



УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ – ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ  
UNIVERSITY OF BELGRADE – FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

# МАТЕРИЈАЛИ И КОНСТРУКЦИЈЕ У САВРЕМЕНОМ ГРАЂЕВИНАРСТВУ

*Монографија  
посвећена 85-ом рођендану  
професора Михаила Мурављова*

Уредници

Проф. др Драгица Јевтић  
Проф. др Бошко Стевановић  
Проф. др Димитрије Закић

Београд, новембар 2022.

Издавач

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ – ГРАЂЕВИНСКИ ФАКУЛТЕТ

За издавача

Проф. др Владан Кузмановић, декан Факултета

Уредници

Проф. др Драгица Јевтић

Проф. др Бошко Стевановић

Проф. др Димитрије Закић

Рецензенти

Проф. др Бранко Божић

Проф. др Душан Продановић

Техничка припрема

Стоја Годоровић - Сашка

Дизајн корица

Александра Ђорђевић

Штампа

Академска мисао, Београд

Тираж: 200 примерака

## ПРЕДГОВОР

Ова Монографија посвећена је проф. др Михаилу Мурављову, дипломираном грађевинском инжењеру, дугогодишњем професору Грађевинског факултета Универзитета у Београду – а излази поводом његовог 85-ог рођендана. Издавањем ове Монографије, Грађевински факултет са својим наставницима и сарадницима, жели да искаже пажњу, поштовање и велику захвалност професору Мурављову за његов изузетан допринос на пољу наставе, струке и науке.

Проф. др Михаилу Мурављов је рођен 19.12.1937. године у Зрењанину. На Грађевинском факултету у Београду радио је од 1981. године до пензионисања 2003. године, где је на редовним студијама предавао предмете Грађевински материјали, Технологија бетона, Грађевински материјали 2, Испитивање конструкција (извесно време), Зградарство 2 и Инсталације и завршни радови у грађевинарству. На последипломској настави предавао је Реологију грађевинских материјала, Изабрана поглавља технологије бетона и бетонских конструкција и Лаке бетоне.

Поред предавања на матичном факултету, проф. др Михаилу Мурављов је држао предавања на Грађевинском факултету Универзитета Црне Горе у Подгорици, на Грађевинско архитектонском факултету у Нишу, Факултету техничких наука Универзитета у Приштини (Косовска Митровица), као и на Факултету техничких наука у Новом Саду.

За предмете које је предавао, публиковао је бројну и запажену уџбеничку литературу, а његове књиге користиле су се и у свим бившим републикама заједничке државе.

Проф. др Михаилу Мурављов јесте отишао у пензију по сили закона 2003. године, али је сваког дана и даље са нама, својим колегама, посвећено и вредно ради публикујући корисну литературу, прати иновације у области материјала и увек је спреман на стручну дискусију и предлоге инжењерских решења у пракси.

Монографија под насловом „Материјали и конструкције у савременом грађевинарству“ садржи 13 радова наставника и сарадника Грађевинског факултета у Београду из различитих области: два рада из групације Грађевински материјали и Технологија бетона, два рада из области Бетонских конструкција, по један рад из области Дрвених конструкција и Металних конструкција, као и из области Испитивања конструкција, Хидротехнике, Механике тла, Теорије конструкција, Геодезије, Саобраћајница и Грађевинске физике.

Укупан број аутора и коаутора, од пензионисаних наставника до најмлађих сарадника је 42.

Радови у овој Монографији нису посвећени само једној тематској области. Они садрже резултате вредних вишегодишњих експерименталних истраживања која су вршена у оквиру како докторских дисертација, тако и научних пројеката, дају домете иновативних технологија, као и интересантне примере из праксе, а све на линији одрживог развоја и примене рециклираних материјала и потребе за штедњом енергије и ресурса.

И овом приликом захваљујемо се свим ауторима на приложеним радовима, које ће читалачка публика, надамо се, високо оценити.

Како је ова Монографија посвећена 85-ом рођендану проф. др Михаила Мурављова, ми му желимо дуг живот, добро здравље, још много нових публикованих књига и активну сарадњу са колегама у сваком погледу као и до сада.

Надамо се да ће ова Монографија бити најцелисходнији поклон и обрадовати професора Мурављова поводом његовог рођендана, поштоваоца писане речи и аутора бројне литературе из најшире области грађевинарства.

Уредници

Драгица Јевтић

Бошко Стевановић

Димитрије Закић

Београд, новембар 2022.

## САДРЖАЈ

<b>Проф. др Михаило Мурављов - Биографија</b>	I	<b>Иновативни материјали и технологије за изградњу путева</b> Александар Цветановић, Горан Младеновић, Марко Орешковић... 107
<b>Испитивање квалитета бетона уграђеног у конструкцију</b> Димитрије Закић, Бранко Милосављевић, Александар Радевић.....	1	<b>Летећи пепео - карактеризација и примена у хидротехници</b> Владана Рајаковић-Огњановић, Дејана Ђорђевић, Владан Кузмановић, Јован Деспотовић..... 119
<b>Малтери на бази креча – јуче, данас, сутра</b> Марина Ашкрабић, Александар Савић, Драгица Јевтић .....	13	<b>Могућност примене пепела из ТЕ у Србији као грађевинског материјала у изградњи саобраћајне инфраструктуре</b> Мирјана Вукићевић, Сања Јоцковић, Милош Марјановић, Вељко Пујевић ..... 129
<b>Пешачко-бициклически мост код ADA-MALLa у Београду: Испитивање статичким пробним оптерећењем</b> Зоран Мишковић, Синиша Саватовић, Љиљана Мишковић, Радоман Чворовић.	27	<b>Примена технологије премера високе дефиниције у праћењу грађевинских конструкција</b> Бранислав Бајат, Марко Пејић, Стефан Миљковић, Милутин Пејовић .... 141
<b>Ојачање дрвених конструкција FRP композитним материјалима</b> Иван Глишовић, Марија Тодоровић, Бошко Стевановић .....	37	<b>Физичко моделовање и in-situ мерења транспорта топлоте кроз вишеслојне спољашње грађевинске зидове</b> Горан Тодоровић, Радован Госпавић..... 151
<b>Испитивање и оцена одрживих решења за конструкцијске бетоне</b> Снежана Маринковић, Иван Игњатовић, Никола Тошић, Јелена Драгаш, Ведран Царевећ.....	57	
<b>Моравски коридор – мост на km 18+107</b> Дејан Бајић, Душко Бобера, Ведран Царевећ, Иван Игњатовић .....	75	
<b>Научна достигнућа групације за металне конструкције у другој деценији 21. века</b> Драган Буђевац, Златко Марковић, Јелена Добрић, Милан Спремић.....	83	
<b>Мултимодална pushover анализа моста са утицајем интеракције тла и објекта</b> Мира Петронијевић, Мирослав Марјановић .....	93	

