

doc. dr. Peter Češarek, univ. dipl. inž. grad.
peter.cesarek@fgg.uni-lj.si



Katja Hrobat, dipl. inž. grad.
kh90020@student.uni-lj.si



doc. dr. Jerneja Češarek Kolšek, univ. dipl. inž. grad.
jerneja.kolsek@fgg.uni-lj.si
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Jamova 2, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek
UDK/UDC: 691.3:624.012:624.04

O SODOBNIH GEOPOLIMERNIH BETONIH IN PROJEKTIRANJU IZ NJIH GRAJENIH GRADBENIH KONSTRUKCIJ ON MODERN GEOPOLIMER CONCRETES AND THEIR APPLICATION TO LOAD-BEARING STRUCTURES

Povzetek

Sodobni geopolimerni betoni so v splošnem kompoziti peska, agregata in geopolimernega veziva, pri čemer je slednje produkt naravne polimerizacije, pri kateri material v obliki aluminosilikata (prekurzor) polimerizira pri interakciji z alkalnim medijem (aktivator). Pri tem se kot prekursor uporabijo različni stranski produkti industrije, npr. žlindra, elektrofiltrski pepel in metakaolin, zato izkazujejo ti betoni v primerjavi s konvencionalnim betonom iz portland cementa ugodne lastnosti v smislu okoljskega od-tisa. Sočasno, kot opiše prvi del članka, pa lahko imajo še druge, boljše lastnosti, pri čemer velja med karakteristikami otrdelega betona posebej omeniti boljšo odpornost proti nekaterim agresivnim vplivom okolja, boljšo odpornost proti visokim tempe-raturam in določene prednosti v smislu mehanskega (σ - ϵ) odziva. Splošna oblika σ - ϵ krivulj je v primerjavi s konvencionalnimi betoni po eni strani podobna, kar nas napelje k zaključku, da bi se tudi pri projektiranju konstrukcij iz geopolimernih betonov lahko zatekli k postopkom s področja konvencionalnih betonov. Vendarle pa obstaja tudi nekaj očitnih razlik, zaradi katerih bo te postopke pred tem verjetno treba vsaj ustrezno modificirati. Članek ponuja del odgovora na vprašanje, kako nujna bo takšna modifikacija.

Ključne besede: geopolimerni beton, mehanski odziv, σ - ϵ krivulja, analiza plastičnih členkov, postkritična nosilnost konstrukcije

Summary

Modern geopolymer concrete is a composite of sand, aggregate and geopolymer binder, the latter being the product of natural polymerization, in which an aluminosilicatic material (precursor) polymerizes through interaction with an alkaline medium (activator). Various industrial by-products are used as precursors, e.g. slag, fly ash and metakaolin. Thus, geopolimetric concrete exhibits favourable properties in terms of its environmental footprint compared to conventional Portland cement concrete. At the same time, as explained in the first part of the paper, geopolimetric concrete also exhibits other favourable properties, the most important among characteristics of hardened concrete being better resistance to various aggressive environmental influences, better resistance to high temperatures, and some advantages in terms of mechanical (σ - ϵ) response. The general shape of the σ - ϵ curves is similar to conventional concretes, which leads us to the conclusion that in the design of a geopolymer concrete structure one could resort to procedures from the field of conventional concretes. However, there are also some obvious differences, due to which these procedures will need to be modified to some extent in advance. The second part of the paper offers a brief insight into the need for such a modification.

Key words: geopolymer concrete, mechanical response, σ - ϵ curve, plastic hinge analysis, post-critical load-bearing structural capacity

1 UVOD

Ena izmed danes možnih alternativ tradicionalnim betonom so sodobni geopolimerni betoni, kjer se portland cement nadomešča z različnimi stranskimi produkti industrije. Tovrstni betoni lahko izkazujejo določeno prednost v smislu okoljskega odtisa, sočasno pa izkazujejo tudi nekatere boljše materialne lastnosti v primerjavi s konvencionalnim betonom. Pri tem prednjačita boljša odpornost proti nekaterim agresivnim vplivom okolja ter boljša odpornost proti visokim temperaturam, pomembne razlike pa se kažejo tudi v smislu mehanskega (σ - ϵ) odziva. A če bomo v prihodnosti rabo geopolimernih betonov v gradbeništvu želeli resnično pospešiti, bo treba razviti tudi ustrezna tehnična priporočila in standarde, podlaga zanj pa bodo ustrezne in dovolj številčne znanstvene raziskave. Pri zadevanja raziskovalcev v zvezi s slednjim, kot lahko opazimo s pregledom najnovejše znanstvene literature, postajajo v zadnjih letih bolj množična. K temu želi svoj delež prispevati tudi ta članek.

Članek gradita poleg uvoda še dva bistvena dela. V prvem delu (poglavje 2) najprej povzamemo, kaj o lastnostih geopolimernih betonov danes navaja dostopna znanstvena in strokovna literatura. Tu se osredotočimo predvsem na lastnosti otrodelega betona, ki so sicer tudi tiste, ki kot vhodni parameter vstopajo v računske postopke za projektiranje nosilnosti konstrukcij, ki jih naslavlja ta članek. V drugem delu (poglavji 3 in 4) pa se podrobneje omejimo le na mehanske lastnosti tovrstnih betonov, kot jih kažejo σ - ϵ materialni diagrami. Materialni diagrami geopolimernih betonov, kot jih je danes moč najti v dostopni literaturi, so predstavljeni v poglavju 3. Pri teh lahko v primerjavi z diagrami konvencionalnih betonov opazimo precej podobnosti, kar nas napeljuje k zaključku, da bi se tudi pri projektiranju konstrukcij iz geopolimernih betonov lahko zatekli k postopkom s področja konvencionalnih betonov. Vendarle pa obstaja tudi nekaj očitnih razlik, zaradi katerih bo te postopke pred tem verjetno treba vsaj ustrezno modificirati. Del odgovora na to, kako nujna je takšna modifikacija, ponuja poglavje 4. V njem predstavimo rezultate analize mehanskega odziva izbrane betonske konstrukcije, ki jo obremenjujemo postopno do in v območje njene postkritične nosilnosti. Analizo opravimo s pomočjo σ - ϵ diagrama, kot ga za opis mehanskega odziva konvencionalnih betonov danes predlaga [SIST, 2005a], in s pomočjo izbranih σ - ϵ diagramov geopolimernih betonov iz poglavja 3.

Omeniti velja, da se primerjalne analize, kot jih predstavimo v poglavju 4, pojavljajo tudi v dostopni literaturi, vendar pa so tam običajno predstavljeni le primeri statično določenih nosilcev (npr. [Sumajouw, 2006], [Sofi, 2007], [Prachasaree, 2014], [Hutagi, 2016]) in stebrov (npr. [Sumajouw, 2006], [Sarker, 2009], [Albitar, 2017]). Pri tem v zvezi z nosilci avtorji običajno poročajo o primerljivi (npr. [Sumajouw, 2006]) ali do približno 1,8-krat večji upogibni nosilnosti nosilcev iz geopolimernih betonov ([Sofi, 2007], [Prachasaree, 2014]). Pri tem so razlike med zaključki različnih raziskovalcev (npr. zaključki [Sumajouw, 2006] in [Prachasaree, 2014]) zelo verjetno predvsem posledica razlik v σ - ϵ diagramu uporabljenega geopolimernega betona.

Za razliko od zgoraj omenjenih primerjalnih analiz iz dostopne literature vpliv lastnosti obeh betonov v tem članku primerjamo na statično nedoločeni konstrukciji. Ena od najpomemb-

nejših razlik med konvencionalnim in geopolimernim betonom je namreč velikokrat v njuni duktilnosti. Zato pričakujemo, da bodo pri statično nedoločeni konstrukciji razlike v odzivu, če bomo za opis obnašanja betona uporabili predlog [SIST, 2005a] ali pa enega izmed modelov, ki so v literaturi predlagani za geopolimerne betone, opaznejše. Vpliv boljše duktilnosti materiala prihaja namreč do izraza zlasti v območjih »plastičnih členkov«, ki pa jih je več pri statično nedoločenih konstrukcijah. Novost v primerjavi z analizami iz dostopne literature pa je tudi ta, da razlike med opazovanimi betoni komentiramo tudi v smislu rotacijske kapacitete prečnih prereзов.

