

Утицај електрофилтерског пепела на чврстоћу самоуграђујућег бетона при притиску

Гордана Броћета¹, Александар Савић², Анђелко Цумбо¹, Марина Латиновић Крндија¹, Жарко Лазих¹, Драженка Лозо¹, Јован Волаш¹

¹Универзитет у Бањој Луци, Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет, Бања Лука, Република Српска

²Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Београд, Србија

gordana.broceta@aggf.unibl.org, sasha@grf.bg.ac.rs, andjelko.cumbo@aggf.unibl.org,
marina.latinovic@aggf.unibl.org, zarko.lazic@aggf.unibl.org, drazenka.radic@aggf.unibl.org, jovan.volash@aggf.unibl.org

Сажетак— Индустрија цемента сматра се једним од значајнијих узрочника емисије CO₂. У циљу изналажења рјешења овој проблематици у раду се предлаже замјена 17,5% потребне количине цемента за производњу самоуграђујућег бетона минералним додацима. Експерименталним истраживањем на четири врсте самоуграђујућих бетона варирана је врста минералног додатка – бетон без минералних додатака, кречњачко брашно, електрофилтерски пепео и комбинација кречњачког брашна и електрофилтерског пепела. У том смислу наглашава се да је електрофилтерски пепео примијењен оригинално, какав је као нуспроизвод настао у термоелектрани, тј. није извршено његово просијавање или додатна обрада прије употребе. Резултати истраживања показују да примјена минералних додатака нема утицај на чврстоћу бетона при старости од 2 дана, али утиче на смањење чврстоће бетона при притиску са старости веће од 2 дана. При томе, значајнији утицај има електрофилтерски пепео. Ипак, тај утицај је у функцији времена опадајућег карактера, са тенденцијом да бетони са минералним додацима достигну чврстоће бетона без минералних додатака у старостима већим од 28 дана.

Кључне ријечи— самоуграђујући бетон; електрофилтерски пепео; кречњачко брашно; термоелектрана; чврстоћа бетона при притиску; експериментално истраживање;

I. Увод

Значајан утрошак цемента, за производњу бетонских композита, намеће потребу за изналажење алтернативних материјала, којим би се смањила потреба за цементом, а тиме и емисија CO₂. У том смислу, напомиње се да је за 7 до 8% укупне емисије CO₂ у свијету, одговорна управо индустрија цемента [1], [2]. Иако су многи произвођачи цемента почели уводити мјере, којима се ограничава емисија CO₂, истовремено је евидентно и повећање глобалне потражње за цементом. Према подацима Међународне агенције за енергетику (*International Energy Agency*), од 2014. до 2017. године, уочен је пораст емисије CO₂, приликом производње цемента, за 0,3% на годишњем нивоу, а сматра се да би, због глобалног раста популације, до 2050. године производња цемента могла порастати за 23% [1]. Дакле, за стратешки развој друштва, од изузетног су значаја истраживања потенцијала за производњу овог најзаступљенијег материјала, са задатком налажења

рјешења у виду смањења количине цемента, а тиме и смањења емисије CO₂, уз искоришћење домаћих природних ресурса, али и домаћих индустријских нуспроизвода и грађевинског отпада.

Као једно од алтернативних рјешења предметном проблему је примјена минералних додатака, којима се у одговарајућем проценту замјењује маса цемента у бетонским и малтерским композитима. У том смислу, нарочито су интересантна истраживања у погледу анализе утицаја минералних додатака на савремене технологије бетонских композита, каква је технологија самоуграђујућег бетона.

Истраживањем научне и стручне јавности, показало се да је примјена минералних додатака у самоуграђујућим бетонима управо пожељна због његових специфичних карактеристика у свјежем стању, у смислу да повољно утичу на одржавања кохезије и отпорности према сегрегацији, смањење топлоте хидратације свјеже бетонске масе, а тиме и на смањење термичког скупљања, појаву прелина, нивоа порозности, нарочито у прелазној зони зрна агрегата и цементног камена, што даље води вишем нивоу многих трајносних својстава бетонских конструкција [3]–[6] и продужењу њиховог вијека експлоатације, те коначно представља и бенефите са економског и еколошког аспекта.

Као минерални додаци могу се користити различити природни и вјештачки материјали [3]–[5], [7], [8]. Но, у предметном раду приказује се могућност примјене најзаступљенијег минералног додатка на домаћем тржишту – кречњачког брашна и нуспроизвода термоелектрана – електрофилтерског пепела, за који постоји потенцијал масовније примјене не само у Републици Српској, него у цијелом региону [3], [7]–[12]. У том смислу, напомиње се да његова примјена у бетонским композитима рјешава и низ других проблема, као што су:

- стварање индустријског отпатка, чије се годишње количине мјере у милионима тона,
- финансирање сталних трошкова транспорта од термоелектране до депоније,

- проблем пречишћавања воде потребне за транспорт летећег пепела,
- загађење околине пепелима депонованим на основним депонијама отпада,
- финансирање земљаних радова и одводњавања за израду депонија великих површина,
- уништавање великих површина обрадиве земље и сл.

II. ПРИМЈЕНА ЕЛЕКТРОФИЛТЕРСКОГ ПЕПЕЛА У БЕТОНИМА

Летећи, односно електрофилтерски, пепео је минерални додатак типа пуцолана, који представља нуспроизвод, добијен при сагоријевању угља у котловима термоелектрана, који се, ношен гасовима сагоријевања, издваја на уређајима за отпашивање (филтерима) – механичким или електростатичким сепараторима. Зато што се отпашује на електроотпашивачима, односно електрофилтерима, назива се и електрофилтерским пепелом.

