

Utjecaj optimizacije gustoće pakiranja čestica na smanjenje količine portlandcementa u betonu

Štefanec, Petra; Gabrijel, Ivan

Source / Izvornik: **8. simpozij doktorskog studija građevinarstva, 2022, 225 - 234**

Conference paper / Rad u zborniku

Publication status / Verzija rada: **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

<https://doi.org/10.5592/CO/PhDSym.2022>

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:884128>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-22**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)



Utjecaj optimizacije gustoće pakiranja čestica na smanjenje količine portlandcementsa u betonu

Petra Štefanec¹, izv. prof. dr. sc. Ivan Gabrijel²

¹Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, petra.stefanec@grad.unizg.hr

²Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, ivan.gabrijel@grad.unizg.hr

Sažetak

Kako bi se smanjila emisija CO₂ i štetan utjecaj na okoliš prilikom proizvodnje betona, važno je promišljati projektiranje betonskih mješavina. U praksi se smanjenje količine cementa ostvaruje primjenom cementa s mineralnim dodacima (punilima) ili rjeđe zamjenom dijela cementa mineralnim dodacima prilikom pripreve betona. Pri tome se ne ulazi u detaljnu karakterizaciju dodataka, kao ni analizu mogućih fizikalnih i kemijskih interakcija između čestica, zbog čega se često ne uspijeva realizirati stvarni potencijal zamjene dijela cementa. Fundamentalni pristup navedenom problemu moguće je ostvariti kroz teoriju pakiranja čestica. U ovom radu prikazane su postojeće metode optimizacije pakiranja čestica, dan je uvid u najvažnije parametre koji definiraju pakiranje čestica, te je naposljetku pregledom literature prikazano na koji se način u novije doba smanjuje količina portlandcementsa u betonskim mješavinama pomoću optimizacije gustoće pakiranja čestica.

Cljučne riječi: CO₂, gustoća pakiranja čestica, portlandcement, punilo

The influence of particle packing density optimization on the reduction of the amount of Portland cement in concrete

Abstract

In order to reduce the emission of CO₂ and the harmful impact on the environment during the production of concrete, it is important to think about the design of concrete mixes. In practice, the amount of cement is reduced by using cement with mineral additives (fillers) or, more rarely, by replacing part of the cement with mineral additives during the preparation of concrete. This does not go into the detailed characterization of the additives, nor the analysis of possible physical and chemical interactions between the particles, which is why the real potential of replacing part of the cement is often not realized. A fundamental approach to the mentioned problem can be realized through the theory of particle packing. In this paper, the existing methods of optimizing particle packing are presented, an insight is given into the most important parameters that define particle packing, and finally, a review of the literature shows how the amount of Portland cement in concrete mixes is reduced in recent times by optimizing the density of particle packing.

Key words: CO₂, packing density, particle packing, portland cement, filler

1 Uvod

Urbanizacija i porast broja stanovništva koji se očekuju tijekom slijedećih desetljeća, posebice u zemljama u razvoju, učinit će potražnju za cementom i betonom većom no ikada. Smatra se da će se globalna proizvodnja cementa između 2005. i 2050. godine povećati za 2,5 puta [1], a nedavne procjene pokazuju kako već sada uzrokuje oko 7 % ukupnih globalnih emisija CO₂ [2]. Betonske konstrukcije izložene su u svom uporabnom vijeku različitim destruktivnim utjecajima koji djelujući na materijale bitno određuju vijek trajanja objekata, a koji danas iznosi oko 50 godina. No, u praksi često već nakon 20 do 30 godina konstrukcije gube svoja trajnosna svojstva i potrebne su različite, često i vrlo skupe, intervencije kako bi se zadržala zadovoljavajuća uporabna svojstva. Projektiranje betonskih konstrukcija za minimalni vijek trajanja od 100 do 120 godina, kao i gradnja betonom, sa smanjenim udjelom cementa, imalo bi veliki pozitivan utjecaj u ekonomskom i ekološkom pogledu [3]. S obzirom na sigurno povećanje proizvodnje cementa, a znajući kako je za proizvodnju 1 tone portlandcementsa (PC) potrebno približno 1 GJ potrošene energije uz oslobađanje 1 tone CO₂ [4], potrebno je što više promišljati način projektiranja betonskih mješavina.

