

Мирјана Вукићевић, Сања Јоцковић, Милош Марјановић, Вељко Пујевић

МОГУЋНОСТ ПРИМЕНЕ ПЕПЕЛА ИЗ ТЕ У СРБИЈИ КАО ГРАЂЕВИНСКОГ МАТЕРИЈАЛА У ИЗГРАДЊИ САОБРАЋАЈНЕ ИНФРАСТРУКТУРЕ

*THE POSSIBILITY OF USING THE ASH FROM SERBIAN THERMAL POWER
PLANTS AS A CONSTRUCTION MATERIAL FOR TRAFFIC INFRASTRUCTURE*

др Мирјана ВУКИЋЕВИЋ, дипл. грађ. инж.
редовни професор у пензији Грађевинског факултета Универзитета у Београду

др Сања ЈОЦКОВИЋ, дипл. грађ. инж.
доцент Грађевинског факултета Универзитета у Београду

др Милош МАРЈАНОВИЋ, мастер инж. грађ.
доцент Грађевинског факултета Универзитета у Београду

др Вељко ПУЈЕВИЋ, дипл. грађ. инж.
доцент Грађевинског факултета Универзитета у Београду

Резиме

У раду је приказан преглед литературе о могућностима употребе пепела и шљаке за изградњу саобраћајне инфраструктуре, с обзиром да велики инфраструктурни пројекти захтевају значајну употребу природних материјала. Затим је дат преглед резултата лабораторијског испитивања пепела и шљаке из термоелектрана у Србији за стабилизацију слабо носивог тла и као материјала за изградњу насипа. Испитивана су инжењерска својства летећег пепела и мешавине пепела и шљаке са и без активатора (цемента и креча). Резултати указују на позитивне ефекте стабилизације тла, у смислу повећања чврстоће и смањења експанзивности. Такође, летећи пепео и мешавине пепела и шљаке имају добре механичке карактеристике, што их у комбинацији са више других предности (мања потрошња енергије и емисија CO₂, уштеда природних материјала и мања подручја депонија), чини погодним материјалима за израду насипа саобраћајнице.

Кључне речи: пепео, шљака, стабилизација тла, насипи, инжењерска својства

Summary

The paper presents literature overview on the possibility of using ash and slag for the traffic infrastructure construction, considering that large infrastructure projects require significant use of natural materials. Then, an overview of the laboratory results of ash and slag from thermal power plants in Serbia for the stabilization of low bearing soil and as material for the construction of embankments was given. The engineering properties of fly ash and a mixture of ash and slag with and without activators (cement and lime) were investigated. The results indicate the positive effects of soil stabilization, in terms of increasing strength and reducing expansivity. Also, fly ash and mixtures of ash and slag have good mechanical characteristics, which, in combination with several other advantages (lower energy consumption and CO₂ emissions, saving of natural materials and smaller landfill areas), make them suitable fill materials for embankments.

Keywords: ash, slag, soil stabilization, embankments, engineering properties

1. УВОД

Савремени свет се суочава са последицама технолошког развоја праћеног огромним утицајем на животну средину. Ово је подстакло новија научна истраживања у области идентификације загађујућих материја и могућности смањења штетних ефеката загађења. Један од највећих загађивача су фосилна горива, која производе огромне количине CO_2 у процесу сагоревања. Према подацима Светске банке за 2015. годину [1], укупно учешће фосилних горива у производњи енергије у свету износи 65.2%. Према истим подацима, у Србији ово учешће износи 73.1 %, будући да су термоелектране главни произвођачи електричне енергије. У оквиру Електропривреде Србије постоји шест термоелектрана.

Термоелектране имају вишеструко штетно дејство на животну средину: загађују ваздух емитујући CO_2 , SO_2 , N_2O и летећи пепео; депоније пепела и шљаке заузимају велике површине углавном пољопривредног земљишта; депоновани пепео може потенцијално да загади земљиште и воду због присуства микроелемената и радионуклида. Штетно дејство димних гасова може се смањити одсумпоравањем гаса, уградњом ефикасних електро филтера, применом метода за смањење концентрације азотних оксида. Количина депонованог пепела и шљаке може се значајно смањити употребом у грађевинској индустрији.

Због различитог порекла угља, као и због разлика између модела котлова за сагоревање угља, нису сви пепели исти. Састав и карактеристике пепела се разликују код различитих енергетских постројења. Постоје четири категорије угља, у зависности од топлотне вредности, хемијског састава, садржаја пепела и геолошког порекла. У питању су лигнит, битуменизирани угаљ, делимично битуменизирани угаљ и антрацит. У Србији је углавном заступљен лигнит. Лигнит, познат као смеђи угаљ, је угаљ најниже класе и нема добро дефинисан састав. Лигнит ствара велике количине пепела због недовољног сагоревања и високог садржаја воде.

Хемијски састав пепела чине углавном оксиди силицијума, алуминијума, гвожђа и калцијума. У мањој мери присутни су и магнезијум, калијум, натријум, титан и сумпор. У зависности од хемијског састава, према стандарду ASTM C618 [2], пепео се класификује као пепео класе

С и пепео класе F, односно према EN 14227-4 [3], као кречњачки, тип W (еквивалентан ASTM класи С) и силикатни, тип V (еквивалентан ASTM класи F). Ова класификација се заснива, у највећој мери, на проценту оксида силицијума, алуминијума и гвожђа ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) који за пепео класе F износи мин 70%, а за класу С мин 50%.

Према хемијском саставу, пепео из српских термоелектрана је класе F (према ASTM C618), односно тип V (према EN 14227-4). Обично садржи мање од 10% негашеног креча (CaO), тако да нема самовезујућа својства. Иако поседује пуцоланске особине, стакласти силицијум диоксид и алуминијум оксид унутар пепела класе F захтевају неко средство за побољшање везивних карактеристика, као што је портланд цемент, живи или гашени креч, како би, уз присуство воде, дошло до реакције и добијања калцијум - силикат хидрата (цементна једињења). Међутим, постоје истраживања која указују да овај летећи пепео може ефикасно да побољша нека инжењерска својства земљишта (UCS, CBR, потенцијал бубрења) и без активатора [4-8].

Према подацима ЕSOVA-е за 2016. годину [9], годишња производња пепела у Европској унији (EU 15) износи око 40 милиона тона, од чега 64% чини летећи пепео. Око 50% произведене количине користи се у грађевинарству, 41.5% се користи за мелiorацију-рестаурацију земљишта, а само 6.7% се депонује. У грађевинарству се највише користи за производњу цемента и бетона (око 25%), док се у изградњи саобраћајница до пре десет година користило 25%, а сада знатно мање, око 6%. У изградњи саобраћајница пепео се може користити за стабилизацију слабо носивог тла и, у много већем обиму, као материјал за изградњу насипа. Подаци показују да се пепео у развијеним земљама ЕУ успешно користи као сировина у индустрији. У Србији је ситуација потпуно другачија. Годишње се произведе око 7 милиона тона пепела. Веома мали део пепела се одлаже у силосе, док се највећи део укупне произведене количине депонује са шљаком на депонијама. Депоније заузимају површину од око 1600 ha, са око 300 милиона тона пепела и шљаке [10,11]. До сада је само 3% пепела коришћено за производњу цемента [11].

