

Primljen / Received: 11.9.2022.

Ispravljen / Corrected: 17.5.2023.

Prihvaćen / Accepted: 18.1.2024.

Dostupno online / Available online: 10.2.2024.

# Utjecaj strukture pora na čvrstoću betona od eolskog pijeska

## Autori:



<sup>1</sup>Prof.dr.sc. **Huimei Zhang**  
zhanghuimei68@163.com



<sup>2</sup>Shihang Zheng, dipl.ing.građ.  
zhengsh2022@163.com  
Autor za korespondenciju



<sup>3</sup>Panyuan Jing, dipl.ing.građ.  
jpanyuan@163.com



<sup>1</sup>Dr.sc. **Chao Yuan**  
yuanchao828@163.com



<sup>4</sup>Prof.dr.sc. **Yugen Li**  
liyugen@yulinu.edu.cn

Stručni rad

**Huimei Zhang, Shihang Zheng, Panyuan Jing, Chao Yuan, Yugen Li**

## Utjecaj strukture pora na čvrstoću betona od eolskog pijeska

Kako bi se istražio utjecaj karakteristika strukture pora betona od eolskog pijeska na mehanička svojstva, provedena su makroskopska mehanička ispitivanja betona od eolskog pijeska pod različitim uvjetima, a analizirani su i utjecaj vodocementnog omjera, te udjela pijeska i stope zamjene eolskog pijeska na tlačnu čvrstoću. Unutarnja mikroskopska struktura pora ispitana je pomoću skenirajuće elektronske mikroskopije i nuklearne magnetske rezonancije. Utjecaj parametara strukture pora na tlačnu čvrstoću određen je sivom relacijskom analizom, te je utvrđen model čvrstoće i strukture pora.

### Ključne riječi:

beton od eolskog pijeska, mehanička svojstva, struktura pora, model funkcije

Professional paper

**Huimei Zhang, Shihang Zheng, Panyuan Jing, Chao Yuan, Yugen Li**

## Influence of pore structure characteristics on the strength of aeolian sand concrete

To investigate the influence of the pore structure characteristics of aeolian sand concrete on the mechanical properties, macroscopic mechanical tests of aeolian sand concrete were performed under different conditions, and the influences of the water-cement ratio, sand ratio, and aeolian sand replacement rate on the compressive strength were analysed. The internal microscopic pore structure was characterised using scanning electron microscopy and nuclear magnetic resonance. The impact of pore structure parameters on compressive strength was determined by the grey relational entropy, and a pore structure-strength model was established.

### Key words:

aeolian sand concrete, mechanical property, pore structure, function model

<sup>1</sup> Sveučilište znanosti i tehnologije Xian, Kina  
Odjel za mehaniku

<sup>2</sup> Sveučilište znanosti i tehnologije Xian, Kina  
Fakultet za arhitekturu i građevinarstvo

<sup>3</sup> Prvi ured Kine za metaluršku geologiju, Kina

<sup>4</sup> Sveučilište Yulin, Kina  
Škola arhitektonskog inženjerstva

## 1. Uvod

S ubrzanim procesom urbanizacije i sve većim razmjerom gradnje u Kini, sve je veća potražnja za betonom kao glavnim materijalom za izgradnju. Stoga značajno raste potražnja za prirodnim riječnim pijeskom kao njegovim sastavnim dijelom. Proturječnost između ponude i potražnje građevnog pijeska postala je glavni čimbenik koji ograničava izgradnju infrastrukture [1]. Pustinjsko područje u Kini iznosi 71,29 milijuna km<sup>2</sup>, što čini 7,4 % ukupne površine te zemlje, s obilnim resursima eolskog pijeska [2]. Primjena eolskog pijeska kao sitnog agregata umjesto riječnog pijeska za pripremu betona ne samo da može riješiti sve ozbiljniji problem dezertifikacije, već također nudi rješenje za nedostatak građevnog materijala, čime se postižu rezultati u korist svih strana.

Beton od eolskog pijeska je vrsta betona u kojem eolski pijesak kao sitni agregat djelomično ili potpuno zamjenjuje prirodni riječni pijesak. Nedavno su istraživači proučavali eolski pijesak s različitim stajališta, ali su se uglavnom usredotočili na njegove tehničke karakteristike te su ga primijenili kao sirovinu za miješanje betona. Benabed i sur. [3] primjenjivali su ultrasitni pijesak za pripremu samozbijajućeg morta, a Padmakumar i sur. [4], Jiang i sur. [5] i Luo i sur. [6] pripremili su beton primjenjujući eolski pijesak kao sitni agregat i otkrili da se eolski pijesak može učinkovito primjenjivati kao zamjenski materijal u betonu i mortu. Li i sur. [7, 8], Dong i sur. [9] i Al-Harthy i sur. [10] upotrijebili su eolski pijesak umjesto riječnog pijeska za pripremu betona i otkrili da se brzina slijeganja i čvrstoća betona najprije povećavaju, a zatim smanjuju s povećanjem udjela eolskog pijeska. Međutim, Guettalla [11] i El-Sayed i sur. [12] zaključili su da čvrstoća betona opada s povećanjem udjela eolskog pijeska, što znači da eolski pijesak negativno utječe samo na mehanička svojstva betona. Takvi zaključci mogu se pripisati očitim regionalnim karakteristikama eolskog pijeska. Sastav zrnaca i minerala različit je u različitim pustinjama ili čak u različitim dijelovima iste pustinje.

Beton je višefazni heterogeni kompozitni materijal složene strukture. Nakon što očvrsne, u betonu se stvaraju mnoge pore različitih veličina i oblika koje utječu na njegovu čvrstoću [13]. Gao i sur. [14] primijenili su stupanj sive korelacije i višestruku linearnu regresijsku analizu kako bi dobili odnos između

raspodjele veličine pora i čvrstoće morta te su utvrdili jednadžbu višestruke linearne regresije. Bu i sur. [15] dobili su poroznost i raspodjelu pora betona metodom živine porozimetrije i uspostavili statistički model za karakteristike tlačne čvrstoće i strukture pora. Dong i sur. [16] proučavali su mehanizam utjecaja karakteristika pora na čvrstoću betona od eolskog pijeska i utvrdili da je korelacija između manje štetnih pora i tlačne čvrstoće nakon 28 dana najveća. Bai i sur. [17] proveli su analizu sive korelacije i otkrili da je najvažniji mikrostrukturni čimbenik koji utječe na trajnost betona od eolskog pijeska relativni udio štetnih i neštetnih pora. Liu i sur. [18, 19] analizirali su raspodjelu pora betona od eolskog pijeska pomoću stupnja sive korelacije entropije te su uspostavili sivi model za omjer čvrstoće pri stlačivanju i radijusa pora. Međutim, eolski pijesak može promijeniti strukturu sučeljka i poroznost materijala kada se primjenjuje za izradu zbog svoje gradacije čestica i karakteristika upijanja vode. To dovodi do razlika u odnosu na obični beton u smislu osnovnih mehaničkih svojstava, a dostupni rezultati istraživanja u vezi s odnosom između karakteristika strukture pora i čvrstoće betona od eolskog pijeska još uvijek su nedostadni, posebice ako se uzme u obzir da je promjena u omjeru neštetnih pora jedva zabilježena.

Ukratko, za ovaj su rad odabrani različiti omjeri vode i cementa (0,42, 0,45 i 0,48), udjeli pijeska (30 %, 32 % i 35 %) i stope zamjene eolskog pijeska (0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 % i 100 %) za pripremu betona od eolskog pijeska, a karakteristike strukture pora betona od eolskog pijeska analizirane su pomoću skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM-a) i NMR-a. Ispitana je veza između mehaničkih svojstava i strukture pora te je utvrđen odnos strukture pora i čvrstoće prikladan za beton od eolskog pijeska.

