 prikazuje splošen potek diagrama naraščanja izvlečne sile F_{izvl} oziroma sprijemne napetosti τ v odvisnosti od pomika oziroma zdrsa med vgrajeno armaturno palico in okoliškim betonom d . Največja izvlečna sila $F_{\max}$ in največja sprijemna napetost $\tau_{\max}$ predstavljata najvišjo točko na diagramih, prikazanih na sliki 6. S slike 6 vidimo, da diagrama $d - F_{\max}$ oziroma $d - \tau_{\max}$ lahko razdelimo na štiri karakteristične faze. Prva faza predstavlja naraščanje izvlečne sile F_{izvl} (oziroma sprijemne

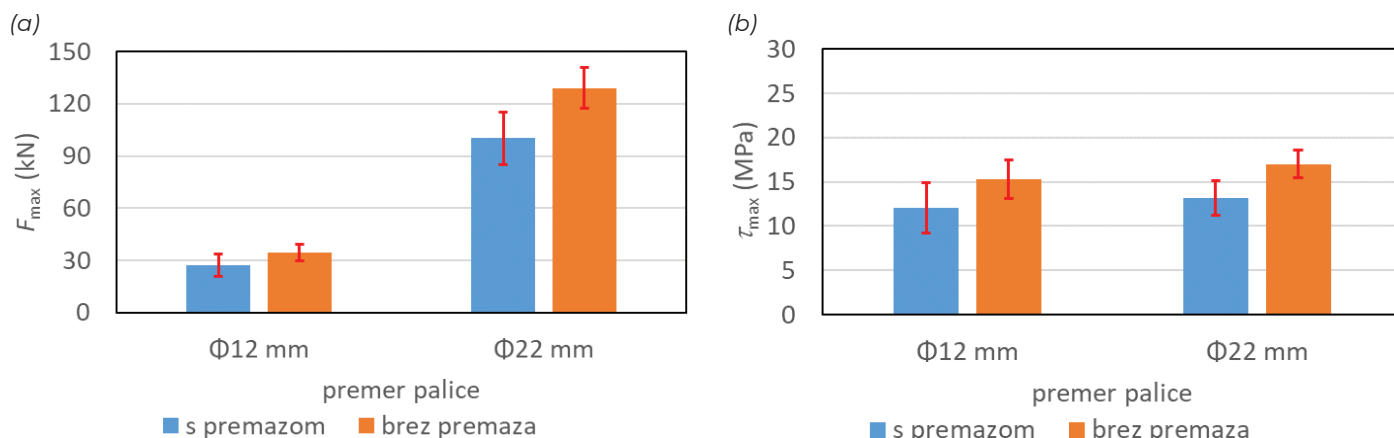
napetosti τ), pri čemer je stik med betonom in armaturno palico še v celoti zagotovljen (tj., znaša vrednost medsebojnega zdrsa $d = 0$). Sledi druga faza, v kateri pomik d narašča linearno z izvlečno silo F_{izvl} do dosežene največje izvlečne sile $F_{\max}$ oziroma sprijemne napetosti $\tau_{\max}$. Za tretjo fazo je značilen praktično linearen padec vrednosti F_{izvl} (oziroma vrednosti τ) z nadaljnjim naraščanjem vrednosti d , v zadnji (4.) fazi pa se vrednost d izrazito povečuje ob manjši intenzivnosti padanja vrednosti F_{izvl} (oziroma vrednosti τ). Ocenjujemo, da je v fazi 1 stik med vgrajeno armaturo in okoliškim betonom v glavnem posledica adhezije, v fazah 2 in 3 trenja med armaturno palico in okoliškim betonom ter zaklinjanjem reber palice v okoliški beton, v fazi 4 pa po večini le še z zaklinjanjem reber palice v okoliški beton.