Ови материјали настају у зонама високих температура (изнад 1000°C) на којима долази до омекшавања или чак топљења несагорјелих минералних честица, које затим долазе у зону значајно ниже температуре (на око 250°C). Услијед оваквог термичког третирања (наглог хлађења) летећи пепели добијају стакласту структуру, при чему се због површинских напона формирају најчешће сферног облика или у форми честица издуженог, заобљеног или потпуно неправилног облика, мрко-црне боје (Сл. 1), чије се димензије крећу у границама од 1 до 200 μm . Основну минералну творевину представљају стакласте материје и мулит ($2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$) уз мање учешће кварца, хематита, магнетита, гетита, калцита, вистита, анхидрита, перикласа и угљене супстанце.



Сл. 1. Изглед електрофилтерског пепела у слободно насутом стању

Основна карактеристика летећих пепела, по којој се издвајају од осталих грађевинских материјала, је њихова изузетно ниска запреминска маса, која у растреситом стању износи од 500 до 860 kg/m^3 . Специфичне масе крећу се у границама од 1700 до 3300 kg/m^3 , а специфичне површине по Блену од 2500 до 6000 cm^2/g [8].

Чињеница да једна материја по начину свог постанка припада групи летећих пепела не мора да значи да тај пепео аутоматски припада групи пуцоланских материјала, него он треба да има одговарајући хемијски и минерални састав. Фактори који утичу на промјенљивост његовог састава уобичајено су: тип и минералношки састав угља, степен спрашивања самог угља, тип пећи за сагоријевање, услови под којима се доводи ваздух, укључујући однос ваздух-гориво, начин на који се пепео сакупља, како се са њиме поступа и начин на који се складишти. Због комплексности наведеног процеса, управо је честа неуједначеност састава летећег пепела, а што представља највећу ману пепела, због које се смањује могућност његове примјене [3].

Европским стандардом EN 450-1 [13] дефинисани су захтјеви у погледу хемијских и физичких својстава летећег пепела, који се користи као додатак у малтерима и бетонима, а како је приказано у табели I.

ТАБЕЛА I. ХЕМИЈСКЕ И ФИЗИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ЛЕТЕЋЕГ ПЕПЕЛА ЗА МАЛТЕРЕ И БЕТОНЕ, ПРЕМА EN 450-1

Параметар	Метода испитивања	Критеријум
ХЕМИЈСКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ		
Губитак жарењем	EN 196-2 ¹⁾	Категорија A: $\leq 5\%$
		Категорија B: $\leq 7\%$
		Категорија C: $\leq 9\%$
Хлориди (Cl ⁻)	EN 196-2	$\leq 0,1\%$
SO ₃	EN 196-2	$\leq 3\%$
Слободни CaO	EN 451-1	$\leq 2,5\%$ ²⁾
Реактивни CaO	EN 197-1	$\leq 10\%$
Реактивни SiO ₂	EN 197-1	$\geq 25\%$
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	EN 196-2	$\geq 70\%$
Укупне алкалије ³⁾	EN 196-2	$\leq 5\%$
MgO	EN 196-2	$\leq 4\%$
Растворљиви P ₂ O ₅	EN 451-1, додатак C	$\leq 100\text{ mg/kg}$
Укупни P ₂ O ₅	EN 196-2	$\leq 5\%$
ФИЗИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ		
Финоћа млива (> 0,045 mm)	EN 451-2	Категорија N: $\leq 40\%$ ⁴⁾
		Категорија S: $\leq 12\%$
Индекс активности	28 дана	EN 450-1/ EN 196-1
	91 дан	EN 450-1/ EN 196-1
Постојаност запремине	EN 450-1/ EN 196-3	$\leq 10\text{ mm}$
Густина	EN 196-6	max $\pm 200\text{ kg/m}^3$ од декларисане вриједности
Почетак времена везивања	EN 450-1/ EN 196-3	max +200 min у односу на испитану цементну пасту
Потреба за водом	EN 450-1, додатак B	$\leq 95\%$ у односу на испитани цементни малтер

¹⁾ губитак жарењем одређује се у складу са EN 196-2 уз примјену модификација у тачки 5.2.1 EN 450-1;

²⁾ ако је садржај слободног CaO већи од 1%, летећи пепео се мора подвргнути испитивању постојаности запремине према EN 196-3;

³⁾ укупан садржај алкалија обрачунава се као садржај Na₂O (еквивалент);

⁴⁾ финоћа не смије варирати за више од $\pm 10\%$ у односу на декларисану вриједност.

Поред тога што се користе као додаци за бетон, летећи пепели силикатног поријекла, ознаке „V” и калцијског поријекла, ознаке „W,” примјењују се и као саставна

компонента цемента, а садрже их према европском стандарду EN 197-1 [14] слиједеће врсте цемента:

- портланд-цемент са додатком летећег пепела:

SEM II/A-V од 6 до 20 % летећег пепела силикатног поријекла,

SEM II/B-V од 21 до 35 % летећег пепела силикатног поријекла,

SEM II/A-W од 6 до 20 % летећег пепела калцијског поријекла,

SEM II/B-W од 21 до 35 % летећег пепела калцијског поријекла;

- портланд-композитни цемент:

SEM II/A-M од 6 до 20 % састојака: гранулисане згуре, силикатне прашине, природних и активираних природних пуцолана, летећих пепела силикатног поријекла, летећих пепела калцијског поријекла, сагорјелих шкриљаца и кречњака,

SEM II/B-M од 21 до 35 % састојака: гранулисане згуре, силикатне прашине, природних и активираних природних пуцолана, летећих пепела силикатног поријекла, летећих пепела калцијског поријекла, сагорјелих шкриљаца и кречњака;

- пуцолански цемент:

SEM IV/A који садржи од 11 до 35 % састојака: природних и активираних природних пуцолана, летећих пепела силикатног поријекла и летећих пепела калцијског поријекла,

SEM IV/B који садржи од 36 до 55 % састојака: природних и активираних природних пуцолана, летећих пепела силикатног поријекла и летећих пепела калцијског поријекла;

- композитни цемент:

SEM V/A који садржи од 18 до 30 % састојака: природних и активираних природних пуцолана и летећих пепела силикатног поријекла,

SEM V/B који садржи од 31 до 50 % састојака: природних и активираних природних пуцолана и летећих пепела силикатног поријекла.

