Podobnost granulometrijskog sastava agregata za noseće slojeve kolovozne konstrukcije

MARIJANA B. NIKOLIĆ IVANOVIĆ, Institut za puteve a.d, Beograd

OLIVERA M. ĐOKIĆ, Institut za puteve a.d, Beograd

VLADIMIR D. MILIĆEVIĆ, Institut za puteve a.d, Beograd

SUZANA LJ. STEFANOVIĆ, Institut za puteve a.d, Beograd

BRATISLAV V. MILIĆ, Saobraćajni institut CIP, Beograd

Stručni rad

UDC: 625.023

DOI: 10.5937/tehnika2103291N

Ocena podobnosti granulometrijskog sastava drobljenih kamenih agregata (DKA) za noseće slojeve kolovoznih konstrukcija u Republici Srbiji vrši se na osnovu propisanog graničnog pojasa, stepena neravnomernosti (Cu), koeficijenta zakrivljenosti (Cz), procenta učešća sitnih čestica i čestica manjih od 0,02 mm. Sa druge strane, standardi koji definišu zahteve kvaliteta agregata i mešavina za izgradnju puteva, SRPS EN 13242 i SRPS EN 13285, uvode znatno drugačiji pristup za ocenu podobnosti agregata. Definisane su kategorije. Svaka kategorija podrazumeva određeni granični pojas, dozvoljena odstupanja na sitima, dozvoljene razlike prolaza na susednim sitima. Kategorije se definišu u zavisnosti od područja primene. Za sedam DKA 0/31.5 mm korišćenih pri izgradnji Koridora XI, izvršena je uporedna analiza podobnosti granulometrijskog sastava prema zahtevima postojećih tehničkih specifikacija (TS) JP „Putevi Srbije“ (JPPS) i navedenih SRPS EN standarda. Analizirane krive ispunjavaju zahteve navedenih tehničkih specifikacija, a po kategorijama variraju od najstrožih mešavina normalnog granulometrijskog sastava kategorije GA do otvorenih mešavina kategorije GP. Zaključeno je da je princip baziran na definisanju dozvoljenih tolerancija procenta prolaza na sitima i između susednih sita, na terenu pogodniji za kontrolu granulometrijskog sastava i dobre granulisanosti agregata. Tehničke specifikacije treba prilagoditi ovom pristupu.

Ključne reči: granulometrijski sastav, drobljeni kameni agregati, evropske norme, kontrola kvaliteta

1. UVOD

Drobljeni kameni agregati (DKA) koriste se za izradu nevezanih i hidraulički vezanih nosećih slojeva kolovoznih konstrukcija. Ovi slojevi obezbeđuju strukturnu nosivost, stabilnost, otpornost na deformisanje, utiču na otpornost na prodor vlage usled nefunkcionalne drenaže. Uloga DKA i potrebna svojstva definisana su tipom kolovozne konstrukcije (kruta ili fleksibilna), kao i položajem sloja u konstrukciji. Izborom agregata adekvatnih karakteristika, mogu se dobiti slojevi visokih čvrstoća i modula [1].

Projektom kolovoznih konstrukcija (KK) definišu se potrebna svojstva materijala, u zavisnosti od saobraćajnog opterećenja, lokalno dostupnih materijala, kao i klimatskih uslova. Granulometrijski sastav je jedan

od najuticajnijih parametara na „ponašanje“ agregata u kolovoznoj konstrukciji. Granulacija agregata utiče na skoro svako važno svojstvo KK. Ona utiče na mehaničko - deformabilne karakteristike sloja, trajnost, ali takođe i na propustljivost, obradivost, otpornost na mraz [2], [3].

Podobnost granulometrijskog sastava za ugradnju DKA, određuje se na osnovu ispunjenosti zahteva tehničkih specifikacija (TS). U zavisnosti od projekta, najčešće zahtevani parametri su: propisani granični pojas, stepen neravnomernosti (Cu), koeficijent zakrivljenosti (Cz), procenat učešća sitnih čestica i čestica manjih od 0,02 mm. Uvođenjem evropskih standarda, nameću se novi zahtevi i način kontrole kvaliteta DKA.

Standardi koji definišu zahteve za agregate i nevezane mešavine za izgradnju puteva, SRPS EN 13242 [4] i SRPS EN 13285 [5], usvojeni su 2010. godine, odnosno 2012. godine. Oni uvode znatno drugačiji pristup za ocenu agregata. Definisani su tipovi granulometrijskog sastava za nevezane mešavine, a u okviru

Adresa autora: Marijana Nikolić Ivanović, Institut za puteve ad, Beograd, Bulevar Peka Dapčevića 45

e-mail: m.nikolic-ivanovic@highway.rs

Rad primljen: 01.04.2021.

Rad prihvaćen: 31.05.2021.

njih kategorije, dozvoljena odstupanja na normiranim sitima za kategorije, kao i dozvoljena razlika procenta prolaza između susednih sita. Tehničke specifikacije JP „Putevi Srbije“ (JPPS) izdanje iz 2018. godine, oslanjaju se na SRPS EN standarde. Međutim, u pogledu granulometrijskog sastava, nije u potpunosti izvršena implementacija zahteva standarda za agregate. Takođe, u upotrebi su i dalje TS JPPS izdanje iz 2009. godine, koje se oslanjaju na povučene SRPS standarde.

Zakon o građevinskim proizvodima propisuje kontrolu agregata prema harmonizovanim evropskim standardima (hEN). Prema studiji „Pregled sektora građevinske industrije Srbije koji je obuhvaćen evropskom Uredbom (EU) 305/2011 i očekivan uticaj na industriju“ [6], procene su da je potreban rok od dve do četiri godine za punu implementaciju i prilagođavanje proizvodnje prema hEN. Kako bi se sagledala razlika u zahtevima za kontrolu granulometrijskog sastava sa aspekta postojećih TS I navedenih SRPS EN standarda, urađena je uporedna analiza za sedam granulometrijskih krivih DKA 0/31,5 mm korišćenih za izgradnju autoputa E-763, sektor I.