Strategije za smanjenje emisija CO₂ koje proizlaze iz proizvodnje cementa su: zamjena cementnog klinkera mineralnim dodacima, povećanje energetske učinkovitosti proizvodnog procesa, kao i korištenje alternativnih goriva u postrojenjima [5]. Zamjena određene količine cementnog klinkera u betonu može se postići na različite načine. Najčešće korišten način je optimizacija pakiranja agregata kako bi se minimizirao sadržaj šupljina u betonskoj mješavini. Kroz povijest razvijeni su mnogi modeli koji se mogu koristiti za izračunavanje što povoljnijih gustoća pakiranja čestica, ali većina tih modela u obzir uzima samo agregate i zanemaruje sitnije čestice.

Prema [6-8] dodavanje punila u sastav morta ili betona pokazalo je brojne pozitivne učinke. Prve zabilježene upotrebe punila kao zamjene za udio cementa su bile u dvije američke brane izgrađene početkom 20. st., a koje su i danas u upotrebi što dokazuje dobru trajnost [9]. Budući da ne zahtijevaju kalciniranje, upotreba punila je sve popularnija u projektiranju sastava betona, a tomu doprinosi i raznovrsnost materijala koji se mogu koristiti u tu svrhu. Najčešće se kao punila za beton koriste prahovi vapnenca, kvarca, mramora, recikliranog stakla ili betona, te nusproizvodi od spaljivanja različite biomase. Mineralni dodaci koji imaju čestice manje od čestica cementa također mogu djelovati kao punilo. Za razliku od veziva (cementa), punila su inertni sastojci u sustavu i djeluju na promjenu gustoće pakiranja čestica [10]. Međutim, propisi ograničavaju upotrebu većih količina materijala kao zamjene za cement, zahtijevajući određenu minimalnu količinu cementa u betonu kako bi se osiguralo da svojstva betona kao što su čvrstoća i trajnost budu zadovoljavajuća. Korištenjem tehnika optimizacije pakiranja čestica koje se danas koriste u proizvod-

nji betona, moguće je smanjiti količinu portlandcementsa u betonu bez negativne promjene njegovih svojstava [11]. Na ovaj način uspješno se može projektirati i sastav betona s niskim udjelom cementa. U ovoj vrsti betona vodocementni omjer je vrlo važan čimbenik jer čak i malo veća potreba mješavine za vodom može dovesti do smanjenja čvrstoće i trajnosti konačnog proizvoda. Zato je važno koristiti odgovarajuću metodu projektiranja koja može kontrolirati potrebu betona za vodom, a pri tome zadržati i ciljanu obradljivost u svježem stanju [12].

U ovom radu navode se postojeće metode optimizacije pakiranja čestica, dan je uvid u najvažnije parametre pomoću koji se optimizira raspodjela veličina čestica i koji direktno utječu na gustoću pakiranja čestica. Naposljetku, pregledom literature prikazano na koji način se u novije doba smanjuje količina portlandcementsa u betonskim mješavinama pomoću optimizacije gustoće pakiranja čestica.