## 2. Materijali i metode

### 2.1. Ispitni materijali i sastav mješavina

P.O. 42.5 obični portlandski cement može se upotrijebiti kao cement. U tablici 1. navedena su fizikalna svojstva cementa. Sitni agregati uključuju riječni pijesak i eolski pijesak, koji se mogu dobiti iz pustinje Mu Us u Kini, a riječni pijesak je pijesak srednje veličine. Usporedba fizikalnih svojstava prikazana je u tablici 2.,

Tablica 1. Glavna fizikalna svojstva cementa

Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	Početno vrijeme vezivanja [min]	Konačno vrijeme vezivanja [min]	Tlačna čvrstoća [MPa]		Čvrstoća na savijanje [MPa]	
			3 dana	28 dana	3 dana	28 dana
3151	145	210	24,1	47,3	5,0	8,6

Tablica 2. Glavna fizikalna svojstva pijeska

Naziv pijeska	Nasipna gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	Specifična gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	Modul finoće	Udio vode [%]	Udio tla [%]
Riječni pijesak	1556	2590	2,64	0,3	2
Eolski pijesak	1564	2610	0,8	0,5	1,5

Tablica 3. Glavna fizikalna svojstva krupnog agregata

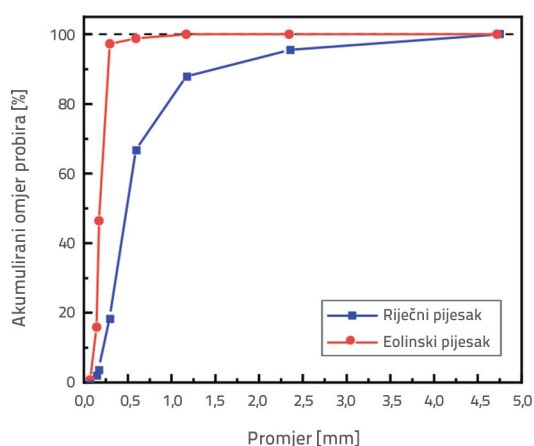
Veličina čestice [mm]	Nasipna gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	Specifična gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	Udio tla [%]
5-20	1652	2640	2,6

Tablica 4. Sastavi betonskih mješavina

Uzorci	Voda [kg/m <sup>3</sup> ]	Cement [kg/m <sup>3</sup> ]	Riječni pijesak [kg/m <sup>3</sup> ]	Eolski pijesak [kg/m <sup>3</sup> ]	Leteći pepeo [kg/m <sup>3</sup> ]	Kamen [kg/m <sup>3</sup> ]
A-1	190	407	450	112	45	1196
A-2	190	380	458	114	42	1216
A-3	190	357	464	116	39	1234
B-1	190	407	422	105	45	1231
B-2	190	407	450	112	45	1196
B-3	190	407	492	123	45	1143
C-1	190	407	562	0	45	1196
C-2	190	407	450	112	45	1196
C-3	190	407	338	224	45	1196
C-4	190	407	226	336	45	1196
C-5	190	407	114	448	45	1196
C-6	190	407	0	562	45	1196

Napomena: A-1, A-2 i A-3 pokazuju da su omjeri vode i cementa 0,42, 0,45, odnosno 0,48. B-1, B-2 i B-3 pokazuju da su udjeli pijeska 30 %, 32 %, odnosno 35 %. C-1, C-2, C-3, C-4, C-5 i C-6 pokazuju da su stope zamjene 0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 % i 100 %.

a gradacijske krivulje prikazane su na slici 1. Krupni agregat je konstantno gradirani drobljeni kamen, a njegova glavna fizikalna svojstva navedena su u tablici 3. Leteći pepeo bio je pepeo II. stupnja sa specifičnom površinom od 352 m<sup>2</sup>/kg i gustoćom od 2150 kg/m<sup>3</sup>. Upotrijebljena je obična voda iz slavine.



Slika 1. Krivulja distribucije veličina zrna pijeska za ispitivanje

Ovaj se rad poziva na normu za određivanje udjela za mješavine običnog betona (JGJ55-2011) [20]. Metoda kontrolne varijable s jednim faktorom primijenjena je za određivanje različitih omjera vode i cementa (udio pijeska bio je 32 %, stopa zamjene eolskog pijeska bila je 20 %, omjer vode i cementa bio je 0,42, 0,45, 0,48), udio pijeska (omjer vode i cementa bio je 0,42, stopa zamjene

eolskog pijeska bila je 20 %, udio pijeska bio je 30 %, 32 %, 35 %) i stopa zamjene eolskog pijeska (omjer vode i cementa bio je 0,42, udio pijeska bio je 32 %, stopa zamjene eolskog pijeska bila je 0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 %, 100 %). Ukupno je postavljeno 12 mješavina različitih omjera za pripremu betona od eolskog pijeska stupnja čvrstoće C40. Specifični omjeri mješavine navedeni su u tablici 4.

## 2.2. Metode ispitivanja

Primijenjena je standardna metoda pripreme uzorka koja se temelji na mehaničkim svojstvima [21]. Za svaku mješavinu pripremljeno je šest grupa kockastih uzoraka dimenzija 100 × 100 × 100 mm. Pet grupa uzoraka upotrijebljeno je za tlačnu čvrstoću, a jedna grupa za pripremu uzoraka nuklearne magnetske rezonancije, s tri paralelna uzorka u svakoj grupi. Za ispitivanje čvrstoće primijenjen je mikračunalni elektrohidraulički stroj za tlačno ispitivanje YAW-2000B, a ispitani su uzorci različitog vremena njegovanja (3, 7, 14, 21 i 28 dana). Odgovarajući prirast opterećenja iznosio je 0,50 MPa/s. Pri NMR ispitivanju primijenjena je nuklearna magnetska rezonancija (NMR) MacroMR12-150H-I. Prije ispitivanja uzorkovani su betoni starosti 28 dana pomoću pile s dijamantnom krunom. Svrđlo je bilo promjera Ø50 mm i visine H100 mm. Uzorci betona bili su 24 sata izloženi vakuumu. Karakteristike poroznosti i strukture pora mjerene su NMR-om. U SEM-u je primijenjen skenirajući elektronski mikroskop Zeiss s poljem emisije Ø300. Prije ispitivanja, uzorak od približno 15 × 15 × 5 mm izrezan je iz središta NMR ispitnog uzorka. Struktura ITZ-a ispitana je pomoću SEM-a.

### 3. Utjecaj različitih čimbenika na tlačnu čvrstoću

#### 3.1. Rezultati ispitivanja i analize tlačne čvrstoće

Provedeno je jednoosno tlačno ispitivanje betona od eolskog pijeska, a slika 2. prikazuje odnos između čvrstoće betona od eolskog pijeska i vremena njegovanja u različitim uvjetima. Slika pokazuje da razvoj čvrstoće betona slijedi sličan obrazac, postupno se povećavajući s vremenom njegovanja. Ova je stopa povećanja u početku spora, ali zatim postaje brža, usklađujući se s obrascem razvoja betona. Tijekom početne faze očvršćivanja betona, reakcija hidratacije cementa odvija se brzo, što rezultira brzim povećanjem čvrstoće. Međutim, u kasnijoj fazi njegovanja, reakcija hidratacije se stabilizirala, što je dovelo do sporijeg povećanja čvrstoće.

Kao što je prikazano na slici 2.a, s povećanjem vremena njegovanja, čvrstoća betona od eolskog pijeska pri stlačivanju postupno raste. Kada je vrijeme njegovanja 0-7 dana, brzina povećanja čvrstoće je brža, a stopa povećanja čvrstoće s povećanjem omjera vode i cementa iznosi 5,3, 5,11 i 4,98 MPa/dan. Kada je vrijeme njegovanja 21-28 dana, porast čvrstoće je najsporiji, a stope povećanja čvrstoće su 0,41, 0,24 i 0,14 MPa/dan. S povećanjem vodocementnog omjera postupno se smanjivala čvrstoća betona od eolskog pijeska pri jednakom vremenu njegovanja. Nakon završetka razdoblja njegovanja, čvrstoća betona dosegla je najveću vrijednost od 49,6 MPa kada je vodocementni omjer iznosio 0,42, što predstavlja povećanje od 7,5 % u usporedbi s omjerom vode i cementa od 0,45 te povećanje od 11,8 % u usporedbi s omjerom vode i cementa od 0,48.