У Србији су прва већа истраживања везана за могућност коришћења пепела у изградњи саобраћајница почела у првој деценији овог века, са циљем да се смањи велика количина

депонованог пепела. Од тада су урађене четири опсежне студије [12-15], од којих су две [14,15] урађене на Грађевинском факултету у Београду. На основу резултата ових студија, Влада Србије је 2015. године донела Уредбу [16] о коришћењу пепела из термоелектрана у Србији, чиме је створен правни оквир за коришћење пепела.

Током истраживања за студије [14,15], у Лабораторији за механику тла Грађевинског факултета у Београду урађено је око 1000 лабораторијских испитивања физичко-механичких својстава летећег пепела, пепела и шљаке, мешавина пепела и тла са или без хидрауличких везива (цемент и креч). Додатно је истражен хемијски састав пепела.

Наведене студије обухватиле су и веома важан еколошки аспект употребе пепела, имајући у виду да пепео садржи штетне материје које могу бити потенцијални извор загађивања земљишта и воде. Пепео се може одлагати као отпадни материјал ако је садржај вештачких и природних радионуклида мањи од вредности прописаних Правилником о границама радиоактивне контаминације животне средине [17]. Пепео и шљака из термоелектрана Србије испуњавају прописане услове [18]. Пепео такође садржи тешке метале који су опасни по животну средину, као што су As, В, Cr, Мо и Se [19]. Ови елементи би могли да контаминирају земљиште, воду и морске екосистеме у случају њиховог излуживања. Главни фактор у контроли излуживања је контрола њихове мобилности. Постоје одговарајуће процедуре које могу смањити или елиминисати излуживање токсичних елемената у траговима као што су As, В, Cr, Мо и Se [18,19]. Ако се докаже да нема ризика од излуживања, употреба пепела за насипе даје економске и еколошке користи.

У раду су приказани главни резултати и закључци студија [14,15]. У првом делу рада представљени су резултати стабилизације тла коришћењем летећег пепела из српских термоелектрана (са и без везива). У другом делу испитивана су инжењерска својства мешавине пепела и шљаке као материјала за насипе у изградњи саобраћајница. Такође је истражен утицај уобичајених активатора, цемента и креча. Релевантна физичка и механичка својства, која су одређена лабораторијским опитима су: специфична тежина, гранулометријски састав, однос влажности и суве запреминске тежине (Прокторов опит збијања), једноаксијална чврстоћа (UCS), стишљивост (M_v), бубрење (%), параметри смичуће чврстоће (ϕ' и c') и

Калифорнијски индекс носивости (CBR). Сви узорци за лабораторијска испитивања механичких својстава добијени су збијањем према стандардном Прокторовом опиту.

2. ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

2.1. Стабилизација слабо носивог тла пепелом

Фактори од којих зависи стабилизација тла пепелом су: врста пепела и његове карактеристике, карактеристике тла које треба стабилизovati, проценат пепела, временски период између влажења смеше и збијања и садржај воде у земљишту у време збијања.

У литератури се углавном могу наћи различита истраживања за летећи пепео. Према [20-22], оптимални садржај летећег пепела за стабилизацију земљишта је у распону од 10% до 30%, у зависности од типа земљишта и пепела. Новија истраживања показала су да се својства сабијања и чврстоћа смеше смањују са повећањем времена кашњења збијања, што је последица губитка успостављених цементних веза између честица и мање запреминске тежине [20,23].

Ефекти примене летећег пепела за стабилизацију тла су смањење пластичности и потенцијала бубрења тла и повећање чврстоће тла и вредности CBR. Величина честица летећег пепела је обично већа од честица глине, тако да додавање летећег пепела мења гранулометријски састав глине и смањује границу течења. Хемијски састав пепела и третираног земљишта такође утиче на Атербергове границе. Смањење пластичности глине доводи до смањења потенцијала бубрења. Ramadas и др. [24] су анализирали карактеристике три експанзивна тла са додатком летећег пепела класе F од 0-50%, што је резултирало значајним смањењем границе течења, притиска бубрења и потенцијала бубрења.

Повећање чврстоће је главни разлог за употребу пепела за стабилизацију тла [25]. Вредност Калифорнијског индекса носивости је примарни параметар у процени погодности коришћења тла стабилизованог пепелом у изградњи путева [20, 23, 25, 26, 27]. Глине генерално имају низак CBR и то их чини неприкладним за употребу у основним слојевима коловоза. Zia и Fox [28] су уочили повећање CBR вредности леса до 5 пута додавањем 10% летећег пепела класе C. Acosta и

др. [29] су истраживали различите типове земљишта са веома ниским вредностима CBR (0-5%) и додатком 18% летећег пепела класе C постигли значајно повећање вредности CBR (20-56%). Вукићевић и др. [30] анализирали су утицај летећег пепела класе F на чврстоћу експанзивне глине. Највеће повећање чврстоће добијено је додатком 15% летећег пепела. Вредност CBR-а је порасла скоро три пута. Повећање чврстоће тла стабилизованог пепелом је процес који зависи од времена. Студија Whitea и сар. [26] на самовезујућем летећем пепелу показала је брз пораст чврстоће током 7 до 28 дана, након чега је регистрован тренд успоравања услед продужених пуцоланских реакција.

2.2. Коришћење пепела као материјала за насип

Пепео се дуги низ година користи у грађевинарству као материјал за испуну у изградњи путева, изградњи насипа и мелиорацији [31]. Мала збијена јединична тежина пепела чини га веома погодним материјалом за изградњу насипа.

Летећи пепео класе F се чешће примењује као материјал за насипе и засипања, у поређењу са пепелом класе C [32], због самовезујућих карактеристика летећег пепела C класе, који брзо очвршћава, у року од 2-4 сата након додавања воде [33].

Важна инжењерска својства пепела за његово коришћење у изградњи насипа су: однос влаге и суве запреминске тежине, носивост (CBR), чврстоћа на смицање и стишљивост.

Пепео има мању збијену запреминску тежину у односу на традиционалне материјале, што доводи до мањег оптерећења и слегања подтла. DiGioia и др. [34] су одређивали максималну суву запреминску тежину и оптимални садржај воде за летећи пепео класе F у западној Пенсилванији и летећи пепео класе C са запада САД. Вредности максималне суве запреминске тежине варираше од 11.9 kN/m^3 до 16.7 kN/m^3 , а вредности оптималног садржаја воде од 13% до 32%. Закључили су да су велике варијације последица различитих физичко-хемијских карактеристика пепела, које зависе од врсте угља и услова сагоревања угља.