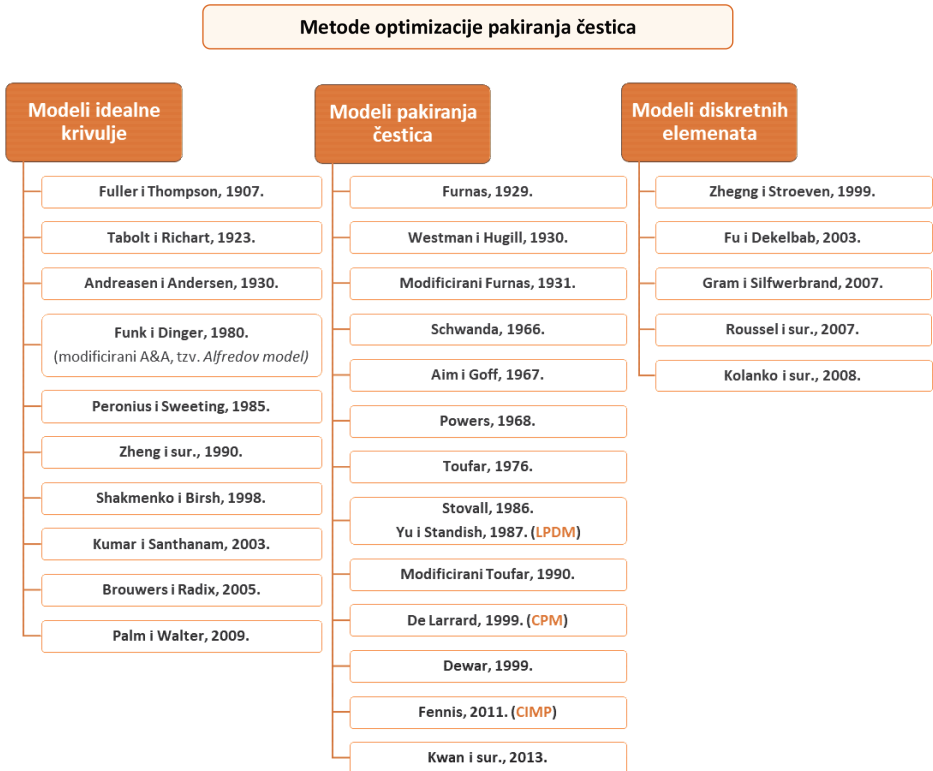
2 Metode optimizacije pakiranja čestica

Postoji mnogo različitih pristupa za optimizaciju pakiranja čestica uključujući empirijske metode, teorijske modele i eksperimentalne pristupe. Koncept pakiranja čestica agregata spominje se već u 19. st. kada je Féret objavio prvu studiju u kojoj navodi da izbor agregata utječe na konačnu čvrstoću betona.

Metode optimizacije pakiranja čestica mogu se podijeliti u tri skupine [12]:

- *Modeli idealne krivulje* - skupine čestica sa specifičnom raspodjelom veličina čestica, kombiniraju se na način da ukupna raspodjela veličina čestica smjese bude najbliža idealnoj krivulji.
- *Modeli pakiranja čestica* - analitički modeli pomoću kojih se izračunava ukupna gustoća pakiranja smjese na temelju geometrije kombiniranih skupina čestica.
- *Modeli diskretnih elemenata* - numerički modeli pomoću kojih se generira 'virtuelna' struktura čestica iz zadane raspodjele veličina čestica.

Na slici 1 prikazan je kronološki razvoj različitih metoda optimizacije pakiranja čestica [6, 12, 13, 14].



Slika 1. Shematski prikaz kronološkog razvoja metoda za optimizaciju pakiranja čestica i njihovih modifikacija