2 SPLOŠNO O GEOPOLIMERNIH BETONIH

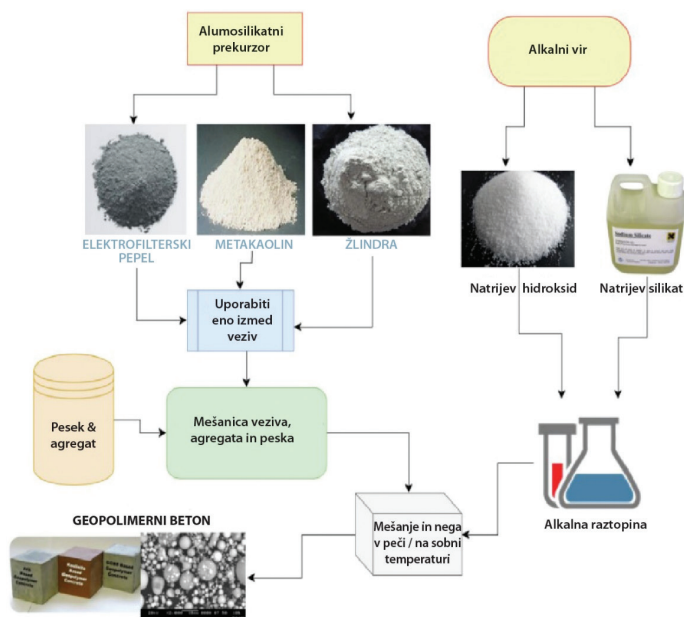
V poglavjih, ki sledijo, se z izrazom »konvencionalni betoni« sklicujemo na betone, ki so kompoziti agregata, vode in portland cementa kot tradicionalnega veziva. Z izrazom »geopolimerni betoni« pa mislimo na kompozite peska, agregata in geopolimernega veziva. Kot navaja dostopna literatura (npr. [Abdullah, 2011], [Hassan, 2020]), dobimo slednjega s procesom naravne polimerizacije (slika 1), pri kateri izvorni material (prekurzor) v obliki aluminosilikata (npr. žindra, elektrofiltrski pepel, metakaolin ...) polimerizira pri interakciji z alkalnim medijem (aktivatorjem). Pogost primer aktivatorja je mešanica raztopine natrijevega silikata (Na_2SiO_3), raztopine natrijevega hidroksida (NaOH) in vode.

Kot poroča vir [Hassan, 2019], je izraz »geopolimer« v sedemdesetih letih 20. stoletja izumil prof. Joseph Davidovits, ki se je pri tem skliceval na material, sintetiziran z reakcijo alkalne raztopine z aluminosilikatnim prahom [Davidovits, 1991]. Do danes pa se je zaradi široke palete formulacij v literaturi pojavilo več različnih imen za takšen material, npr. »anorganski polimer« in »alkalno aktiviran material (AAM)«. Nekateri raziskovalci so predlagali, da bi geopolimer poimenovali »alkalno aktivirano vezivo s prekursorji z nizko vsebnostjo kalcija«. Vendar pa različna poimenovanja povzročajo zmedo, zato v tem članku uporabimo le izraz »geopolimer«.

2.1 Okoljski vidik

Kot poroča [Hassan, 2020], se proizvodnja portland cementa v svetu vsako leto poveča za 5 %. Pri tem je najhitrejšo rast opaziti v razvijajočih se gospodarstvih Azije, kjer se pospešeno gradijo stavbe, ceste in druga infrastruktura. Skladno s statistiko iz vira [GCCA, 2022] je konvencionalni beton drugi najpogostejše uporabljen material na svetu, in sicer takoj za vodo. S proizvodnjo zanj potrebnega portland cementa pa naj bi se trenutno ustvarilo kar 12 % vseh emisij CO_2 na svetu [Hassan, 2020]. Geopolimerni betoni naj bi predstavljali eno izmed okolju prijaznejših alternativ.

Po podatkih, ki so na voljo v delu [Hassan, 2020], se pri proizvodnji geopolimernih betonov količina toplogrednih plinov v primerjavi s proizvodnjo konvencionalnih betonov zmanjša za 65–90 %. Poleg manjšega onesnaževanja z izpusti pa ima proizvodnja geopolimernih betonov še drugo prednost. V mešanicah se namreč uporabljajo materiali, ki so v drugih industrijah klasificirani kot odpadki tehnoloških procesov, njihova ponovna uporaba v geopolimernih betonih pa prispeva k reševanju problema odlaganja teh snovi v okolje in njihovi trajnostni rabi. Tako se kot ugodno vezivo za geopolimerni beton v literaturi



Slika 1. Proces priprave mešanice geopolimernega betona ([Hrobat, 2022], [Hassan, 2019]).

zelo pogosto omenja elektrofiltrski pepel (najpogostejše tipa F), ki je v osnovi odpadnik industrije, kjer se uporablja izogrevanje trdih goriv, npr. iz termoelektrarn. Omenjajo pa se tudi žlindra, ki je odpadnik iz proizvodnje jekla, metakaolin in drugi.

Opozoriti velja, da odpadni materiali, ki se uporabljajo za izdelavo mešanic geopolimernih betonov in smo jih omenili zgoraj, vsebujejo snovi (npr. težke kovine), ki bi ob morebitnem sproščanju v okolje lahko neugodno vplivale na zdravje ljudi. Vendar pa raziskovalci predvidevajo, da se pri geopolimernih betonih zaradi njihove nizke prepustnosti škodljivi elementi fizično ujamejo v porah betonske matrice ali pa se v betonski mešanici kemijsko povežejo [Hassan, 2019]. Luna in sodelavci [Luna, 2007] so z eksperimentalnimi preiskavami nekaj mešanic geopolimernih betonov npr. dokazali odlične sposobnosti enkapsulacije izbranih kovin (Pb, Cd, Cr, Zn), pri čemer so bili izjema le vzorci betonov, ki so vsebovali kaolin in metakaolin, kjer so opazili visoko raven stopnje izluženja. V prihodnosti bodo v zvezi s tem potrebne obsežnejše dodatne raziskave.

2.2 Lastnosti otrdelega betona

2.2.1 Mehanska odpornost

Če sklepamo zgolj po obliki materialne krivulje σ - ϵ iz enosnih tlačnih preizkusov, ki jih najdemo v dostopni literaturi, ugotovimo, da so mešanice geopolimernih betonov, ki so jih predstavili nekateri avtorji (npr. [Hardjito, 2004], [Hardjito, 2005]), precej primerljivih mehanskih lastnosti v primerjavi s konvencionalnimi betoni (lahko bi rekli, da so si σ - ϵ krivulje skoraj »na las« podobne). Pri drugih pa so opazne večje razlike. Pri slednjih se nekaj odstopanja kaže v elastičnem modulu, ki je pri sicer približno enaki tlačni trdnosti pri geopolimernih betonih lahko nekoliko nižji ([Sofi, 2007], [Pracharsaree, 2014]) ali pa nekoliko višji [Chitralla, 2018]. Zelo očitna odstopanja pa se kažejo v odzivu materiala v območju postkritične nosilnosti

(tj. od trenutka dosežene tlačne trdnosti pa do porušitve vzorca). V tem območju so geopolimerni betoni večinoma (lahko tudi precej) bolj duktilni ([Sofi, 2007], [Pracharsaree, 2014], [Chitralla, 2018]). Omenjene razlike med mešanicami geopolimernih betonov so lahko posledica različnega tipa prekurzorja (elektrofiltrski pepel tipa F, elektrofiltrski pepel tipa C, žlindra ...), glede na raziskave iz vira [Noushini, 2016] pa je jasno, da je izrednega pomena tudi nega svežega betona.

Natezna trdnost geopolimernih betonov je ob izkazani enaki tlačni trdnosti običajno nekoliko višja v primerjavi z natezno trdnostjo konvencionalnih betonov.

2.2.2 Odpornost proti vplivom okolja

Pri projektiranju betonskih konstrukcij je nujno poznavanje okolja, v katerem se bo konstrukcija nahajala. Skozi pore in razpoke v betonu lahko vanjo namreč s časom prodirajo škodljive snovi, ki konstrukcijo tako ali drugače poškodujejo. Najbolj pogosta poškodba je korozija armaturnih palic v armiranem prerezu kot posledica t. i. karbonatizacije [Hren, 2019]. Ker se jeklu po oksidaciji volumen poveča, se v betonu ustvari dodatne napetosti, te pa vodijo v razpoke. Odpornost proti karbonatizaciji se za geopolimerne betone zaradi njihove drugačne kemijske strukture (nižja vsebnost kalcijevih komponent v otrdeli betonski matrici) v literaturi pogosto navaja kot boljša v primerjavi s konvencionalnimi betoni, čeprav to ne velja nujno za vse mešanice ([Hassan, 2019], [Lingyu, 2021]).

Poškodbe betona so lahko tudi posledica kloridov, ki so lahko prisotni že v komponentah za izdelavo betonskih mešanic ali pa vstopajo v beton ob (neposrednem ali posrednem) stiku z morsko vodo ali ob stiku s talinimi solmi (v zimskem obdobju). Posledica izpostavitve betona kloridom je prav tako lahko korozija armature in posledična formacija razpok ([Hočevar, 2007], [Hren, 2019]). V zvezi s tem rezultati nekaterih raziskav [Hassan, 2019] nakazujejo, da so tovrstnim poškodbam geopolimerni betoni v nekaterih primerih zaradi manjše vsebnosti kalcijevih spojin lahko podvrženi manj.