**Владана РАЈАКОВИЋ-ОГЊАНОВИЋ, Дејана ЂОРЂЕВИЋ,  
Владан КУЗМАНОВИЋ, Јован ДЕСПОТОВИЋ**

## **ЛЕТЕЋИ ПЕПЕО - КАРАКТЕРИЗАЦИЈА И ПРИМЕНА У ХИДРОТЕХНИЦИ**

### *FLY ASH – CHARACTERIZATION AND APPLICATION IN HYDROTECHNICS*

**др Владана РАЈАКОВИЋ-ОГЊАНОВИЋ, дипл.техн.инж.**  
**ванредни професор Грађевинског факултета Универзитета у Београду**

**др Дејана Ђорђевић, дипл.грађ.инж.**  
**ванредни професор Грађевинског факултета Универзитета у Београду**

**др Владан КУЗМАНОВИЋ, дипл.грађ.инж.**  
**редовни професор Грађевинског факултета Универзитета у Београду**

**др Јован ДЕСПОТОВИЋ, дипл.грађ.инж.**  
**редовни професор Грађевинског факултета Универзитета у Београду, у пензији**

#### *Резиме*

Летећи пепео (ЛП) је нуспроизвод сагоревања чврстих горива. У уводном делу рада дат је осврт на настанак (порекло), хемијски састав и класификацију летећег пепела. ЛП је прашкаста, чврста супстанца чији хемијски састав чини несагорели угљеник, метални оксиди (Si, Fe, Ca и Al) и друге неорганске супстанце. Структурна анализа сировог и модификованог узорка ЛП даје смернице ка потенцијалној промени ЛП. У другом делу рада наведене су и описане области примене ЛП. Примена ЛП налази своје место: у синтези зеолита, у индустрији керамике, у пречишћавању отпадних вода, у сорпционим материјалима. Летећи пепео има потенцијалну примену за побољшање деградираног земљишта, а користи се и као замена за сировину у грађевинској индустрији или као адитив у индустрији цемента. Летећи пепео је, због повољних геомеханичких и геотехничких карактеристика, нашао примену и у изградњи насипа. Такође, летећи пепео се користи за изградњу брана од ваљаног бетона. У Србији се данас ЛП користи за ободне насипе на депонијама пепела.

Кључне речи: примена, летећи пепео, хидротехника.

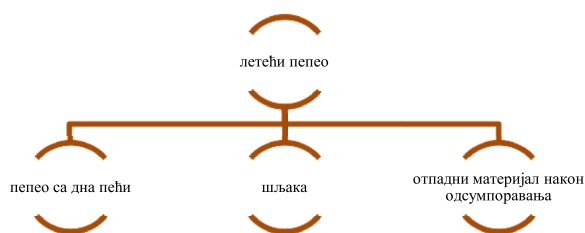
#### *Summary*

Fly ash (FA) is a by-product of solid fuels burning. In the introductory part of the paper, an overview of the origin, chemical composition and classification of fly ash is given. FA is a powdery, solid substance whose chemical composition consists of unburnt carbon, metal oxides (Si, Fe, Ca and Al) and other inorganic substances. Structural analysis of the raw and modified FA sample provides guidance towards potential FA change. In the second part of the paper, the areas of FA application are listed and described. The application of fly ash finds its place: in the synthesis of zeolites, in the ceramics industry, in the purification of waste water, in sorption materials. Fly ash has potential applications for improving degraded soils. Fly ash is used as a substitute for raw material in the construction industry or as an additive in the cement industry. Due to favorable geomechanical and geotechnical characteristics, FA has also found application in the construction of embankments. Fly ash is also used for Roller Compacted Concrete Dams. In Serbia, FA is used for containment embankments at ash impoundments of Thermal Power Plants.

Keywords: application, fly ash, hydraulic engineering.

## 1. О ЛЕТЕЋЕМ ПЕПЕЛУ

Летећи пепео (ЛП) је нуспроизвод сагоревања чврстих горива. ЛП је прашкаста, чврста супстанца чији хемијски састав чини несагорели угљеник, метални оксиди (Si, Fe, Ca и Al) и друге неорганске супстанце. Несагорели угљеник представља извор активног угља који представља важну потенцијалну примену ЛП у адсорпцији. Састав ЛП је променљив и карактеризација ЛП је први задатак код дефинисања могуће примене ЛП. ЛП се категорише у две класе: Ф или Ц, у зависности од максималног и минималног удела  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , и  $\text{SO}_3$ , у процентима. Пепео, настао сагоревањем угља настаје у електранама, као нуспроизвод сагоревања угља. Нуспроизводи сагоревања пепела од угља могу бити летећи и приземни пепео, котловска шљака и димни гас, како је приказано на слици 1.