Cilj rada je da se prikažu novine u pristupu, kao i razlike u parametrima kontrole granulometrijskog sastava koji se propisuju u dosadašnjoj praksi u odnosu na evropske standarde, a takođe da se ukaže na neophodnost dopune TS koje se oslanjaju na SRPS EN standarde.

2. GRANULOMETRIJSKI SASTAV AGREGATA

Granulometrijski sastav (GS) predstavlja prisustvo zrna određenih veličina (frakcija) u masi materijala [7]. Razlike u granulometrijskom sastavu često mogu da dovedu do značajno različitog ponašanja za isti tip agregata. Ovo je posledica razlika u pakovanju zrna i rasporedu šupljina, koji igraju najznačajniju ulogu u prenosu opterećenja preko kontakta zrna na zrna u agregatnom matriksu [8].

O uticaju različitih parametara granulometrijskog sastava na ponašanje agregata u KK postoje brojna istraživanja. Brown i Chan su odabirom agregata optimalne granulacije, koja daje maksimalnu zapreminsku težinu u zbijenom stanju, značajno smanjili kolotrage u nevezanim gornjim nosećim slojevima [9]. Barsdale i Itani su utvrdili dramatično smanjenje povratnog modula (MR) od 60%, kada sadržaj sitnih čestica poraste sa 0% na 10% [10]. U Minesoti (SAD) su, na primer, vršena istraživanja da li su propisani granični pojasevi, uspostavljeni na osnovu iskustva državnih agencija, povezani sa stvarnim mehaničkim performansama materijala. Na agregatima iz različitih izvora utvrđeno je da različiti granulometrijski sastavi agregata, koji pripadaju jednom graničnom pojasu, nemaju

jedinstvene veze sa povratnim modulima i čvrstoćom, naročito za materijale iz donjih nosećih slojeva [2]. Utvrđeno je, takođe, da je ključni granulometrijski parametar za mehaničko ponašanje odnos šljunka i peska (eng. gravel-to-sand ratio, G/S). Materijali koji ulaze u propisan pojas [11] sa istim G/S odnosom od oko 1,5, imaju slične čvrstoće na smicanje, bez obzira na maksimalno zrno, sadržaj sitnih čestica, vlažnost i maksimalnu zapremisku težinu. Granulometrijski sastav agregata takođe je presudan za postizanje minimalne poroznosti mešavine. Raspored pora ukoliko je nepovoljan, može povećati osetljivost na mraz [12]. Uticaj karakteristika materijala nevezanih nosećih slojeva znatno je veći kod fleksibilnih konstrukcija.

U zavisnosti od geologije (vrste i kvaliteta raspoloživih stenskih masa), klimatskih i ekonomskih uslova, svaka zemlja propisuje nacionalne tehničke specifikacije za zahtevani kvalitet agregata. U Holandiji, osim drobljenih materijala prirodnog porekla, u široj upotrebi su i industrijski otpad - različite vrste šljake, drobljenog betona, mešavina beton i opeka. U Finskoj, uslovi i debljine granularnih materijala direktno su u funkciji zaštite od mraza.

Zahtevi u pogledu količine sitnih čestica su vrlo restriktivni. Na Islandu, najčešće se upotrebljava prirodni šljunak (oko 92%) i oko 8% drobljeni kamen, uglavnom bazalt. Velika Britanija, kao i Francuska, dozvoljava upotrebu nevezanih zrnastih materijala za donji noseći sloj i posteljicu. U Španiji je upotreba materijala sa otvorenom granulacijom (eng. open graded) ograničena samo na puteve sa niskim saobraćajnim opterećenjem [13]. Ovi primeri navedeni su radi ilustracije vrsta materijala i tipova kolovoznih konstrukcija zastupljenih u različitim evropskim zemljama.

2.1 Parametri granulometrijskog sastava

Karakteristike granulometrijskog sastava agregata definisane su maksimalnom veličinom zrna, raspodelom zrna po veličini i količinom sitnih čestica [1]. Za opis GS krupnozrnih materijala upotrebljavaju se i numerički pokazatelji, stepen neravnomernosti ($C_u = d_{60}/d_{10}$) i stepen zakrivljenosti ($C_z = d_{30}/d_{10} \times d_{60}$), koji se određuju na bazi granulometrijske krive [7], [14].

Na osnovu ovih parametara imamo informaciju o granulometrijskoj raspodeli čestica u materijalu. Stepenn neravnomernosti (C_u) opisuje nagib granulometrijske krive, dok stepen zakrivljenosti (C_z) opisuje njen oblik. Kada je stepen zakrivljenosti u vrednostima između 1 i 3 ($1 \leq C_z \leq 3$), kriva ima dobar kontinuitet. Kod materijala kojima nedostaje neka frakcija (eng. gap graded), kriva pokazuje diskontinuitet i praktično je horizontalna između određenih tačaka.