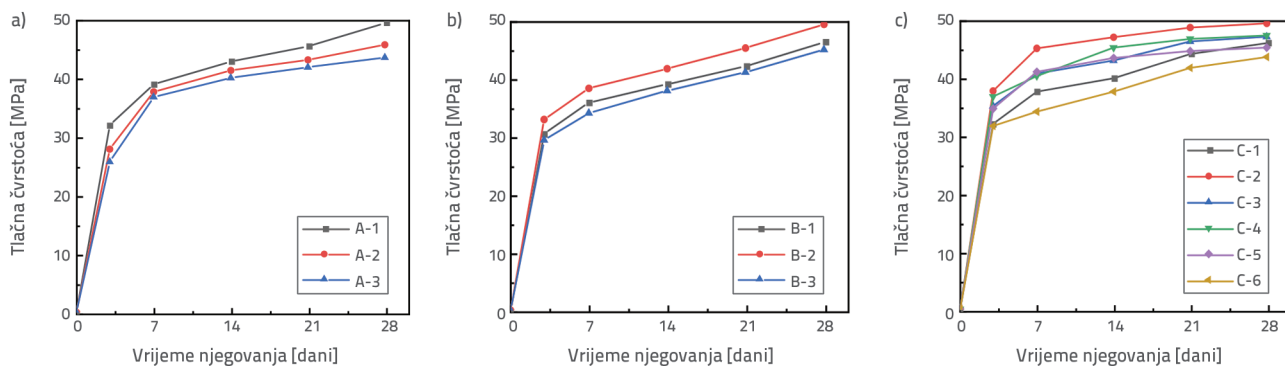
Slika 2.b prikazuje da s povećanjem vremena njegovanja porast tlačne čvrstoće pokazuje u početku usporeni rast, a zatim ubrzani. Štoviše, razlika u ranoj čvrstoći betona od eolskog pijeska jest mala pri različitim udjelima pijeska, a glavni utjecaj opaža se u kasnijem razvoju čvrstoće. Kada je vrijeme njegovanja 0-7 dana, prirast čvrstoće je brži, a povećanje čvrstoće s povećanjem udjela pijeska iznosi redom 4,85, 5,21 i 4,6 MPa/dan. Kada je vrijeme njegovanja 21-28 dana, prirast čvrstoće je najsporiji, a iznosi 0,36, 0,3 i 0,32 MPa/dan. S povećanjem udjela pijeska, čvrstoća betona se u početku povećavala, a zatim smanjivala

pri istom vremenu njegovanja. Nakon njegovanja do 28 dana, tlačna čvrstoća betona doseže najveću vrijednost od 49,6 MPa kada je udio pijeska 32 %, što predstavlja povećanje od 6,2 % u usporedbi s udjelom pijeska od 30 % te predstavlja povećanje od 8,8 % u usporedbi s udjelom pijeska od 35 %.

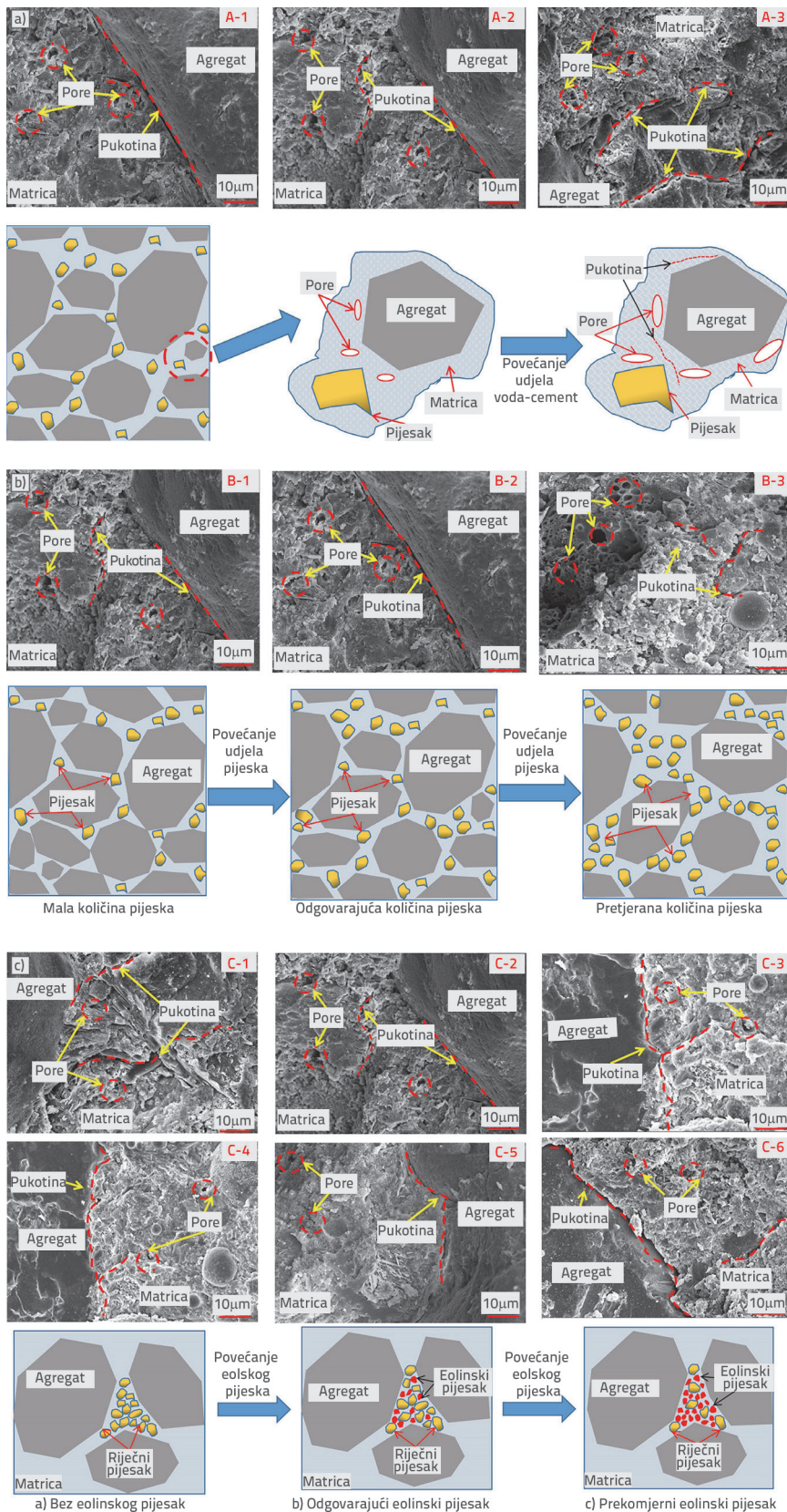
Na slici 2.c može se vidjeti da razvoj tlačne čvrstoće pokazuje obrazac najprije ubrzano, a zatim usporeno s povećanjem vremena njegovanja, a tlačna čvrstoća od 28 dana za svaku stopu zamjene zadovoljava konfiguracijske zahtjeve betona C40, što upućuje na izvedivost primjene eolskog pijeska kao zamjene za riječni pijesak. Kada je vrijeme njegovanja 0-7 dana, stopa povećanja čvrstoće je brža. Prirast čvrstoće s povećanjem stope zamjene je 5,4, 6,47, 5,84, 5,79, 5,88 i 4,9 MPa/dan. Kada je vrijeme njegovanja 21-28 dana, prirast čvrstoće je najsporiji te iznosi 0,27, 0,1, 0,11, 0,08, 0,08 i 0,27 MPa/dan. S povećanjem stope zamjene eolskog pijeska, čvrstoća betona se u početku povećavala, a zatim smanjivala pri istom vremenu njegovanja. Nakon završetka razdoblja njegovanja, čvrstoća betona pri stopama zamjene od 20 %, 40 % i 60 % bila je veća od one pri stopi zamjene od 0 %. Čvrstoća je dosegla najveću vrijednost od 49,6 MPa kada je stopa zamjene bila 20 %, što predstavlja povećanje od 7,36 % u usporedbi sa stopom zamjene od 0 %, što predstavlja povećanje od 4,86 % u usporedbi sa stopom zamjene od 40 %, što predstavlja povećanje od 4,42 % u usporedbi sa stopom zamjene od 60 %, što predstavlja povećanje od 9,25 % u usporedbi sa stopom zamjene od 80 %, te predstavlja povećanje od 13,24 % u usporedbi sa stopom zamjene od 100 %.