Слика 1. Нуспроизводи сагоревања угља

Честице ЛП, главни нуспроизвод сагоревања угља, fine су, прашкасте и хетерогене. Састав ЛП зависи од врсте угља, услова сагоревања, контроле хлађења и сагоревања. Разноликост састава ЛПа представља изазов, када је у питању карактеризација и класификација типова ЛП. ЛП је класификован у две класе: Ц и Ф. На слици 2 наведене су разлике између класа. Ова подела преузета је од Америчког друштва за испитивање и материјале (АСТМ) [1]. Летећи пепео класе Ф има пуцоланске карактеристике, добија се антрацитним или битуменским сагоревањем угља. Укупна количина  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , код ове класе ЛП мора да буде изнад 70 %. Пепео класе Ц има пуцоланске и цементне карактеристике и производи се сагоревањем подбитуменског угља или лигнита. Укупна количина  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , према АСТМ мора да буде већа од 50 %.

Садржај металних оксида основа је за већину техника карактеризације за ЛП. Постоји подела ЛПа према којој је ЛП са садржајем калцијум-оксида већим од 20 % класификован као ЛП класе Ц, а ЛП са нижим садржајем калцијум-оксида као ЛП класе Ф [1]. Постоји и подела ЛП

на класе Ц и Ф, на основу процента  $\text{CaO}$ , при чему класа Ц одговара уделима  $\text{CaO}$  већим од 10%, а класа Ф уделима мањим од 10%.



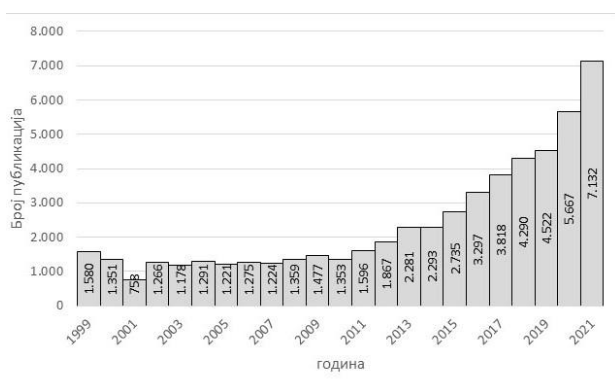
Слика 2. Класификација и карактеризација пепела

ЛП који има пуцоланске карактеристике садржи силицијум-диоксид или силицијум и алуминијум, што омогућава уградњу ЛП у бетон, као делимичну замену за цемент [2]. ЛП садржи три основне компоненте: (1) органску материју, (2) неорганску материју која се састоји од аморфне и кристалне фазе и (3) смешу органских и неорганских једињења [3,4]. Удео несагорелог угљеника у ЛП указује на неефикасност у процесу сагоревања и представља препреку адекватном коришћењу ЛП. Удео, односно карактеристике несагорелог угљеника у ЛП одређују квалитет и врсту угља. ЛП се користи у многим индустријским гранама посебно у грађевинарству односно у индустрији бетона. ЛП се користи и примењује и у третману отпадних вода, синтези зеолита и стабилизацији земљишта [5,6]. На слици 3 приказан је пораст броја научних радова који се баве летећим пепелом. Одабран је период од 1990 до 2021. Од 1990 до 2021 пораст изражен бројевима објављених радова се креће од 1580 до 7132.

## 2. СТРУКТУРА И НАСТАНАК ЛЕТЕЋЕГ ПЕПЕЛА

Минералoшку структуру ЛП чине кристалне и стакласте минералне компоненте у неорганској аморфној фази, као и делимично и/или непотпуно сагорели угљеник [7]. Према фазама формирања ЛП разликују се примарна, секундарна и терцијарна фаза. Примарна фаза не подразумева промене у структури угља. Током секундарне фазе сагоревања угља настају оксиди и силикати. Терцијарна фаза обухвата настанак структура као што су портландит и

гипс. Кључни структурни елементи који чине ЛП су: силицијум, кисеоник, калцијум, алуминијум, угљеник, гвожђе, магнезијум, калијум, водоник, титан, натријум, фосфор, азот и баријум [8]. Брзина хлађења честица ЛП утиче на формирање неорганске материје. Брзо хлађење доводи до стварања малих стакластих честица, док споро хлађење доводи до настанка великих кристалних честица. Неорганске материје, аморфне и/или кристалне фазе, представљају основну структуру ЛП. Летећи пепео се у основи може класификовати и категорисати и према садржају оксида:  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Када расте удео  $\text{CaO}$ , опада удео  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Како удео  $\text{CaO}$  расте, расте и садржај  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{SO}_3$ .



Слика 3. Пораст броја објављених радова који се баве ЛП у периоду од 2000 до 2021

Густина летећег пепела може се одредити из садржаја гвожђа (Fe) и угљеника (C). Дакле, када се садржај угљеника у ЛП повећа, густина се смањује, а што је више Fe, то је већа и густина ЛП. Поред корелације са густином, садржај угљеника утиче и на моћ упијања воде (хигроскопност) и обрадивост ЛП. Летећи пепео се може класификовати и према разлици у садржају угљеника између класа која се одређује израчунавањем губитка при жарењу.

Губици при жарењу су израженији, односно већи када је удео несагорелог угљеника већи. У складу са тим, класа Ф има већи губитак при жарењу у односу на класу Ц.

Истраживачи са Грађевинског факултета, Универзитета у Београду, у оквиру својих пројеката бавили су се анализом и класификацијом летећих пепела у Србији. Да би се дефинисала и спровела категоризација пепела, могуће је помоћу рендгенске флуоресценције (енг. XRF) обавити елементарну анализу и одговарајућим трансформацијама прерачунати концентрације оксида метала. У табели 1 приказане су

прерачунате концентрације калцијум оксида ( $\text{CaO}$ ). Сви узорци пепела без додатака имају концентрације овог оксида испод 10%, па се може закључити да анализирани узорци пепела припадају класи Ф према правилнику ASTM. Дакле, да би се унапредиле карактеристике пепела из ових термоелектрана ради употребе у производњи бетона, неопходно је додавање портланд цемента, живог или гашеног креча.