Pre uvođenja EN standarda ispitivanje GS agregata najčešće je vršeno prema SRPS U.B1.018 (grupa standarda za geomehanička ispitivanja tla). Rezultati se prikazuju grafički na polulogaritamskom dijagramu ili tabelarno. Ovaj standard više je bio u upotrebi nego metoda suvog sejanja prema SRPS B.B8.029 (grupa standarda za kamene agregate), zbog zahteva za određivanje procenta prolaza na 0,02 mm (SRPS B.-B8.036). U kontroli GS agregata za tamponske slojeve, najmerodavniji je oblik granulometrijske krive, ukla-panje krive u granični pojas i procenat sitnih čestica. Propisani parametri kontrole (Cu, Cz), određuju se na osnovu grafika. Uvođenjem EN standarda za agregate, definisan je SRPS EN 933-1 [15], kao referentni za određivanje GS. Obavezan podatak je numerički prikaz rezultata. Grafički prikaz GS nije obavezan podatak. U slučaju isključivo numeričkog prikaza GS, nameće se i potreba za definisanjem drugih parametara u odnosu na koje bi se vršila kontola.

2.2. Tipovi granulometrijskog sastava agregata

Prema granulometrijskom sastavu, agregati se mogu podeliti na [12], [16]:

- Dobro granulisane (eng. Well/dense graded)
- Otvoreno granulisane (eng. Open graded)
- Diskontinualno granulisane (eng. Gap graded)
- Uniformno granulisane (eng. Uniformly graded)

Na slici 1 prikazani su različiti tipovi granulometrijskog sastava agregata.

Slika 1 - Prikaz različitih tipova granulometrijskog sastava: a) dobar, b) otvoren, c) diskontinualan, d) unforman (Izvor: [17])

a) Dobro granulisani materijali imaju ravnomernu zastupljenost svih frakcija. Karakteristike materijala sa ovim tipom granulometrijskog sastava su: ostvaren kontakt čestica na česticu, mali sadržaj šupljina, visoke zapreminske mase, niske propustljivosti, visoke stabilnosti [18].

b) Otvorena granulacija predstavlja GS koji sadrži mali procenat sitnog agregata. Ovo rezultira sa većim procentom šupljina u materijalu. Karakteristike ovog

tipa materijala su: malo je kontakta čestica na česticu; visok sadržaj šupljina; visoka propustljivost; mala, ali promenljiva zapreminska masa; visoka stabilnost [18].

c) Diskontinualni granulometrijski sastav predstavlja GS koji sadrži mali procenat čestica u srednjem rasponu. Ovo ima za posledicu da je sadržaj šupljina povećan. Karakteristike materijala sa ovim tipom GS su da nema kontakta zrno na zrno; srednja propustljivost; niža zapreminska masa; niska stabilnost. Materijali sa ovakvim granulacijama mogu biti podložni segregaciji tokom ugradnje [18].

d) Uniformni granulometrijski sastav odnosi se na granulacije koje sadrže najviše zrna u uskom rasponu veličina. Čestice imaju međusobni kontakt. Zapreminska masa je mala i promenljiva. Sadržaj šupljina je visok, a time i propustljivost. Stabilnost je niska [18].

Odabir tipa granulometrijskog sastava zavisi od potrebnih performansi krajnje mešavine/sloja.

3. ZAHTEVI ZA KVALITET

GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA DKA

Potrebna svojstva DKA zavise od njihove upotrebe, odnosno ranga puta, saobraćaja, položaja sloja u konstrukciji (donji ili gornji noseći sloj) i propisana su tehničkim uslovima projekta. Oni se najčešće oslanjaju na tehničke specifikacije JP „Putevi Srbije“ izdanja iz 2009. ili 2018. godine.

3.1. Tehničke specifikacije u Republici Srbiji

Za sedam granulometrijskih krivih DKA 0/31,5 mm, (M1 – M7/1), korišćenih za izgradnju E-763, sektor I, analizirana je podobnost GS prema zahtevima TS i SRPS EN standarda za kontolu agregata i nezvanih mešavina. Za projekat izgradnje E-763, zahtevi kvaliteta agregata, definisani su posebnim tehničkim uslovima uz projekte kolovoznih konstrukcija, gde je propisano da kvalitet materijala bude u skladu sa SRPS EN 13242:2007. U pogledu granulometrijskog sastava, nisu definisane kategorije propisane standardom, već stepen neravnomernosti i procenat zrna na 0,02 mm. Zavisno od deonice, zahtevano je Cu 8 – 50 ili Cu > 6 uz stepen zakrivljenosti Cz od 1 do 3. Kategorije prema SRPS EN 13242 definisane su kod dozvoljenog procenta sitnih čestica, oblika zrna, kao i mehaničkih osobina npr. koeficijent otpornosti na drobljenje.

Podobnost drobljenih kamenih agregata (DKA) 0/31,5 mm, određuje se ispitivanjem u akreditovanoj laboratoriji, na zahtev naručioca. U dosadašnjem periodu, u laboratorijama Instituta za puteve, najveći broj ovih zahteva odnosio se na ispitivanja prema opštim TS JPPS iz 2009. godine (ukoliko nije specificirano drugačije). Iz tih razloga, u radu je vršena ocena GS i prema ovim TS. Zahtevi kvaliteta za GS prikazani su u tabeli br. 1.

Tehničke specifikacije iz 2018. godine (prvo izdanje 2012. godine), oslanjaju se na SRPS EN standarde. Evropski standardi za svako svojstvo propisuju paletu kategorija. U ovim specifikacijama za svojstva propisane su kategorije, na primer: oblik zrna, otpornost na drobljenje, otpornost na smrzavanje.

U pogledu granulometrijskog sastava, osim za dozvoljeni procenat sitnih čestica, nisu definisane zahtevane kategorije. Za kontrolu GS propisani su parametri (Cu i P_{0,02}) koji su i ranije bili u praksi, odnosno pre usvajanja EN standarda, tabela br. 1. Ali, ove parametre, kao takve, EN standardi za agregate, ne definišu paletu kategorija.