#### 3.2. Utjecaj strukture sučeljka na tlačnu čvrstoću

Analiziran je utjecaj različitih čimbenika na mikroskopsku strukturu betona od eolskog pijeska te mikroskopsku morfologiju betona od eolskog pijeska čije je vrijeme njegovanja 28 dana. Slika 3. prikazuje mikromorfologiju sučeljka i mehanizam djelovanja betona od eolskog pijeska pod različitim čimbenicima. Kao što je prikazano na slici 3.a, s povećanjem omjera vode i cementa, male pore postupno su se razvile u veće, što je rezultiralo vidljivim pukotinama i porama unutar prijelazne zone kontaktnog područja. Općenito gledajući, A-1 je imao relativno gustu strukturu s malim izoliranim porama tijekom unutarnjeg



Slika 2. Odnos između čvrstoće i vremena njegovanja betona od eolskog pijeska: a) Vodocementni omjer; b) Udio pijeska; c) Stopa zamjene eolskog pijeska



Slika 3. Mikrostruktura i mehanizam betona od eolskog pijeska: a) Vodocementni omjer; b) Udio pijeska; c) Stopa zamjene eolskog pijeska

zatvaranja. Otkriven je mali broj mikropukotina, ali slaba područja nisu bila vidljiva. Nasuprot tome, A-2 pokazuje slabo područje s porama različite veličine i malim brojem mikropukotina uzrokovanih hidratacijskim skupljanjem. A-3 ima relativno rastresitu strukturu s vidljivim porama i velikim raspoređenim pukotinama vidljivima iznutra. U kombinaciji s analizom mehanizma, na fluidnost betona uglavnom je utjecala konzistencija cementne kaše kada je vodocementni omjer varirao. S povećanjem vodocementnog omjera, konzistencija cementne kaše se smanjivala, a fluidnost betonske smjese se povećavala. To rezultira stvaranjem porozne strukture sučeljka, što smanjuje vezu između cementne matrice i površine agregata. Ta oslabljena struktura u konačnici dovodi do opadanja mehaničkih svojstava betona tijekom kasnijih faza hidratacije.

Iz slike 3.b vidljivo je da se s povećanjem udjela pijeska zbijenost konstrukcijskog okvira najprije povećava, a zatim smanjuje, te da ima pore i pukotine. Zbijenost B-1 općenito je bila niska, s porama i isprepletenim mikropukotinama. Za usporedbu, B-2 ima relativno veću kompaktnost sa zatvorenim porama i manjim brojem mikropukotina. Kao posljedica toga, pokazuje najveće makroskopske performanse. B-3 je imao velike vidljive pore i relativno poroznu strukturu, a matrica je bila relativno "svježja". U kombinaciji s analizom mehanizma, s povećanjem udjela pijeska, povećavala se i specifična površina agregata, a debljina cementne kaše primijenjene za oblaganje agregata se smanjivala, što je rezultiralo smanjenjem fluidnosti mješavine. Osim toga, smanjenje broja krupnih agregata dodatno utječe na kompaktnost konstrukcijskog okvira. To je oslabilo oslonac kostura i smanjilo čvrstoću betona. Kada je udio pijeska bio mali, količina krupnog agregata se povećala, a volumen pora između agregata također se povećao, što je rezultiralo smanjenjem efektivne površine presjeka betona te je čvrstoća betona smanjena.

Kao što je prikazano na slici 3.c, s povećanjem stope zamjene eolskog

pijeska, kompaktnost strukture prvo se povećala, a zatim olabavila, a unutarnje pore postupno su se razvile u male pore. Kompaktnost prijelazne zone kontaktnog područja u C-1 bila je slaba, s vidljivim pukotinama i porama. Nasuprot tome, C-2 ima povezaniju prijelaznu zonu sučeljka sa znatno manje pukotina i pora. C-6 je pokazao vidljive dugačke pukotine i rastresite naslage cementa u sučeljku, što je rezultiralo manjom zbijenošću u usporedbi s drugim grupama betona. U kombinaciji s analizom mehanizma, dodavanje eolskog pijeska pomoglo je u ispunjavanju pora između krupnog agregata i riječnog pijeska, pružajući učinak punjenja koji podupire strukturni okvir i rafinira pore. To slabi 'granični učinak' i poboljšava kompaktnost između agregata, što rezultira poboljšanom raspodjelom naprezanja cementnog kamena pod opterećenjem i poboljšanim makroskopskim performansama. Međutim, okrugla površina eolskog pijeska smanjuje trenje između agregata, što rezultira smanjenom potrebom za cementnim mortom za ovladavanje ovog trenja i povećava podmazivanje morta i čvrstoću betona. Međutim, zbog male veličine čestica eolskog pijeska, iako eolski pijesak može smanjiti potrošnju cementne kaše ispunjene porama, prekomjerno dodavanje može uzrokovati nedovoljnu količinu cementnog morta kojim bi se obložili agregati, povećavajući trenje između agregata i u konačnici smanjujući čvrstoću betona.

### 3.3. Utjecaj strukture pora na tlačnu čvrstoću

Beton je višefazni i višeslojni kompozitni materijal [22], a njegove makroperformanse određene su njegovom mikrostrukturom. Složenost i nesigurnost mikrostrukture određuje varijabilnost i nepravilnost makrofizikalnih karakteristika materijala. Nuklearna magnetska rezonancija (NMR) je tehnologija neraznog ispitivanja koja ima jedinstvene prednosti u karakterizaciji mikroskopskih pora. Prema principu nuklearne magnetske rezonancije [23, 24], vrijeme relaksacije proporcionalno je veličini pora i na njega utječe specifična površina pora u materijalu. Pod pretpostavkom da su pore idealne sfere,  $T_2$  karta se može pretvoriti u raspodjelu veličine pora materijala.

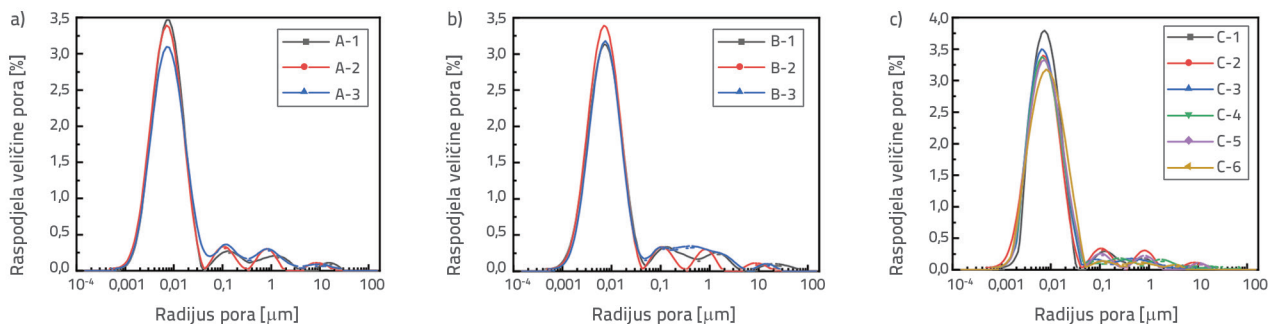
Slika 4. prikazuje krivulje raspodjele veličine pora betona od eolskog pijeska s različitim faktorima. Krivulje pokazuju postotak svake veličine pora u ukupnom udjelu svih pora. Što je veći postotak, to je veći broj pora. Početna točka krivulje predstavlja

najmanju veličinu pora prisutnu u betonu, dok najveća vršna vrijednost označava veličinu pora s najvećim udjelom u uzorku, što je također poznato kao najvjerojatnija veličina pora. Vidljivo je da je raspodjela veličine pora betona primarno koncentrirana između 0,001–0,1  $\mu\text{m}$  i pokazuje strukturu od 'više vrhova' sastavljenu od 3 do 4 vrha. Prvi vrh, koji je činio više od 85 % distribucije, bio je znatno veći od ostalih vrhova.