V nadaljevanju omenimo tudi odpornost betonov proti prisotnosti sulfatov. Sulfati lahko v beton prodirajo ob stiku s kontaminirano zemljo ali vodo, posledica tega pa je tvorba sadre, ki se v reakciji z aluminati pretvori v etringit. Zaradi večjega volumna produktov reakcije v primerjavi z reaktanti beton nabreka, kar vodi do razpok in porušitve stika med cementno pasto in agregatom [Hočevar, 2007]. V zvezi s tem omenimo raziskavo, ki so jo leta 2012 izvedli Parshwanath in sodelavci [Parshwanath, 2012]. Ti so opazovali odpornost mešanic geopolimernega in konvencionalnega betona proti delovanju natrijevega in magnezijevega sulfata. Ugotovili so, da se je konvencionalnim betonom trdnost po izpostavitvi sulfatom zmanjšala do največ 39 %, geopolimernim betonom pa le do 21,3 %. Zmanjšanje trdnosti je bilo sicer odvisno od vrste sulfata in časa, v katerem je bila temu izpostavljena opazovana betonska mešanica.

Ne nazadnje pa je pri betonih zagotovo pomembna tudi odpornost proti zmrzovanju in tajanju. Podatki v zvezi s tem so za geopolimerne betone v dostopni literaturi za zdaj še skopi, prve raziskave pa dajejo prednost geopolimernim betonom iz mešanice elektrofiltrskega pepela in žlindre v primerjavi z betoni iz čistega elektrofiltrskega pepela. Zhao in sodelavci [Zhao, 2019] so na primer dokazali, da so lastnosti geopolimer-

nega betona, pri katerem je delež žlindre vsaj enakovreden deležu elektrofiltrskega pepela, v zvezi s problemom zmrzovanja in tajanja primerljive z lastnostmi konvencionalnih betonov. Žal pa je odziv geopolimernih betonov bistveno slabši pri tretmajih z aeranti, na katere se ti, kot kažejo prve raziskave (npr. [Sun, 2013]), opazneje sploh ne odzivajo.

2.2.3 Odpornost proti visokim temperaturam

Izrazita prednost geopolimernih betonov v primerjavi z običajnimi betoni je tudi njihovo obnašanje pod vplivom visokih temperatur ([Aslani, 2016], [Hassan, 2019], [Hassan, 2020]). Geopolimerni betoni imajo namreč nižjo toplotno prevodnost, zaradi česar se počasneje segrevajo, ugodno pa je tudi dejstvo, da ohranijo svoje mehanske karakteristike vse do temperature 600 °C. Za primerjavo omenimo, da se trdnost konvencionalnih betonov pri takšni temperaturi zniža že za približno 50 % [SIST, 2005b]. Zanimiva pa je tudi primerjava tlačne trdnosti obeh vrst betonov po izpostavljenosti visokim temperaturam in ohladi tvri nazaj na sobno temperaturo. Medtem ko bi pri konvencionalnih betonih v takih primerih ugotovili nižjo tlačno trdnost v primerjavi z začetno (tj. pred segrevanjem), bi bila ta pri geopolimernih betonih celo višja.

2.3 Lastnosti svežega betona

V dostopni literaturi je mogoče najti tudi podatke o lastnostih svežega geopolimernega betona. Ker so te z vidika ciljev tega prispevka manj zanimive, jih v nadaljevanju opišemo le na kratko, zainteresirani bralec pa lahko podrobnosti najde v literaturi, kot jo na primer povzema poglavje 2 dela [Hassan, 2019].

- Konsistenca svežega betona: Dostopna literatura navaja primerljive vrednosti konsistence svežega geopolimernega betona v primerjavi s konvencionalnimi betoni, pri čemer pa so te odvisne predvsem od razmerja aktivatorja in prekursorja, finosti zrn elektrofiltrskega pepela, razmerja Na_2SiO_3 in NaOH v raztopini aktivatorja ter razmerja vode in trdne snovi betona. Konsistenco lahko zvišamo z uporabo agregata z nizko absorptivnostjo in z uporabo superplastifikatorja, npr. superplastifikatorja na osnovi tekočega naf-talena.
- Čas vezanja: Časi vezanja mešanic geopolimernih betonov, kot jih navaja npr. vir [Hassan, 2019], so v mejah 35–70 min. (začetni čas) in 45–220 min. (končni čas). Na čas vezanja vpliva predvsem koncentracija NaOH , pri čemer višja molar-nost NaOH čas učinkovito zvišuje. Dodatek žlindre nasprotno čas vezanja znižuje.
- Hidratacijska toplota: Površinska temperatura, ki se pri testiranjih svežih betonskih mešanic uporablja za merilo sproščene hidratacijske toplote, je v literaturi pogosto omenjena kot nekoliko višja v primerjavi s konvencionalnimi betoni. Pri tem višje razmerje med Na_2SiO_3 oz. NaOH in elektrofiltrskim pepelom temperaturo zvišuje, višje razmerje med peskom in elektrofiltrskim pepelom pa jo znižuje. Najvišje temperature so običajno opažene med samim mešanjem betona, kasneje po vlitju betona v opaž pa se temperature znižajo. Geopolimerni betoni iz elektro-filtrskega pepela eksotermnih procesov po vlitju ne izka-zujejo.

2.4 Raba geopolimernih betonov danes

Geopolimerni betoni imajo zaradi svojih ugodnih lastnosti, ki smo jih omenili v poglavju 2.2, velik potencial za implementacijo na različna področja gradbeništva. Žal pa je zaradi pomanjkanja ustreznih tehničnih priporočil in standardov danes njihova raba v praksi še zelo omejena ([DBMR, 2022], [MI, 2022]).

Kot navaja vir [Hassan, 2019], bi se zaradi njihove dobre odpor-nosti proti vplivom okolja raba geopolimernih betonov kma-lu utegnila povečati v kanalizacijskih sistemih, kjer se zaradi počasnega toka tekočin in pomanjkljivega prezračevanja ob razkranjanju organskih snovi tvori vodikov sulfid. Ta se ob ne-nemnem stiku z vlago ali vodo, ki je zaradi majhnih naklonov cevi v sistemu prisotna ves čas, zlahka pretvori v žvepleno ki-slino. Ta pa naj bi bila po nekaterih ocenah odgovorna za kar 45 % vseh poškodb, ki jih na kanalizacijskih ceveh iz konvenci-onalnega betona opažamo danes [Hassan, 2019]. Prav tako se žveplove kislina lahko tvori ob stiku betonske cevi in kislih sul-fatnih tal, ki vsebujejo pirit. Pirit ob stiku z zrakom, do katerega pride med izkopavanjem ali izsuševanjem zemljine, oksidira in prav tako tvori žveplove kislino.

Zaradi njihove boljše odpornosti proti sulfatom iz morske vode bi se raba geopolimernih betonov v prihodnosti utegnila uve-ljaviti tudi v morski in obmorski gradnji [Hassan, 2020]. Tako v svetu že razvijajo sisteme vetrnih elektrarn na morju, katerih nosilna konstrukcija bi bila zgrajena iz visokotrdnih geopoly-mernih betonov z bazaltno armaturo. Po nekaterih ocenah naj bi življenjska doba takšne konstrukcije dosegala 100 let in več [Filak, 2022].

Ne nazadnje pa bi se, kot je sicer podrobneje argumentirano v delu [Hassan, 2020], zaradi njihove dobre odpornosti proti raz-ličnim vplivom okolja aplikacija geopolimernih betonov lahko pospešila tudi na področju drugih, bolj izpostavljenih kon-strukcij (tako pri sanacijah obstoječih kot gradnji novih), npr. mostov, zaradi njihove dobre odpornosti proti visokim tempe-raturam pa tudi na področju protipožarnih zaščit.

3 MATERIALNI DIAGRAMI GEOPOLIMERNIH BETONOV

V poglavju 3 predstavimo materialne diagrame geopolimer-nih betonov pri kratkotrajni enoosni tlačni obremenitvi, ki so bili do danes predlagani v dostopni znanstveni literaturi. Za predstavitev več materialnih diagramov se odločimo, ker so mehanske lastnosti geopolimernega betona v veliki meri od-visne od kemijske sestave surovin in razmerij v mešanici, pri čemer imata največji vpliv vezivo in alkalni aktivator. V bolj koncentriranem aktivatorju lahko raztopimo več delcev veziva, s čimer dosežemo večjo stopnjo geopolimerizacije in posle-dično gostejšo strukturo betonske matrice (torej beton boljših mehanskih lastnosti). Prav tako je pomembna struktura veziva, npr. razmerje silicijevih in aluminijevih mineralov v elektrofiltr-skem pepelu. Modeli so predstavljeni v obliki sovisnosti med normalno napetostjo in pripadajočo deformacijo.

Ker gre pri večini predstavljenih materialnih modelov geopo-limernega betona za modifikacijo materialnega modela, ki so ga za primere konvencionalnih betonov višjih trdnosti že leta

1987 razvili Thorenfeldt in sodelavci [Thorenfeldt, 1987], nekaj let kasneje pa so ga dopolnili še Collins in Mitchell [Collins, 1991] in Collins in sodelavci [Collins, 1993], je v začetku poglavja predstavljen tudi slednji.

Oznake, ki so uporabljene v modelih, so skladne z oznakami, ki jih v svojem delu uporabijo avtorji posameznega modela, in niso nujno enake oznakam, ki jih uporabljajo drugi avtorji oz. oznakam, ki jih uporablja standard Evrokod [SIST, 2005a].