Tabela 1. Zahtevi TS za granulometrijski sastav DKA 0/31,5 mm

Parametri	Opšti TS 2009 (SRPS standardi)	TS 2018 (SRPS EN standardi)
	Da	Da
Stepen neravnomernosti Cu	15 - 30	8 - 50
Učešće čestica < 0,08 mm	< 6%	-
Učešće čestica < 0,063 mm	-	f5, f8
Sadržaj zrna < 0,02 mm	-	≤3%

- nije propisano

Izvor: TS JPPS 2009. god., verzija 4 i 2018. godine, verzija 01

3.2. Zahtevi prema SRPS EN 13242 i SRPS EN 13285

Zahtevi kvaliteta za agregate koji se koriste u putogradnji za nevezane slojeve, definisani su u SRPS EN 13242 (agregati) [4] i SRPS EN 13285 (nevezane mešavine) [5]. Oni se međusobno prepliću i dopunjuju. Način kontrole, značajno je drugačiji u odnosu na dosadašnju praksu u Srbiji.

3.2.1. Tipovi mešavina i deklarisanu vrednost proizvođača prema SRPS EN 13285

Novina koja se uvodi je da je proizvođač obavezan da deklarise granulometrijski sastav agregata. Osnovna oznaka je veličina agregata d/D, gde d predstavlja veličinu donjih sita (podmerna zrna), odnosno D gornjih sita (nadmerna zrna), na primer 0/31,5 mm.

Za nevezane mešavine, definisane su kategorije za dozvoljena odstupanja nadmernih zrna (OC), odnosno kategorije za maksimalni (UF) i minimalni sadržaj sitnih čestica (LF). U pogledu granulometrijskog sastava razlikuju se tri tipa mešavina :

- normalne, obuhvataju 3 kategorije (GA, GB i GC)

- otvorene, obuhvataju 2 kategorije (GO i GP)
- druge, obuhvataju 8 kategorija (Gs, GE, GU, GV, GN, GW, GWW, GT)

Za sve kategorije, definisan je poseban granični pojas, osim za GN, koja nema propisanih zahteva (eng. no requirement). Kategorije Gs, GE, GU, GV nemaju zahtevani procenat prolaza na više normiranih sita ili ne definišu polja za gornje noseće slojeve (eng. base), tako da u radu nisu analizirane. Treba imati u vidu da su ovim standardima osim prirodnih (mehanički obrađenih), obuhvaćeni i proizvedeni (industrijski obrađeni) i reciklirani agregati (prethodno korišćeni u građevinarstvu). Za sve kategorije normalnih i otvorenih mešavina, kao i za GW i GWW iz grupe „drugih mešavina“, pored definisanog „opšteg“ polja, propisani su i „unutrašnji“ granični pojasevi za proizvođače, unutar kojih treba da se nalazi deklarisan granulometrijski sastav. Takođe, kod ovih kategorija definisana je i tolerancija procenta prolaza na normiranim sitima, kao i dozvoljene razlike prolaza između susednih sita. Za kategoriju GT definisan je samo „opšti“ pojas, odnosno nije propisan dodatni za proizvođače.

Aneks A SRPS EN 13285 (Informativni), objašnjava kako se koristi deklarisanu vrednost proizvođača (slika 2). Na primer, projektant u projektu propisuje „opšte“ polje GA čije su granice definisane standardom (6 - eng. Overall grading range). Unutar ovoga polja, nalazi se granično polje za deklarisanu vrednost GS proizvođača (5 - eng. Manufacturer's declared value grading range), takođe definisano standardom. Proizvođač deklarise vrednost tipičnog granulometrijskog sastava - srednja vrednost na bazi šestomesečnih prosejavanja (1 - eng. Manufacturer's declared value, MDV).

Ova vrednost ima svoju ± toleranciju koja predstavlja opseg variranja proizvođača (4 - eng. Manufacturer's typical grading range). U periodu od 6 meseci 90% rezultata granulometrijskog sastava proizvođača treba da bude u ovom polju (4). Ostalih 10% rezultata može da bude van, ali u okviru dozvoljenih tolerancija za deklarisanu kategoriju GS i relevantnu MDV. Granulometrijski sastav van zadatog polja (6) nije dozvoljen (7).

Slika 2 - Primer korišćenja deklarisanu vrednosti proizvođača (Izvor : SRPS EN 13285, Aneks A)

4. REZULTATI - OCENA PODOBNOSTI DKA

Analizirane granulometrijske krive dobijene su u prethodnim ispitivanjima kvaliteta i upotrebljivosti materijala. Na osnovu rezultata ovih ispitivanja i izdatih izveštaja, nadzorna služba odobrava materijale za ugradnju u skladu sa zahtevima projekta. Prethodna

ispitivanja ponavljaju se najčešće u periodu od godinu dana. Svi analizirani DKA, u pogledu granulometrijskog sastava, ispunjavali su zahteve tehničkih specifikacija projekata. U tabeli br. 2 prikazani su parametri GS za analizirane krive, kao i procenti prolaza na srednjem situ ($D/2$), na situ 0,4 mm i 0,063 mm.