Na slici 4.a vidljivo je da se s povećanjem vodocementnog omjera početna vršna pozicija u početku pomiče udesno, a zatim ulijevo, što upućuje na početno povećanje, a zatim na smanjenje minimalne veličine pora materijala. Slično tome, krajnji vršni položaj pomiče se najprije ulijevo, a zatim udesno, što pokazuje da se najveća veličina najprije smanjuje, a zatim povećava. Osim toga, amplituda prvog vrha postupno se smanjuje, što upućuje na smanjenje udjela najvjerojatnije veličine pora u materijalu. Nadalje, veličina prvog vrha u krivulji raspodjele veličine pora iznosila je 92 % kada je vodocementni omjer bio 0,42, a drugi i treći vrh bili su relativno mali. Kad je vodocementni omjer bio 0,45 i 0,48, veličina prvog vrha iznosila je 87 %, a drugi i treći vrh bili su relativno veliki, s fenomenom superpozicijskog vrha. To upozorava na veći udio malih pora i manji udio velikih pora kada je omjer vode i veziva 0,42.

Kao što je prikazano na slici 4.b, s povećanjem udjela pijeska, amplituda prvog vrha najprije se povećala, a zatim smanjila. Kada je udio pijeska bio 32 %, amplituda prvog vrha bila je najveća. Udio veličine pora koji odgovara drugom, trećem i četvrtom vrhu bio je manji, a veličina pora koja odgovara kraju vrha bila je manja, što pokazuje da je maksimalna veličina pora prisutna u materijalu bila u tom slučaju manja. Kada je udio pijeska bio 30 %, veličine pora koje odgovaraju drugom i trećem vrhu bile su veće, a veličina pora koja je odgovarala kraju vrha bila je najveća. Kada je udio pijeska bio 35 %, podvrhovi su se počeli preklapati, što upućuje na to da materijal ima više velikih pora.

Kao što je prikazano na slici 4.c, s povećanjem stope zamjene eolskog pijeska, početna vršna pozicija pomaknula se ulijevo. To je prije svega zbog dodavanja eolskog pijeska koji povećava gustoću cementnog kamena u betonu, što rezultira postupnim smanjenjem minimalne veličine pora. Prvi vrh postupno je rastao, dok je njegov drugi vrh opadao, što pokazuje da se udio malih pora povećao, a udio velikih pora smanjio. Kada je stopa zamjene bila 0 %, prvi vrh činio je 93 % ukupnih vrhova, što upućuje na jasnu strukturu od četiri vrha. Kada je stopa zamjene



Slika 4. Krivulje raspodjele veličine pora betona od eolskog pijeska: a) Vodocementni omjer; b) Udio pijeska; c) Stopa zamjene eolskog pijeska

Tablica 5. Parametri poroznih karakteristika betona od eolskog pijeska

Uzorc	Ukupna poroznost [%]	Minimalna veličina pora [ $\mu\text{m}$ ]	Maksimalna veličina pora [ $\mu\text{m}$ ]	Najvjerojatnija veličina pora [ $\mu\text{m}$ ]	Prosječna veličina pora [ $\mu\text{m}$ ]
A-1	4,72	0,00017	26,44371	0,00732	0,09222
A-2	5,48	0,00098	8,12381	0,00732	0,07173
A-3	5,93	0,00017	42,99101	0,00732	0,12370
B-1	5,39	0,00018	69,89289	0,00683	0,23495
B-2	4,72	0,00017	26,44371	0,00732	0,09222
B-3	5,68	0,00018	28,34479	0,00785	0,13340
C-1	5,41	0,00851	9,33386	0,00785	0,02577
C-2	4,72	0,00017	26,44371	0,00732	0,09222
C-3	5,18	0,00060	24,67014	0,00683	0,035805
C-4	5,08	0,00069	74,91758	0,00683	0,070981
C-5	5,65	0,00060	18,68825	0,00785	0,058362
C-6	6,08	0,00056	5,35618	0,00841	0,019804

bila 100 %, udio prvog vrha porastao je na 96 %, dok su se drugi i treći vrh stopili u niže vrhove. To pokazuje da je dodavanje eolskog pijeska korisno za pretvaranje velikih pora u male pore i smanjenje ukupnog broja pora u betonu.

Karakteristike pora betona određene su parametrima kao što su ukupna poroznost, minimalna veličina pora, maksimalna veličina pora, najvjerojatnija veličina pora i prosječna veličina pora, kao što je određeno krivuljom raspodjele veličine pora dobivenom nuklearnom magnetskom rezonancijom. U tablici 5 navedeni su parametri primijenjeni za proučavanje utjecaja različitih čimbenika na karakteristike pora betona od eolskog pijeska.

Iz tablice 5. vidljivo je da s povećanjem vodocementnog omjera poroznost postupno raste, minimalna veličina pora se u početku povećava, a potom smanjuje, a maksimalna i prosječna veličina pora u početku se smanjuju, a zatim povećavaju. Analiza je pokazala da se s povećanjem omjera vode i cementa povećava fluidnost betonske mješavine. Međutim, voda potrebna za hidrataciju cementa čini približno 25 % ukupne količine cementa. Stoga je bila potrebna dodatna količina vode za postizanje željene razine fluidnosti. Pri očvršćivanju betona, voda unutar betona stvara mjehuriće, što dovodi do povećanja lokalne poroznosti i stvaranja slabije strukture. To može smanjiti efektivni dio otpornosti betona na opterećenje, što u konačnici utječe na njegova mehanička svojstva.

Povećanjem udjela pijeska poroznost se najprije smanjivala, a potom povećavala, minimalna veličina pora ostala je nepromijenjena, maksimalna i prosječna veličina pora najprije su se smanjivale, a zatim povećavale, a najvjerojatnija veličina pora se povećavala. Analiza je pokazala da kada je udio pijeska mali, povećava se broj krupnih agregata i volumen pora između agregata, što smanjuje efektivnu površinu poprečnog presjeka i čvrstoću betona. Kada je udio pijeska odgovarajući, unutarnji agregat materijala pokazuje jednoliku raspodjelu veličine čestica i dobru gradaciju čestica, što rezultira gušćim strukturnim

skeletom, smanjenom poroznošću i povećanom čvrstoćom betona. Kada je udio pijeska bio visok, specifična površina agregata se povećala, uzrokujući da cementna kaša koja se primjenjuje za oblaganje agregata postane tanja i rezultira smanjenjem fluidnosti mješavine. Također, smanjenjem broja krupnih agregata povećava se poroznost, što slabi strukturu i u konačnici smanjuje čvrstoću betona.

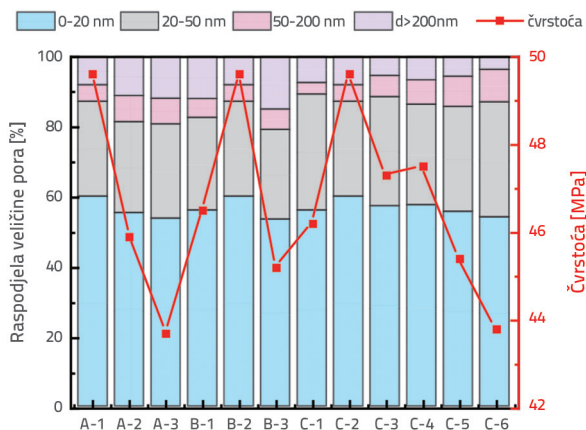
S povećanjem stope zamjene eolskog pijeska, poroznost se u početku smanjivala, a zatim povećavala, a minimalna veličina pora se u početku smanjivala, a zatim povećavala. Trendovi maksimalne i prosječne veličine pora najprije su se povećavali, a zatim smanjivali, a najvjerojatnije veličine pora bile su slične veličine. Analiza je pokazala da mala veličina čestica eolskog pijeska omogućuje ispunjavanje pora između krupnih agregata i riječnog pijeska, čime se poboljšava kompaktnost agregata. Dodavanje odgovarajuće količine eolskog pijeska poboljšava gradaciju agregata betona i čini da veličina čestica eolskog pijeska, riječnog pijeska i kamena približno zadovoljava teoriju kontinuirane gradacije, čime se ostvaruje međusobno punjenje pora između različitih veličina čestica, rafinirajući pore, smanjujući volumen pora između krupnih agregata i poboljšavajući makroperformanse betona. Prekomjerna količina eolskog pijeska može pogoršati 'granični' učinak, dovodeći do stvaranja više susjednih labavih cementnih akumulacijskih tijela i lokalnih područja s visokim omjerom vode i cementa u betonu. To zauzvrat povećava poroznost i smanjuje kompaktnost strukture, što u konačnici smanjuje mehanička svojstva betona.