3.2 Vpliv premera armature na vrednosti $F_{\max}$ in $\tau_{\max}$

Slika 7 prikazuje vpliv premera armature na vrednosti $F_{\max}$ (slika 7a) in $\tau_{\max}$ (slika 7b). Prikazane so povprečne vrednosti štirih (v primeru brez predhodnega premaza) oziroma petih (v primeru s predhodnim premazom) rezultatov ter standardni odkloni rezultatov od povprečnih vrednosti. Pričakovano je povečanje premera armaturne palice rezultiralo v občutno večji izvlečni sili $F_{\max}$ tako v primeru, ko palice niso bile predhodno premazane z bentonitnim premazom, kot tudi v primeru prehodnega premaza palic z bentonitnim premazom. V primeru brez predhodnega premaza se je s povečanjem premera armaturnih palic z 12 mm na 22 mm izvlečna sila $F_{\max}$ povečala povprečno za 273%, v primeru predhodnega bentonitnega premaza pa v povprečju za 268%. Nasprotno je v primeru sprijemne napetosti $\tau_{\max}$ povečanje le-te s povečanjem premera praktično zanemarljivo in znaša brez predhodnega premaza armaturnih palic v povprečju 11%, s predhodnim premazom armaturnih palic pa v povprečju 9%. Opazno je, da je pri obeh premerih armaturnih palic predhodni bentonitni premaz rezultiral v nekoliko nižjih vrednostih $F_{\max}$ in $\tau_{\max}$. Pri palicah premera 12 mm sta v primeru predhodnega bentonitnega premaza izvlečna sila $F_{\max}$ in sprijemna napetost $\tau_{\max}$ v povprečju nižji za 21%, pri palicah premera 22 mm pa za 22%.



Slika 6. Splošen potek diagrama spreminjanja: a) izvlečne sile F_{izvl} oziroma b) sprijemne napetosti τ v odvisnosti od pomika oziroma zdrsa med vgrajeno armaturno palico in okoliškim betonom d .

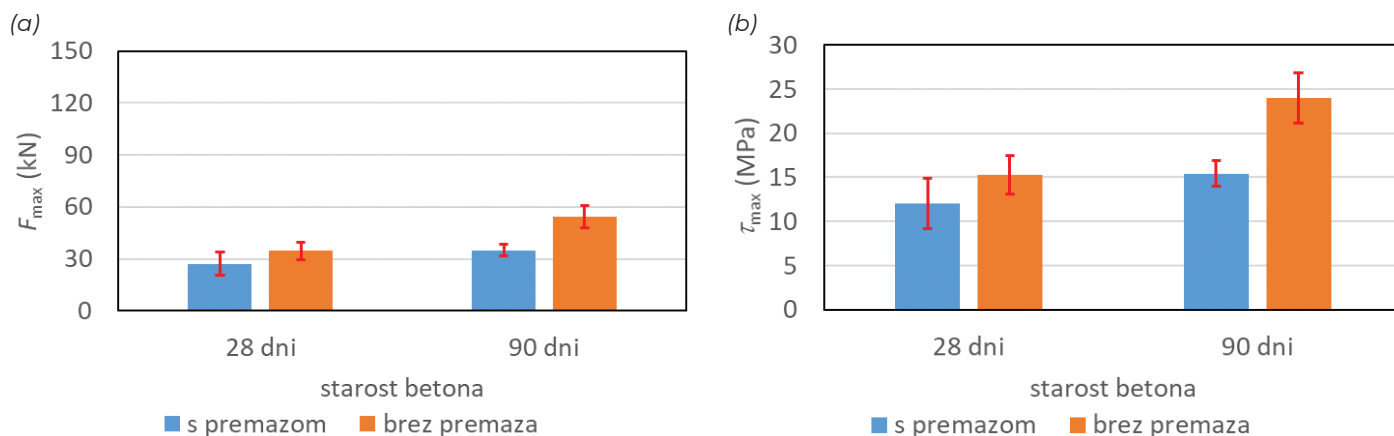


Slika 7. Vpliv premera armature na vrednosti: a) $F_{\max}$ in b) $\tau_{\max}$.