Tabela 2. Parametri granulometrijskih sastava analiziranih DKA 0/31,5 mm

Materijal	Cu	Cz	D ₁₀ mm	D ₃₀ mm	D ₅₀ mm	D ₆₀ mm	P ₁₆ %	P _{0,4} %	P _{0,063} %
M1	24,3	1,7	0,393	2,50	6,9	9,5	75,0	11,0	3,0
M2	20,1	4,5	0,702	6,66	12,0	14,1	69,0	8,5	3,1
M3	14,7	1,3	0,801	3,46	8,5	11,8	70,0	9,0	4,4
M4	39,1	4,1	0,253	3,22	7,5	9,9	76,0	13,0	5,0
M5	16,9	2,3	0,601	3,72	7,5	10,1	74,4	8,0	4,2
M6	11,9	1,7	1,083	4,51	9,0	11,8	75,0	7,0	2,0
M7/1	25,4	3,6	0,481	4,63	9,3	12,2	72,0	10,0	4,0

Vrednosti parametara granulometrijskog sastava zahtevane TS JPPS, prikazane su u tabeli br. 3. Pet GS (M1, M2, M3, M5, M7/1) ispunjava sve zahteve TS iz 2009. godine (opšte). Dve granulometrijske krive tangiraju granične krive propisanog polja. Agregat M4 tangira gornju, a M6 donju graničnu krivu. Ovaj pojas

je identičan sa zahtevanim iz projekta za Koridor XI. Granični pojas iz TS 2018. je uži, osim u gornjem delu, tako da tri granulometrijske krive (M2, M3 i M6) izlaze van. Stepenn neravnornosti se kreće u rasponu od 10 – 40. Procentat sitnih čestica (P_{0,063}), kao i čestica manjih od 0,08¹ mm zadovoljavajući je za sve GS.

Tabela 3. Ispunjenost zateva TS JPPS 2009.g. (opšte) i 2018.g. za analizirane materijale

Materijali	Zatevani parametri				TS 2009			TS 2018			
					Zadovoljava zahteve			Zadovoljava zahteve			
	Cu	P _{0,08}	P _{0,063}	P _{0,02}	Pojas 2009	Cu 15-30	P _{0,08} <6%	Pojas 2018	Cu 8-50	P _{0,063} f ₅ , f ₈	P _{0,02} ≤3%
M1	24,3	4,0	3,0	1,0	da	da	da	da	da	da	da
M2	20,1	4,0	3,1	2,0	da	da	da	ne	da	da	da
M3	14,7	5,0	4,4	1,7	da	da	da	ne	da	da	da
M4	39,1	6,0	5,0	3,0	da*	ne	da	da	da	da	da
M5	16,9	5,0	4,2	2,5	da	da	da	da	da	da	da
M6	11,9	4,0	2,0	1,0	da*	ne	da	ne	da	da	da
M7/1	25,4	5,0	4,0	2,0	da	da	da	da	da	da	da

*na granici krive polja crvena boja – nezadovoljavajući rezultat Izvor: Zavod za stručni nadzor i Odeljenje za geotehnički nadzor i kontrolu Instituta za puteve ad, Beograd

4.1. Ocena podobnosti agregata prema SRPS EN standardima

Da bi se utvrdila sličnost ili razlika između graničnih polja definisanih u RS za noseći sloj 0/31,5 mm u odnosu na evropske kategorije, izvršeno je poređenje. Kao kriterijum je uzeto uklapanje u „opšte“ granice, (eng. Overall grading range), uz sagledavanje i mogućnosti uklapanja graničnog polja za deklarisanu vrednost proizvođača. Zaključeno je da se granični pojas iz TS JPPS 2009 (opšte) uklapa u polje otvorenih mešavina GP, kao i sa kategorijom normalnih mešavina Gc, uz manje korekcije. Granično polje iz TS 2018 najpribližnije se uklapa sa kategorijama normalnih mešavina GA i Gc. Odstupanja od standardom de-

finisanih polja postoje u svim kategorijama, ali su kod navedenih najmanja.

Analizirane granulometrijske krive², (M1 –M7/1), upoređivane su sa uslovima za kategorije normalnih i otvorenih, kao i drugih mešavina (kategorije GW, GWW i GT). S obzirom da su razmatrani rezultati prethodnih ispitivanja, granulometrijske krive su posmatrane kao deklarirani granulometrijski sastavi proizvođača (MDV). U pogledu opštih zahteva za nadmerna

¹Evropski standard je definisao granicu za sitne čestice (fines) na 0,063 mm

²Obrada podataka rađena u programu GRANULGRAF

zrna granulometrijske krive pripadaju kategoriji GA-80, odnosno OC 90, tabela br. 4. Kod svih GS procenat

prolaza na situ 31,5 mm (D) iznosi 99 % ili 98 %, što je na gornjoj granici.

Tabela 4. Kategorije DKA prema SRPS EN 13242 i 13285

Svojstva	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7/1
Standard	SRPS EN 13242						
Nadmerna zrna	GA85	GA85	GA85	GA85	GA85	GA85	GA85
Odstupanja za sito D, D/2 i 0,063 mm	GTA10	GTA10	GTA10	GTA10	GTA10	GTA10	GTA10
Sadržaj sitnih čestica	f3	f5	f5	f5	f5	f3	f5
Standard	SRPS EN 13285						
Nadmerna zrna	OC90	OC90	OC90	OC90	OC90	OC90	OC90
Sadržaj sitnih čestica	UF5*	UF5	UF5	UF5	UF5	UF5	UF5
Kategorija GS	Gc**	Gp	Gp	Gc**	GT***	Gp	Gp

* TS zahtevano maksimalno 5% sitnih čestica

** kriva odgovara svim tipovima normalnih mešavinama, ali su najmanja odstupanja u ovoj kategoriji. U slučaju deklarisanja od strane proizvođača nominuje se jedna kategorija za srednji GS u periodu od šest meseci

*** za sve kategorije koje imaju proizvođački pojas kriva izlazi van tog pojasa, što nije dozvoljeno standardnom

Analizirani GS kategorisani su u različite tipove mešavina: normalne, otvorene i druge. U kategoriju normalnih mešavina GC, klasirane su krive M1 i M4 (slika 3a).