Силикатно-алуминатни летећи пепели, код којих је садржај реактивног СаО мањи од 10% – пепели ознаке „V” – имају пуцоланске особине, док силикатно-калцијски пепели, код којих је садржај реактивног СаО већи од 10% – пепели ознаке „W,” – поред пуцоланских, могу имати и хидрауличне особине [14].

Летећи пепели се према америчком стандарду ASTM C 618 дијеле на три класе:

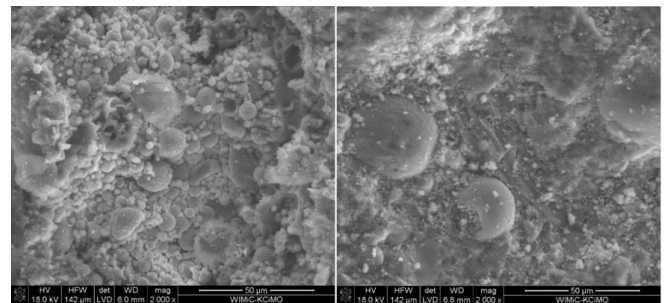
- N – сирови или калцинисани природни пуцолани као што су неке врсте дијатомејске земље, опалски рожнац и шкриљац, туф, вулкански пепео, калцинисани или некалцинисани пловућац, те разни материјали који захтијевају калцинацију

да би се добила задовољавајућа својства, као што су поједине глине и шкриљци;

- F – пепели који настају приликом сагоријевања антрацита или битуменског угља, а понекад и приликом сагоријевања суббитуменског угља или лигнита; имају пуцоланска својства;
- C – пепели који уобичајено настају приликом сагоријевања лигнита или суббитуменског угља, а могу настати и приликом сагоријевања антрацита или битуменског угља; поред пуцоланских, могу имати и хидраулична својства [15].

Наведени цементи са додатком летећих пепела, а самим тим и бетони који их садрже, одликују се нешто споријем очвршћавањем, нижом топлотом хидратације и високом отпорношћу на дејство агресивних вода [2], [8].

На Сл. 2 приказани су „SEM” снимци цементног камена за који је примијењен цемент са 15% силикатног пепела, истраживања реализованог у Пољској [2]. Сферични облици, који се уочавају на снимцима, су честице пепела. Како се види на Сл. 2 – лијево, цементни камен старости 2 дана је високог нивоа порозности, управо због споријег очвршћавања услјед удјела пепела. Сл. 2 – десно приказује цементни камен у старости од 28 дана, гдје се уочава да силикатни пепео још увијек није одреаговао, јер нема хидраулична својства, већ само пуцоланска, која постају очигледна тек током дужег временског периода.



Сл. 2. „SEM” снимак цементног камена са 15% електрофилтерског пепела након 2 дана (лијево) и 28 дана (десно) [2]

Узимајући у обзир наведено, приликом пројектовања бетонских композита изузетно је важно водити рачуна, не само о количини пепела, како је то уобичајена пракса домаћег градитељског тржишта (ако се, на жалост, уопште и води рачуна о предметном), него и о његовом саставу приликом избора врсте цемента или електрофилтерског пепела као минералног додатка, а обзиром на услове средине и услове приликом бетонирања.

Процентуално учешће летећег пепела, као минералног додатка у самоуграђујућим бетонским мјешавинама варира од 5% до 40% у односу на масу цемента [8], [16], а ријетко више од тога. Истраживањем научне јавности проценат замјене цемента електрофилтерским пепелом је најчешће оптималан у интервалу од 15% [17] до 20% [3], [4], [16], [18] при чему су проценти увијек виши у случајевима примјене чистог портланд цемента.

Европским стандардом EN 206, дефинише се концепт тзв. „к-вриједности”, према којем масени однос електрофилтерског пепела и цемента може бити максимално 0,33. Истим стандардом се упућује да се у случају прекорачења овог односа, прекорачена количина не узима у обзир код прорачуна водопрашкастог фактора и одређивања минималне количине цемента у односу на услове средине [19].

Европским препорукама за самоуграђујући бетон [20] на електрофилтерски пепео се указује као на врло користан додаток самоуграђујућих бетона, имајући у виду да утиче на повећање кохезије и смањење осјетљивости на промјене у садржају воде. Ипак, напомиње се да употреба веће количине летећег пепела може довести до значајног повећања кохезије, што би проузроковало отпор течењу и самокомпактирању свјеже масе.

Иако већина истраживања указују на ниже ране чврстоће бетона са електрофилтерским пепелом, постоје и истраживања којима се показало да и при старостима мањим од 28 дана бетони са пепелом могу достићи чврстоће референтних бетона без пепела. У том смислу истраживањем [16], у којем је варирано учешће пепела класе F (према америчком стандарду) од 0 до 40%, са инкрементом од 5%, показало се да самоуграђујући бетон, справљен са 20% пепела, у односу на масу цемента, имају за 13,4% већу чврстоћу при притиску, у односу на референтни бетон. Даљњим повећањем учешћа пепела чврстоћа при притиску се у предметном експерименту смањивала. Оваквом резултату недвосмислено доприноси управо врста пепела класе F, који, како је у наводу ASTM C 618 стандарда претходно дато, поред пуцоланских има и хидраулична својства.