## 4. Mikrostruktura i makroskopska mehanička svojstva betona od eolskog pijeska

### 4.1. Veličina pora

Kao porozni materijal, na mehanička svojstva betona utječe veličina pora, odnosno struktura pora, a utjecaj različitih veličina

pora na mehanička svojstva betona varira. Prema akademiku Wuu [25] i njegovom standardu klasifikacije veličine pora u betonu, struktura pora može se podijeliti na neštetne pore ( $d \leq 20$  nm), manje štetne pore ( $20 < d \leq 50$  nm), štetne pore ( $50 < d \leq 200$  nm), štetnije pore ( $d > 200$  nm). Struktura pora na slici 4 je klasificirana i uzeta u obzir te je razmatran njezin utjecaj na tlačnu čvrstoću. Rezultati su prikazani na slici 5.



Slika 5. Odnos između udjela veličine pora i čvrstoće

Kao što je prikazano na slici 5., udio neštetnih i manje štetnih pora u klasifikaciji veličine pora betona od eolskog pijeska pod različitim čimbenicima bio je veći. S postupnim porastom vodocementnog omjera, čvrstoća se postupno smanjuje, što je za 7,5 % i 11,8 % manje od one od 0,42. Udio neštetnih pora postupno se smanjivao i bio je 7,7 % i 10,5 % manji od onog od 0,42. Udio manje štetnih pora najprije se smanjio, a zatim povećao, te je bio 4,5 % odnosno 0,6 % manji od 0,42. Poroznost štetnih i štetnijih pora postupno se povećavala. Broj štetnih pora bio je 59,9 % odnosno 56,9 % veći od 0,42, a broj pora s višestrukom štetnošću bio je 38,5 % odnosno 47,4 % veći od 0,42. Povećanje vodocementnog omjera rezultira povećanjem udjela slobodne vode i unutarnjih pora unutar materijala, što u konačnici smanjuje čvrstoću.

S postupnim povećanjem udjela pijeska, čvrstoća se prvo povećavala, a zatim smanjivala, povećavajući se za 6,6 % i smanjujući za 2,8 % u usporedbi s udjelom pijeska od 30 %. Udio neštetnih pora prvo se povećao, a zatim smanjio, povećavši se za 7 %, odnosno smanjivši za 4,7 %, u usporedbi s udjelom pijeska od 30 %. Udio manje štetnih pora prvo se povećao, a zatim smanjio, povećavši se za 2,6 %, odnosno smanjivši za 2,9 %, u usporedbi s udjelom pijeska od 30 %. Udio štetnijih pora najprije se smanjio, a zatim povećao, smanjivši se za 33 %, odnosno povećavši za 24,7 %, u usporedbi s udjelom pijeska od 30 %. Razlika u udjelu pijeska uglavnom utječe na enkapsulaciju i fluidnost betona, što utječe na kompaktnost kostura konstrukcije i mijenja poroznost materijala.

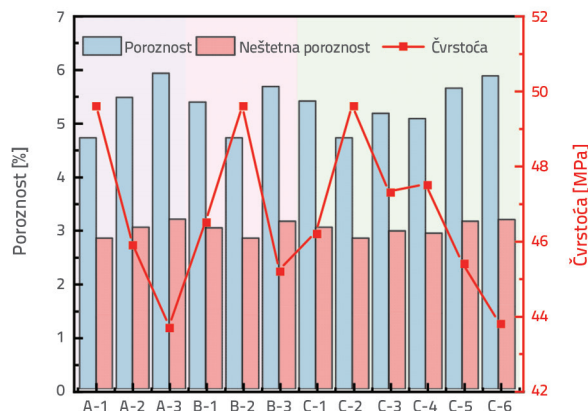
S povećanjem stope zamjene eolskog pijeska, čvrstoća se prvo povećavala, a zatim smanjivala, povećavajući se za 7,4 %, 2,4 %

i 2,8 %, odnosno smanjujući za 1,7 % tj. 5,2 %, u usporedbi sa stopom zamjene od 0 %. Udio neštetnih pora prvo se povećao, a zatim smanjio, a raspon varijacije bio je između 54,15 % i 60,09 %. Udio manje štetnih pora najprije se smanjio, a zatim povećao te je iznosio 27,22 % do 33,21 %. Udio štetnih pora postupno se povećavao s 3,3 % na 9,28 %. Udio štetnijih pora opadao je u valovitoj krivulji, s udjelom od 3,6 % do 8,03 %, što pokazuje slabu pravilnost. Razlog je taj što su čestice eolskog pijeska okrugle i slabo graduirane, a veličina čestica je relativno koncentrirana, što može ispuniti pore između krupnog agregata i riječnog pijeska i povećati kompaktnost između agregata. Stoga, kada se stopa zamjene eolskog pijeska promijenila, polumjer pora postao je koncentriraniji, neštetan i manje štetan.

Rezultati na slici 5. pokazuju da udio bezopasnih pora slijedi obrazac koji je u skladu s razvojem čvrstoće betona, bez obzira na druge čimbenike. Konkretno, povećanje udjela neštetnih pora dovelo je do povećanja čvrstoće, dok je smanjenje udjela neštetnih pora rezultiralo smanjenjem čvrstoće. Stoga se može zaključiti da udio neštetnih pora ima značajnu ulogu u razvoju čvrstoće betona.

## 4.2. Poroznost

Poroznost je ključni pokazatelj strukture pora poroznih materijala. Poroznost je usko povezana s gustoćom i čvrstoćom materijala. Za daljnje istraživanje odnosa između makro- i mikrokarakteristika betona od eolskog pijeska s različitim čimbenicima, slika 6. prikazuje zakon varijacije čvrstoće i poroznosti betona od eolskog pijeska s različitim čimbenicima.



Slika 6. Odnos između poroznosti i čvrstoće

Iz slike 6. je vidljivo da povećanjem omjera vode i cementa čvrstoća postupno opada, što je za 7,5 % odnosno 11,8 % niže od one omjera vode i cementa od 0,42. Poroznost se postupno povećavala i bila je 16,1 % odnosno 25,6 % viša od one omjera vode i cementa od 0,42. Neštetna poroznost se postupno povećava, što je za 7,1 % i 12,5 % više od one omjera vode i cementa od 0,42. Poroznost je bila najmanja, a čvrstoća najveća kada je omjer vode i cementa bio 0,42.



S povećanjem udjela pijeska, čvrstoća se u početku povećala, a zatim smanjila, povećavši se za 6,6 %, odnosno smanjivši za 2,8 % u usporedbi s udjelom pijeska od 30 %. Poroznost se prvo smanjila, a zatim povećala, smanjivši se za 12,5 %, odnosno povećavši za 5,2 %, u usporedbi s udjelom pijeska od 30 %. Neštetna poroznost prvo se smanjila, a zatim povećala, smanjivši se za 6,2 %, odnosno povećavši za 4,2 %, u usporedbi s udjelom pijeska od 30 %. Poroznost je bila minimalna, a čvrstoća maksimalna kada je udio pijeska bio 32 %.

S povećanjem stope zamjene eolskog pijeska, čvrstoća se najprije povećavala, a zatim smanjivala. U usporedbi sa stopom zamjene od 0 %, čvrstoća je porasla za 7,4 %, 2,4 % i 2,8 %, a smanjena je za 1,7 % odnosno 5,2 %. U usporedbi sa stopom zamjene od 0 %, poroznost se najprije smanjila, a zatim povećala za 12,7 %, 4,3 % i 6,1 % te se potom ponovno povećala za 4,4 % odnosno 8,7 %. U usporedbi sa stopom zamjene od 0 %, neštetna poroznost se najprije smanjila, a zatim povećala za 6,6 %, 2,1 % i 3,5 % te se ponovno povećala za 3,7 % odnosno 4,8 %. Poroznost je bila na minimumu, a čvrstoća na maksimumu kada je stopa zamjene bila 20 %.