One ispunjavaju kriterijume i za GA (slika 3b) i GB, ali u ovim kategorijama polja tolerancije imaju nešto veća odstupanja u odnosu na proizvođačko

deklarirano polje, nego kod Gc. Četiri granulometrijske krive (M2, M3, M6, M7/1) pripadaju otvorenim mešavinama, kategorije GP (slika 3c). Granulometrijska kriva M6 ne ispunjava u potpunosti zahteve ni za jednu kategoriju, ali za Gp su potrebne najmanje korekcije. Granulometrijska kriva M5 odgovara kategoriji GT, tabela br. 4 (slika 3d).

a) Materijali M1 i M4 pripadaju kategoriji Gc

b) Materijali M1 i M4 pripadaju kategoriji GA

c) Materijali M2, M3, M6, M7/1 koji pripadaju kategoriji Gp

d) Materijal M5 koji pripada kategoriji GT

Slika 3 - Kategorije DKA prema SRPS EN standardima

Tabela 5. Dozvoljene razlike prolaza između susednih sita

Materijali															G _A	G _B	G _p
Sito	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7/1		G _c ^a	G _o	
	G _c		G _p		G _p		G _c		G _c		G _p		G _p		G _w	G _{ww}	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	2	
mm	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
16	75		69		70		76				75		72		Max. 25	Max 30	
		20,5		35		22,2		24				30		27			
8	54,5		34		47,8		52				45		45		Min. 10	Min. 7	
		17,5		10		13,1		19		Nema	18		18				
4	37		24		34,7		33			zahteva	27		27		Max. 20		
		10						8,5							Min. 7		
2	27		Nema		Nema		24,5				Nema		Nema		Max. 15		
			zahteva		zahteva						zahteva		zahteva		Min. 7		
1	18		9				18		6,5								

1 Procenti prolaza na sitima
Crvena boja Nezadovoljavajući rezultat
*G_c Za kategoriju G_c uslovi za razliku na sitima 16-8 mm i 8-4 mm su kao za kategoriju G_p

2 Razlike između sita
Plava boja Granična vrednost

U tabeli 5 prikazane su razlike prolaza između normiranih sita i zahtevi po kategorijama. Sve ispitivane krive ispunjavaju zahteve za odgovarajuću kategoriju, osim na granulaciji M2, razlika prolaza između sita 16 mm i 8 mm veća je od dozvoljenih 30% za polje G_p (35%).

4.2 Promenljivost granulometrijskog sastava i parametri kontrole kvaliteta

Granulometrijski sastav agregata se kontroliše u toku izgradnje. Kada dolazi do variranja, tako da parametri Cu i Cz odstupaju izvan propisanih vrednosti, postavlja se pitanje koje su granice tolerancije i prihvatljivosti GS, u odnosu na zahteve TS.

Takođe, tokom izgradnje, kada je vremensko trajanje ugradnje DKA duže od godinu dana, izvođač je u obavezi da za svaku godinu dostavi nov izveštaj o podobnosti materijala. Za agregat M7 analizirani su GS iz dva godišnja izveštaja o podobnosti materijala (M7/1 i M7/2), kao i za jedan materijal uzorkovan tokom izgradnje E-763, sektor I (M7/t).

Za poređenje sa GS sa ugradnje, odabran je uzorak M7/t koji ima vrlo visoke vrednosti parametara Cu i Cz, od 104,2 i 11,3. Prethodnim ispitivanjima za M7/1 dobijene su vrednosti od Cu 25,4 i Cz 3,6, tabela br. 6

Tabela 6. Parametri granulometrijskog sastava materijala M7/1, M7/t, M7/2

Materijal	Cu	Cc	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	P ₁₆ (%)	P _{0,4} (%)	P _{0,063} (%)
M7/1	25,4	3,6	0,481	4,63	12,2	72	10	4
M7/t	104,2	11,3	0,113	3,89	11,8	71	14	7
M7/2	27,7	3,4	0,368	3,58	10,2	72	11	5

Slika 4 - Promene granulometrijske krive sa promenom parametara Cu i Cz za DKA M7/1 i M7/t

U odnosu na granulometrijsku krivu dobijenu prethodnim ispitivanjima, uzorak sa ugradnje ima povišen

sadržaj materijala sitnijeg od 4 mm. Najveća razlika je za veličine zrna ispod 1 mm (slika 4) Ove dve granulometrijske krive (M7/1 i M7/t), kao i GS M7/2 iz izveštaja o podobnosti, analizirane su sa aspekta zahteva SRPS EN 13285.

Krive M7/1 i M7/2 posmatrane su kao „deklarisan GS“ (MDV). Kriva M7/1 (MDV1) kategorisana je u otvorene mešavine GP, s obzirom da su za ovu kategoriju najveća podudaranja zahteva.

Međutim, procenti prolaza na sitima 31 mm i 16 mm, su na granici proizvođačkog polja, tabela br 7. GS za MDV, prema standardu, mora biti unutar granica polja. Takođe pozitivna tolerancija na situ 16 mm izlazi van opšteg polja, tako da bi i za kategoriju GP trebalo izvršiti korekciju. GS sa ugradnje M7/t, upoređen sa MDV1 (M7/1), u granicama je dozvoljenih tolerancija.

U odnosu na dozvoljene razlike prolaza između susednih sita, za kategoriju GP, zahtevi su ispunjeni (tabele br. 7 i 8).

Tabela 7. Procenti prolaza za GS M7/1, M7/t, M7/2

GS DKA	Procenti prolaza na sitima (%)								
	P ₄₅	P _{31,5}	P ₁₆	P ₈	P ₄	P ₂	P ₁	P _{0,5}	P _{0,063}
M7/1 - MDV1	100	99,0	72,0	45,0	27,0	21,0	14,0	10,5	4,0
M7/t	100	99,0	71,0	48,0	31,0	25,0	20,0	15,0	7,0
M7/2 – MDV2	100	99,0	75,0	52,0	33,0	23,0	17,0	12,0	5,0

Plava boja - Procenat prolaza na granici dozvoljene tolerancije
Crvena boja - Procenat prolaza van granice dozvoljene tolerancije

Ali, kada se granični pojas poveže sa maksimalno dozvoljenim sitnim česticama, GS izlazi iz opšteg pojasa, što nije dozvoljeno. Ovakav GS se ne bi mogao prihvatiti. Takođe, proizvođač deklarise maksimalni

sadržaj sitnih čestica. U slučaju da je deklarirana kategorija UF5, GS takođe ne bi ispunjavao deklaraciju, odnosno, ispunjava za deklarisanu kategoriju UF7 (slika 5a).