Бетони са додатком летећег пепела имају сивкасту боју, па се уобичајено у случајевима када се желе постићи свјетлије нијансе бетона, као минерални додаток примјењује и извјесна количина кречњачког брашна [8].

III. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ

A. План и програм експерименталног истраживања

У сврху реализације сопственог експерименталног истраживања справљене су четири врсте самоуграђујућих бетона са просјечно великом количином прашкасте компоненте.

Сви бетони су трофракцијски, номинално најкрупнијег зрна у износу од 16 mm, са континуалном гранулометријском кривом, при чему су кориштени природни ријечни агрегати. Од минералних додатака примијењени су: кречњачко брашно (минерални додаток типа I), електрофилтерски пепео (минерални додаток типа II), као и њихова комбинација. Као основно везиво кориштен је портланд-композитни цемент високе чврстоће, а као хемијски додаток примијењен је суперпластификатор нове генерације. Кориштена је вода из градског водовода. За постизање потребне кохезивности и отпорности на сегрегацију није примијењен модификатор вискозитета, што је једна од могућности приликом пројектовања самоуграђујућих

бетона, обзиром да коришћење наведеног хемијског додатка, генерално, поскупљује цијену коштања бетона, да се на нашем тржишту, још увијек не обичава његова примјена, те се тако и рјеђе налази у понуди произвођача хемијских додатака.

Полазни критеријуми за пројектовање свих мјешавина, односили су се, како је то уобичајено за самоуграђујуће бетоне, на захтјеве у погледу карактеристика бетона у свјежем стању, а били су:

- постизање „потпуне компактности”, без примјене механичких средства за уграђивање, потресања или вибрација и
- постизање класе SF2, за коју се вриједност разливања слијегањем креће у границама од 660 до 750 mm (обзиром да је иста погодна за уобичајену, тј. најчешће потребну примјену; нпр. за извођење зидова, стубова); према овом захтјеву, утврђена је количина суперпластификатора, а у складу са препоруком произвођача.

За пројектоване бетоне примјењене су слиjede ознаке:

- С-Е – бетон справљен без примјене минералних додатака,
- С-С – бетон справљен примјеном минералног додатка типа I – кречњачког брашна, којим је замијењено 17,5% масе цемента,
- С-F – бетон справљен примјеном минералног додатка типа II – електрофилтерског пепела, којим је замијењено 17,5% масе цемента и
- С-С+F – бетон справљен примјеном мјешавине минералних додатака типа I и типа II, којом је, у међусобно једнаком односу, замијењено 17,5% масе цемента.

На бетонима у свјежем стању испитане су слиjedeће карактеристике:

- температура бетона, према EN 12350-1 [21],
- садржај увученог ваздуха, према EN 12350-7 [22],
- запреминска маса, према EN 12350-6 [23] и
- конзистенција – разливање слијегањем, методом „Slump-flow test”, према EN 12350-8 [24].

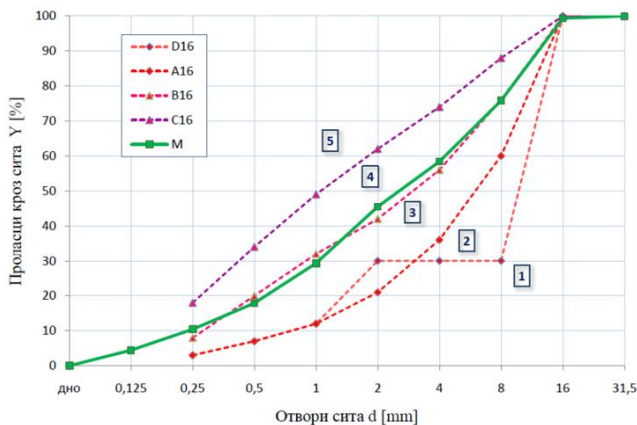
На бетонима у очврслом стању испитане су слиjedeће карактеристике:

- запреминска маса, према EN 12390-7 [25].
- чврстоћа при притиску у старостима од 2, 7, 14 и 28 дана, према EN 12390-3 [26] и
- фигура лома, према EN 12390-3 [26].

B. Компонентни материјали и састав мјешавина

За израду предметних мјешавина примијењени су слиjedeћи компонентни материјали:

- цемент ознаке СЕМ II/B-M (S-LL) 42,5 N, „Далмацијацемент“, произвођача „Св. Јурај“ из Сплита (Каштел Шућурац),
- кречњачко брашно произвођача „Јапра“ а. д. из Новог Града,
- електрофилтерски пепео Термоелектране „Никола Тесла Б“ из Обреновца – силикатни тип електрофилтерског пепела (садржи мање од 10% аналитичког СаО), при чему се напомиње да је примијењен пепео оригиналног састава, онако како је добијен, као нуспроизвод, из Термоелектране (није просијавано прије употребе, тако да зрна крупнија од 0,125 mm доприносе садржају ситне фракције агрегата у бетону),
- ријечни агрегат „Петошеви“, произвођача „Нискоградња“ из Лакташа, за који је гранулометријска крива мјешавине приказана на Сл. 3.



Сл. 3. Гранулометријска крива мјешавине агрегата

- хемијски додаток типа суперпластификатора нове генерације „Cementol@Zeta Super S“, произвођача „ТКК“, Српеница, Словенија, базиран на модификованом поликарбоксилат-етер полимеру и
- вода из градског водовода.