Na temelju podataka prikazanih na slici 6. može se primijetiti da postoji obrnuti odnos između poroznosti i razvoja čvrstoće betona. Točnije, s povećanjem čvrstoće smanjivala se poroznost. To sugerira da poroznost ima značajnu ulogu u određivanju čvrstoće betona.

## 5. Model čvrstoće strukture pora temeljen na entropijskoj analizi sive korelacije

### 5.1. Entropijom ponderirana siva relacijska analiza

Metoda entropijske analize sive korelacije važna je tehnika za sive modele. Ona pomaže u sprječavanju pogrešaka uzrokovanih lokalnom kontrolom cijelog sustava pri određivanju stupnja sive korelacije. Ta metoda može učinkovito razlikovati utjecaje primarnih i sekundarnih čimbenika na cijeli sustav [26].

Kako bismo istražili utjecaj karakterističnih parametara strukture pora betona od eolskog pijeska na njegovu tlačnu čvrstoću pod različitim čimbenicima, proveli smo entropijom ponderiranu sivu relacijsku analizu na temelju podataka ispitivanja strukture

pora i tlačne čvrstoće betona izmjerene NMR-om. Tlačna čvrstoća uzeta je kao referentni stupac, a poroznost, minimalna veličina pora, maksimalna veličina pora, najvjerojatnija veličina pora, prosječna veličina pora i udio svakog intervala polumjera pora upotrijebljeni su kao sekvenca usporedbe za dobivanje stupnja korelacije sive entropije između tlačne čvrstoće betona od eolskog pijeska s različitim faktorima i udjela parametara strukture pora i intervala polumjera pora. Tablica 6 prikazuje stupanj korelacije sive entropije u betonu od eolskog pijeska s različitim čimbenicima.

Na tlačnu čvrstoću betona od eolskog pijeska s različitim čimbenicima utječu različiti parametri strukture pora i udio intervala polumjera pora. Na temelju stupnja korelacije sive entropije, najutjecajniji parametar strukture pora je najvjerojatnija veličina pora, zatim poroznost, prosječna veličina pora, maksimalna veličina pora i minimalna veličina pora, dok su najutjecajniji omjer radijusa pora neštetnih pora, a zatim manje štetnih pora, štetnih pora i štetnijih pora.

Istraživanjem je utvrđeno da je stupanj korelacije sive entropije između čvrstoće betona od eolskog pijeska pri stlačivanju s različitim čimbenicima najveći, s omjerom najvjerojatnije veličine pora i neštetne veličine pora. To sugerira da udio neštetnih pora i najvjerojatnija veličina pora imaju najveći utjecaj na čvrstoću betona pri stlačivanju. Budući da se najvjerojatnija veličina pora povećava, povećava se i udio polumjera pora u neštetnim porama, što rezultira betonom veće zbijenosti i većom tlačnom čvrstoćom.

### 5.2. Uspostava modela čvrstoće i strukture pora

Regresijska analiza je statistička metoda koja se primjenjuje za ispitivanje linearnog ili nelinearnog odnosa između zavisne varijable i jedne ili više nezavisnih varijabli. Regresijska analiza i predviđanje metode su koje se primjenjuju za izračunavanje uzročno-posljedičnih odnosa i čimbenika utjecaja između predviđenih objekata. Ta metoda uzima u obzir sve čimbenike koji utječu na predviđene objekte, što rezultira manjim pogreškama. Osim toga, predviđene vrijednosti mogu se prilagoditi na temelju odgovarajućih faktora promjene kada sustav prolazi kroz značajne promjene, što ga čini prikladnim za dugoročna predviđanja.

Tablica 6. Stupanj korelacije sive entropije betona od eolskog pijeska

Parametar	Vodocementni omjer	Udio pijeska	Stopa zamjene	Različiti čimbenici
Minimalna veličina pora	0,975	0,982	0,973	0,971
Maksimalna veličina pora	0,948	0,965	0,986	0,979
Najvjerojatnija veličina pora	0,990	0,982	0,991	0,992
Prosječna veličina pora	0,986	0,959	0,987	0,982
Poroznost	0,987	0,980	0,989	0,989
Neštetna pora	0,989	0,983	0,991	0,993
Manje štetna pora	0,987	0,979	0,989	0,987
Štetna pora	0,986	0,978	0,987	0,979
Štetnija pora	0,981	0,965	0,988	0,977

Tablica 7. Bezdimenzijsko određivanje prosjeka betona od eolskog pijeska s različitim čimbenicima

Uzorci	Čvrstoća pri stlačivanju [MPa]	Najvjerojatnija veličina pora [ $\mu\text{m}$ ]	Udio neštetnih pora [%]	Neštetna poroznost [%]
A-1	1,033	1,045	1,026	0,982
A-2	0,955	0,975	0,978	1,047
A-3	0,911	0,974	0,949	1,113
B-1	0,951	0,910	0,991	1,094
B-2	1,013	1,045	1,003	0,969
B-3	0,924	1,045	0,944	1,096
C-1	1,026	1,045	1,026	0,969
C-2	1,102	0,975	1,060	0,874
C-3	1,051	0,910	1,048	0,949
C-4	1,055	0,910	1,018	0,904
C-5	1,008	1,045	1,001	0,988
C-6	0,973	1,120	0,955	1,015

Sivom je teorijom analizirana korelacija između različitih utjecajnih čimbenika, tlačne čvrstoće i stupnja utjecaja različitih čimbenika na tlačnu čvrstoću. Nadalje, siva teorija kombinirana je s regresijskim modelom u svrhu konstruiranja modela predviđanja čvrstoće pri stlačivanju koji se temelji na regresiji sive teorije s obrađenim bezdimenzijskim podacima. U radu su se u početku analizirali i obrađivali podaci o različitim čimbenicima primjenom srednje bezdimenzijske metode, kako je prikazano u tablici 7. Na temelju rangiranja stupnja korelacije uspostavljen je regresijski model strukture pora prema svojoj teoriji primjenom čvrstoće betona pri stlačivanju, najvjerojatnije veličine pora, udjela neštetnih pora i neštetne poroznosti.

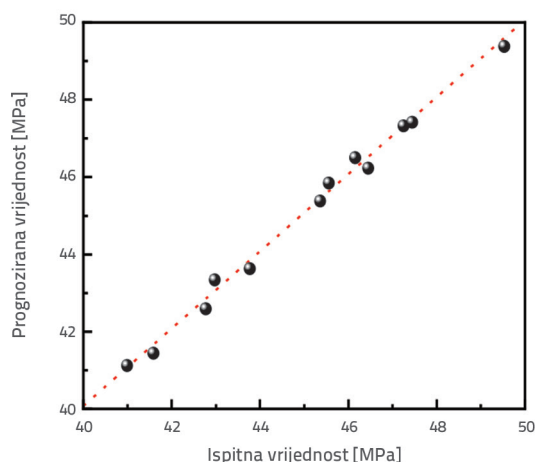
Pod pretpostavkom da je odnos strukture pora i čvrstoće:

$$f_c = \alpha + \beta_1 d_p - \beta_2 p_h + \beta_3 n_h \quad (1)$$

U izrazu (1),  $f_c$  je čvrstoća pri stlačivanju,  $d_p$  je najvjerojatnija veličina pora betona,  $p_h$  je udio neštetnih pora betona,  $n_h$  je neštetna poroznost betona,  $\alpha$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  su regresijski parametri. Izraženi parametri bezdimenzijskog odnosa strukture pora i čvrstoće dobiveni su regresijskom analizom. Ti se parametri uvode u izrazu (1) kako bi se dobio izraz (2).

$$f_c = 1,399 + 0,237d_p - 0,724p_h + 0,30n_h \quad (2)$$

Podaci u tablici 5. primijenjeni su u izrazu (2) za dobivanje bezdimenzijske čvrstoće pri stlačivanju. Izračunane čvrstoće pri stlačivanju bile su u skladu s ispitivanim vrijednostima uz korelacijski koeficijent  $R^2 = 0,996$ . Prosječna relativna pogreška između predviđenih i eksperimentalnih vrijednosti modela strukture pora i čvrstoće betona od eolskog pijeska i ispitne vrijednosti iznosila je 0,86 %, što upućuje na visoku točnost modela. Tlačna čvrstoća može se predvidjeti pomoću parametara strukture pora betona i intervala polumjera pora. Rezultati su prikazani na slici 7.