Испитивања чврстоће на смицање на збијеним узорцима пепела показују да се чврстоћа пепела углавном генерише унутрашњим трењем [35]. Летећи пепео класе F има угао трења обично у опсегу од 26° до 42° [36]. Kim и др. [35] су

спровели испитивања на мешавини летећег и депонијског пепела и добили углове трења у опсегу од 28° - 48° , што је у рангу чврстоће на смицање збијеног песка.

Нема много објављених података за Калифорнијски индекс носивости пепела. Према [37], CBR за летећи пепео класе F је у границама од 6.8 -13.5% у потопљеном стању и између 10.8 и 15.4% у непотопљеном стању. За природна земљишта, вредности CBR се обично крећу између 3% и 15% (ситнозрна тла), 10%-40% (песак и песковита тла) и 20%-80% за шљунак и шљунковита тла [38].

Генерално, технички стандарди прописују да насип мора имати малу стишљивост да би се смањила слегања коловоза. Стишљивост се може изразити преко индекса стишљивости C_s и индекса бубрења C_r или преко модула стишљивости M_v . Kaniraj и Gaiathri [39] су извршили испитивања консолидације на узорцима летећег пепела класе F из термоелектране Дадри (Индија). Утврдили су да су индекси стишљивости C_s узорака 0.041 или 0.084, у зависности од нивоа ефективног напрезања. Просечан индекс бубрења C_r био је 0.008. Kim и Prezzi [40] одредили су тангентни модул стишљивости при вертикалним напонима, од нула до 200 kPa, што је опсег оптерећења који се очекује у насипима аутопута. Летећи пепео коришћен у студији био је класе F, из три електране у Индијани (САД). Добијене вредности су упоређене са модулима доступним у литератури за збијени песак различитих запреминских тежина (при релативној збијености од 99% и 85%). Конкретно, вредности модула стишљивости за испитивани летећи пепео (у опсегу напона 50-200 kPa) одговарају доњој граници опсега модула песка. Ово указује да је за исте нивое збијености, летећи пепео нешто стишљивији од песка.

3. РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА УПОТРЕБЕ ЛЕТЕЋЕГ ПЕПЕЛА ИЗ ТЕРМОЕЛЕКТРАНА У СРБИЈИ ЗА СТАБИЛИЗАЦИЈУ ТЛА

У оквиру студије [14] извршено је испитивање могућности употребе летећег пепела без и са додатком везива (цемента/креча) за стабилизацију тла.

Испитивање је спроведено на мешавинама три различите врсте тла и летећег пепела из ТЕ Колубара и ТЕ Костолац, као и мешавинама две

врсте тла са пепелом из ТЕ Колубара и ТЕ Костолац са додатком цемента или креча.

Програм истраживања обухватио је следећа лабораторијска испитивања:

- Хемијске анализе летећег пепела
- Минеролошке анализе тла
- Испитивања физичко-механичких својстава тла
- Испитивања физичких својстава пепела
- Испитивања механичких својстава мешавине тла са различитим садржајем пепела
- Испитивања механичких својстава мешавине тла и пепела са додатком цемента (2% и 3%) и креча (8% и 10%). Садржај додатака је рачунат у односу на суву масу тла.
- Испитивања механичких својстава мешавина у функцији времена

Могућности стабилизације тла летећим пепелом испитане су за три врсте ситнозрног тла: за средње до високо пластичну глину са изразитим експанзивним својствима, прашинасто песковиту ниско пластичну глину и високо пластичну глину са умереним експанзивним својствима.

У студији су коришћене две врсте летећег пепела, узорковане у термоелектранама “Колубара” (KOL-FA) и “Костолац” (KOS-FA). Хемијски састав пепела дат је у Табели 1.

За максимални ефекат стабилизације тла одређен је оптималан садржај летећег пепела. Основни показатељ ефекта стабилизације је повећање чврстоће тла, које се огледа у повећању једнооксијалне чврстоће или CBR вредности. Према наведеним критеријумима добијене су вредности оптималног садржаја пепела дате у Табели 2.

Да би се извршила оцена ефеката стабилизације тла пепелом, сва испитивања механичких карактеристика су рађена на минимум три серије узорака: узорци само од тла (еталон), узорци само од пепела и узорци мешавине тла и пепела. Уколико је додавано везиво (активатор) креч или цемент рађена је и четврта серија. За приказ резултата ефеката стабилизације тла пепелом из студије изабран је приказ резултата стабилизације високо пластичне глине пепелом. За остале две врсте тла ефекти показују врло сличан тренд.

3.1. Једнооксијална чврстоћа - UCS

Може се констатовати да се само са додатком пепела једнооксијална чврстоћа не мења значајно, што је последица ниске вредности једнооксијалне чврстоће самог пепела. Извршена су даља испитивања са додатком цемента и креча као активатора. Резултати испитивања приказани на Слици 3.1 потврђују очекивани тренд прираста чврстоће кроз време, карактеристичан за мешавине са пепелом класе F (силикатног пепела типа W) са додатком активатора. За мешавине са додатком 3% цемента забележено је повећање једнооксијалне чврстоће после 28 дана од 70% (ТЕ Колубара), односно 140% (ТЕ Костолац).

Оптималан садржај креча утврђен је на бази критеријума рН вредности мешавине, чиме се обезбеђују оптимални услови за процес хидратације [41]. За комбинацију са Колубарским пепелом оптимални садржај је 8%, односно 10% за комбинацију са Костолачким пепелом. Забележено је повећање једнооксијалне чврстоће после 28 дана од 335% (ТЕ Колубара), односно 455% (ТЕ Костолац).

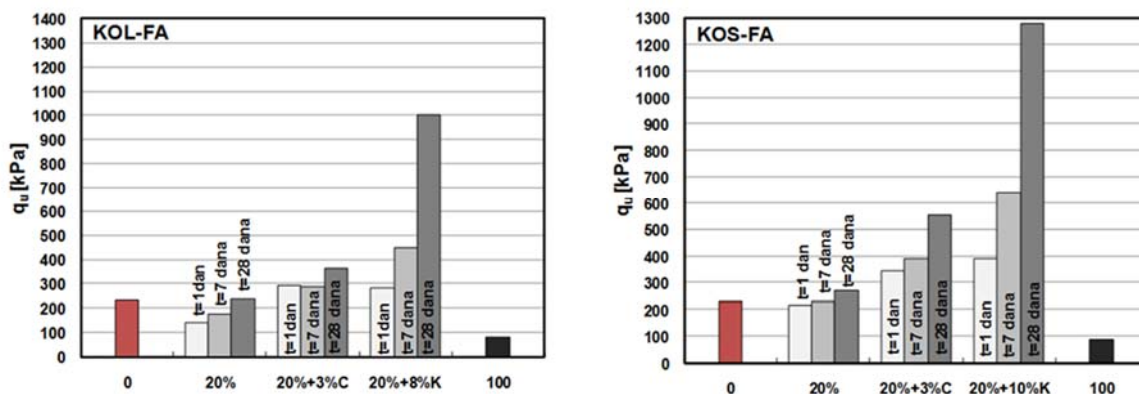
Табела 3.1: Хемијски састав примењених летећих пепела (садржај једињења у %)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅
KOL-FA	50.21	23.83	9.89	4.79	3.12	0.44	0.35	0.54	5.24	0.06
KOS-FA	56.38	17.57	10.39	7.46	2.13	0.57	0.38	0.52	0.95	0.025