Табела 1. Добијене концентрације  $\text{CaO}$  у ЛПу произведеном у ТЕ у Србији

Узорак	Ca (%)	CaO (%)
ЕФП ТЕ "Костолац"	4,83	6,76
ЕФП ТЕ "Костолац" + креч 6,8%	9,46	13,24
ЕФП ТЕ "Костолац" + цемент 5%	6,44	9,01
ЕФП ТЕ "Колубара"	3,14	4,39
ЕФП ТЕ "Колубара" + креч 7%	6,76	9,46
ЕФП ТЕ "Колубара" + цемент 5%	5,13	7,18
Шљака ТЕ "Морава"	4,42	6,18
ЕФП ТЕ "Морава"	4,08	5,71
ДП ТЕ "Морава"	4,41	6,18
ДП ТЕ "Морава" + креч 5%	8,13	11,38
ДП ТЕ "Морава" + креч 7%	10,13	14,17
ТЕНТ А	2,56	3,58
ТЕНТ Б	3,18	4,46

Према SRPS EN 450 укупни садржај  $\text{CaO}$  не треба да прелази 10,0% масе, па се сматра да је захтев за реактивни калцијум-оксид испуњен за све узорке пепела без додатака и узорке пепела са додатком цемента, као и за узорке електрофилтерског пепела ТЕ „Колубара“ са додатком 7% креча. Додатак креча у пепео из ТЕ „Костолац“ (7 %) и ТЕ „Морава“ (и 5 и 7%) утиче на повећање концентрације  $\text{CaO}$  изнад дозвољене границе за употребу при прављењу бетона.

### 2.1. Кристалне фазе

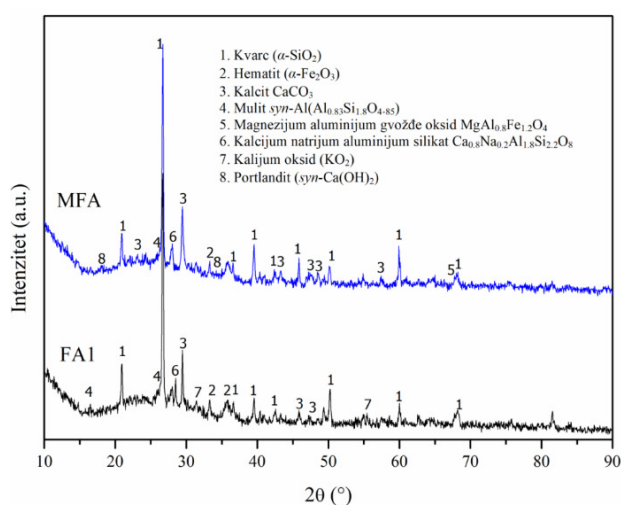
Кристалне фазе ЛП чине 5 до 50% укупне масе. Кристалне фазе се састоје од различитих, мешовитих кристалних фаза. Анхидрит ( $\text{CaSO}_4$ ), мервинит, рериклас и трикалцијум-алуминат (енг. С3А) се налазе у летећем пепелу класе Ц, са већим уделом, као и мулит, мелит, кварц, хематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) и креч, са мањим уделом. Анхидрит настаје услед присуства  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{CaO}$  у пећи. Анхидрит је углавном укључен у формирање еtringита. Мулит није реактиван и више се налази у летећем пепелу класе Ф. Међутим, кварц је присутан у свим врстама летећег пепела. Мелит

и мервинит су повезани са садржајем MgO који је чврсти раствор геленита и акерманита. Периклас и креч су кристални MgO, односно CaO. Креч има кључну улогу у учешћу у реакцијама хидратације, јер се налази у свим типовима ЛП. Креч утиче на повећање рН вредности. Трикалцијум-алуминат је одговоран за присуство и већи удео сулфата. Кристалне фазе у ЛП се препознају коришћењем рендгенске дифракције, за разликовање реактивне и стабилне фазе. Рендгенска дифракциона анализа (РДА) се заснива на интеракцији испитиваног материјала и рендгенског зрачења. Проласком рендгенског зрака кроз узорак долази до његовог судара са атомима или јонима који постају извор новог рендгенског зрачења. X-зраци одређене таласне дужине  $\lambda$  биће рефлектовани са паралелних равни кристала када на равни падну под одређеним углом  $\theta$ . При датој таласној дужини X-зрака доћи ће до појаве максималне рефлексије само при одређеним угловима сјаја упадних зрака. Мерење интензитета дифрактованог зрачења, одређеним коракком и експозицијом у различитом опсегу угла  $2\theta$  добијају се различите вредности рефлексије зрачења са кристалне решетке услед стохастичке оријентације кристала у спрашеном узорку. Свако кристално једињење има карактеристичне положаје рефлексија на основу којих може да се идентификује из података добијених мерењем и упоређивањем са базом података [9, 10].

РДА на праху (*енг. X-ray diffraction, XRD*) успешно се користи за идентификацију монофазних и вишефазних кристалних једињења, идентификацију смеша једног или више кристалних једињења, одређивање кристалне структуре претходно идентификованих материјала, одређивање степена кристаличности у непотпуно аморфним материјалима, квантитативно одређивање присутних фаза на основу односа интензитета пикова, одређивање величине кристала на основу ширења пикова и одређивање облика кристалита проучавањем симетрије пикова. Део истраживања истраживача са Грађевинског факултета Универзитета у Београду који се односи на анализу ЛП (*енг. Fly ash - FA*) обухватио је и анализе разлике у кристалној структури сирових узорака ЛП и модификованих узорака ЛП (*енг. Modified Fly ash-MFA*). Резултати су приказани на слици 4. Рендгенском дифракционом анализом утврђено је да сирови и модификовани узорци имају мешовиту кристалну структуру и минералоски састав. Спектри рендгенске дифракционе анализе показују да оба узорка имају хетерогену структуру, да

претежно садрже кварц ( $\text{SiO}_2$ ), калцијум натријум алуминијум силикат ( $\text{Ca}_{0,8}\text{Na}_{0,2}\text{Al}_{1,8}\text{Si}_{2,2}\text{O}_8$ ) и калцит ( $\text{CaCO}_3$ ). Поред ових минерала идентификовани су: мулит (*syn-Al*( $\text{Al}_{0,83}\text{Si}_{1,8}\text{O}_{4,85}$ ), хематит ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), магнезијум алуминијум гвожђе оксид ( $\text{MgAl}_{0,8}\text{Fe}_{1,2}\text{O}_4$ ), калијум оксид ( $\text{KO}_2$ ) и портландит (*syn-Ca*( $\text{OH}$ ) $_2$ ). Поређењем површина под кристалним и аморфним пиковима добијена је кристаличност за модификовани ЛП 61%, а за сирови ЛП 59%. Састав ЛП је карактеристичан за пепеле Ф класе (углавном од алуминосиликатног стакла и кристалног кварца, мулита) [3].