3.3 Vpliv starosti betona na vrednosti $F_{\max}$ in $\tau_{\max}$

Slika 8 prikazuje vpliv starosti in s tem tlačne trdnosti betona na vrednosti $F_{\max}$ (slika 8a) in $\tau_{\max}$ (slika 8b). Premer armaturnih palic je v tem primeru znašal 12 mm. Prikazane so povprečne vrednosti štirih (v primeru brez predhodnega premaza) oziroma petih (v primeru s predhodnim premazom) rezultatov ter standardni odkloni rezultatov od povprečnih vrednosti.

Iz preglednice 2 je razvidno, da je povprečna vrednost tlačne trdnosti betona pri starosti 28 dni znašala 68,4 MPa, pri starosti 90 dni pa 79,3 MPa. Slika 8 kaže, da so se s povečanjem starosti betona iz 28 na 90 dni povečale vrednosti $F_{\max}$ in $\tau_{\max}$ tako v primeru predhodnega premaza kot v primeru brez predhodnega premaza. V primeru predhodnega premaza je povečanje vrednosti $F_{\max}$ oziroma $\tau_{\max}$ s povečanjem starosti betona v povprečju znašalo 28%, v primeru brez predhodnega premaza pa 57%. Pri obeh starostih betona je predhodni bentonitni premaz armaturnih palic rezultiral v nekoliko nižjih vrednostih $F_{\max}$ in $\tau_{\max}$. Pri starosti betona 28 dni sta v primeru predhodnega bentonitnega premaza izvlečna sila $F_{\max}$ in sprijemna napetost $\tau_{\max}$ v povprečju nižji za 27%, pri starosti betona 90 dni pa za 56%.

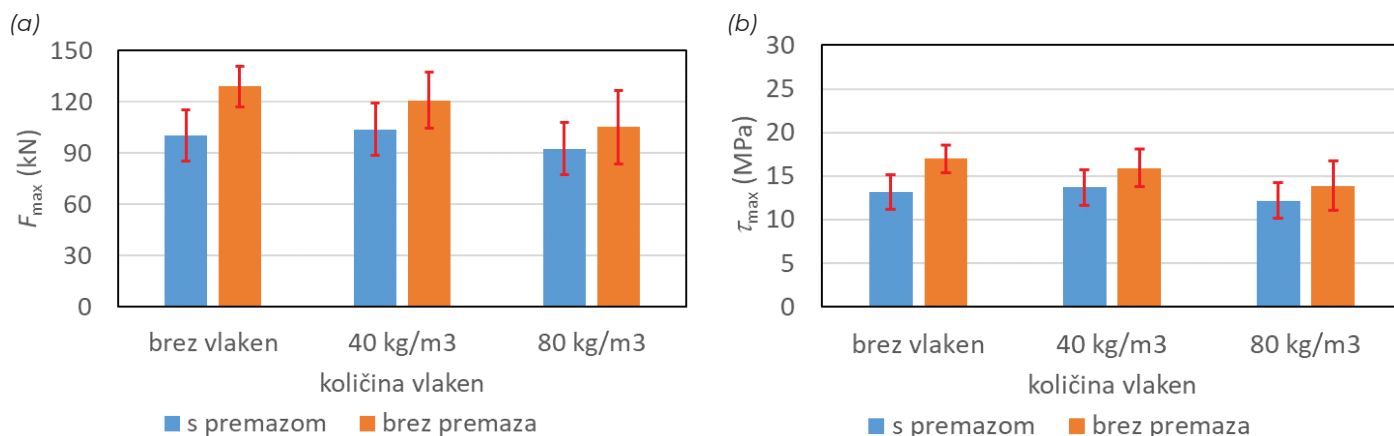


Slika 8. Vpliv starosti betona na vrednosti: a) $F_{\max}$ in b) $\tau_{\max}$.