Напомена: Вредности нису у потпуности репрезентативне за тестирани материјал, пошто се током времена хемијски садржај угља који користе електране може променити

Табела 3.2. Оптимални % летећег пепела

	Врста тла Локација	Летећи pepeo	
		KOL-FA	KOS-FA
1	Алеврит (Каленић)	15%	20%
2	Прашинасто песковита глина ((Избиште)	15%	
3	Високо пластична глина Радљево	20%	

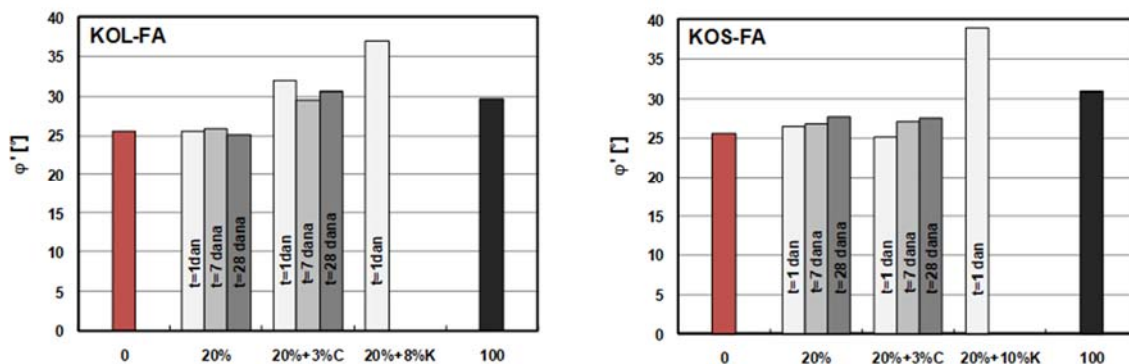


Слика 3.1 Једнооксијална чврстоћа мешавина

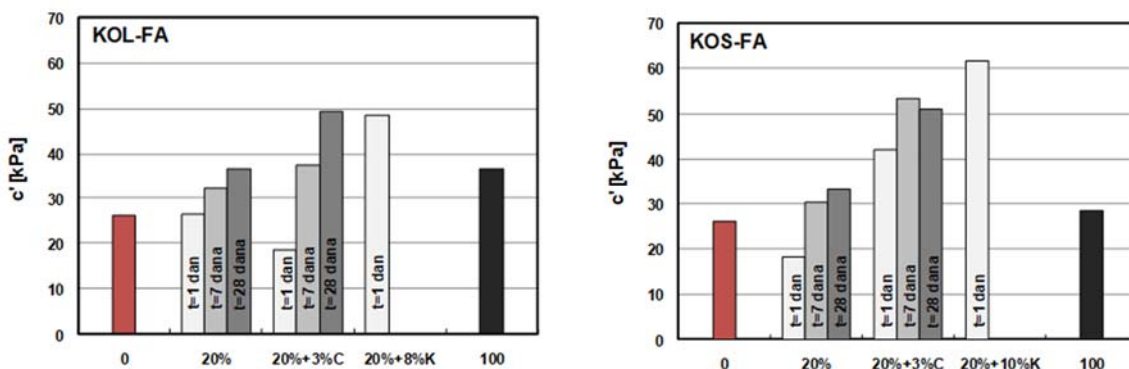
3.2. Смичућа чврстоћа

Ефективни параметри смичуће чврстоће одређени дренарим опитом директног смицања на узорцима са оптималним процентом пепела приказани су на Сликама 3.2 и 3.3. Резултати добијени при старости узорака од 28 дана показују занемарљив утицај пепела на промену угла смичуће чврстоће. С друге стране ефекти третирања ове врсте тла летећим пепелом су нешто израженији у погледу кохезије c' (Слика 3.3). Забележено је повећање кохезије, и то 40% у случају Колубарског пепела, односно 26% за Костолачки пепео. угла смичуће чврстоће. Ефективни параметри

смичуће чврстоће узорака испитани су и са додатком активатора – цемента и креча. Угао смичуће чврстоће после 28 дана са додатком цемента је благо повећан, док се ефекти примене креча огледају у драстичном повећању угла већ после једног дана. Кохезија се за мешавине оба типа активатора значајно повећава и то око 90% након 28 дана у случају примене цемента, односно 135% у случају креча. Додатком цемента и креча активирана је пуцоланска реакција и формиране су цементне везе између зрна у мешавини, што је условило повећање кохезије.



Слика 3.2 Промена угла смичуће чврстоће

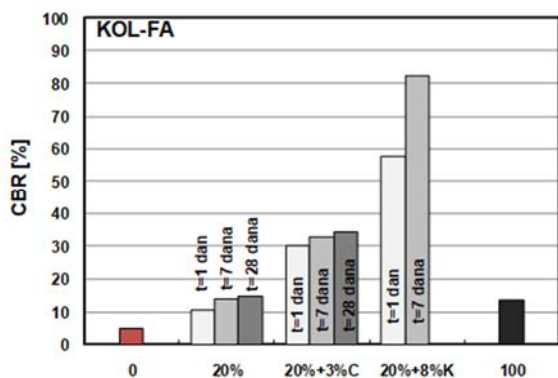


Слика 3.3 Промена кохезије

3.3. Калифорнијски индекс носивости - CBR

Резултати испитивања Калифорнијског индекса носивости мешавина са оптималним процентом летећег пепела приказани су на Слици 3.4. Испитивана глина високе пластичности има релативно малу CBR вредност. Са оптималним додатком летећег пепела, при старости узорака од 28 дана добијена је више од три пута већа CBR вредност и за Колубарски и за Костолачки пепео. Према апсолутним вредностима CBR-а (14.6-15.5) мешавине спадају према носивости постелице у постелице средњег квалитета.

Са додатком активатора (цемента/креча), CBR вредности мешавина за обе врсте пепела су вишеструко повећане. Ефекти су нешто израженији у случају примене креча. Према апсолутним вредностима CBR-а, мешавине са активаторима спадају према носивости постелице у постелице одличног квалитета.