За све пројектоване бетоне примијењена је приближно једнака збирна количина цемента и минералног додатка и то у износу од $483,5 \pm 7,4 \text{ kg/m}^3$, тј. око $0,16 \text{ m}^3$ у 1 m^3 бетона, односно, приближно једнака количина прашкасте компоненте, тј. цемента, минералног додатка и агрегата, зрна ситнијег од 0,125 mm, у износу од $497,9 \pm 8,1 \text{ kg/m}^3$, тј. $0,1629 \pm 0,0026 \text{ m}^3$ у 1 m^3 бетона. Количина ситног агрегата износила је $38,4 \pm 2,6\%$ запремине малтера у бетонима, док је укупна количина агрегата износила $1571,6 \pm 99,4 \text{ kg/m}^3$, тј. $0,5935 \pm 0,0254 \text{ m}^3$ у 1 m^3 бетона. Количина суперпластификатора износила је $0,0060 \pm 0,0007 \text{ m}^3$ у 1 m^3 бетона, тј. 1,5% у односу на масу цемента, односно 1,5% за еталонски бетон без минералних dodataka (C-E) и 1,2% за бетоне са минералним dodacima (C-C, C-C+F и C-F) у односу на масу прашкасте

компоненте. Масени водопрашкasti однос износио је $0,425 \pm 0,025$, при чему се исти повећавао са учешћем електрофилтерског пепела, односно за бетоне C-E и C-C је износио 0,40; за бетон C-C+F је износио 0,41 и за бетон C-F је износио 0,45.

В. Резултати и анализа истраживања

Испитивањем бетона у свјежем стању показало се да се за све пројектоване бетоне добила вриједност разливања слијегањем у интервалу од 720 до 740 mm, односно класа конзистенције SF2. У том смислу уочава се да примјена електрофилтерског пепела, уз нешто веће учешће воде, а како је претходно наведено, није деградирала флуидност свјеже самоуграђујуће масе бетона.

Изглед бетонске масе, након испитивања разливања слијегањем, приказан је на Сл. 4.



Сл. 4. Разливање слијегањем бетонске мјешавине пројектоване са кречњачким брашном и електрофилтерским пепелом

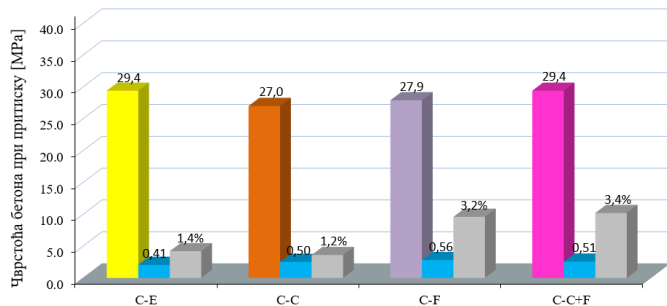
Температура бетона у свјежем стању износила је за све бетоне од $24,8$ до $26,7 \text{ }^\circ\text{C}$.

Количина заосталог ваздуха, измјерена порозиметром, износила од 1,2 до 3,4%, на основу чега се констатује да је за све пројектоване бетоне постигнута „потпуна компактност“, без примјене механичких средстава за уграђивање, потресања или вибрација (вриједности од 0,2% и 0,4%, респективно за бетоне C-F и C-C+F, преко дефинисане границе од 3% су, као уобичајене, прихватљиве за бетоне са пепелима).

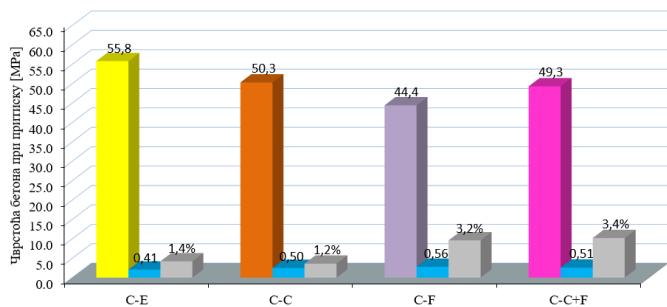
Резултати испитивања запреминске масе указују да се, за добијене вриједности од 2392 kg/m^3 до 2257 kg/m^3 , сви пројектовани бетони карактеришу као бетони нормалних запреминских маса, при чему најниже вриједности имају бетони са пепелом.

Резултати испитивања чврстоћа бетона при притиску, у старостима од 2 и 28 дана, приказани су графички, респективно, на Сл. 5 и 6, док су прираштаји чврстоћа у старости до 2 дана, од 2 до 7 дана, од 7 до 14 дана и од 14 до 28 дана представљени на Сл. 7.

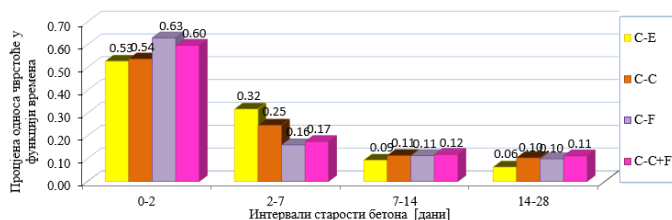
За све пројектоване бетоне добијена је правилна фигура лома и мјешовит лом по цементном камену и зрну агрегата.



Сл. 5. Чврстоће бетона при притиску у старости од 2 дана са приказом вриједности водоцементног фактора и процента увученог ваздуха



Сл. 6. Чврстоће бетона при притиску у старости од 28 дана са приказом вриједности водоцементног фактора и процента увученог ваздуха



Сл. 7. Прираштај чврстоће бетона при притиску у интервалима времена

Анализа и дискусија експерименталног истраживања спроведена је систематизацијом и компарацијом резултата експерименталних испитивања уз примјену нумеричке анализе, математичке статистике и теорије вјероватноће.

За мјерадавне вриједности, које репрезентују анализирана својства бетона, усвојене су аритметичке средине резултата испитивања, при чему су сагледани минимуми, максимуми и релативна мјера варијабилитета резултата. Значајност разлике аритметичких средина анализираних својстава извршена је примјеном Студентовог t теста, а начин тестирања је утврђен претходним тестом Снедекора.