Pri vsakem modelu so navedene tudi eksperimentalne raziskave, na podlagi katerih so bili modeli razviti, saj te vplivajo na meje aplikativnosti modela. Eksplicitno so navedeni: (i) osnovni tip betona, za katerega je model veljaven, v smislu vrste prekurzorja, (ii) pogoji, pri katerih so bili betonski vzorci negovani pred enoosnim testiranjem, ter (iii) razpon tlačnih trdnosti, ki so jih vzorci pri testiranjih dosegali. Dodani pa so tudi sklici na drugo literaturo, kjer so na voljo podrobnejši podatki o eksperimentih.

3.1 6-ε model za konvencionalne betone višjih trdnosti skladno s predlogi Thorenfeldta in sodelavcev [Thorenfeldt, 1987], Collinsa in Mitchella [Collins, 1991] in Collinsa in sodelavcev [Collins, 1993]

Že leta 1987 so Thorenfeldt in sodelavci [Thorenfeldt, 1987] izpeljali analitični izraz za izračun materialnega diagrama betonov s tlačnimi trdnostmi nad (in vključno) 40 MPa. Izraz je temeljil na izrazu Popovicsa [Popovics, 1973], ki je sicer veljaven za betone normalnih trdnosti, le da je bil ustrezno modificiran. Kasneje, leta 1991, sta izraz, ki je do takrat zvezo med napetostjo in deformacijo betona podajal le v naraščajočem delu krivulje, dopolnila še Collins in Mitchell [Collins, 1991]. Ta je s tem prešel v obliko:

$$\frac{f_c}{f'_c} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} \cdot \frac{n}{n-1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c}\right)^{nk}} \quad (1)$$

V enačbi (1) predstavlja f_c napetost v poljubni točki sigma-epsilon krivulje, ε_c pa deformacijo betona, ki pripada f_c . f'_c je nadalje maksimalna vrednost napetosti v diagramu oz. t. i. tlačna trdnost betona, ε'_c pa njej pripadajoča deformacija. k in n sta parametra, ki ju izračunamo s pomočjo izrazov:

$$k = \begin{cases} 1; & \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} \leq 1 \\ 0,67 + \frac{f'_c [\text{MPa}]}{62}; & \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} > 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$n = 0,8 + \frac{f'_c [\text{MPa}]}{17} \quad (3)$$

Leta 1993 sta Collins in Mitchell skupaj z MacGregorjem [Collins, 1993] zgoraj zapisanim izrazom dodala še izraz za izračun deformacije ε'_c , ki so jo avtorji zapisali v odvisnosti od tlačne trdnosti betona f'_c in elastičnega modula betona E_c :

$$\varepsilon'_c = \frac{f'_c}{E_c} \cdot \frac{n}{n-1} \quad (4)$$

V kolikor lahko za določen konvencionalni beton izmerimo vrednost njegove tlačne trdnosti in elastičnega modula (v praksi se ti dve količini največkrat določita laboratorijsko po

protokolih standardov [SIST, 2019] in [SIST, 2021]), lahko torej s pomočjo izrazov (1)–(4) enolično določimo tudi pripadajočo materialno σ – ε krivuljo.

3.2 6-ε model za geopolimerne betone iz elektrofilitrskega pepela tipa F visokih trdnosti po predlogu Sarkerja [Sarker, 2009]

Eden izmed prvih, ki je izraze (1)–(4) iz poglavja 3.1, prilagodil še za geopolimerne betone, je bil Sarker [Sarker, 2009], ki se je pri tem oprl na podatke iz eksperimentalnih raziskav Hardjita in Rangana [Hardjito, 2004] in Hardjita in sodelavcev [Hardjito, 2005]. Mešanice, ki so jih za pripravo preskušancev za določitev σ – ε krivulj uporabili slednji, so bile treh različnih trdnosti (41, 61 in 64 MPa), pri vseh pa je bil kot prekurzor uporabljen elektrofilitrski pepel tipa F. Pred testiranjem so se preskušanci 24 ur sušili v peči pri 90 °C ali pa so bili 24 ur negovani s parjenjem pri 90 °C. Za tem so bili sušeni na zraku pri normalni sobni temperaturi do dneva testiranja. Več podrobnosti o omenjenih testiranjih je na voljo tudi v dodatku E iz diplomske naloge K. Hrobat [Hrobat, 2022].

V zvezi z izrazi (1)–(4) je Sarker [Sarker, 2009] predlagal nov izraz za izračun parametra n , in sicer:

$$n = 0,8 + \frac{f'_c [\text{MPa}]}{12} \quad (5)$$

Pri tem je f'_c tlačna trdnost betona.

Kot dodatek izrazom (1)–(2) ter (4)–(5) pa je predlagal tudi izraz za izračun elastičnega modula E_c , in sicer skladno z analitično predlogo Hardjita in sodelavcev [Hardjito, 2005]:

$$E_c [\text{MPa}] = 2707 \sqrt{f'_c [\text{MPa}]} + 5300 \quad (6)$$

Primernost izraza (6) je preveril s primerjavo izračunanih in izmerjenih vrednosti modula elastičnosti, ki so jih za geopolimerne betone predstavili drugi raziskovalci (več o omenjeni validaciji je na voljo tudi v dodatku B iz diplomske naloge K. Hrobat [Hrobat, 2022]). Ujemanje rezultatov je opisal kot zadovoljivo.

3.3 6-ε model za geopolimerne betone iz elektrofilitrskega pepela tipa F normalnih trdnosti po predlogu Anuradhe in sodelavcev [Anuradha, 2012]

Kot dopolnitev modela Sarkerja [Sarker, 2009], ki je bil torej razvit za geopolimerne betone iz elektrofilitrskega pepela tipa F višjih trdnosti, so Anuradha in sodelavci [Anuradha, 2012] kasneje izpeljali še izraze za istovrstne betone normalnih trdnosti. Tudi ti raziskovalci so za osnovo privzeli izraze (1)–(4) iz poglavja 3.1 in modificirali le izraz za izračun parametra n , ki so ga zapisali kot:

$$n = 0,7 + \frac{f'_c [\text{MPa}]}{14} \quad (7)$$

Elastični modul E_c so po vzoru Sarkerja [Sarker, 2009] tudi sami povzeli po predlogu [Hardjito, 2005] (enačba 6).

Glede na eksperimentalne rezultate, ki so prikazani v delu [Anuradha, 2012], sklepamo, da so raziskovalci izraz (7) razvili

s pomočjo prilagajanja rezultatov numeričnega modela rezultatom lastnih eksperimentalnih raziskav, čeprav avtorji v svojem članku slednjih posebej žal ne opišejo. Pri tem so testirali betone tlačnih trdnosti 25 MPa in 35 MPa, priprava vzorcev in testiranje pa sta potekala v skladu z indijskimi standardi. Tudi določil omenjenih standardov avtorji ne navedejo, prav tako pa ne navedejo točnih naslovov standardov.

3.4 σ - ϵ model za geopolimerne betone iz elektrofiltregega pepela in/ali žlindre normalne ali visoke trdnosti po predlogu Prachasareeja in sodelavcev [Prachasaree, 2014]

Model Prachasareeja in sodelavcev [Prachasaree, 2014] predstavlja nov mejnik v razvoju materialnih modelov geopolimernih betonov, saj so avtorji pri njegovem razvoju v primerjavi z avtorji del [Sarker, 2009] in [Anuradha, 2012] uporabili širšo bazo eksperimentalnih podatkov iz dostopne literature. Tako so poleg podatkov iz vira [Hardjito, 2004] in [Hardjito, 2005] uporabili tudi podatke lastnih meritev (podrobnosti o teh so na voljo tudi v dodatku C vira [Hrobat, 2022]) ter množico meritev drugih raziskovalcev (za povzetek teh in pripadajoče sklice na drugo literaturo glej [Hrobat, 2022], dodatek D). Podatki, ki so jih uporabili, so tako predstavljali podatke raziskav geopolimernih betonov najrazličnejših trdnosti (med 12 in 80 MPa) ter z različnimi vrstami prekursorja (elektrofiltreski pepel tipa F ali tipa C, žlindre, mešanice slednjih ...), ki so bili pred testiranjem negovani pri različnih pogojih (sušenje na zraku pri sobni temperaturi, sušenje v peči 24 ur pri 60 °C, sušenje v peči 24 ur pri 90 °C, parjenje 24 ur pri 90 °C ...). Razviti model lahko torej razumemo kot prvi poskus »povprečenja« odziva preizkušancev iz različnih mešanic geopolimernih betonov pri enosmernem tlačnem preizkusu, ki so bile razvite približno do časa nastanka članka [Prachasaree, 2014] in do tega časa tudi predstavljene v dostopni literaturi. O smiselnosti poskusa opisanja toliko različnih mešanic, ki so bile tudi negovane pri zelo različnih pogojih, z enim samim modelom pa bodo sodile prihodnje raziskave.