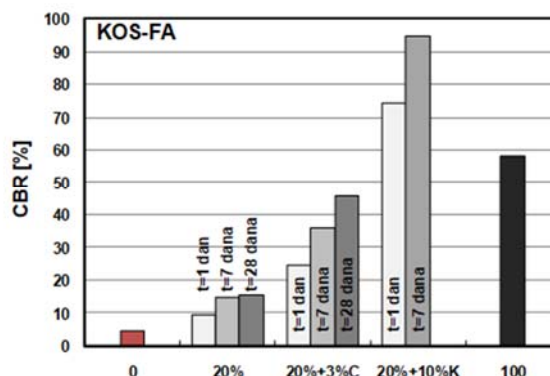


3.4. Параметри деформабилности

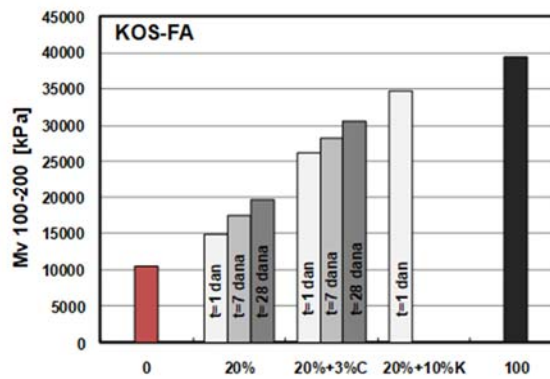
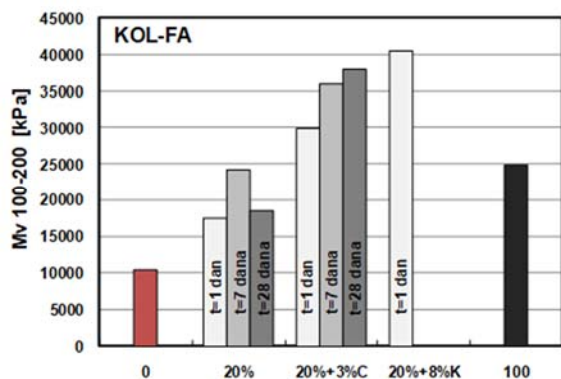
Параметри деформабилности испитани су у едометарском опиту. На Слици 3.5 приказани су модули стишљивости M_v за интервале вертикалних напона од 100-200 кПа. Добијени резултати указују на повећање параметара деформабилности тла стабилизованог пепелом око 200%, што недвосмислено потврђује ефикасност примене летећег пепела у стабилизацији ове врсте тла. У случају мешавина са додатком активатора параметри деформабилности су се значајно повећали, 300-400%.

3.5. Бубрење

Испитивано тло пре додавања летећег пепела показивало је склоност ка бубрењу – притисак бубрења одређен у едометарском опиту је 156 кПа, а деформација бубрења је $\epsilon=2.16\%$. Додавањем летећег пепела својство експанзивности тла је елиминисано, што указује на то да су примењене врсте летећег пепела ефективни стабилизатори тла са становишта бубрења.



Слика 3.4 CBR вредности



Слика 3.5 Модули стишљивости 100-200 кПа

4. РЕЗУЛТАТИ ИСПИТИВАЊА ПЕПЕЛА ИЗ ТЕРМОЕЛЕКТРАНА У СРБИЈИ ЗА НАСИПЕ

Студија [15] обухватила је истраживање могућности примене летећег пепела из силоса, као и депоноване мешавине пепела и шљаке из термоелектрана Никола Тесла А и Б у Обреновцу, и термоелектрана А и Б у Костолцу, за добијање мешавина погодних за грађење појединих елемената конструкције железничке инфраструктуре, пре свега насипа. Иако је студија специфично рађена за потребе железничке инфраструктуре, резултати истраживања могу се користити и за потребе путне инфраструктуре.

Програм истраживања обухватио је следећа лабораторијска испитивања:

- Хемијске анализе пепела;
- Испитивања физичко механичких својстава пепела/шљаке са депоније. Поред већ наведених својстава, испитан је и утицај мрза преко индекса отпорности на мраз;
- Испитивања механичких својстава пепела са додатком два различита процента везива (цемента, креча). Минимални проценат употребљеног цемента одређен је из услова могућности справљања хомогене мешавине уз минимални утрошак цемента, док је минимални проценат креча одређен из услова да рН вредност мешавине буде 12.4, чиме су обезбеђени услови за одвијање процеса хидратације;
- Испитивања механичких својстава мешавина у функцији времена.

За приказ резултата испитивања могућности коришћења пепела као материјала за израду

насипа изабран је летећи пепео из ТЕ Никола Тесла Б (ТЕНТ Б).

4.1. Једноаксијалан чврстоћа - UCS

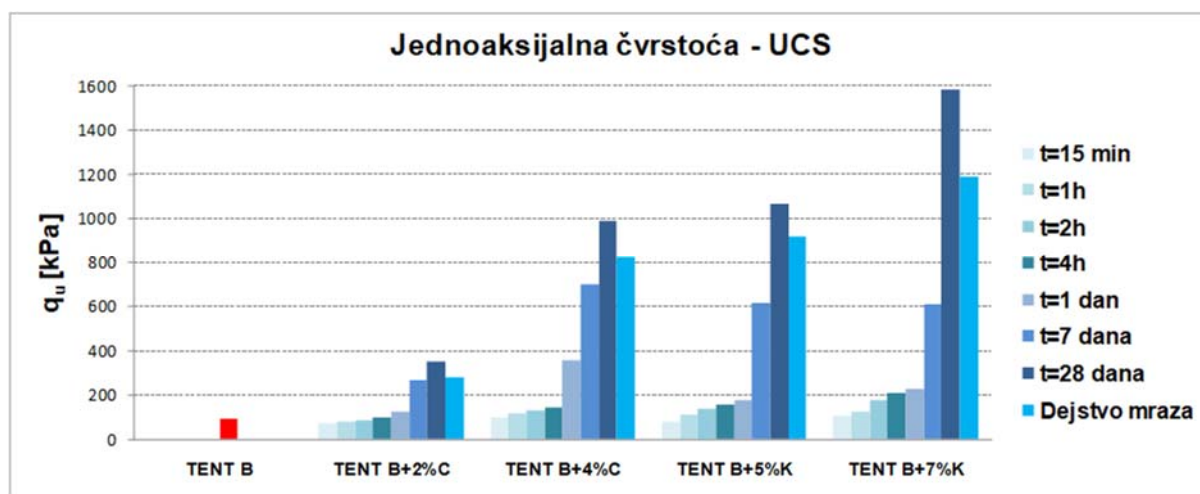
Резултати испитивања једноаксијалне чврстоће пепела без и са додацима цемента и креча су приказани на Слици 4.1. Узорак од пепела без додатка везива (еталон) има веома малу једноаксијалну чврстоћу која износи 87.4 кПа. Са додатком везива и воде почиње пуцоланска реакција и резултати показују стални прираст једноаксијалне чврстоће са временом. Са додатком 2% цемента, након 28 дана једноаксијална чврстоћа је повећана 4 пута, док је са додатком 4% цемента повећана 11 пута. Са додатком креча ефекат је израженији и једноаксијална чврстоћа је повећана 12 пута са 5% креча, односно 18 пута са 7% креча.