Састав компонената сировог и модификованог ЛП приказан је у табели 2.



Слика 4. Спектри рендгенске дифракционе анализе узорака сировог и модификованог ЛПа

Табела 2. Структурна анализа сировог и модификованог узорка ЛПа

Основне компоненте, %	СЛП	МЛП
Кварц ( $\alpha\text{-SiO}_2$ )	43,9	36,3
Хематит ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ )	4,20	3,30
Калцит $\text{CaCO}_3$	15,7	15,4
Мулит <i>syn-Al</i> ( $\text{Al}_{0,83}\text{Si}_{1,8}\text{O}_{4,85}$ )	14,7	10,3
Магнезијум алуминијум гвожђе оксид $\text{MgAl}_{0,8}\text{Fe}_{1,2}\text{O}_4$	2,5	2,5
Калцијум натријум алуминијум силикат $\text{Ca}_{0,8}\text{Na}_{0,2}\text{Al}_{1,8}\text{Si}_{2,2}\text{O}_8$	15,7	26,6
Калијум оксид ( $\text{KO}_2$ )	3,40	1,80
Портландит ( <i>syn-Ca</i> ( $\text{OH}$ ) $_2$ )	-	3,50

## 2.2. Аморфне фазе

Честице аморфне фазе су кружне са опсегом величине пречника у распону од 1 до 5  $\mu\text{m}$ . Ове честице настају спајањем честица које изазивају



нарушавање кристалних структура. Аморфне фазе је тешко карактерисати. Ниска концентрација калцијума у угљу утиче на настанак алуминосиликатног стакла (аморфне фазе), док висок садржај калцијума доводи до настанка калцијум алуминосиликатног стакла (аморфне фазе).

### 2.3. Несагорели угљеник

Несагорели угљеник указује на неефикасност у процесу сагоревања и што је већи удео овог угљеника то је израженија препрека ка примени ЛП. Према садржају несагорелог угљеника дефинишу се основне функционалне карактеристике према типу, квалитету, условима сагоревања и потребним степеном напајања реактора угљем. Употреба ЛП, односно садржај несагорелог угљеника дефинише могућност примене ЛП као замену за цемент. Од свих карактеристика за замену за цемент највише се разматра потенцијал за апсорпцију ваздуха. С друге стране, удео несагорелог угљеника може бити позитиван за друге, разноврсне примене. Посебан допринос несагорели угљеник има за адсорпцију органских једињења (боје, феноли, полихлоровани бифенили, састојци нафте, хербициди), за уклањање токсичних елемената, посебно димних гасова живе, и као јефтин извор активног угља, кокса у металуршкој индустрији, производњи графита и враћању угљеника у катао [4].

## 3. ПРИМЕНА ЛЕТЕЋЕГ ПЕПЕЛА

### 3.1. Примена у синтези зеолита

Примена ЛП у синтези зеолита има једно од најважнијих места кад је реч о корисној употреби ЛП. Сличност састава између летећег пепела и вулканских материјала који су прекурсори у синтези зеолита омогућава примену ЛП у синтези зеолита. Синтеза зеолита се развија у алкалним условима коришћењем хидротермалне кристализације. Синтеза зеолита алкалном хидротермалном реакцијом се изводи у три главна корака: растварање, кондензација и кристализација. Хидротермална реакција ЛП у  $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$  тестирана је и утврђено је да се промовише растварање инертних фаза. Садржај фаза које испољавају зеолитска својства повећава се на рачун мулита и кварца уз повећање концентрације алкалног раствора [5].

### 3.2. Примена у третману воде

Одрживи развој и концепт самоодрживости промовише потребу за добијањем чисте воде из пречишћених отпадних вода, из извора незагађених подземних вода и из индустријских пречишћених отпадних вода. У складу са тим, економски исплативе методе, односно примена сорпционих материјала који су настали рециклирањем летећег пепела су веома оправдане и ефикасне. Примена ЛП нашла је своје место код пречишћавања комуналних отпадних вода. Методе које уважавају примену и третман отпадних вода материјалима у чији састав улази и летећи пепео су економичне, еколошки прихватљиве и ефикасне. Несагорели угљеник у летећем пепелу омогућава адсорпцију органских једињења као што су феноли, боје, токсични метали, хербициди, нафтна једињења, итд. Растварање летећег пепела у води резултира променом рН средине, у изразито алкалној области (10-13). При високој вредности рН, електрофилтерски пепео постаје негативно наелектрисан, омогућавајући уклањање јона тешких метала (позитивно наелектрисаних) таложењем и електростатичком адсорпцијом из воде. Летећи пепео се може модификовати или трансформисати у нове материјале, за адсорпцију јона тешких метала. Висок садржај  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$  у летећем пепелу класе Ф чини га погодним за адсорпцију израженог капацитета. Синтетички зеолити добијени из летећег пепела садрже фракцију зеолита која има негативно наелектрисање и фракцију која нема зеолитску структуру и која садржи  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{CaO}$ . Ове фракције су одговорне за уклањање и анјонских и катјонских загађујућих материја. Фракција зеолита је одговорна за уклањање катјонских загађујућих материја, док је фракција која нема зеолитску структуру одговорна за уклањање анјонских загађујућих материја. Зеолити имају јединствена физичка и хемијска својства као што су термичка стабилност, кристалинност и капацитет јонске измене [5].