Izraz za elastični modul, ki ga Prachasaree in sodelavci v svojem članku [Prachasaree, 2014] označijo z E , je sledeč:

$$E \text{ [GPa]} = 0,840 - 0,886f'_c + 0,647(f'_c)^2. \quad (8)$$

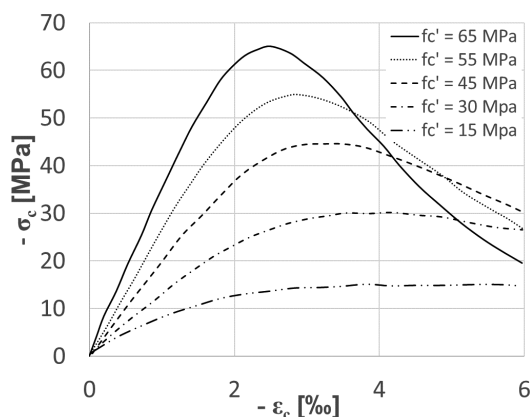
Pri tem je f'_c tlačna trdnost betona v MPa. Skupino izrazov modela pa sicer predstavljata še izraza (1) in (2) iz poglavja 3.1, v katerih so v viru [Prachasaree, 2014] uporabljene le nekoliko drugačne oznake, in sicer: f_c za napetost v betonu, ϵ za pripadajočo deformacijo, f'_c za tlačno trdnost betona in ϵ_0 za deformacijo pri doseženi tlačni trdnosti. Prav tako pa skupino izrazov modela predstavljata še nekoliko spremenjena izraza (3) in (4), ki preideta v obliko:

$$\epsilon_0 = 0,0051 - \frac{4(f'_c)}{10^5}, \quad (9)$$

$$n = 0,5 + \left(\frac{f'_c}{14,3} \right) - \left(\frac{3(f'_c)^2}{10^4} \right). \quad (10)$$

Problem izrazov (8)–(10), ki smo jih predstavili zgoraj, je žal v tem, da je v njih zelo očitno tudi vsaj ena tipkarska napaka. Že hiter preračun namreč razkrije, da ti izrazi ne opisujejo krivulj, ki jih avtorji v svojem članku [Prachasaree, 2014] predstavijo na

sliki 4, poračunali pa naj bi jih s predlaganimi izrazi (v tem prispevku so omenjene krivulje iz slike 4 vira [Prachasaree, 2014] povzete na sliki 2). V zvezi z omenjenimi težavami smo navezali stik z avtorji modela in jih prosili za ustrezne popravke, a se ti žal na prošnjo v času nastajanja tega članka še niso odzvali. Namesto izrazov (8)–(10) zato v nadaljevanju tega prispevka uporabljamo σ - ϵ krivulje s slike 2 v diskretni obliki.



Slika 2. Sigma-epsilon krivulje geopolimernih betonov različnih trdnosti, kot so jih s svojim modelom določili Prachasaree in sodelavci [Prachasaree, 2014].

3.5 σ - ϵ model za geopolimerne betone iz elektrofiltregega pepela tipa F in žlindre po predlogu Chitrале in sodelavcev [Chitrала, 2018]

Model Chitrале in sodelavcev [Chitrала, 2018] je namenjen geopolimernim betonom, kjer je za vezivo uporabljena kombinacija elektrofiltregega pepela tipa F in žlindre, del peska kot finega agregata pa je lahko nadomeščen z granitnimi delci. Pri tem so razmerja deležev finega agregata (pesek:granitni delci) lahko različna. Model je bil razvit na podlagi lastnih eksperimentalnih raziskav avtorjev, ki so testirali vzorce s tlačnimi trdnostmi v razponu 18–50 MPa. Vzorci so bili pred testiranjem sušeni na zraku pri normalni sobni temperaturi. Podrobnosti testiranja so predstavljene tudi v delu [Hrobat, 2022] (dodatek F).

Sovisnost med napetostjo in deformacijo je v modelu opisana z izrazom:

$$\sigma_c = \frac{\epsilon_c + a}{b_0 + b_1(\epsilon_c + a) + b_2(\epsilon_c + a)^2}. \quad (11)$$

Tu je σ_c tlačna napetost v poljubni točki materialnega diagrama, ϵ_c pa pripadajoča tlačna deformacija. a , b_0 , b_1 , in b_2 so konstante, ki so odvisne od razmerja peska in granitnih delcev v betonski mešanici in starosti betona (7, 28 ali 90 dni). Pri razmerju 100 : 0 in starosti 28 dni so vrednosti sledeče: $a = -7,12 \cdot 10^{-5}$, $b_0 = 2,19 \cdot 10^{-5}$, $b_1 = 0,006$ in $b_2 = 5,49$. Za ostale mešanice so vrednosti koeficientov na voljo tudi v delu [Hrobat, 2022].

Mejno tlačno deformacijo ϵ_{cr} , ki jo beton doseže pred nastopom porušitve, izračunamo po izrazu:

$$\frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_p} = 2,8 - 0,05 \ln(f_{cm} [\text{MPa}]) \quad (12)$$

Pri tem sta f_{cm} in ε_p tlačna trdnost in njej pripadajoča deformacija betona.

3.6 Drugi σ - ε modeli geopolimernih betonov iz dostopne literature

V literaturi lahko zasledimo tudi druge predloge za materialne modele geopolimernih betonov pri kratkotrajni enoosni tlačni obremenitvi, ki obravnavajo specialne tipe tovrstnih betonov, npr. geopolimerne betone z dodatkom sintetičnih vlaken [Noushini, 2018], geopolimerne betone z recikliranim agregatom [Tang, 2019] itd. Nekateri raziskovalci se lotevajo raziskav vpliva objekta betona zaradi jeklene strižne armature prereza (npr. [Ganesan, 2014]) ali pa objekta s plaščem iz ojačanih polimerov ([Alrshoudi, 2021], [Tang, 2020]). Pojavljajo se tudi predlogi modelov pri kompleksnejšem triosnem napetostnem stanju (npr. [Haider, 2014]). Vendarle pa ti modeli za ta članek niso relevantni, zato jih v nadaljevanju posebej ne omenjamo.

Prav tako lahko v literaturi zasledimo tudi modele, ki podobno kot modela [Sarker, 2009] in [Anuradha, 2012], ki smo ju predstavili v poglavjih 3.2 in 3.3, predstavljajo geopolimerne betone, katerih lastnosti σ - ε krivulje niti v padajočem delu krivulje niso bistveno drugačne kot pri konvencionalnih betonih (npr. [Cong, 2020]) ali pa se v tem območju odzivajo slabše (npr. [Thomas, 2015]). Ti modeli za nadaljnje analize tega članka niso zanimivi, zato jih ne opišemo posebej.

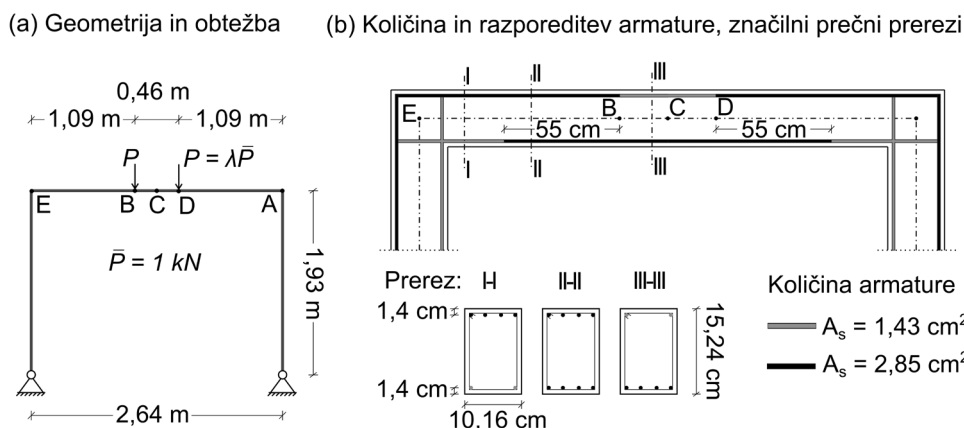
4 PRIMERJAVA MEHANSKEGA ODZIVA KONSTRUKCIJE IZ KONVENCIONALNEGA IN GEOPOLIMERNEGA BETONA NA PODLAGI NUMERIČNIH SIMULACIJ

V tem poglavju preverimo, kako se razlike med σ - ε zakoni geopolimernih in konvencionalnih betonov odražajo pri mehanskem odzivu izbrane konstrukcije na delovanje kratkotrajne statične obtežbe. Med modeli, ki smo jih predstavili v poglavju 3, izberemo za primerjavo modele geopolimernih betonov, kjer so razlike v mehanskem odzivu bolj očitne, tj. modele po virih [Prachasaree, 2014] in [Chitralla, 2018].