Tabela 8. Dozvoljene razlike prolaza na sitima, kontola pojedinačnih isporuka

Sito	Materijali						GA,GB, GC*, GO, GW, GWW	GP
	M7/1 G		M7/t		M7/2 G			
	1	2	1	2	1	2	2	2
mm	%	%	%	%	%	%	%	%
16	72	27	71	23	75	23	max. 25*	max. 30
8	45	18	48	17	52	19	min. 10*	min. 7
4	27	6	31	6**	33	10	max.25 - min.7	-
2	21	6	25	5	23	6	max.15 - min.4	-
1	14	6	20	5	17	6	max.15 - min.4	-
1 Procenti prolaza na sitima 2 Razlike između sita								
*GC Za kategoriju Gc uslovi razlike na sitima 16-8 i 8-4 su kao za kategoriju GP								
**6 Vrednost nezadovoljavuća u slučaju kategorije GA

Slika 5a. - MDV1 (M7/1) i M7/t sa graničnim poljem opštim i za proizvođače za kategoriju GP

Slika 5b - GS za MDV2 (M7/2) i M7/t sa graničnim poljem opštim i za proizvođače za kategoriju GA

GS za M7/2 kategorisan je u G_A, s obzirom da ispunjava zahteve za ovu kategoriju (slika 5b). U odnosu na M7/1, ovaj GS izlazi iz proizvođačkog

polja za G_P kategoriju, tako da ne može biti deklarisan u ovoj kategoriji. Vidimo sa dijagrama (slika 5a i 5b) da male promene u granulometrijskom sastavu, koji

je delom na graničnim vrednostima, mogu da dovedu do promene kategorije, a u ovom slučaju i tipa mešavine (otvorena ili normalna). Kriva M7/t seče opšti pojas i za kategoriju G_A , što nije prihvatljivo.

Na ovom primeru, možemo videti da ocena podobnosti prema standardu SRPS EN 13285 daje jednoznačnu informaciju na kojim sitima i koliko treba da se „popravi“ GS, da bi odgovarao onom iz prethodnih ispitivanja (MDV). Stoga je znatno pogodnija pri terenskoj kontroli agregata.

Tabela 9. Primeri zahteva za granulometrijski sastav po EN

BS specifikacije – Kategorije mešavina i granulacija za nevezane mešavine						HRN specifikacije - Projekt za sanaciju autoputa	
Nevezane mešavine	Tip 1	Tip 2	Tip 3 (otvorena)	Kategorija B „zatvorena“	Tip 4 (asfalt)		
Tačka	803	804	805	806	807		
Standard	BS EN 13285 Svojstva kategorija nevezanih mešavina					Standard	HRN EN 13242
Zahtevi za kategorije mešavina						Zahtevi	
- Oznaka	0/31,5	0/31,5	0/40	0/31,5	0/31,5	-Oznaka	0/32 f3
- Max. % sitnih čestica	UF9	UF9	UF5	UF9	UF9	-Max. % sitnih čestica	G_{A85}
- Nadmerna zrna	OC ₇₅	OC ₇₅	OC ₈₀	OC ₈₀	OC ₇₅	-Nadmerna, podzrna *	GTA10
Zahtevi za kategoriju GS						Zahtevi za kategoriju GS po HRN EN 13285	
- Opšti GS	G _P	G _E	G _O	G _B	G _P	G_A , G_B ili G_C	

Kategorija tolerancije od deklarisanog tipičnog granulometrijskog sastava na sitima D , $D/2$ i $0,063$ mm

5. ZAKLJUČCI

Na osnovu izvršene analize sedam granulometrijskih krivih DKA 0/31,5 mm, zaključeno je da GS ispunjavaju zahteve projekata. Sa aspekta evropskih standarda za kontrolu agregata u putogradnji, pripadaju različitim tipovima nevezanih mešavina: normalnim (G_A), otvorenim (G_P) i drugim (G_T).

Implementacijom zahteva hEN i definisanjem kategorija granulometrijskog sastava u tehničke specifikacije za nevezane noseće slojeve kolovoznih konstrukcija, postiže se veća uniformisanost materijala sa aspekta geometrijskih karakteristika, a time i kvalitet kompletne kolovozne konstrukcije.

Primenom hEN omogućava se efikasnija kontrola na terenu za proizvođače, za izvođače radova i nadzor. Standard za određivanje granulometrijskog sastava agregata uvodi numerički prikaz kao obavezan, dok se dijagram može opcionalno prikazati.

U odnosu na dosadašnju praksu, ovaj pristup nameće da u kontroli kvaliteta budu definisani drugi

4.3. Strani propisi – primeri

U tabeli br. 9 prikazan je primer specifikacija za nevezane mešavine iz Velike Britanije za posteljni i donji noseći sloj (eng. Sub-base) [19].

Tip 1 koristi se za DNS visokog kvaliteta, dok se Tip 2 koristi za slojeve nižeg kvaliteta [13], [20].