Још једна занимљива примена летећег пепела у области обраде отпадних вода су мембрански филтери на бази летећег пепела. Керамичке, неорганске и порозне мембране имају изузетне хемијске, термичке и механичке карактеристике попут стабилности, робусне структуре, ниску потрошњу енергије, еколошку прихватљивост, рад изражен у дугом временском периоду са високом селективношћу, ефикасношћу раздвајања и способношћу регенерације. Кључни недостатак керамичких мембрана је ограничена

доступност сировина као што су  $ZrO_2$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  и других оксида. Осим ограничене доступности, високи трошкови су такође ограничавајући за практичну примену у односу на полимерне мембране. Уважавајући високи садржај  $SiO_2$  и  $Al_2O_3$  у летећем пепелу, уложени су многи напори за израду микропорозних неорганских мембранских филтера за третман великих количина отпадних вода [5,6].

### 3.3. Примена у индустрији керамике

Летећи пепео у основној структури садржи велики број металних оксида ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ , и  $CaO$ ). У индустрији керамике наведени метални оксиди су корисни и јефтини. Поред металних оксида, фина прашкаста структура ЛПА чини га погодним за директно и лако комбиновање. Претходни третман скоро да није ни потребан за производњу керамичке пасте. Недавна истраживања обухватају тестирање производње мешаних материјала и стаклокерамике од летећег пепела. Производња се базира на температурној активацији сировог ЛП. Стаклокерамички материјали на бази  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ , и  $Li_2O$ , имају значајну индустријску примену због негативне вредности коефицијента топлотног ширења. Цена наведених производа је још увек веома висока због употребе реагенса високог квалитета. Недавно је пепео са дна, коришћен за припрему  $Li_2Al_2Si_3O_{10}$  и резултати су показали да је вредност коефицијента топлотног ширења била за 18% мања него за  $Li$  стаклокерамику која се комерцијално производи. Поред тога,  $Li_2Al_2Si_3O_{10}$  је припремљен коришћењем ЛП као прекурсора и производ има одличне карактеристике као што је мала величина зрна и способност брзе кристализације [7]. Однедавно се ЛП користи у производњи кордиерита уместо каолинита. Иначе, кордиерит се јавља у три различита полиморфна облика и има орторомбну структуру. Облик са високом температуром познат је као индијалит. Керамика од кордиерита се сматра изузетним кандидатом за конструкцијске материјале због ниског коефицијента топлотног ширења, високе ватросталности и ниске диелектричне константе. Кордиерит има вишеструку примену, од којих је један за измењиваче топлоте у гаснотурбинским моторима, за носаче катализатора за пречишћавање издувних гасова, за ватросталне металне превлаке и електронске материјале за паковање [8].

### 3.4. Примена као испуне земљишта

Летећи пепео има потенцијалну примену за побољшање деградираног земљишта ако се правилно комбинује са органским ђубривом (органски компост, пресован муљ, кравље и дворишно ђубриво, отпадни муљ и фабрички муљ и остаци од усева). Комбинација ЛПА и органске материје има изузетно корисна својства за квалитет земљишта. ЛП уништава патогене организме у муљу, смањује мобилност тешких метала и побољшава изглед земљишта текстуром. Поред наведених предности повећава се концентрација хранљивих материја, садржај воде у маси, повећава се порозност и садржај ситнозрнатих минерала. Долази и до побољшања биолошких активности у земљишту. Главно ограничење за употребу ЛП у пољопривреди јесте токсичност једињења која могу бити присутна у ЛП. Једињења бора (која су често присутна) инхибирају микробно дисање у земљишту. Овај проблем се може спречити мешањем алкалног ЛП са карбонским киселинама како би настао компост за третман земљишта [9-11]. Доломит и/или креч се често користе за побољшање киселости земљишта. Међутим, ни доломит ни креч нису еколошки прихватљиви, а треба им и много времена да побољшају физичка својства и структуру тла. Физичко-хемијске карактеристике које су погодне за испуну земљишта су: висок капацитет задржавања воде, извор есенцијалних хранљивих материја за биљке, рН вредност која не нарушава рН природног тла, ниска насипна густина и честице величине глине. Изражена емисија  $CO_2$  током калцинације калцита за производњу креча може се смањити када се ЛП користи уместо креча чиме се доприноси умањеном глобалном загревању. У оквиру различитих истраживања уочено је неколико удружених позитивних ефеката у смеси ЛП и органске материје и утицаја на земљиште. Смањена је мобилност тешких метала у земљишту, изражено је уништавање патогених материја у муљу, што утиче на побољшање квалитета земљишта (расте и концентрација хранљивих материја), боља је текстура, мања је запреминска густина, већа је порозност и маса воде земљишта. Поред наведеног, већи садржај ситнозрнатих минерала побољшава биолошку активност земљишта, смањује испирање главних хранљивих материја и има позитиван утицај за вегетацију. Промене рН земљишта засноване су на утицају рН вредности летећег пепела, капацитету неутрализације летећег пепела и пуферском капацитету земљишта. Промене рН вредности земљишта у

присуству ЛП има велики значај за побољшање квалитета непроизводног земљишта, рудничких остатака и земљишта која су служила за депоније.

Летећи пепео садржи корисне хранљиве материје за земљиште као што су: S, P, Cu, K, Ca, Zn и Mg који побољшава раст биљака. Истраживачи се баве и проширују могућу примену и предности за употребу ЛП у земљишту која се фокусира на аерацију, побољшање текстуре тла, перколацију, смањење запреминске густине земљишта и може имати функцију инсектицида због присуства силицијум диоксида.