3.4 Vpliv vsebnosti vlaken v betonu na vrednosti $F_{\max}$ in $\tau_{\max}$

Slika 9 prikazuje vpliv količine jeklenih vlaken v betonu na vrednosti $F_{\max}$ (slika 9a) in $\tau_{\max}$ (slika 9b). Premer armaturnih palic je v tem primeru znašal 22 mm. Prikazane so povprečne vrednosti štirih (v primeru brez predhodnega premaza) oziroma petih (v primeru s predhodnim premazom) rezultatov ter standardni odkloni rezultatov od povprečnih vrednosti. Razvidno je, da je s povečanjem količine vlaken v splošnem opaziti malenkostno zmanjšanje izvlečne sile $F_{\max}$ in sprijemne napetosti $\tau_{\max}$. Z dodatkom 40 kg/m³ vlaken sta se izvlečna sila $F_{\max}$ in sprijemna napetost $\tau_{\max}$ v primeru predhodnega premaza armaturnih palic sicer povečali za približno 4% glede na preskušance brez vlaken, v primeru brez predhodnega premaza pa je opazno zmanjšanje vrednosti $F_{\max}$ in $\tau_{\max}$ za približno 6%.

Z nadaljnjim povečanjem vlaken s 40 kg/m³ na 80 kg/m³ je v primeru predhodnega premaza armaturnih palic prišlo do zmanjšanja vrednosti $F_{\max}$ in $\tau_{\max}$ za približno 11%, v primeru brez predhodnega premaza pa za približno 13%. V vseh primerih je opaziti, da je predhodni premaz armaturnih palic s premazom rezultiral v zmanjšanju vrednosti $F_{\max}$ in $\tau_{\max}$. V primeru, ko v betonu ni bilo prisotnih vlaken, je to zmanjšanje znašalo v povprečju 29%, v primeru mikroarmiranega betona pa za približno 15%.

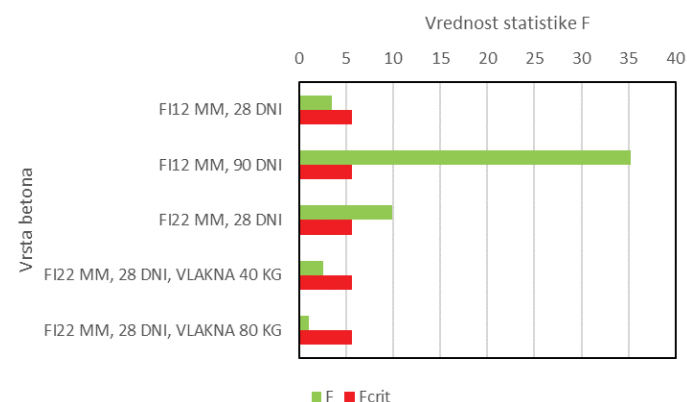


Slika 9. Vpliv vsebnosti vlaken v betonu na vrednosti: a) F_{max} in b) τ_{max} .

3.5 Statistična analiza vpliva posameznih parametrov na vrednosti F_{max} oziroma τ_{max}

V nadaljevanju prikazujemo rezultate statistične analize vpliva predhodnega premaza armaturnih palic na vrednosti F_{max} oziroma τ_{max} , dobljene z metodo analize variance (Anova). V primeru, ko je vrednost F_{crit} večja od vrednosti statistike F , velja, da je vpliv predhodnega premaza na dosežene vrednosti F_{max} oziroma τ_{max} statistično značilen.