3 Gustoća pakiranja i strukturni efekti

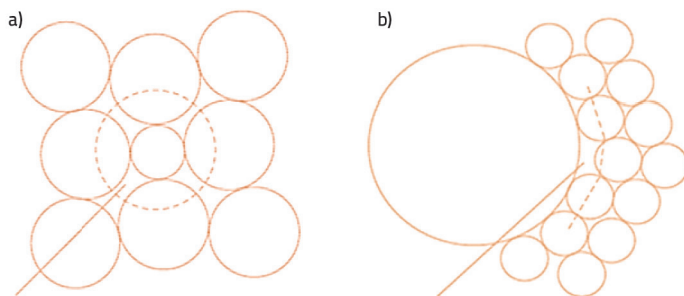
Svrha analitičkih modela pakiranja čestica je izračunati teorijsku gustoću pakiranja čestica u sustavu, a danas su modeli razvijeni dovoljno da se pomoću njih mogu izračunati gustoće pakiranja cijele betonske mješavine na temelju raspodjele veličine čestica i gustoće pakiranja materijala koji se koriste u toj smjesi. *Gustoća pakiranja čestica* u mješavini definira se kao volumen krutih tvari u ukupnom jediničnom volumenu, odnosno opisuje do kojeg stupnja je jedinični volumen ispunjen česticama [12, 15]. Glavni čimbenici koji utječu na gustoću pakiranja sustava su veličina, oblik i volumen čestica, njihova međusobna udaljenost, te geometrijske i elektrostatičke interakcije [5, 16].

Metodu suhog određivanja gustoće pakiranja čestica prvi je predložio De Larrard [15] i to za čestice agregata. Stoga, ova metoda ne uzima u obzir vodu prisutnu u mješavini betona, kao niti privlačne sile koje postoje između sitnih čestica prilikom dodavanja punila u mješavinu. Određivanje gustoće pakiranja sitnih čestica meto-

dom suhog pakiranja, bez prisustva vode, može rezultirati određenim problemima. Između čestica punila djeluju kohezivne sile (Van der Waalsove sile) tvoreći male aglomerate čestica. Zbog toga, za primjenu metode suhog određivanja gustoće pakiranja čestica u mješavini kada su prisutna punila, potrebno je koristiti i superplastifikator, kako bi se aglomeracija čestica minimalizirala. Wong i Kwan [17, 18] predložili su metodu mokrog određivanja gustoće pakiranja za proračun pakiranja sitnih praškastih materijala (poput letećih pepela, silicijske prašine i različitih punila). Korištenjem ove metode moguće je izmjeriti utjecaj vode, koristiti iste dodatke za betonsku mješavinu, kao i metode vibriranja i zbijanja koje će se koristiti u proizvodnji betona. To predstavlja stvarne uvjete kojima će sastavni materijali biti podvrgnuti tijekom proizvodnje [19].

Idealna pakiranja ponašaju se tako da se veće šupljine popunjavaju manjim česticama, a šupljine između njih bit će ponovno ispunjene još manjim česticama i itd. [13]. Postoje različiti strukturni efekti koji opisuju raspodjelu položaja čestica različitih veličina i mogu imati pozitivan ili negativan učinak na gustoću pakiranja. Do danas otkriveni i opisani strukturni efekti su: *filling effect*, *occupying effect*, *loosening effect*, *wall effect*, te *wedging effect* [17, 18, 19].

Pomoću *filling effect-a* i *occupying effect-a* dolazi do povećanja gustoće pakiranja kada se u sustav dodaju čestice (punila) čija je srednja veličina manja od srednje veličine čestica cementa. Ovi efekti djeluju na način da se u binarnom sustavu optimizira volumni udio sitnih i/ili krupnih čestica i time se postiže maksimalna moguća gustoća pakiranja čestica. Međutim, povećanje gustoće pakiranja koje uzrokuju ova dva efekta narušiti mogu *loosening effect* i *wall effect*, koji djeluju na sustav tako da smanjuju gustoću pakiranja čestica [17].