4.2. Утицај мрза

Испитана је отпорност стабилизованог пепела на мраз методом одређивања смањења једноаксијалне чврстоће. Након 15 циклуса смрзавања и одмрзавања одређена је једноаксијална чврстоћа узорака и добијени резултати су приказани на Слици 4.1. Индекс отпорности према мразу се креће у границама 75-86%. Вредност индекса је прихватљива имајући у виду велике апсолутне вредности једноаксијалне чврстоће.

4.3. Ефективни параметри смичуће чврстоће

Ефективни параметри смичуће чврстоће су одређени опитом директног смицања и приказани су на Слици 4.2. Еталон пепела има



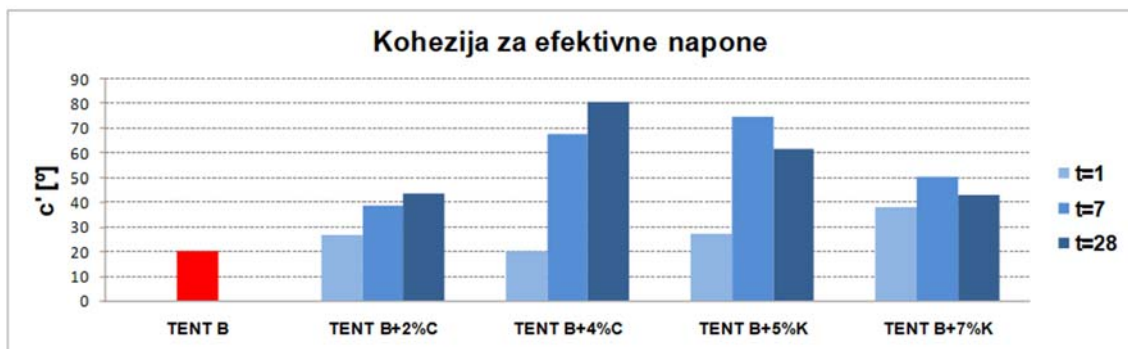
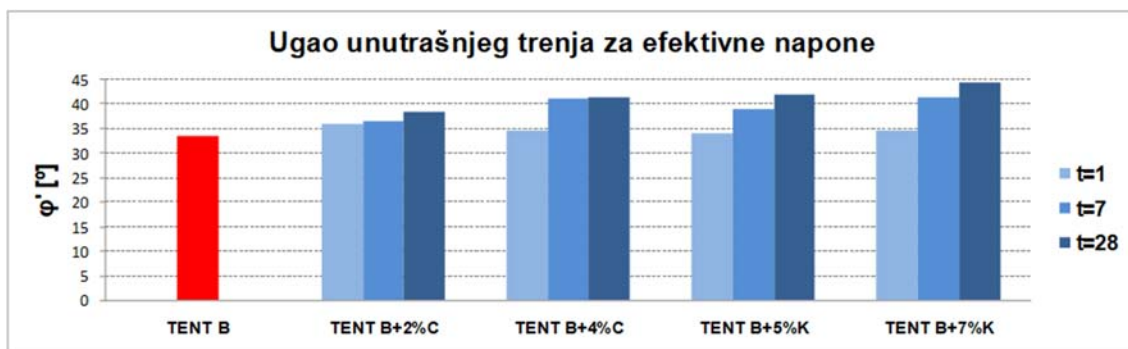
Слика 4.1 Једноаксијална чврстоћа - летећи пепео – ТЕНТ Б

високу вредност угла унутрашњег трења од 33.5° . Резултати испитивања показују благо повећање угла унутрашњег трења за све узорке кроз време, као и са повећањем процента везива. Са додатком цемента угао унутрашњег трења се повећао 15-25%, док је са додатком креча забележено повећање од 25-30%.

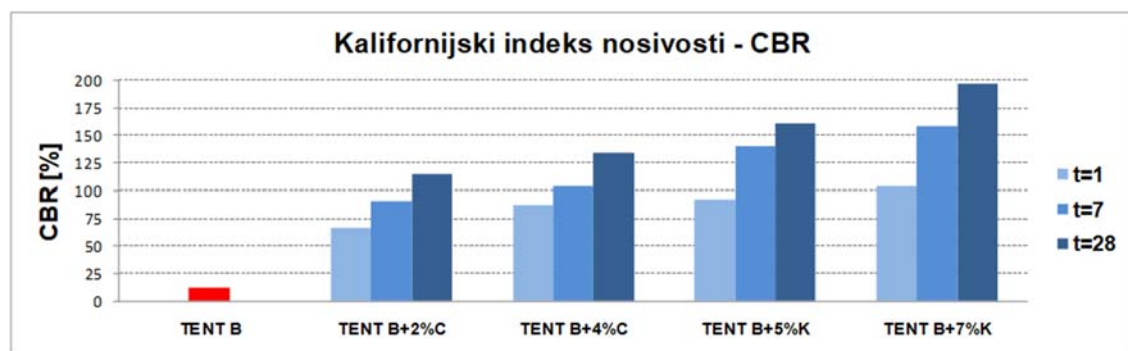
Летећи пепео из силоса ТЕНТ Б има кохезију као резултат апроксимације нелинеарне анvelope лома линеарном. Након додавања везива и уз присуство воде долази до пуцоланске реакције и стварања цементних веза и до повећања кохезије. Додавањем цемента евидентан је прираштај кохезије кроз време. Додавањем 2% цемента, кохезија се повећала 2 пута, односно 4 пута додавањем 4% цемента (након 28 дана). Додавањем креча, после 7 дана је кохезија повећана 2.5-3.5 пута и даље није забележен пораст кохезије кроз време.