Obravnavamo ravninski armiranobetonski okvir, podprt z dvema vrtljivima podporama, ki ga je eksperimentalno analiziral Cranston [Cranston, 1965]. Primer je dobro znan iz literature, saj je bil predmet številnih numeričnih raziskav (npr. [Bažant, 1987], [Bratina, 2004]). Skico okvirja z osnovnimi geometrijskimi podatki prikazujemo na sliki 3. Obtežba okvirja je simetrična. Dimenzije prečnega prereza stebra in prečke so enake, različna je le razporeditev vzdolžne armature. V stebrih ter na obeh koncih prečke je količina zgornje (v stebrih zunanje) armature večja od spodnje (v stebrih notranje), v sredini razpetine prečke v območju B-D (med prijemališčema sil) pa je količina spodnje armature večja od zgornje. V vmesnem območju prečke na dolžini 55 cm sta količini spodnje in zgornje armature enaki. V analizah upoštevamo geometrijsko nepopolnost stebrov, o kateri poroča [Cranston, 1965], zaradi katere sta stebra na vrhu od navpične osi izmaknjena v vodoravni smeri za 3,2 mm.

Numerične analize okvirja opravimo v programu SAP2000 [CSI, 2021]. Program omogoča geometrijsko in materialno nelinearno analizo konstrukcij, pri čemer je materialna nelinearnost skoncentrirana v vnaprej določenih plastičnih členkih. Uporabimo plastične členke tipa »P-M2-M3, fiber hinge«. Plastične členke program izračuna sam s pomočjo vnaprej definiranih integracijskih točk prečnega prereza, pri čemer v vsaki točki s pomočjo podatkov o vzdolžnih in upogibnih deformacijah (ukrivljenosti) referenčne osi nosilca najprej določi vzdolžno deformacijo materialnega vlakna, nato pa še pripadajočo vzdolžno normalno napetost. Slednja je z vzdolžno deformacijo povezana prek nelinearnega σ - ε zakona betona oziroma armature. Nadalje program izračunane napetosti integrira po prerezu in izračuna pripadajoče vrednosti osne sile in upogibnih momentov. V vseh prerezih okvira izberemo mrežo 20 x 30 zgoraj omenjenih integracijskih točk.

Okvir diskretiziramo z mrežo linijskih končnih elementov, ki niso večji od 20 cm, plastične členke pa postavimo v vozlišča teh elementov. Nastanek plastičnih členkov pričakujemo na mestih največjih momentov, tj. v točkah A do E (točke so označene na sliki 3). Okvir je enkrat statično nedoločen in postane kinematično labilen po nastanku drugega plastičnega členka. V kolikor bi deformiranje konstrukcije do porušitve v analizi poskušali voditi s povečevanjem obtežbe na okvir (oz. s povečevanjem obtežnega faktorja λ , kot ga definira slika 3), bi v računu

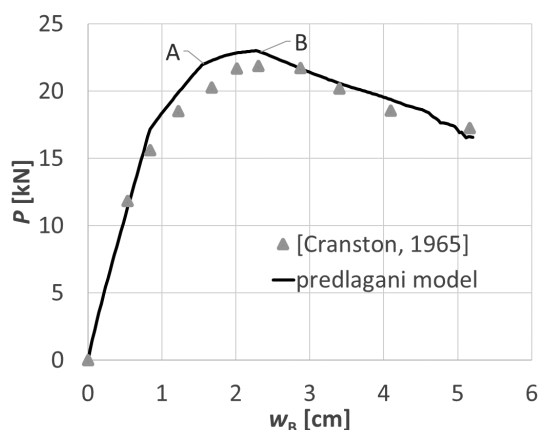


Slika 3. Cranstonov portalni okvir.

naleteli na numerične težave približno v času nastanka prvega plastičnega člena. Analizo zato izvedemo tako, da predpisujemo navpični pomik pod točkovnima silama, ki predstavljata obtežbo okvira (slika 3). To nam omogoči, da obtežno deformacijski poti sledimo tudi v postkritičnem območju.

4.1 Validacija modela

Prepričajmo se najprej, da je zgoraj opisani numerični model zares ustrezen. Za ta namen primerjamo naše numerične rezultate z eksperimentalnimi rezultati, kot jih navaja vir [Cranston, 1965]. V modelu pri tem za materialne parametre betona in armature uporabimo vrednosti, kot jih podajajo Bažant in sodelavci [Bažant, 1987]. Za trdnost betona tako upoštevamo vrednost 29 MPa, za elastični modul betona vrednost 25,5 GPa, napetost na meji elastičnosti armature privzamemo v vrednosti 40 MPa, elastični modul armature pa v vrednosti 200 GPa. Materialno krivuljo za beton v tlaku privzamemo po modelu [Desayi, 1964], pri čemer za deformacijo pri tlačni trdnosti betona in mejno deformacijo ob porušitvi betona privzamemo vrednosti, kot jih predlaga [Bratina, 2004], tj. 2,3 ‰ in 50 ‰. Nosilnost betona v nategu zanemarimo. Za armaturo izberemo bilinearni diagram z modulom utrjevanja 200 MPa, z deformacijo pri največji napetosti 10 ‰ in z mejno deformacijo, pri kateri je napetost v armaturi zaradi odpovedi materiala ponovno enaka 0, 300 ‰. Pomemben parameter za analizo, pri kateri želimo dosledno upoštevati tudi padajoči del σ - ϵ krivulj betona (mehčanje betona), je dolžina cone mehčanja, ki jo definiramo kot dolžino plastičnega člena. Dolžina cone mehčanja je odvisna od oblike materialnega diagrama v območju mehčanja in od energije loma betona, na katero vpliva tudi objetje betonskega jedra s stremensko armaturo, ki je za obravnavani primer ne poznamo in bi jo kvečjemu lahko samo predpostavili skladno z relevantno dostopno literaturo za konvencionalne betone. Zaradi vsega naštetega dolžine cone mehčanja ne izračunamo, ampak jo izberemo tako, da se rezultati numeričnega modela dovolj dobro ujamejo z eksperimentalnimi. Izberemo vrednost $h = 8$ cm. Primerjava eksperimentalno in numerično dobljenih krivulj obtežne sile P v odvisnosti od vertikalnega pomika v točki B je prikazana na sliki 4.



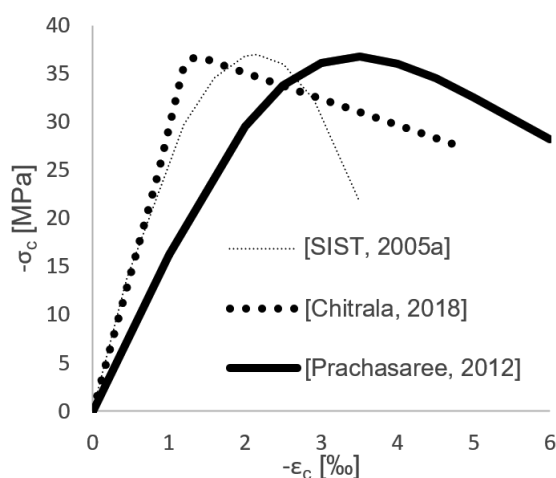
Slika 4. Primerjava eksperimentalno določenih in izračunanih obtežnih sil P v odvisnosti od vertikalnih pomikov v točki B za Cranstonov okvir. Točki A in B, ki sta na sliki označeni z modro barvo, označujeta nastanek plastičnih členkov v pre-rezih A in B.

Ujemanje rezultatov numeričnega modela z eksperimentalnimi je zadovoljivo, zato numerični model uporabimo za nadaljnje analize odziva konstrukcije pri uporabi drugih σ - ϵ modelov betona.

4.2 Primerjava rezultatov pri različnih σ - ϵ modelih betona

Že na tem mestu omenimo, da implementacija drugih materialnih krivulj v analizo našega okvira v splošnem pomeni tudi spremembo v dolžinah plastičnih členkov, ki pa jih zaradi že prej omenjenih razlogov ne moremo natančno določiti. Za ta namen bi bili namreč potrebni tudi določeni dodatni eksperimentalni podatki primerjanih betonov, ki v literaturi danes po vedenju avtorjev članka žal še niso na voljo. Zato pri vseh analizah predpostavimo enako vrednost, kot smo jo določili v poglavju 4.1, tj. $h = 8$ cm. Ker so si krivulje materialnih modelov betonov, ki jih uporabimo v nadaljevanju, vendarle medsebojno v splošnem podobne, ocenjujemo, da je pri vseh analizah napaka zaradi tega majhna in pri vseh približno enaka. Prpadajoče rezultate lahko zato kljub vsemu tretiramo kot ustrezne vsaj v primerjalnem smislu.

Med materialnimi modeli, ki smo jih za geopolimerne betone predstavili v poglavju 3, izberemo za analize tega poglavja tiste, kjer so razlike v mehanskem odzivu v primerjavi s konvencionalnimi betoni bolj očitne, tj. modele po virih [Prachasaree, 2014] in [Chitralla, 2018]. Rezultate analize okvira pri izbranih modelih primerjamo z rezultati analize, kjer upoštevamo model konvencionalnega betona po predlogu Evrokoda [SIST, 2005a]. Pri vseh analizah za trdnost betona izberemo vrednost $f_{cm} = 37$ MPa. Po modelu Chitralle in sodelavcev [Chitralla, 2018] takšna trdnost približno odgovarja σ - ϵ krivulji za beton, kjer je kot fini agregat uporabljen le pesek, ne pa tudi granitna zrna, starost betona pa je enaka 28 dni (oznaka takšnega betona v delu [Chitralla, 2018] je »100:0_28«). Ker tudi pri konvencionalnih betonih kot fini agregat običajno uporabimo le pesek, sigma-epsilon modeli, ki jih za konvencionalne betone predlaga dostopna literatura, pa običajno pripadajo starosti 28 dni, je med modeli, kot jih predlaga [Chitralla, 2018], izbira modela za beton »100:0_28« najbolj smiselna.