Тестирање значајности разлика чврстоћа при притиску бетона у старостима од 2 и 28 дана, приказани су, респективно, у табелама II и III. За све анализираних бетоне, аритметичка средина је добијена из 3 резултата испитивања, тако да је број степени слободе сваког анализираних пара бетона у износу од 4. Према томе, за ниво значајности од 0,05, критична таблична вриједност тестне карактеристике t_0 разматраних парова бетона износи 2,7764.

ТАБЕЛА II. ТЕСТИРАЊЕ ЗНАЧАЈНОСТИ РАЗЛИКА ЧВРСТОЋА БЕТОНА ПРИ ПРИТИСКУ, У СТАРОСТИ ОД 2 ДАНА

Врста бетона	Чврстоћа при притиску	Станд. дев.	Врста бетона	Чврстоћа при притиску	Станд. дев.	Оцјена станд. грешке	Емпир. вр. теста
	$f_{c,cube,2}$	S_n		$f_{c,cube,2}$	S_n		
	[MPa]	[MPa]		[MPa]	[MPa]		
E	29,4	0,643	C	27,0	1,480	1,1410	2,5761
E	29,4	0,643	F	27,9	0,651	0,6470	2,8394
E	29,4	0,643	C+F	29,4	1,140	0,9255	0,0000
C	27,0	1,480	F	27,9	0,651	1,1433	0,9641
C	27,0	1,480	C+F	29,4	1,140	1,3210	2,2251
F	27,9	0,651	C+F	29,4	1,140	0,9283	1,9791

Поређењем тестних и теоријске вриједности парова бетона, старости 2 дана, констатује се да се само за пар C-E – C-F, одбацује нулта, а прихвата радна хипотеза, тј. да се само поређењем еталонског бетона, справљеног без минералних додатака и бетона, код којег је као минерални додатак примијењен искључиво електрофилтерски пепео, разлика аритметичких средина 2-дневних чврстоћа при притиску, статистички значајна, за ниво повјерења 0,05. За остале тестиране парове, прихвата се нулта хипотеза, тј. сматра се да резултати припадају истом скупу. Анализом односа, емпиријских вриједности тестова парова у којима фигурише бетон са комбинацијом минералних додатака – кречњачким брашном и електрофилтерским пепелом, закључује се да је емпиријска вриједност теста за пар C-E – C-F добијена не доминантно због утицаја примјене електрофилтерског пепела, него првенствено због веће количине воде и већег водопрашког фактора, примијењеног код бетона C-F. Са тим у вези, закључује се да за наведени ниво повјерења примјена и избор врсте минералног додатка, нема значајан утицај на вриједност 2-дневне чврстоће бетона при притиску.

ТАБЕЛА III. ТЕСТИРАЊЕ ЗНАЧАЈНОСТИ РАЗЛИКА ЧВРСТОЋА БЕТОНА ПРИ ПРИТИСКУ, У СТАРОСТИ ОД 28 ДАНА

Врста бетона	Чврстоћа при притиску	Станд. дев.	Врста бетона	Чврстоћа при притиску	Станд. дев.	Оцјена станд. грешке	Емпир. вр. теста
	$f_{c,cube,28}$	S_n		$f_{c,cube,28}$	S_n		
	[MPa]	[MPa]		[MPa]	[MPa]		
E	55,8	5,791	C	50,3	2,053	4,3446	1,5505
E	55,8	5,791	F	44,4	1,776	4,2831	3,2598
E	55,8	5,791	C+F	49,3	1,800	4,2881	1,8565
C	50,3	2,053	F	44,4	1,776	1,9195	3,7645
C	50,3	2,053	C+F	49,3	1,800	1,9306	0,6344
F	44,4	1,776	C+F	49,3	1,800	1,7880	3,3563

Поређењем тестних и теоријске вриједности парова бетона старости 28 дана констатује се да се за све парове, у којима фигурише бетон C-F, одбацује нулта, а прихвата радна хипотеза, тј. само су за парове C-E – C-F, C-C – C-F

и C-F – C-C+F, разлике аритметичких средина 28-дневних чврстоћа при притиску, статистички значајне. За остале тестиране парове, прихвата се нулта хипотеза, за ниво повјерења 0,05, тј. сматра се да резултати припадају истом скупу. Из наведеног се закључује да доминантан утицај на вриједност чврстоће бетона при притиску, у старости од 28 дана, има примјена електрофилтерског пепела. Како је бетон C-F справљен са електрофилтерским пепелом и нешто већом количином воде (што због постизања захтијеване конзистенције условљава примјена ове врсте минералног додатка), може се закључити да се при оваквој комбинацији компонентних материјала добијају бетони мањих чврстоћа у односу на бетоне справљене са другим примјењеним компонентним материјалима и њиховим комбинацијама. Исто тако, важно је напоменути да је евидентирани пад чврстоће у функцији времена, а за интервал од 7 до 28 дана старости бетона (како се види на Сл. 5), опадајућег карактера. У том смислу, резултати показују да примјена необрађеног електрофилтерског пепела условљава пад чврстоће у старостима 7, 14 и 28 дана, респективно, за 25,7%, 23,5% и 20,4% у односу на случај потпуног изостанка примјене додатака бетону. Исто тако показало се да примјена комбинације необрађеног електрофилтерског пепела и кречњачког брашна условљава пад чврстоће у старостима 7, 14 и 28 дана, респективно, за 19,3%, 16,3% и 11,7% у односу на случај потпуног изостанка примјене додатака бетону. Обе ове констатације иду у прилог закључку да ће бетон у којем је дио цемента замијењен електрофилтерским пепелом, при старостима већим од 28 дана, достићи вриједности чврстоће при притиску бетона у потпуности справљених са цементом, односно бетона без минералних додатака.