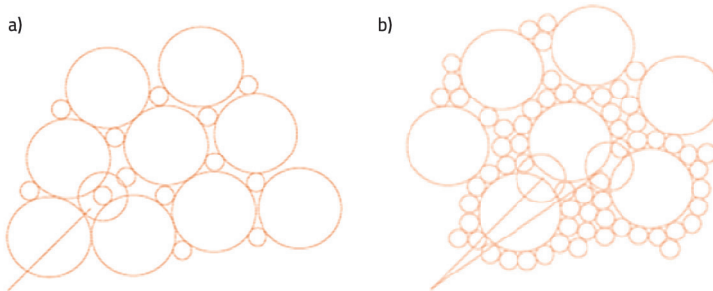


Slika 2. Shematski prikaz: a) *loosening effect*; b) *wall effect* [17]

Loosening effect nastaje kada su krupne čestice dominantne, a sitne čestice nisu dovoljno male da stanu u šupljine između krupnih čestica. Tada punjenje šupljina malim česticama "labavi" pakiranje krupnih čestica (slika 2.a). Kada su sitne čestice dominantne nastaje *wall effect*, zato što krupne čestice nisu dovoljno velike. Tada te krupne čestice osim što zauzimaju čvrsti volumen umjesto poroznog volumena

sitnih čestica, stvaraju dodatne šupljine na kontaktnim mjestima krupnih i sitnih čestica (slika 2.b).

Strukturni efekti ovise o omjeru veličine sitnih i krupnih čestica, stoga kada je omjer veličine manji, efekti su slabije izraženi i obrnuto. Ovisnost gustoće pakiranja o volumenskom udjelu sitnih čestica zapravo nije linearna, posebno u točki optimalnog sastava [15, 21]. Zbog toga dolazi do razlike između eksperimentalne i teorijske gustoće pakiranja, a kako bi se ove nepodudarnosti svele na minimum Kwan i sur. predložili su novi strukturni efekt - *wedging effect* [18, 20].



Slika 3. Shematski prikaz a) *wedging effect* (kada su krupne čestice su dominantne); b) *wedging effect* (kada su sitne čestice su dominantne) [17]

Wedging effect može nastati na dva načina. Kada su krupne čestice dominantne, sitne čestice se mogu "zaglaviti" između njih umjesto da popune šupljine među njima. To rezultira pomicanjem krupnih čestica u sustavu, a time i smanjenjem gustoće pakiranja (slika 3.a). S druge strane, kada su sitne čestice dominantne, a pojedine krupne čestice smještene su iznimno blizu jedna drugoj, to onemogućuje stvaranje potpunih slojeva sitnih čestica između njih. Kao rezultat, pojavljuju se dodatne šupljine između krupnih čestica, odnosno dolazi do prividnog "klinanja" sloja sitnih čestica u kontaktu s krupnim česticama (slika 3.b).

Napredniji modeli pakiranja čestica uzimaju u obzir postojanje strukturnih efekata. U većini modela to su *loosening effect* i *wall effect* čiji se učinak uračunava u obliku *loosening effect parametra* i *wall effect parametra*. Zato se takvi modeli mogu nazvati - modelima s dva parametra.

Modifikacijom ovih modela, znanstvenici su pokušavali unaprijediti shvaćanje modela pakiranja čestica. Tako su Yu i sur. razmatrali učinak oblika čestica i apsolutne veličine čestica na gustoću pakiranja (što je od posebne važnosti kada se u sustav dodaju sitne čestice poput punila koje mogu aglomerirati). Također, de Larrard je modificirao 2-parametarski model Stovalla i sur. i time kreirao najpoznatiji model pakiranja čestica – *model kompresivnog pakiranja* (CPM). On je u svoj model uveo indeks zbijanja, kako bi se u obzir uzeo učinak zbijanja tijekom miješanja i procesa pakiranja na gustoću pakiranja (uvođenjem indeksa zbijanja CPM bi se trebao svr-

stavati u zasebnu klasu modela). Uvođenjem efekta uklinjanja nastao je dodatni parametar i time je razvijen model pakiranja čestica s *tri parametra*. Iako ovaj model još ne uzima u obzir parametre kao što su oblik čestica, apsolutna veličina čestica, učinak zbijanja i pakiranja, njegova modifikacija će biti vrlo korisna za optimizaciju betonske mješavine [17, 18, 20].