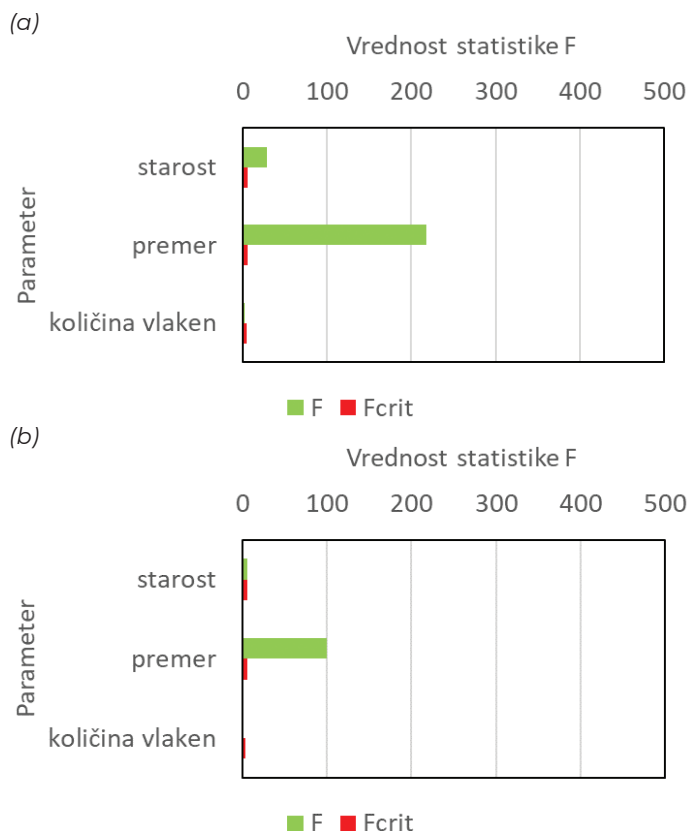
S slike 10 vidimo, da je predhodni premaz armaturnih palic statistično značilno vplival na zmanjšanje vrednosti F_{max} oziroma τ_{max} le v primeru 90 dni starih vzorcev, v katerih je bila nameščena armaturna palica premera 12 mm, ter v primeru 28 dni starih vzorcev z armaturno palico premera 22 mm. V ostalih primerih predhodni premaz armaturnih palic ni povzročil statistično značilnega znižanja vrednosti F_{max} oziroma τ_{max} .



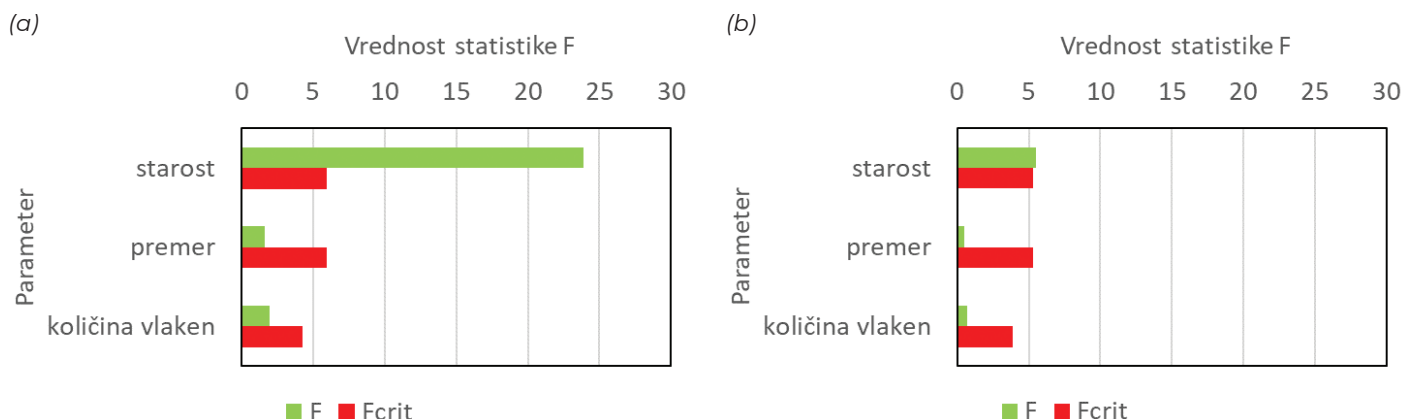
Slika 10. Statistična značilnost vpliva premaza na dosežene vrednosti F_{max} oziroma τ_{max} .