Slika 7. Usporedba predviđene vrijednosti modela i ispitne vrijednosti

## 6. Zaključak

Ovaj rad prikazuje rezultate mehaničkih svojstava, NMR i SEM ispitivanja provedenih na betonu od eolskog pijeska u različitim uvjetima. O karakteristikama strukture pora betona od eolskog pijeska raspravlja se iz makro- i mikroperspektive, uzimajući u obzir učinke različitih čimbenika. Odnos između mehaničkih svojstava i strukture pora analiziran je pomoću sive relacijske analize. Zaključci su sljedeći:

- Tlačna čvrstoća betona smanjivala se s povećanjem vodocementnog omjera i najprije se povećavala, a zatim smanjivala s povećanjem udjela pijeska i stope zamjene eolskog pijeska.
- Krivulja raspodjele veličine pora betona od eolskog pijeska pokazala je više vrhova, a raspodjela veličine pora pala je unutar 0,001–0,1  $\mu\text{m}$  raspona. Glavna vršna amplituda smanjivala se s povećanjem omjera vode i cementa i stope zamjene eolskog pijeska te se najprije povećavala, a zatim

smanjivala s povećanjem udjela pijeska.

- Tlačna čvrstoća betona od eolskog pijeska imala je najveću korelaciju s najvjerojatnijim veličinama pora i udjelom neštetnih pora, s korelacijama sive entropije od 0,992 odnosno 0,993.
- Prema modelu čvrstoće i strukture pora, koji uzima u obzir najvjerojatnije veličine pora, udio štetnih pora i štetnu poroznost, čvrstoća betona eolskog pijeska može se točno predvidjeti, s prosječnom relativnom pogreškom od 0,86 %.

## LITERATURA

- [1] Bendixen, M., Best, J., Hackney, C.R., et al: Time is running out for sand, *Nature*, 571 (2019), pp. 29-31.
- [2] Xue, H.J., Shen X.D., Liu Q., et al.: Analysis of the damage to the aeolian sand concrete surfaces caused by wind-sand erosion *Journal of Advanced Concrete Technology*, 15 (2017), pp. 724-737.
- [3] Benabed, B., Azzouz, L., Kadri, E.H., et al: Effect of fine aggregate replacement with desert dune sand on fresh properties and strength of self-compacting mortars, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 28 (2014), pp.2182-2195.
- [4] Padmakumar, G., Srinivas, K., Uday, K.V., et al.: Characterisation of aeolian sands from Indian desert, *Engineering Geology*, (2012), pp. 38-49.
- [5] Jiang, J.Y., Feng, T.T., Chu, H.Y., et al.: Quasi-static and dynamic mechanical properties of eco-friendly ultra-high-performance concrete containing aeolian sand, *Cement and Concrete Composites* (2019). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.01.011>.
- [6] Luo, F.J., He, L.F., Pan, Z., et al.: Effect of very fine particles on workability and strength of concrete made with dune sand, *Construction and Building Materials*, 47 (2013), pp. 131-137.
- [7] Li, Y.G., Zhang, H.M., Liu, G.X. et al.: Multi-scale study on mechanical properties and strength prediction of aeolian sand concrete, *Construction and Building Materials*, 247 (2020), p. 118538.
- [8] Li, Y.G., Zhang, H.M., Liu, G.X. et al.: Time-varying compressive strength model of aeolian sand concrete considering the harmful pore ratio variation and heterogeneous nucleation effect, *Advances in Civil Engineering*, (2019). <https://doi.org/10.1155/2019/5485630>.
- [9] Dong, W., Xiao, Y., Su, Ying, et al.: Study on axial compression performance of aeolian sand concrete, *Advanced Engineering Sciences*, 52 (2020), pp. 86-92.
- [10] Al-Harthy, A., Halim, M.A., Taha, R.A., et al., Properties of concrete made with fine dune sand, *Construction and Building Materials*, 21 (2007), pp. 1803-1808.
- [11] Guettala, S., Mezghiche, B.: Compressive strength and hydration with age of cement pastes containing dune sand powder. *Construction and Building Materials*, 25 (2011), pp. 1263-1269.
- [12] Seif, E.S.: Assessing the engineering properties of concrete made with fine dune sands: An experimental study. *Arabian Journal of Geosciences*, 6 (2013), pp. 857-863.
- [13] Lian, C.Q., Zhuge, Y., Beecham, S.: The relationship between porosity and strength for porous concrete, *Construction and Building Materials*, 25 (2011), pp. 4294-4298.
- [14] Gao, H., Zhang, X., Zhang, Y.: Effect of the entrained air void on strength and interfacial transition zone of air-entrained mortar, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 30 (2015), pp. 1020-1028.
- [15] Bu, J., Tian, Z.: Relationship between pore structure and compressive strength of concrete: experiments and statistical modelling, *Sādhanā*, 41 (2016), pp. 337-344.
- [16] Dong, R.X., Shen, X.D., Liu, Q., et al.: Influence mechanism of pore characteristics of aeolian sand concrete on its strength, *Bulletin of Chinese Ceramic Society*, 38 (2019), pp. 1901-1907.
- [17] Bai, J.W., Zhao, Y.R., Shi, J.G. et al.: Cross-scale study on the mechanical properties and frost resistance durability of aeolian sand concrete, *KSCSE Journal of Civil Engineering*, 25 (2021), pp. 4386-4402.
- [18] Liu, Q., Shen, X. D., Wei, L. S., et al.: Grey model research based on the pore structure fractal and strength of NMR aeolian sand lightweight aggregate concrete, *JOM*, 72 (2020), pp. 536-543.
- [19] Liu, Q., Shen, X.D., Dong, R.X., et al.: Grey entropy analysis on effect of pore structure on compressive strength of aeolian sand concrete, *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 35 (2019), pp. 108-114.
- [20] JGJ 55. 2011. Specifications for the mix proportion design of ordinary concrete. JGJ 55, China Architecture and Building Press, Beijing.
- [21] GB/T 50081. 2019. Standard test method for the mechanical properties of ordinary concrete. GB/T 50081; China Architecture and Building Press, Beijing, China.
- [22] Xue, H.J., Shen, X.D., Zou, C.X., et al.: Freeze-thaw pore evolution of aeolian sand concrete based on nuclear magnetic resonance *Journal of Building Materials*, 22 (2019), pp. 199-205
- [23] Cui, S.A., Liu, P., Cui, E.Q., et al: Experimental study on mechanical property and pore structure of concrete for shotcrete use in a hot-dry environment of high geothermal tunnels, *Construction and Building Materials*, 173 (2018), pp. 124-135.
- [24] Ji, Y.L., Sun, Z.P., Yang, X. et al.: Assessment and mechanism study of bleeding process in cement paste by <sup>1</sup>H low-field NMR, *Construction and Building Materials*, 100 (2015), pp. 255-261.
- [25] Wu, Z.W.: Discussion on the recent development direction of concrete science and technology *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 03 (1979), pp. 262-27
- [26] Zhang, M., Yao, X.H., Guan, J.F., et al: Study of concrete strength and pore structure model based on grey relation entropy, *Materials*, 14 (2021). <https://doi.org/10.3390/ma14020432>.

## Zahvale

Rad je podržala Nacionalna zaklada za prirodne znanosti Kine (12172280, 52268047, 51868075), ključni projekt Zaklade za prirodne znanosti iz Shaanxija (2020JZ-53), industrijsko-sveučilišno-istraživački projekt Yulina s potporom br. 2019-101-6 i Yulinov visokotehnološki ured za znanost i tehnologiju s potporom br. CXY-2020-10 te Projekt za mlade Zaklade za prirodne znanosti iz Shaanxija (2024JC-YBQN-0273).