U istoj tabeli prikazan je primer iz hrvatskog projekta za sanaciju autoputa [21], koji se oslanja na EN 13242 i EN 13285.

parametri, kao što su dozvoljene tolerancije prolaza na sitima i između susednih sita. Izmene zahteva u tehničkim specifikacijama bi proizvođačima DKA dale smernice kojoj kategoriji mogu da teže u zavisnosti od trenutnih proizvodnih kapaciteta, kao i u kom pravcu da unaprede svoj proizvod zavisno od željene kategorije mešavine.

6. ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Radmili Lukić za sugestije pri izradi rada, kao i Mirjani Pokrajac na pomoći pri prikupljanju dokumentacije.

LITERATURA

- [1] R. Chaulagai et al, Influence of Maximum Particle Size, Fines Content, and Dust Ratio on the Behavior of Base and Subbase Coarse Aggregates *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 2655, no. 1, pp. 20–26, Jan. 2017.
- [2] Y. Xiao, E. Tutumluer, Y. Qian, and J. A. Siekmeier, Gradation Effects Influencing Mechanical

- Properties of Aggregate Base– Granular Subbase Materials in Minnesota *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 2267, no. 1, pp. 14–26, Jan. 2012.
- [3] T. W. Roberts, F. L. Kandhal P. S, Brown, E. R, Lee, D. Y, Kennedy, *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*. 1996.
- [4] SRPS EN 13242:2010, Agregati za za nevezane i hidraulički vezane materijale za upotrebu u građevinskim radovima i izgradnji puteva. Tehnički komitet CEN/TC 154.
- [5] SRPS EN 13285:2018, Nevezane mešavine – Specifikacije. Tehnički komitet CEN/TC 227.
- [6] D. Milinković, *Pregled sektora građevinske industrije Srbije koji je obuhvaćen evropskom Uredbom (EU) 305/2011 i očekivan uticaj na industriju*. Institut za standardizaciju Srbije, 2019.
- [7] M. Maksimović, *Mehanika tla: Laboratorijska identifikacija i klasifikacija tla*. Građevinska knjiga, 2005.
- [8] J. P. Bilodeau G. Dore, and P. Pierre, Gradation influence on frost susceptibility of base granular materials, *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 9, no. 6, pp. 397–411, Dec. 2008.
- [9] S. F. Brown and F. W. K. Chan, Reduced rutting in unbound granular pavement layers through improved grading design, *Proc. Inst. Civ. Eng. – Transp.*, vol. 117, no. 1, pp. 40–49, Feb. 1996.
- [10] R. D. Barksdale and S. Y. Itani, *Influence of Aggregate Shape on Base Behavior, in Transportation research record 1227*, Atlanta, Ga. 30332.: School of Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, pp. 173–182. 1989.
- [11] Y. Xiao and E. Tutumluer, *Best Value Granular Material for Road Foundations*, 2012.
- [12] M. Smith and L. Collis, *Aggregates, Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes* (3rd edition), Second edi. London: The Geological Society, 2001.
- [13] Working group 2A, *COST 337 Unbound granular materials for road pavements*, 1998.
- [14] M. Selimović, *Mehanika tla i temeljenje*, deo I. Mostar: Građevinski fakultet Univerziteta „Džemal Bijedić“, 2000.
- [15] SRPS EN 933-1:2013, *Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata — Deo 1: Određivanje granulometrijskog sastava — Metoda prosejavanja*. Tehnički komitet CEN/TC 154.
- [16] Y. Xiao, *Performance-based evaluation of unbound aggregates affecting mechanistic response and performance of flexible pavements*, 2014.
- [17] M. Fang, D. Park, J. L. Singuranayo, H. Chen, and Y. Li, Aggregate gradation theory, design and its impact on asphalt pavement performance: a review, *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 20, no. 12, pp. 1408–1424, Dec. 2019.
- [18] T. Yideti, Road Aggregates Characterization. [Online]. Available: <https://www.kth.se/social/514b3ac6f2765412f7cb69e3/Lecture.pdf>. [Accessed: 18- May-2020].
- [19] UK Highways Agency, Series 800, Volume 1 Road Pavements - Unbound, Cement and Other Hydraulically Bound Mixtures, 2016.
- [20] J. McCulloch, *Unbound aggregates*, in ICE Manual of Highway Design and Management, Institution of Civil Engineers, pp. 459–468, 2011.
- [21] Institut IGH d.d., *Građevinski projekt sanacije kolnika*, br. 72590-016/17. 2017

SUMMARY

SUITABILITY OF AGGREGATES GRADATION FOR BASE AND SUBBASE LAYERS OF PAVEMENT

The assessment of the suitability of the granulometric composition of the crushed stone aggregates (CSA) for an unbound base and subbase layers of pavement, in the Republic of Serbia is done based on the defined gradation bands, uniformity degree (Cu), coefficient of curvature (Cz), percentage of fines and percentage of particles passing a 0.02 mm sieve. On the other hand, standards which define the quality requirements of aggregates and unbound mixtures for road construction SRPS EN 13242 and SRPS EN 13285 introduce a significantly different approach to the assessment of the granulometric composition suitability. Categories are defined. Each category includes a particular boundary band, tolerances on sieves, differences in values passing each sieve. The categories are defined depending on the field of the application. For seven CSA 0/31.5 mm used for the construction of Corridor XI, a comparative analysis of the granulometric composition suitability was performed according to the requirements of the existing Technical Specifications (TS) of PE „Roads of Serbia“ (PERS) and the specified SRPS EN standards. The analysed curves satisfy those technical requirements, but vary in categories from the most severe mixtures of the normal granulometric composition of the G_A category, to the open mixtures of the G_P category. It was concluded that the principle based on the defining allowed tolerances on the sieves and between the sieves, is more suitable for field control of the granulometric composition and the good granularity of the aggregates. Technical Specifications should be modified to this approach.

Key words: *granulometric composition, crushed stone aggregates, European standards, quality control*