4.4. Калифорнијски индекс носивости - CBR

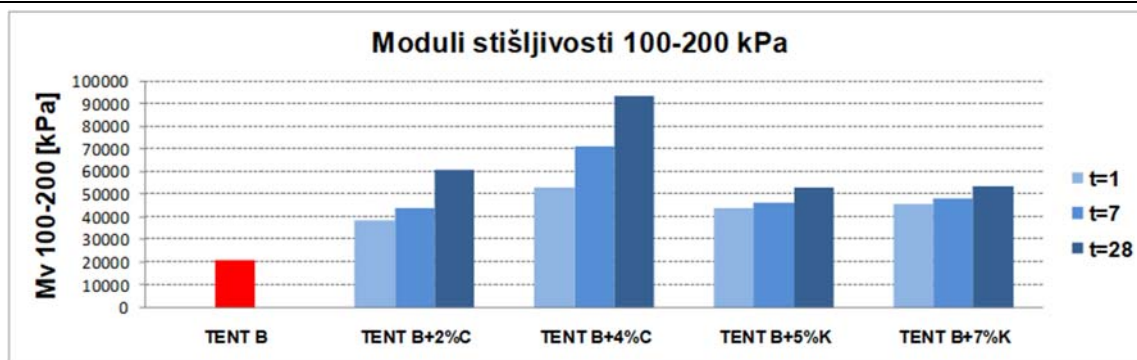
Еталон пепела ТЕНТ Б има CBR вредност од 12.1%, што према носивости постељице спада у постељице средњег квалитета. Са додатком цемента постигнут је пораст CBR вредности од 10-11 пута и након 28 дана износи 115-134%, у зависности од количине везива. Слични ефекти забележени су и са додатком креча - CBR вредност са додатком креча се повећала 13-16 пута и износи од 161-197%, у зависности од количине везива. Према апсолутним вредностима CBR-а, мешавине спадају према носивости постељице у постељице одличног квалитета. Са додатком везива, код свих испитаних узорака постоји јасан тренд повећања CBR вредности кроз време. Добијени резултати приказани су на Слици 4.3.



Слика 4.2 Параметри смичуће чврстоће – летећи пепео- ТЕНТ Б



Слика 4.3 CBR вредности – летећи пепео - ТЕНТ Б



Слика 4.4 Модули стишљивости – летећи пепео- ТЕНТ Б

4.4. Параметри деформабилности

На Слици 4.4 приказани су модули стишљивости за интервал вертикалних напона од 100-200 kPa. Резултати показују да пепео и без додатка везива има задовољавајуће модуле стишљивости са становишта деформабилности насипа. Са додатком везива значајно се смањује деформабилност третираног пепела, односно модули стишљивости се повећавају од 200-400%. Додавањем цемента евидентан је прираштај модула стишљивости кроз време, као и са повећањем садржаја цемента, док су додавањем креча ови ефекти нешто слабије изражени.

5. ЗАКЉУЧЦИ

Термоелектране имају вишеструке негативне утицаје на животну средину: загађују ваздух штетним гасовима и летећим пепелом; депоније пепела и шљаке заузимају велике површине углавном пољопривредног земљишта; депоновани пепео може потенцијално да загади земљиште и воду због присуства тешких метала и радионуклида. Количина депонованог пепела и шљаке може се значајно смањити употребом у грађевинској индустрији.

Да би се проценила могућност примене пепела и шљаке у изградњи саобраћајне инфраструктуре извршена су лабораторијска испитивања пепела и шљаке из термоелектрана у Србији као материјала за стабилизацију слабо носивог тла и изградњу насипа. С обзиром да је пепео из домаћих термоелектрана силикатни, типа V (према EN 14227-4), испитивана је ефикасност стабилизације тла силикатног пепела без везива, као и ефекти додавања везива као средства за цементацију. Такође су испитиване карактеристике летећег пепела и мешавине

пепела и шљаке као грађевинског материјала за изградњу насипа.

С обзиром на резултате стабилизације високо пластичне глине, испитивани летећи пепео из термоелектрана може се успешно користити као додаток који побољшава све механичке карактеристике подтла. Због побољшаних механичких параметара, стабилизовано тло има бољу носивост и ниску стишљивост. Повећање вредности CBR-а и елиминисање потенцијала бубрења чине стабилизовано тло употребљивим у изградњи путева. Уз додаток везива, сва испитивана инжењерска својства су значајно побољшана. Додатак креча даје значајније резултате стабилизације у поређењу са цементам.

Што се тиче пројектовања насипа и постелице пута, мешавине летећег пепела и пепела и шљаке из српских термоелектрана имају упоредиве механичке особине са песком. Употреба везива доприноси значајном повећању параметара чврстоће на смицање, модула стишљивости и CBR вредности испитиваних материјала. Постигнута висока чврстоћа на смицање обезбеђује већу носивост и стабилност косина. Такође, мала стишљивост и смањена запреминска тежина у односу на класичне материјале чини ове материјале погодним за изградњу насипа. Употреба пепела и мешавина пепела и шљаке као грађевинског материјала даје вишеструке користи: смањену количину пепела на депонијама, очување природних ресурса, нижу цену изградње насипа, мању потрошњу енергије и емисије CO₂.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Electricity Production from Oil, Gas and Coal Sources. Available online: <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.FOS.L.ZS>