S slike 11 vidimo, da je tako v primeru brez predhodnega premaza armaturnih palic (slika 11a) kot v primeru, ko so bile armaturne palice predhodno premazane z bentonitnim premazom (slika 11b), povečanje starosti betona iz 28 na 90 dni ter povečanje premera armaturnih palic iz 12 mm na 22 mm statistič-

no značilno vplivalo na povečanje vrednosti izvlečne sile F_{max} . Povečanje starosti betona z 28 na 90 dni je v obeh primerih (torej brez predhodnega premaza in s predhodnim premazom armaturnih palic) statistično značilno vplivalo na povečanje vrednosti sprijemne napetosti τ_{max} , za razliko od vpliva na vrednost F_{max} pa vpliv premera armaturnih palic na vrednosti τ_{max} ni statistično značilen ne glede na predhodni premaz armaturnih palic (slika 12). Dodajanje vlaken v beton v nobenem primeru ni statistično značilno vplivalo ne na vrednosti izvlečne sile F_{max} (slika 11) ne na vrednosti sprijemne napetosti τ_{max} (slika 12).



Slika 11. Statistična značilnost vpliva posameznih parametrov na dosežene vrednosti F_{max} : a) brez premaza; b) s premazom.



Slika 12. Statistična značilnost vpliva posameznih parametrov na dosežene vrednosti $\tau_{\max}$: a) brez premaza; b) s premazom.

4 DISKUSIJA

Iz rezultatov preiskav, prikazanih v predhodnih poglavjih, je razvidno, da se vrednosti sprijemnih napetosti med vgrajeno rebrasto armaturo in okoliškim betonom v povprečju gibljejo v območju med 10–17 MPa, kar je primerljivo z rezultati sprijemnih napetosti, prikazanimi v literaturi ([Bashir, 2019], [Saje, 2021]).

Uporabljen predhodni premaz armaturnih palic je v vseh analiziranih primerih vplival na zmanjšanje izvlečne sile $F_{\max}$ oziroma sprijemne napetosti $\tau_{\max}$, pri čemer je to zmanjšanje v povprečju znašalo med 15–56%. Kljub navedenemu dejstvu je bilo statistično značilno zmanjšanje vrednosti $F_{\max}$ oziroma $\tau_{\max}$ ob predhodnem premazu armaturnih palic ugotovljeno le v primeru 90 dni starih vzorcev z armaturno palico premera 12 mm ter v primeru 28 dni starih vzorcev z armaturno palico premera 22 mm. V ostalih primerih vpliv predhodnega premaza armaturnih palic ni statistično značilno vplival na vrednosti izvlečne sile $F_{\max}$ oziroma sprijemne napetosti $\tau_{\max}$, kar je posledica relativno velikega raztrosa (variance) med posameznimi rezultati znotraj posameznega sklopa preiskav. To dejstvo kaže, da bentonitna izplaka v splošnem ne vpliva pomembneje na sprijemnost med v beton vgrajeno armaturo in okoliškim betonom.

Medtem ko je povečanje premera armaturnih palic z 12 mm na 22 mm tako v primeru predhodnega bentonitnega premaza kot v primeru brez predhodnega premaza (pričakovano) visoko statistično značilno vplivalo na povečanje izvlečne sile $F_{\max}$ (slika 10), pa vpliv omenjene spremembe na doseženo sprijemno napetost $\tau_{\max}$ ni statistično značilen (slika 11). Te ugotovitve sovpadajo z ugotovitvami, ki jih je predstavil Gangolu s sodelavci [Gangolu, 2007], medtem ko sta Bashir s sodelavci [Bashir, 2019] in Eligehausen ter Tayeh s sodelavci ([Eligehausen, 1988], [Tayeh, 2019]) ugotovila malenkostno zmanjšanje sprijemne napetosti $\tau_{\max}$ s povečanjem premera armaturnih palic. Količina vlaken v betonu v nobenem primeru ni imela statistično značilnega vpliva na vrednost izvlečne sile $F_{\max}$ (slika 10) oziroma sprijemne napetosti $\tau_{\max}$ (slika 11). To kaže na dejstvo, da prisotnost vlaken v betonu ne vpliva na sprijemnost med betonom in armaturo. Rezultat je pričakovan, saj vsebnost vla-