Анализа утицаја примјене кречњачког брашна показује да је утицај на чврстоћу при притиску ове врсте додатка значајно мањи од утицаја електрофилтерског пепела. Бетони справљени са кречњачким брашном, у односу на бетоне без минералних додатака, имају просјечно мању чврстоћу за 16,4%, 13,8% и 9,9% у старостима, респективно, 7, 14 и 28 дана. Са друге стране, бетони справљени са кречњачким брашном, у односу на бетоне са необрађеним електрофилтерским пепелом, имају већу чврстоћу при притиску просјечно за 4,4 МПа, тј. око 11,2% у старости од 7 дана, за 5,1 МПа, тј. око 11,3% у старости од 14 дана и за 5,9 МПа, тј. око 11,7% у старости од 28 дана. Наведеним се такође уочава да је темпо опадајућег утицаја на смањење чврстоће бетона при притиску приближно једак за обе врсте минералних додатака, са благом предности кречњачког брашна, у односу на електрофилтерски пепео, при чему се напомиње да та предност није статистички значајна.

Односом 2-дневних и 28-дневних чврстоћа при притиску, констатован је брз прираштај чврстоће у функцији времена за све бетоне, са вриједностима фактора чврстоће у интервалу од 0,53 до 0,63, при чему је градијација овог фактора слиједећим редослиједом: C-F, C-C+F, C-C и C-E.

IV. ЗАКЉУЧАК

Трендови и начини градње, како на домаћем, тако и свјетском тржишту, изискују све већу потребу за производњом цемента, који се у највећој мјери примјењује као неизоставна компонента највећег броја врста и количина бетонских композита. Истовремено, истраживачке студије указују да је за 7 до 8% укупне емисије CO₂ у свијету, одговорна управо индустрија цемента. Због наведеног, али и низа других, у раду изложених разлога, од изузетног је значаја изналажење рјешења којим би се смањило утрошак цемента у малтерским и бетонским композитима.

Као једно од рјешења овог проблема у раду се предлаже примјена електрофилтерског пепела, добијеног као нуспроизвод у процесу рада термоелектрана. Наиме, електрофилтерски пепео је већ деценијама познат стручној јавности као додаток у производњи цемента, а у новије вријеме и као минерални додаток бетонима и малтерима. Са тим у вези, напомиње се да нису све врсте пепела одговарајуће за предметну намјену, јер немају сви потребна пуцоланска својства, одговарајући хемијски и минерални састав, финоћу млива, гранулометрију итд., те да је за декларисање неког пепела, као могућег додатка цементима или малтерским и бетонским композитима, неопходан низ процеса његовог испитивања и одговарајуће обраде. Све ово, иако еколошки и економски доприноси, изискује даљњи утрошак енергије. Стога се експерименталним истраживањем, приказаним у раду, анализира могућност примјене потпуно необрађеног електрофилтерског пепела, у стању онаквом, какав је добијен као нуспроизвод из термоелектране и то као компонента савремене врсте бетонских композита – самоуграђујућег бетона. Са друге стране, примјена ове врсте бетонског композита, такође има повољан утицај са еколошког и економског аспекта.

Анализом врсте самоуграђујућих бетонских композита: C-E – бетон без примјене минералних додатака, C-C – бетон у којем је 17,5% масе цемента замијењено кречњачким брашном, C-C+F – бетон у којем је 17,5% масе цемента замијењено комбинацијом кречњачког брашна и електрофилтерског пепела силикатног типа у једнаком односу и C-F бетон у којем је 17,5% масе цемента замијењено електрофилтерским пепелом силикатног типа, показало се да је за све бетоне могуће постићи високе захтјеве у погледу самоуграђљивости и компактности свјеже бетонске масе, као и конструкцијска својства бетона у очврслном стању. Са тим у вези, показало се да примјена минералних додатака нема статистички значајан утицај на ране чврстоће (чврстоће до старости 2 дана), али да деградира чврстоћу бетона при притиску за старости веће од 2 дана. Ипак, важно је напоменути да је тај утицај у функцији времена опадајућег карактера, тако да се уочава тенденција да, при старостима већим од 28 дана, бетони са предметним минералним додацима и њиховом комбинацијом, достигну чврстоће бетона, код којих је као везиво примјењен искључиво цемент.

Примјена електрофилтерског пепела има значајнији утицај на смањење чврстоће бетона при притиску у односу на примјену кречњачког брашна, у истом односу према маси цемента. Конкретно, допринос смањења чврстоће бетона при притиску услјед примјене кречњачког брашна износи: 16,4%, 13,8% и 9,9%, услјед примјене електрофилтерског пепела износи: 25,7%, 23,5% и 20,4% и услјед примјене комбинације кречњачког брашна и електрофилтерског пепела износи: 19,3%, 16,3% и 11,7% – за све наведено у старостима, респективно, 7, 14 и 28 дана, у односу на еталонски бетон, справљен без минералних додатака.