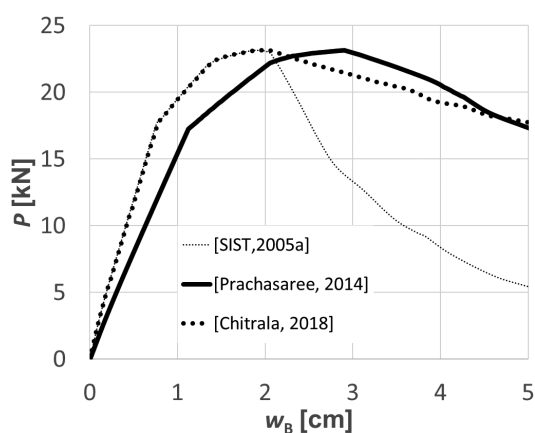


Slika 5. Krivulje σ - ϵ , ki so bile uporabljene kot materialni modeli betona v analizah poglavja 4.2.

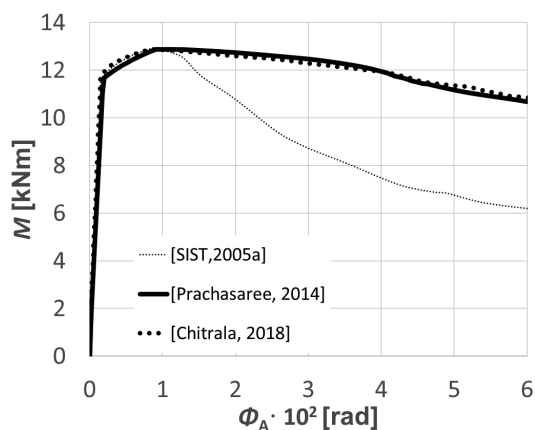
V zvezi z modelom [Prachasaree, 2014], kot smo pojasnili že v poglavju 3.4, σ - ϵ krivulj sami žal ne moremo točno izračunati. Lahko pa kot približek uporabimo katero od krivulj, ki so jih za različne možne vrednosti f_{cm} izračunali avtorji modela, če te krivulje povzamemo iz njihovega članka v diskretni obliki (krivulje so prikazane tudi na sliki 2 tega članka). Za zajem točk krivulj v tem članku uporabimo program Dagra [BLS, 2019]. Izberemo krivulji za vrednosti $f_{cm} = 30$ MPa in $f_{cm} = 45$ MPa, njune točke pa medsebojno smiselno interpoliramo, tako da dobimo oceno krivulje za trdnost $f_{cm} = 37$ MPa.

Primerjavo vseh materialnih krivulj, ki jih implementiramo v analizah tega poglavja, povzema slika 5, rezultati analiz pa so prikazani na slikah 6 in 7.

Primerjava rezultatov na slikah 6 in 7 pokaže, da daje model geopolimernega betona Chitrale in sodelavcev [Chitrала, 2018] v primerjavi z modelom [SIST, 2005a] zelo podoben rezultat v naraščajočem delu krivulj, tj. zagotovo tudi pri obtežbah, ki skladno z Evrokodom [SIST, 2004] odgovarjajo stalnim projektnim stanjem iz skupine MSN in projektnim stanjem iz skupine MSU. Za projektiranje konstrukcij iz takšnih betonov gle-



Slika 6. Obtežna sila P v odvisnosti od navpičnega pomika v točki B Cranstonovega okvira ob implementaciji izbranih σ - ϵ modelov betona. Pozicija točke B je razvidna s slike 3.



Slika 7. Graf moment-rotacija za prečni prerez okvira v točki A ob implementaciji izbranih σ - ϵ modelov betona. Pozicija točke A je razvidna s slike 3.

de na omenjena stanja bi torej verjetno lahko uporabili kar določila, kot jih za konvencionalne betone podaja [SIST, 2005a]. Večje razlike v tem delu krivulj pa so pri betonih po modelu [Prachasaree, 2014], ki se kažejo kot bolj podajni.

V postkritičnem območju krivulj na slikah 6 in 7 se večje razlike kažejo pri obeh modelih geopolimernih betonov ([Chitrала, 2018] in [Prachasaree, 2014]). Zaključimo lahko, da so lahko konstrukcije iz geopolimernih betonov v primerjavi s konstrukcijami iz konvencionalnih betonov veliko ugodnejša alternativa tam, kjer so pomembne višje ravni rotacijske kapacitete prečnih prerezov, npr. na potresnih območjih.

5 SKLEP

Izčrpen pregled danes dostopne znanstvene in strokovne literature s področja sodobnih geopolimernih betonov, ki smo ga predstavili v prvem delu članka, kaže na nekatere pomembne prednosti tovrstnih betonov v primerjavi s konvencionalnimi betoni. V prvi vrsti velja izpostaviti njihov boljši okoljski odtis, ki ga pripisujemo dejstvu, da se pri proizvodnji tega materiala namesto portland cementa uporabljajo odpadki tehnoloških procesov iz drugih industrij, kot sta elektrofiltrski pepel in žlindra. K boljšemu vplivu na okolje pa prispeva tudi bistveno zmanjšana količina toplogrednih plinov, ki nastajajo pri proizvodnji in ki naj bi bila po ocenah nekaterih raziskovalcev nižja za kar 65–90 %. Nadalje velja omeniti tudi druge očitne prednosti geopolimernih betonov, kot so boljša odpornost proti nekaterim agresivnim vplivom okolja, boljša odpornost proti zelo visokim temperaturam (npr. pri požaru) in prednosti v smislu mehanskega (σ - ϵ) odziva. Slednjemu smo se posvetili v drugem delu članka. Tu smo analizirali primer armiranobetonskega okvira, ki smo ga obremenjevali do porušitve. Analizo smo najprej izvedli ob predpostavki, da je konstrukcija grajena iz konvencionalnega betona, ki ga lahko opišemo z materialnim modelom iz SIST EN 1992-1-1, dobljene rezultate pa validirali s pomočjo eksperimentalnih rezultatov, ki so za tak okvir na voljo v dostopni literaturi. Nato smo numerično analizo izvedli še ob predpostavki, da je okvir grajen iz geopolimernih betonov, ki jih lahko opišemo z izbranimi modeli, predstavljenimi v predhodnih poglavjih članka. Primerjava rezultatov vseh analiz je pokazala, da dajejo pri obravnavanem okviru nekateri modeli geopolimernih betonov v primerjavi z modelom konvencionalnega betona iz SIST EN 1992-1-1 zelo podoben rezultat pri obtežbah, ki skladno s SIST EN 1990 odgovarjajo stalnim projektnim stanjem iz skupine MSN in projektnim stanjem iz skupine MSU. Za projektiranje konstrukcij iz takšnih geopolimernih betonov glede na omenjena projektna stanja bi bila določila in računске metode SIST EN 1992-1-1 zato uporabna kar v svoji izvirni (nemodificirani) obliki. Pri drugih modelih geopolimernih betonov, ki smo jih implementirali v analizo opazovanega okvira, pa so bili zaključki podobni, a z opozorilom, da bi bilo treba nekoliko prilagoditi kontrole MSU. Pri teh bi bilo v primerjavi s konstrukcijami iz konvencionalnih betonov treba računati vsaj z nekoliko nižjim elastičnim modulom betona, podajnost konstrukcije pa bi bila zato večja. Pri vseh uporabljenih modelih geopolimernih betonov pa so se zelo očitne razlike pokazale v območju postkritične nosilnosti okvira.

Ugotovitev napeljuje k zaključku, da so lahko konstrukcije iz geopolimernih betonov veliko ugodnejša alternativa tam, kjer so pomembne višje ravni rotacijske kapacitete prečnih prereзов, npr. na potresnih območjih. Za trdnjšo potrditev sklepa pa bodo seveda potrebne nadaljnje obsežnejše eksperimentalne in podporne numerične raziskave.

Opozoriti velja, da odpadni materiali, ki se uporabljajo za izdelavo mešanic geopolimernih betonov, vsebujejo tudi snovi (npr. težke kovine), ki bi ob morebitnem sproščanju v okolje lahko neugodno vplivale na zdravje ljudi. Vendar pa raziskovalci predvidevajo, da se zaradi nizke prepustnosti materiala škodljivi elementi fizično ujamejo v porah betonske matrice ali pa se v betonski mešanici kemijsko povežejo. Prve raziskave s tega področja, ki smo jih omenili v članku, temu pritrjujejo, v kolikor se v betonski mešanici uporabi elektrofitrski pepel in/ali žlindra, ne pa metakaolin in kaolin. Zagotovo pa bodo v prihodnosti v zvezi s tem potrebne obsežnejše dodatne raziskave.

6 ZAHVALA

Delo P. Češarka in J. Č. Kolšek je bilo opravljeno v okviru raziskovalnih programov P2-0158 in P2-0260, ki ju financira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS).