ken v betonu ne vpliva bistveno na lastnosti oziroma kvaliteto stičnega območja med armaturno palico in cementnim vezivom, ki pri kvaliteti stika med armaturno palico in okoliškim betonom igra ključno vlogo. Nasprotno se seveda s starostjo betona njegove mehanske lastnosti in s tem stično območje med betonom in armaturo ter posledično jakost stika med armaturno palico in cementnim vezivom povečujejo. To se odraža v statistično značilnem povečanju vrednosti tako izvlečne sile $F_{\max}$ kot tudi sprijemne napetosti $\tau_{\max}$ s povečanjem starosti betona z 28 na 90 dni.

5 ZAKLJUČKI

V predmetnem prispevku analiziramo vpliv različnih parametrov betona in vgrajene rebraste armature na velikost izvlečne sile $F_{\max}$ oziroma sprijemne napetosti $\tau_{\max}$ med vgrajeno armaturo in okoliškim betonom. Preiskavo izvleka armaturne palice iz betona smo izvedli skladno z dodatkom D-standarda SIST EN 10080:2005 [SIST, 2005], pri čemer je najpomembnejšo modifikacijo glede na standard predstavljala uporaba naprednega optičnega merilca deformacij oziroma pomikov med izvedbo preiskave. Na podlagi prikazanih rezultatov lahko podamo predvsem naslednje pomembne zaključke in ugotovitve:

- Predhodni bentonitni premaz armaturnih palic je statistično značilno vplival na zmanjšanje vrednosti $F_{\max}$ oziroma $\tau_{\max}$, le v primeru 90 dni starih vzorcev, v katerih je bila nameščena armaturna palica premera 12 mm, ter v primeru 28 dni starih vzorcev z armaturno palico premera 22 mm. V ostalih primerih predhodni premaz armaturnih palic ni povzročil statistično značilnega znižanja vrednosti $F_{\max}$ oziroma $\tau_{\max}$.
- V primeru brez predhodnega premaza se je s povečanjem premera armaturnih palic z 12 mm na 22 mm izvlečna sila $F_{\max}$ povečala povprečno za 273%, sprijemna napetost $\tau_{\max}$ pa za povprečno 11%. V primeru predhodnega bentonitnega premaza se je s povečanjem premera armaturnih palic z 12 mm na 22 mm izvlečna sila $F_{\max}$ povečala v povprečju za 268%, sprijemna napetost $\tau_{\max}$ pa za povprečno 9%. Medtem ko je tako v primeru predhodnega premaza kot v primeru brez premaza armaturnih palic povečanje premera

armaturnih palic statistično značilno vplivalo na povečanje izvlečne sile $F_{\max}$, pa ta sprememba na vrednosti sprijemne napetosti $\tau_{\max}$ ni imela statistično značilnega vpliva.

- V primeru brez predhodnega premaza se je s povečanjem starosti betona z 28 dni na 90 dni izvlečna sila $F_{\max}$ oziroma sprijemna napetost $\tau_{\max}$ povečala za 57%, v primeru predhodnega premaza pa za 28%. V obeh primerih je povečanje starosti betona statistično značilno vplivalo na povečanje izvlečna sila $F_{\max}$ oziroma sprijemne napetosti $\tau_{\max}$.
- Z dodajanjem vlaken v beton je v splošnem sicer prišlo do malenkostnega zmanjšanja izvlečne sile $F_{\max}$ oziroma sprijemne napetosti $\tau_{\max}$, pri čemer pa ta vpliv tako v primeru brez prehodnega premaza kot v primeru predhodnega premaza ni statistično značilen.