4 Istraživanja smanjenja udjela PC optimizacijom gustoće pakiranja čestica

Posljednjih godina povećano je zanimanje za optimizaciju pakiranja čestica u različitim inženjerskim područjima, a u betonskoj industriji naglasak je na smanjenju količine portlandcementsa u betonskim mješavinama. U istraživanjima izdvojenim u ovom poglavlju, ostvareni su zamjetni pomaci u smanjenju količine portlandcementsa i zamjena njegova udjela sa različitim punilima u cementnoj pasti, mortu ili betonu.

Fennis [11] je provela ispitivanje na šesnaest cementnih pasti pripremljenih od portlandcementsa, različitih postotaka silicijske prašine i superplastifikatora. U radu je korišteno projektiranje pomoću CPM, a eksperimentalni rezultati pokazali su kako se gustoća pakiranja čestica može povećati za više od 10 %, kao i da se potreba za vodom može smanjiti dodavanjem punila u sastav cementne paste. Također, istaknuto je kako se cementne paste, mortovi i betoni sa smanjenim udjelom cementa, mogu projektirati samo s punilima koja povećavaju reaktivnost cementa. Fennis [22] je provela ispitivanja na tri betonske mješavine pripremljene od portlandcementsa s dodatkom troske visoke peći, letećeg pepela i silicijske prašine. Kao agregat korišteni su riječni agregati. Prema dobivenim rezultatima optimizacija pakiranja čestica pozitivno je utjecala na svojstva betona kao što su skupljanje i puzanje. Ispitivanja električne otpornosti pokazala su da povećana gustoća pakiranja i smanjena potražnja za vodom dovode do gušće mikrostrukture betona. Ovaj eksperiment pokazao je kako je moguće pažljivim projektiranjem sastava betona uštediti i do 50 % portlandcementsa. Chan [18] je u svom radu procijenio točnost i primjenjivost CPM, 2-parametraskog modela i 3-parametraskog modela. Usporedio je teorijska predviđanja gustoće pakiranja s eksperimentalnim podacima gustoće pakiranja za binarne mješavine. Utvrdio je da kada je omjer veličina sitnih/kрупnih čestica veći od 0,65, sva tri modela pakiranja su dovoljno točna. Međutim, kada je omjer veličine ovih čestica manji od 0,65, 2-parametraski model i CPM podcjenjuju ili precjenjuju gustoću pakiranja. Kao najtočniji pokazao se 3-parametraski model.

Betonske konstrukcije često su izložene agresivnom okolišu kao što je morski okoliš. Castro [13] je u svom radu koristio koncept pakiranja čestica u svrhu projektiranja specijalnih betona. Betonska mješavina koja je uspoređena s referentnom (konvencionalnom) mješavinom, pripravljena je od portlandcementsa, drobljenog kamena

balzatnog podrijetla, prirodnog pijeska i silicijske prašine. Nakon provedenih ispitivanja utvrđeno je kako je koeficijent kapilarnog upijanja vode za novo projektirani beton bio znatno niži od onoga za referentni beton, što ukazuje na iznimno nisku propusnost. Dubina prodiranja kloridnih iona također se smanjila nakon ciklusa vlaženja i sušenja u otopini NaCl-a. Herman [19] je pomoću analitičkog modela pakiranja čestica (CPM) pokušao usporediti teorijsko i eksperimentalno slaganje rezultata za dodavanje određenog udjela silicijske prašine u cementnim pastama. Teorijski rezultati pokazuju kako je moguće koristiti silicijsku prašinu u količinama od 18 do 20 % s obzirom na masu cementa, što je visoko s obzirom na preporuke u literaturi od 15 %. Ipak, ovaj model pakiranja ne uzima u obzir učinak velike specifične površine silicijske prašine na aglomeraciju čestica i potražnju za vodom. Stoga se gustoća pakiranja predviđena pomoću CPM ne može koristiti kao jedini parametar u određivanju optimalne količine silicijske prašine u cementnim pastama.