7 PRISPEVKI AVTORJEV

P. Češarek: pregled literature, pisanje članka, numerične analize, metodologija, konceptualizacija

K. Hrobat: pregled literature, pisanje članka

J. Č. Kolšek: pregled literature, pisanje članka, numerične analize, metodologija, konceptualizacija

8 LITERATURA

Abdullah, M. M. A. B., Kamarudin, H., Binhussain, M., Nizar, K., Ibrahim, W. M. W., Mechanism and Chemical Reaction of Fly Ash Geopolymer Cement-A Review. *Asian Journal of Scientific Research*, 1(5), 247-253, 2011.

Albitar, M., Mohamed Ali, M.S., Visintin, P., Experimental study on fly ash and lead smelter slag-based geopolymer concrete columns, *Construction and Building Materials*, 141, 104-112, 2017.

Alrshoudi, F., Abbas, H., Abadel, A., Albidah, A., Altheeb, A., Al-Salloum, Y., Compression behavior and modeling of FRP-confined high strength geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 283, 1-11, 2021.

Aslani, F., Thermal Performance Modeling of Geopolymer Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(1), 2016.

BLS, Dagra: the data digitizer, Version 2.0.19152. 601, Blue Leaf Software, 2019.

Bažant, Z., Pan, J., Pijaudier-Cabot, G., Softening in reinforced concrete beams or frames,

Journal of Structural Engineering, 113, 2333-2347, 1987.

Bratina, S., Saje, M., Planinc, I., On materially and geometrically non-linear analysis of reinforced concrete planar beams, *International journal of solids and structures*, 41 (24-25), 7181-7207, 2004.

Chitralla, S., Jadaprolu, G. J., Chundupalli, S., Study and predicting the stress-strain characteristics of geopolymer concrete under compression, *Case Studies in Construction Materials*, 8, 172-192, 2018.

Collins, M. P., Mitchell, D., Prestressed concrete structures, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1991.

Collins, M. P., Mitchell, D., MacGregor, J. G., Structural design considerations for high-strength concrete. *Concrete International*, 5(5), 27-34, 1993.

Cong, X., Zhou, W., Elchalakani, M., Experimental study on the engineering properties of alkali-activated GGBFS/FA concrete and constitutive models for performance prediction, *Construction and Building Materials*, 240, 1-21, 2020.

Cranston, W. B., Tests on reinforced concrete frames, 1: Pinned portal frames. Technical report TRA/392, Cement and Concrete Association, London, 1965.

CSI, SAP2000, Structural analysis and design, Version 21.0.2, Computers & Structures, Inc., 2021.

Davidovits, J., Geopolymers - inorganic polymeric new materials, *Journal of Thermal Analysis*, 37, 1633-1656, 1991.

DBMR, Global Geopolymer Market - Industry Trends and Forecast to 2028, <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-geopolymer-market>, Data Bridge Market Research, 2022.

Desayi, P., Krishnan, S., Equation for the stress-strain curve of concrete, *Journal of American Concrete Institute*, 61, 345-35, 1964.

Filak, A., A new concept for offshore turbine tower construction, <https://www.windsystemsmag.com/a-new-concept-for-offshore-turbine-tower-construction/>, *Wind Systems*, 2022.

Ganesan, N., Abraham, R., Deepa Raj, S., Sasi, D. Stress-strain behaviour of confined geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 73, 326-331, 2014.

GCCA, Cement and concrete around the world, <https://gccasociation.org/concretefuture/cement-concrete-around-the-world/>, Global Cement and Concrete Association, 2022.

Haider, G. M., Sanjayan, J. G., Ranjith, P. G., Complete triaxial stress-strain curves for geopolymer, *Construction and Building Materials*, 69, 196-202, 2014.

Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, M. J., Rangan, B.V., The stress-strain behaviour of fly ash-based geopolymer concrete, *Developments in Mechanics of Structures & Materials, Proceedings of the 18th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials*, Perth, Australia, 2004.

Hardjito, D., Rangan, B. V., Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete, *Research Report*

GC 1, Curtin University of Technology, Faculty of Engineering, Perth, Australia, 2005.

Hassan, A., Mohammed, A., Shariq, M., Use of geopolymers concrete for a cleaner and sustainable environment – A review of mechanical properties and microstructure. *Journal of Cleaner Production*, 223, 704-728, 2019.

Hassan, A., Mohammed, A., Shariq, M., A review of properties and behaviour of reinforced geopolymer concrete structural elements – A clean technology option for sustainable development. *Journal of Cleaner Production* 245, 1-15, 2020.

Hočevár, A., Vpliv vrste cementa na sulfatno odpornost betona, diplomska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2007.

Hren, M., Karakterizacija korozijskih procesov jekla v mešanih cementih v prisotnosti kloridov, doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2019.

Hrobat, K., Materialni modeli sodobnih geopolimernih betonov za računske analize gradbenih konstrukcij, diplomska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2022.

Hutagi, A., Khadiranaikar, R. B., Flexural behavior of reinforced geopolymer concrete beams, *International Conference on Electrical, Electronics and Optimization Techniques, ICEEOT 2016*, Chennai, India, 2016.

Lingyu, T., He, D., Zhao, J., Wang, H., Durability of geopolymers and geopolymer concretes: A review, *Reviews on advanced materials science*, 60 (1), 1-14, 2021.

Luna, Y., Querol, X., Antenucci, D., Jdid, E.-A., Fernandez, C., Vale, J., Immobilization of a Metallurgical Waste Using Fly Ash-Based Geopolymers, *V: World of Coal Ash, WOCA 07*, Northern Kentucky, USA, 2007.

MI, Geopolymer Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2023 - 2028), <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/geopolymer-market>, Mordor Intelligence, 2022.

Noushini, A., Aslani, F., Castel, A., Gilbert, R. I., Uy, B., Foster, S., Compressive stress-strain model for low-calcium fly ash-based geopolymer and heat-cured Portland cement concrete, *Cement and Concrete Composites*, 73, 136-146, 2016.

Noushini, A., Hastings, M., Castel, A., Aslani, F., Mechanical and flexural performance of synthetic fibre reinforced geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 186, 454-475, 2018.

Parshwanath, R. N., Nataraja, M. C., Lakshmanan, N., Dattatreya, J. K., Sabitha, D., Sulphuric acid resistant ecofriendly concrete from geopolymerisation of blast furnace slag, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 19(5), 357-367, 2012.

Popovics, S., A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete, *Cement and concrete research*, 3, 583-599, 1973.

Prachasaree, W., Limkatanyu, S., Hawa, A., Samakrattakit, A., Development of equivalent stress block parameters for fly-ash-based geopolymer concrete, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 8549-8558, 2014.

Sarker, P. K., Analysis of geopolymer concrete columns, *Materials and Structures*, 42, 715-724, 2009.

SIST, SIST EN 1990, Evrokod – Osnove projektiranja konstrukcij, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2004.

SIST, SIST EN 1992-1-1, Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2005a.

SIST, SIST EN 1992-1-2, Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij – 1-2. del: Splošna pravila - Projektiranje požarnovarnih konstrukcij, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2005b.

SIST, SIST EN 12390-3:2019, Evrokod 2: Preskušanje strjenega betona - 3. del: Tlačna trdnost preskušancev, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2019.

SIST, SIST EN 12390-13:2021, Evrokod 2: Preskušanje strjenega betona - 13. del: Določanje sekantnega modula elastičnosti pri tlačni obremenitvi, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2021.

Sofi, M., van Deventer, J. S. V., Mendis, P. A., Lukey, G. C., Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs), *Cement and Concrete Research*, 37, 251-257, 2007.

Sumajouw, M. D. J., Rangan, B. V., Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: Reinforced beams and columns, *Research Report GC 3*, Curtin University of Technology, Faculty of Engineering, Perth, Australia, 2006.

Sun, P. J., Wu, H. C., Chemical and freeze-thaw resistance of fly-ash-based inorganic mortars, *Fuel*, 111, 740-745, 2013.

Tang, Z., Hua, Y., Tam, V. W. C., Li, W., Uniaxial compressive behaviors of fly ash/slag-based geopolymeric concrete with recycled aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 104, 1-16, 2019.

Tang, Z., Li, W., Tam, V. W. Y., Yan, L., Mechanical performance of CFRP-confined sustainable geopolymeric recycled concrete under axial compression, *Engineering Structures*, 224, 1-17, 2020.

Thomas, R. J., Peethamparan, S., Alkali-activated concrete: Engineering properties and stress-strain behavior, *Construction and Building Materials*, 93, 49-56, 2015.

Thorenfeldt, E., Tomaszewicz, A., Jensen, J. J., Mechanical properties of high strength concrete and application in design, *Proceedings of the symposium on utilization of high strength concrete*, Tapir, Trondheim, 149-159, 1987.

Zhao, R. D., Yuan, Y., Cheng, Z. Q., Wen, T., Li, J., Li, F. H., Ma, Z. J., Freeze-thaw resistance of Class F fly ash-based geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 222, 474-483, 2019.