### 3.5. Примена у грађевинарству

#### 3.5.1. Индустија бетона

Летећи пепео се користи као замена за сировину у грађевинској индустрији или као адитив у индустрији цемента. Геополимер на бази летећег пепела се појавио као повољна алтернатива цементу у области грађевинарства и грађевинских материјала. ЛП класе Ц има цементна (висок садржај СаО) и пуцоланска својства, док класа Ф има само пуцоланска својства. Пуцоланске особине летећег пепела чине га корисним за замену цемента у бетону [10]. Силицијум-диоксид из ЛП реагује са калцијум-хидроксидом који се ослобађа хидратацијом СаО стварајући Са<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> хидрат [10, 11]. Код бетона код којег се додаје ЛП, код мешаног бетона мање је изражена влажност, а обрадивост је побољшана укључивањем ЛП у везиво. Топлота хидратације може се смањити делимичном заменом цемента класом Ф, чиме се смањује и ризик од пуцања бетона у раним фазама [11]. Летећи пепео може побољшати дугорочну издржљивост бетона смањењем продора агресивних агенаса као што је Cl<sup>-</sup>. Очврсли ЛП/бетон испољавају повећану чврстоћу и ниску пропусност када су правилно пројектовани.

#### 3.5.2. Примена у хидротехници

Осим поменути примењене у комуналној хидротехници за пречишћавање комуналних отпадних вода, ЛП је, због повољних геомеханичких и геотехничких карактеристика, у земљама као што су Индија, Кина или САД, где годишње количине произведеног ЛПА прелазе 100 Мт, нашао примену и у изградњи насипа. Летећи пепео се користи било за изградњу ободних насипа на депонијама пепела уз термоелектране, било за изградњу линијских објеката дуж којих

се, не ретко, протежу путеви. За изградњу насипа користи се и мешавина ЛП и пепела са дна пећи. У Србији се ЛП користи за ободне насипе на депонијама пепела термоелектрана (ТЕНТ А и Б, ТЕ Колубара А, ТЕ Костолац и Дрмно).

Занимљиво је да је на сразмерно малом броју изграђених објеката организовано праћење понашања конструкције током њеног коришћења. Федерална управа САД за путеве је 1997 године у Упутствима за коришћење отпадног материјала и нуспроизвода у путоградњи саопштила да су сви изграђени објекти од почетка коришћења показали захтевани степен сигурности [12]. Дугорочно (трогодишње) праћење стања и понашања објекта организовано је на два од двадесетједног објекта. Праћени су: физичке и геомеханичке карактеристике пепела, померање и стање збијености, прикупљани су и анализирани узорци воде из околних бунара и мерена су слегања на изабраним локацијама дуж насипа. Сви параметри били су у прихватљивим границама. Због мање густине (650 до 810 kg/m<sup>3</sup> за сув материјал), односно мање запреминске масе (1380 до 1620 kg/m<sup>3</sup>) сувог материјала збијеног при оптималној влажности (између 20 и 35%), ЛП је погоднији од приручног земљаног материјала за изградњу насипа на слабо носивом тлу. И поред мале запреминске масе, која зависи од густине ЛПА и садржаја воде, ЛП има високу чврстоћу на смицање, која је последица великог унутрашњег трења. Лабораторијска испитивања показала су да се вредност угла унутрашњег трења креће од 26° до 42°. Захваљујући томе, насипи од овог материјала имају велику носивост и мало слегање. Честице ЛП су приближно сферног облика што омогућава лакше и брже збијање. Лакоћа са којом се поставља и збија (под условом да се на место уградње допрема са довољним садржајем воде) смањује време изградње и трошкове механизације [12]. Ако се насипи граде у близини ТА, значајно се смањују трошкови набавке материјала, дозвола за његово коришћење и коришћења позајмишта [12,13].

Порозност овог материјала креће се од 10<sup>-4</sup> до 10<sup>-6</sup> cm/s. Захваљујући приближно сферном облику честица, приликом збијања се може постићи густо паковање чиме се значајно смањује водопрпусност насипа, односно процуривање кроз тело линијских насипа током великих вода или процуривање кроз ободне насипе на депонијама пепела. ЛП са значајним садржајем креча (настао сагоревањем лигнита) временом повећава чврстоћу, чиме се скраћује време консолидације и смањује збијеност.

Међутим, коришћење ЛП има и своје недостатке. Због тога што припада категорији прашинастих материјала (више од 90% зрна је пречника  $d \leq 0,076 \text{ mm}$ ), на градилиште мора да се допрема са оптималним процентом влаге који износи 10 до 15%  $\pm 3$  до 4%. Након уградње ЛП, треба предузети антиерозионе мере како га ветар или вода не би однели. Анти-ерозионе мере подразумевају затрављивање косина, а по потреби (ако се насипом не протеже пут) и круне насипа, набацивање крупног материјала на косине или постављање слоја портланд цемента или креча.



Слика 5. Пробој ободног насипа на депонији пепела ТЕ Костолац 13. јуна 2002. године изазван слегањем и преливањем

### 3.5.3. Примена у изградњи брана

Значајна примена летећег пепела постоји и у изградњи брана, које представљају масивне хидротехничке конструкције. Због тога свака уштеда у јединичној цени бетона, или бржа изградња значајно утичу на укупне трошкове. У изградњи брана летећи пепео користи се за справљање такозваног „ваљаног бетона“ (*eng.* Roller Compacted Concrete, RCC). Ваљани бетон дефинише се као бетон чија је мешавина врло круте конзистенције и који се транспортује, разастире и збија механизацијом за насуте бране.

Основне карактеристике ваљаног бетона су:

- врло крута конзистенција бетонске мешавине која омогућава да ваљани бетон у неочврслном стању издржи притисак механизације за уграђивање;
- мала количина цемента са додатним везивним материјалима (најчешће летећи пепео);
- технолошки поступак транспорта, уграђивања и збијања ваљаног бетона механизацијом за насуте земљане бране, који омогу-

ћава велике дневне учинке и знатно скраћење времена грађења.

Бране од ваљаног бетона разликују се од класичних брана према врсти бетона и према методи грађења. Захваљујући позитивним искуствима, број ових брана у свету нагло је повећан у односу на остале типове брана.