Juhrat [23] je predstavio praktičnu kombinaciju metoda nazvanu "Mi-S-S" (*mixing-shear-resistance, spread flow, strength test*). Kako bi se smanjila količina cementa, u cementne paste i mortove dodana su *ekopunila* i *mikropunila*. U odnosu na referentne mješavine postignuta je visoka gustoća pakiranja, željena obradljivost, dovoljna tlačna čvrstoća i smanjenje utjecaja na okoliš. Utvrđen je optimalni mogući sadržaj punila od 20 do 40 % s obzirom na masu cementa. Tešić [24] je u svom radu provela istraživanje koristeći Fullеров model, a raspodjela veličina čestica odabrana je pomoću Funka i Dingera. Projektirano je deset betonskih mješavina s različitim udjelima vapnenačkih punila, uz dodatak superplastifikatora i riječnog agregata u 3 različite frakcije. Omjer vode i cementa za svaku mješavinu je bio konstantan, a omjer vode i praha se smanjivao povećanjem zamjene količine cementa. Eksperimentalna ispitivanja provedena su na svježem i očvrslom betonu. Rezultati su pokazali da je moguće povećati tlačnu čvrstoću betona smanjenjem 45 % cementa, no daljnja istraživanja trebaju biti usmjerena na poboljšanje obradljivosti koja se djelomično može nadoknaditi boljim izborom raspodjele veličine čestica agregata.

5 Zaključak

Posljednjih desetljeća interes za optimizaciju pakiranja čestica porastao je u području tehnologije betona razvojem novih vrsta betona. Kroz povijest su postavljeni snažni temelji koji su pokazali kako postoji mogućnost poboljšanja betonskih mješavina uređenjem strukture čestica koje su interakciji i time se značajno poboljšava učinkovitost korištenja cementa uz potencijal za smanjenje emisija CO₂. S češće razmatranog projektiranja pakiranja čestica agregata, istraživanja se danas sve više usmjeravaju na učinkovito projektiranje pakiranja čestica punila. Gustoća pakiranja čestica u betonu je važna jer će manji omjer šupljina između čestica dovesti do smanjene potražnje za vodom. To znači da se u mješavini može koristiti manje cementa

uz zadržavanje konstantnog vodocementnog omjera. Iako je za različite vrste punila dosadašnja praksa ograničavala upotrebu istih u rasponu od 5 do 30 %, korištenjem različitih modela za projektiranje pakiranja čestica, znanstvenici su dokazali kako je moguće, ovisno o vrsti, dodatno povećati količinu punila. Danas je uz pravilno projektirani sastav betonske mješavine s različitim punilima ili nusproizvodima, moguće izbjeći negativne učinke smanjenja količine portlandcimenta i pomoću odabranog modela pakiranja čestica postići ciljanu obradljivost u svježem stanju, čvrstoću u određenoj dobi, maksimalnu gustoću, specificiranu trajnost i stabilnost dimenzija krajnjeg proizvoda. Cilj budućih istraživanja je pomoću najpogodnijeg modela pakiranja čestica, projektirati sastav betona u kojemu će se koristiti lokalno dostupna punila i na taj način proizvesti beton sa smanjenim udjelom cementa, a koji zadovoljava postojeće standarde za građenje u morskom okolišu.