6 LITERATURA

Bashir, M. T., Ansar, M., Muhammad, S., Farid F., Abbas, M. I., Pull-out Behavior of Conventional Steel Reinforcement in Normal and High Strength Concrete, International Journal of Scientific Engineering and Science, 3 (4), 18-25, 2019.

Bilek, V., Bonczkova, S., Hurta, J., Pytlík, D., Mrovec, M., Bond Strength Between Reinforcing Steel and Different Types of Concrete, Procedia Engineering, 190, 243-247, 2017.

DIN, DIN 1048-1, Testing concrete; testing of fresh concrete, DIN, 1991.

Eligehausen, R., Popov, E. G., Bertera, V. V., Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations, R.No.UCB/EERC-83/23,EERC, Berkeley, 1988.

Naaman, A. E., Engineered steel fibers with optimum properties for reinforcement of cement composites, Journal of advanced concrete technology, 1 (4), 241-252, 2003.

Gangolu, A. R., Pandurangan, K., Sultana, F., Eligehausen, R., Studies on the pull-out strength of ribbed bars in high-strength concrete, Research Gate, https://www.researchgate.net/publication/288403054_Studies_on_the_pull-out_strength_of_ribbed_bars_in_high-strength_concrete, 1-6, 2007.

Saje, D., Lopatič, J., Obnašanje stika med betonom in armaturnimi palicami iz bazaltnih vlaken, Gradbeni Vestnik, 70, 186-196, 2021.

SIST, SIST EN 10080:2005, Jeklo za armiranje betona - Varivo armaturno jeklo - Splošno, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2005.

SIST, SIST EN 12350-10:2010, Preskušanje svežega betona - 8. del: Samozgoščevalni beton - Preskus z L-zabojem, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2010.

SIST, SIST 1026:2016 Beton - Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost - Pravila za uporabo SIST EN 206, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2016.

SIST, SIST EN 12350-1:2019, Preskušanje svežega betona - 1. del: Vzorčenje in naprave za preskušanje, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2019a.

SIST, SIST EN 12350-6:2019, Preskušanje svežega betona - 6. del: Gostota, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2019b.

SIST, SIST EN 12350-7:2019, Preskušanje svežega betona - 7. del: Vsebnost zraka - Metode s pritiskom, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2019c.

SIST, SIST EN 12350-8:2019, Preskušanje svežega betona - 8. del: Samozgoščevalni beton - Preskus razleza s posedom, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2019d.

SIST, SIST EN 12390-2:2019, Preskušanje strjenega betona - 2. del: Izdelava in nega vzorcev za preskus trdnosti, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2019e.

SIST, SIST EN 12390-3:2019, Preskušanje strjenega betona - 3. del: Tlačna trdnost preskušancev, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2019f.

SIST, SIST EN 12390-8:2019, Preskušanje strjenega betona - 8. del: Globina vpivanja vode pod pritiskom, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2019g.

SIST, SIST EN ISO 15630-1:2019, Jeklo za armiranje in prednapenjanje betona - Metode preskušanja - 1. del: Armaturne palice, drogovi in žica, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2019h.

SIST, SIST EN 6892-1:2020, Kovinski materiali - Natezni preskus - 1. del: Metoda preskušanja pri sobni temperaturi, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2020.

Tayeh, A. B., El Dada, Z. M., Shidada, S., Yusuf, M. O., Pull-out behavior of post installed rebar connections using chemical adhesives and cement based binders, Journal of King Saud University - Engineering Sciences, 31, 332-339, 2019.

Turk, G., Verjetnostni račun in statistika, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 2011.

Yoo, D. Y., Shin, H. O., Bond performance of steel rebar embedded in 80-180 MPa ultra-high-strength concrete, Cement and Concrete Composites, 93, 206-217, 2018.