Експериментом се, такође, показало могућим постићи брзе прираштаје чврстоћа самоупраћујућих бетона са предметним минералним додацима и њиховом комбинацијом, што се сматра значајним са аспекта уштеде времена током градње и могућности ранијих скидања оплате са бетонских конструкција.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] R. Panichi, T. Nadramia, P. Segulier, A. Michel, D. Huang, "Industry Top Trends 2020: Building Materials," S&P Global Ratings, pp. 1-22, 2019.
- [2] E. Tkaczewska, G. Malata, "Properties of the Cement, Slag and Fly Ash Mixture Composition Corresponding to CEM II/C-M and CEM VI," Materials Proceedings, Vol. 13, No. 1:11, 2023.
- [3] А. Савић, Истраживање својстава свежег и очврслог самозбијајућег бетона са минералним додацима на бази индустријских нуспродуката, Докторска дисертација, Грађевински факултет Универзитета у Београду, Београд, 2015.
- [4] Г. Броћета, М. Малешев, В. Радоњанин, Трајност самоупраћујућег бетона у функцији примијешане врсте агрегата, Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет Универзитета у Бањој Луци, Бања Лука, 2021.
- [5] G. Rojo-Lopez, B. Gonzalez-Fonteboa, F. Martínez-Abella, I. Gonzalez-Taboada, "Rheology, durability, and mechanical performance of sustainable self-compacting concrete with metakaolin and limestone filler," Case Studies in Construction Materials, Vol. 17, p. e01143, 2022.
- [6] A. Hameed, A. M. Rasool, Y. E. Ibrahim, M. F. U. D. Afzal, A. U. Qazi, I. Hameed, "Utilization of Fly Ash as a Viscosity-Modifying Agent to Produce Cost-Effective, Self-Compacting Concrete: A Sustainable Solution," Sustainability, Vol. 14, No. 18, p. 11559, 2022.
- [7] D. Jevtić, A. Savić, G. Broćeta, "Application of fly ash and expanded clay in lightweight SCC concrete," VIII International Scientific Conference "Contemporary Materials," Book of proceedings, Academy of Sciences and Arts of Republic of Srpska, pp. 201-211, September 6-7, 2015, Banjaluka, 2016.
- [8] Г. Броћета, Истраживање компонентних материјала самозбијајућег бетона са методама испитивања свјеже бетонске масе, Магистарска теза, Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет Универзитета у Бањој Луци, Бања Лука, 2010.
- [9] D. Bjegović, M. Serdar, M. Jelčić Rukavina, A. Baričević, M. Pezer, "Possibilities in concrete industry towards circular economy through industrial symbiosis," Building materials and structures 2014, No. 4, pp. 31-42, 2014.
- [10] M. Malešev, V. Radonjanin, S. Draganić, S. Šupić, M. Laban, "Influence of fly ash and decreasing water-powder ratio on performance of recycled aggregate concrete," Građevinar, Vol. 69, No. 8, pp. 811-820, 2017.
- [11] A. Savić, G. Broćeta, M. Aškrabić, A. Gajić, "Effect of aggregate type and fly ash content on properties of self-compacting concrete", XI International Scientific Conference "Contemporary Materials," Book of proceedings, Academy of Sciences and Arts of Republic of Srpska, pp. 23-40, September 2-3, 2018, Banjaluka, 2019.
- [12] A. Savić, M. Vlahović, S. Martinović, N. Đorđević, G. Broćeta, T. Volkov Husović, "Valorization of Fly Ash from a Thermal Power Plant for Producing High-Performance Self-Compacting Concrete," Science of Sintering, Vol. 52, No. 3, pp. 307-327, 2020.
- [13] EN 450-1:2012 Fly ash for concrete - Part 1: Definitions, requirements and quality control.
- [14] EN 197-1:2011 Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements.
- [15] ASTM C 618:2022 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete
- [16] K. Saphouvong, K. Thepvongsa, C. Sonemanivong, S. Simixay, "The Properties of Self-Compacting Concrete Using Fly Ash from Hongsa Power Plant," IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 849, p. 012071, 2020.
- [17] M. Abed, K. Rashid, M. U. Rehman, M. Ju, "Performance Keys on Self-Compacting Concrete Using Recycled Aggregate with Fly Ash by Multi-Criteria Analysis," Journal of Cleaner Production, Vol. 378, p. 134398, 2022.
- [18] S. Badgujar, A. Kumar Dwivedi, "Economical and environment friendly self-compacting concrete," IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 1130, p. 012041, 2022.
- [19] EN 206:2013+A2:2021 Concrete - Specification, performance, production and conformity.
- [20] BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA, EFNARC: "The European Guidelines for Self-Compacting Concrete - Specification, Production and Use", May 2005.
- [21] EN 12350-1:2009 Testing fresh concrete - Part 1: Sampling.
- [22] EN 12350-7:2009 Testing fresh concrete - Part 7: Air content - Pressure methods.
- [23] EN 12350-6:2009 Testing fresh concrete - Part 6: Density.
- [24] EN 12350-8:2010 Testing fresh concrete - Part 8: Self-compacting concrete - Slump-flow test.
- [25] EN 12390-7:2009 Testing hardened concrete - Part 7: Density of hardened concrete.
- [26] EN 12390-3:2009 Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens.

ABSTRACT

The cement industry is considered one of the most important causes of CO₂ emissions. To find a solution to this problem, the paper proposes replacing 17,5% of the required amount of cement for the production of self-compacting concrete with additions. Through experimental research on four types of self-compacting concrete, the type of additions was varied - concrete without additions, limestone filler, fly ash and a combination of limestone filler and fly ash. In this sense, it is emphasized that the fly ash was used originally, as it was formed as a by-product in the thermal power plant, i.e. it was not sieved or further processed before use. The research results show that the application of additions has no effect on the compressive strength of concrete at the age of 2 days, but it affects the reduction of the compressive strength of concrete at an age of more than 2 days. At the same time, fly ash has a significant impact. However, this influence is a function of time of a decreasing character, with a tendency for concretes with additions to reach the strengths of concrete without additions at ages greater than 28 days.

EFFECT OF FLY ASH ON THE COMPRESSIVE STRENGTH OF SELF-COMPACTING CONCRETE

GORDANA BROĆETA, ALEKSANDAR SAVIĆ, ANĐELKO CUMBO, MARINA LATINOVIĆ, ŽARKO LAZIĆ, DRAŽENKA RADIĆ, JOVAN VOLAŠ