Literatura

- [1] The cement sustainability initiative (CSI), Cement industry energy and CO₂ performance: getting the numbers right, pp. 44, *CSI report*, 2009.
- [2] Andrew, R.M., Global CO₂ Emissions from Cement Production, *Earth System Science Dana* (2018), 10:195-217
- [3] The Cement Sustainability Initiative, Recycling Concrete. World Business Council for Sustainable Development, *Report*, 2009.
- [4] Mehta, P.K., Reducing the Environmental Impact of Concrete, *Concrete International* 23 (2001) 10, pp. 61-66
- [5] Damineli, B.L., Kemeid, F.M., Aguiar, P.S., John, V.M., Measuring the eco-efficiency of cement use, *Cem. Concr. Compos.* 32 (2010), pp. 555–562
- [6] Vogt, C. Ultrafine particles in concrete, Influence of ultrafine particles on concrete properties and application to concrete mix design, School of Architecture and the Built Environment, *Doctoral thesis*, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2010.
- [7] Ojha, P.N., Mittal, P., Singh, A., Singh, B., Arora, V.V., Optimization and evaluation of ultra high-performance concrete, Technical paper, *Journal of Asian Concrete Federation Vol. 6*, No. 1 (2020), pp. 26-36
- [8] He, H., Courard, L., Particle Packing Density and Limestone Fillers for More Sustainable Cement, *Key Engineering Materials Vol. 517* (2012), pp. 331-337, Switzerland
- [9] Scrivener K.L., Johnb, V.M., Gartner E.M., Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry, *Cement and Concrete Research*, 2018.

- [10] Bjegović, D., Štirmer, N., *Teorija i tehnologija betona*, University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, Croatia, 2015.
- [11] Fennis, S.A.A.M., Walraven, J.C., den Uijl, J.A., The use of particle packing models to design ecological concrete, *HERON Vol. 54*, No. 2/3 (2009)
- [12] Fennis, S.A.A.M, Design of Ecological Concrete by Particle Packing Optimization, *Doctoral thesis*, Delft University of Technology, Netherlands, 2011.
- [13] Castro, A., Ferreira, F., Effect of particle packing in the durability of high-performance concretes, *Revista Ingeniería de Construcción Vol 31*, No. 2 (2016), Department of Civil Engineering, Federal University of São Carlos, Brazil
- [14] Yousufa, S., Sanchezb, L.F.M., Shammeha, S.A., The use of particle packing models (PPMs) to design structural low cement concrete as an alternative for construction industry, *Journal of Building Engineering 25* (2019)
- [15] de Larrard, F., *Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach*, E & FN Spon, London, UK, 1999.
- [16] de Grazia, M.T. et al., Investigation of the use of continuous particle packing models (PPMs) on the fresh and hardened properties of low-cement concrete (LCC) systems, *Construction and Building Materials 195* (2019), pp. 524–536
- [17] Wong, V., Chan, K.W., Kwan, A.K.H., Applying Theories of Particle Packing and Rheology to Concrete for Sustainable Development, *Organization, technology and management in construction Vol. 5* (2013), pp. 844-851
- [18] Chan, K.W., Kwan, A.K.H., Evaluation of particle packing models by comparing with published test results, *Particuology* (2014)
- [19] Hermann, A., Langaro, E.A., Lopes da Silva, S.H., Klein, N.S., Particle packing of cement and silica fume in pastes using an analytical model, *IBRACON Structures and Materials Journal Vol. 9*, No 1 (2016), pp. 48-65
- [20] Koutný, O., Kratochvíl, J., Švec, J., Bednárek, J., Modelling of packing density for particle composites design, *Procedia Engineering 151* (2016), pp. 198–205
- [21] Kwan, A.K.H., Chan, K.W., Wong, V., A 3-parameter particle packing model incorporating the wedging effect, *Powder Technol. 237* (2011) 172–179
- [22] Fennis, S.A.A.M., Walraven, J.C., Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design, *HERON Vol. 57*, No. 2 (2012)
- [23] Juhart J. et al., Functional and environmental performance optimization of Portland cement-based materials by combined mineral fillers, *Cement and Concrete Research 122* (2019), pp. 157-178
- [24] Tešić, K., Marinković, S., Savić, A., Influence of cement replacement with limestone filler on the properties of concrete *Building Materials and Structures 64* (2021), pp. 165-170