Поређећи искуства и праксу у водећим земљама у изградњи брана од ваљаног бетона уочава се да је просечна употребљена количина цемента у мешавини слична и да износи од 70 до 90  $\text{kg/m}^3$ . Велике разлике јављају се додавањем летећег пепела, па тако просечна количина у мешавини код брана у Бразилу износи 18  $\text{kg/m}^3$ , у Кини 93  $\text{kg/m}^3$ , а у Шпанији чак преко 120  $\text{kg/m}^3$ .

Посебно су занимљива искуства са RCC брана у САД, јер је примењен велики број различитих концепција пројектовања. Укупна количина везивних материјала (цемента и летећег пепела или пуцолана) варира од веома посних (са 64  $\text{kg/m}^3$ ) до изразито масних мешавина (252  $\text{kg/m}^3$ ), које су сличне мешавинама код класичног бетона. Разликује се и количина додатог летећег пепела (и до 70 %) у односу на укупан садржај везивних материјала [14].

За прављење ваљаног бетона може се користити цемент са својствима као за класичан хидротехнички бетон. При избору цемента и додатних везивних материјала (летећи пепео, пуцолан или згура) мора се водити рачуна о топлоти хидратације цемента и могућим агресивним утицајима средине. Летећи пепео треба да има следеће особине:

- мора да обезбеди потребну обрадљивост ваљаног бетона;
- треба да има ниску топлоту хидратације;
- мора бити хемијски компатибилан са финим честицама агрегата;
- мора бити компатибилан са другим везивним материјалима и адитивима (ако постоје);
- мора остати стабилан и после пуњења акумулације.

Најбитније особине очврслог ваљаног бетона су: чврстоћа на притисак, чврстоћа на затезање, модул еластичности, Поасонов коефицијент, биаксијална и триаксијална смичућа чврстоћа, запреминске деформације услед сушења (испаривања) и температуре, термички коефицијент ширења, специфична топлота, течење, термичка проводљивост, коефицијент термичког напрезања, дифузија, водонепропустљивост, трајност и јединична тежина.



Слика 6. Изградња бране од ваљаног бетона

Разлике између особина очврслог RCC-а и класичног бетона проистичу првенствено из пропорција мешавине, дозирања и садржаја пора. Пошто постоји велики број RCC мешавина различитих карактеристика, тешко је квантификовати карактеристичне вредности сваке мешавине. RCC има мање цемента, пасте и воде, и нема увученог ваздуха. Могућа је употреба прашине или других финих честица за попуњавање шупљина и пора у агрегату.

Највећи утицај на механичке карактеристике имају ваљаног бетона имају дозирање, квалитет и физичке особине агрегата. Тај утицај је већи него код класичног бетона, јер се у неким RCC мешавинама користе агрегати лошијих карактеристика (према конвенционалним стандардима), па разлике у особинама ваљаног бетона могу бити знатно веће него код класичних бетона.

#### 4. ЗАКЉУЧАК

У овом раду истакнута је потреба за интензивнијом применом, уградњом и коришћењем летећег пепела у Србији. Лепеза могућности за његово коришћење је широка: од индустрије керамике и синтезе зеолита, сорбената, за пречишћавање вода, до уградње у хидротехничке објекте. Поред струке и науке, потребна је и подршка законодавства како би примена пепела заживела.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] ASTM C618-08. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, Pa, 2008.
- [2] M. T. McCarthy, T. D. Dyer. Pozzolanas and pozzolanic materials. [Elsevier](#). 2019. 363-467. ISBN 9780081007730.
- [3] ASTM C1157/C1157M. Standard Performance Specification for Hydraulic Cement. West Conshohocken, Pa, 2011.
- [4] J.C. Hower, J.G. Groppo, U.M. Graham, C.R. Ward, I.J. Kostova, M. M. Maroto-Valer, S. Dai. Coal-derived unburned carbons in fly ash. A review, International Journal of Coal Geology, 179, 2017, 11–27.
- [5] F. Mushtaq. M. Zahid, I.A. Bhatti, S. Nasir, T. Hussain. Possible applications of coal fly ash in wastewater treatment. J. Environ. Manage, 240, 2019, 27–46.
- [6] S. Dai, X. Wang, V. V. Seregin, J. C. Hower, C. R. Ward, J. M. K. O'Keefe, W. Huang, T. Li, X. Li, H. Liu, W. Xue, L. Zhao. Petrology, mineralogy, and geochemistry of the Ge-rich coal from the Wulantuga Ge ore deposit, Inner Mongolia, China: New data and genetic implications. International Journal of Coal Geology, 90, 2012, 72–99.
- [7] S.V. Vassilev, C.G. Vassileva. A new approach for the classification of coal fly ashes based on their origin, composition, properties. and behaviour. Fuel. 86 (10–11), 2007, 1490–1512.
- [8] L. Bartoeová, D. Juchelková, Z. Klika, B. Cech. On Unburned Carbon in Coal Ash from Various Combustion Units. International Journal of Materials and Metallurgical Engineering, 5(4), 2011, 280-283.
- [9] M. Karanac. Primena elektrofilterskog pepela modifikovanog kalcijum-hidroksidom i oksidima železa za uklanjanje jona teških metala iz vode. Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu – Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 2018.
- [10] Z. Yao. Generation, characterization and extracting of silicon and aluminium from coal fly ash. Fly Ash, Sources, Applications and . Potential Environmental Impacts. Nova Science Publishers. 2013, 3-58.
- [11] J. Cao, X. Dong, L. Li, Y. Dong, S. Hampshire. Recycling of waste fly ash for production of porous mullite ceramic membrane supports with increased porosity. Journal of the European Ceramic Society, 34 (13), 2014. 3181–3194.
- [12] User guidelines for waste and byproduct materials in pavement construction Federal highway administration, U.S. Department of transportation 1997.
- [13] D. N. Naresh. Management of ashdisposal. Indian Geotechnical Conference – 2010, GEOTrendz, IGS Mumbai chapter & IIT Bombay, 2010.

- [14] V. Kuzmanović, Lj. Savić. Brane od valjanog betona. Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet. 2016. ISBN 978-86-7518-188-0