- [2] ASTM C618-15: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2015.
- [3] SRPS EN 14227-4: Hydraulically bound mixtures - Specifications - Part 4: Fly ash for hydraulically bound mixtures, Institute for Standardization of Serbia, 2014.
- [4] Pandian, N.S.; Krishna, K.C.; Leelavathamma, B. Effect of fly ash on the CBR behaviour of soils. Indian Geotechnical Conference, Allahabad, India, 2002, 1; pp. 183-186.
- [5] Ramadas, T.L.; Kumar, N.D.; Yesuratnam, G. A study on strength and swelling characteristics of three expansive soils treated with fly ash. Proc. of International Symposium on Ground Improvement (IS-GI Brussels 2012) - Recent research, Advances & Execution Aspects of Ground Improvement Works, Brussels, Belgium, 2012; pp. 459-466.
- [6] Kolay, P.K.; Sii, H.Y.; Taib, S.N.L. Tropical peat soil stabilization using class F pond ash from coal fired power plant. IJCEE 2011, 3 (2), pp. 79-83. (<https://doi.org/10.5281/zenodo.1075802>)
- [7] Kumar, S.P. Cementitious compounds formation using pozzolans and their effect on stabilization of soils of varying engineering properties. International Conference on Environment Science and Engineering IPCBEE, Singapore, 2011, 8; pp. 212-215.
- [8] Vukićević, M.; Maraš-Dragojević, S.; Jocković, S.; Marjanović, M.; Pujević, V. Research results of fine-grained soil stabilization using fly ash from Serbian electric power plants. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering "Challenges and Innovations in Geotechnics", Paris, France, 2013; pp. 3267-3270.
- [9] European Coal Combustion Products Association. Available online: <http://www.ecoba.com/ecobaccpprod.html>
- [10] Cmiljanić, S.; Jotić, S.; Tošović, S. Prethodni rezultati istraživačko razvojnog programa-primena elektrofilterskog pepela u putogradnji. In Proceedings of the Simpozijum o Istraž. i Primeni Savremenih Dostignuća u Našem Građevinarstvu u Oblasti Materijala i Konstrukcija: Divčibare, Serbia, 2008; pp. 3–13. (In Serbian)
- [11] Cmiljanić, S.; Vujanić, V.; Rosić, B.; Vuksanović, B.; Tošović, S.; Jotić, S. Physical-mechanical properties of fly-ash originating from thermo-electric power plants of Serbia. In Proceedings of the 14th Danube-European Conference on Geotechnical Engineering: From Research to Design in European Practice, Bratislava, Slovakia, 2–4 June 2010.
- [12] Cmiljanić, S.; Study: Use of Fly Ash and Slag Produced in the Thermal Power Plants “Nikola Tesla A/B” and “Kostolac A/B” for the Needs of Road Construction; Highway Institute, Contractor: Public Enterprise “Roads of Serbia”:Belgrade, Serbia, 2008. (In Serbian)
- [13] Šušić, N.; Study: Application and Placement of Ash Produced at “Elektroprivreda Srbije” Power Plants; Institute for testing materials, Contractor: Public Company “Elektroprivreda Srbije”: Belgrade, Serbia, 2011. (In Serbian)
- [14] Despotović, J.; Study: The Use of Fly Ash of Thermal Power Plants for Soil Stabilization, Self-Compacting and Rolling (RCC) Concrete with Emphasis on Durability of Cement Mortar and Fine Grained Concrete; University of Belgrade—Faculty of Civil Engineering, Contractor: Public Company “Elektroprivreda Srbije”: Belgrade, Serbia, 2014. (In Serbian)
- [15] Vukićević, M.; Study: The Use of Fly Ash and Slag from “Elektroprivreda Srbije” Thermal Power Plants in Railways; Institute for testing materials/University of Belgrade—Faculty of Civil Engineering, Contractor: Public Company “Elektroprivreda Srbije”:Belgrade, Serbia, 2015. (In Serbian)
- [16] Uredba o Tehničkim i Drugim Zahtevima Za Pepee, Kao Građevinski Materijal Namenjen Za Upotrebu u Izgradnji, Rekonstrukciji, Sanaciji I Održavanju Infrastrukturnih Objekata Javne Namene; Official Gazette of RS, 56/2015: Belgrade, Serbia, 2015. (In Serbian)
- [17] Pravilnik o Granicama Radioaktivne Kontaminacije Životne Sredine i o Načinu Sprovođenja Dekontaminacije; Official Gazette of FRY: Belgrade, Serbia, 1999. (In Serbian)
- [18] Vilotijević, M.; Vukićević, M.; Lazarević, L.; Popović, Z. Sustainable railway infrastructure and specific environmental issues in the Republic of Serbia. *Teh. Vjesn.* **2018**, 25, 516–532, doi:10.17559/TV-20171019124644.
- [19] Izquierdo, M.; Querol, X. Leaching behaviour of elements from coal combustion fly ash: An overview. *Int. J. Coal Geol.* **2012**, 94, 54–66, doi:10.1016/j.coal.2011.10.006.
- [20] Ferguson, G.; Levenson, S.M. Soil and pavement base stabilization with self-cementing coal fly ash. American Coal Ash Association International, Alexandria, VA, USA, 1999.
- [21] Çokça, E. Use of class C fly ashes for the stabilization of an expansive soil. *J Geotech Geoenviron* 2001, 127, pp. 568-573. ([https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:7\(568\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:7(568)))
- [22] Nalbantoglu, Z.; Gucbilmez, E. Utilization of an industrial waste in calcareous expansive clay stabilization. *Geotech Test J* 2002, 25 (1), pp. 78-84. (<https://doi.org/10.1520/GTJ11082J>)
- [23] Ferguson, G. Use of self-cementing fly ashes as a soil stabilization agent. ASCE Geotechnical Special Publication, 36, 1993; pp. 1-14.
- [24] Ramadas, T.L.; Kumar, N.D.; Yesuratnam, G. A study on strength and swelling characteristics of three expansive soils treated with fly ash. Proc. of International Symposium on Ground Improvement (IS-GI Brussels 2012) - Recent research, Advances

- & Execution Aspects of Ground Improvement Works, Brussels, Belgium, 2012; pp. 459-466.
- [25] Parsons, R.L. Subgrade improvement through fly ash stabilization, Miscellaneous Report, Kansas University Transportation Center, University of Kansas, 2002.
- [26] White, D.J.; Harrington, D.; Thomas, Z. Fly ash soil stabilization for non-uniform subgrade soils, Volume I: Engineering properties and construction guidelines. Report No. IHRB Project TR-461, FHWA Project 4, Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, 2005.
- [27] Edil, T.B.; Acosta, H.A.; Benson, C.H. Stabilizing soft fine-grained soils with fly ash. *J Mater Civil Eng - Special Issue: Stabilization of geomedias using cementitious materials* 2006, 18 (2), pp. 283-294.
- [28] Zia, N.; Fox, P.J. Engineering properties of loess-fly ash mixtures for roadbase construction. *Transport Res Rec* 2000, 1714(1), pp. 49-56. (<https://doi.org/10.3141/1714-07>)
- [29] Acosta, H.A.; Edil, T.B.; Benson, C.H. Soil stabilization and drying using fly ash. *Geo Engineering Report No. 3*, Geo Engineering Program, University of Wisconsin-Madison, 2003.
- [30] Vukićević, M.; Maraš-Dragojević, S.; Jocković, S.; Marjanović, M.; Pujević, V. Research results of fine-grained soil stabilization using fly ash from Serbian electric power plants. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering "Challenges and Innovations in Geotechnics"*, Paris, France, 2013; pp. 3267-3270
- [31] Meij, R.; Berg, J. Coal fly ash management in Europe trends, regulations and health & safety aspects, *International ash utilization symposium*, Lexington, Kentucky, USA, 2001.
- [32] Murthy, A.V.S.R.; Guru, U.K.; Havanagi, V.G. Construction of road embankments using fly ash. *Fly ash Disposal and Deposition: Beyond 2000 AD*, Narosa Publishing House, New Delhi, India, 2000.
- [33] McKerral, W.C.; Ledbetter, W.B.; Teague, D.J. Analysis of fly ashes produced in Texas. *Texas Transportation Institute, Research Report No. 240-1*, A&M University, Texas, 1982.
- [34] DiGioia, A.M.; McLaren, R.J.; Burns, D.L.; Miller, D.E. Fly ash design manual for road and site application, Vol. 1: Dry or conditioned placement. *Manual Prepared for EPRI, CS-4419, Research, Project 2422-2, Interim Report*, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1986.
- [35] Kim, B.; Prezzi, M.; Salgado, R. Geotechnical properties of fly and bottom ash mixtures for use in highway embankments. *J Geotech Geoenviron* 2005, 131(7), pp. 914-924.
- [36] Sridharan, A.; Pandian, N.S.; Srinivasa Rao P. Shear strength characteristics of some Indian fly ashes, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 2(3), 1998, pp. 141-146.
- [37] Chesner, W.H.; Collins, R.J.; MacKay, M.H.; Emery, J. User guidelines for waste and by-product materials in pavement construction (No. FHWA-RD-97-148, Guideline Manual, Rept No. 480017). *Recycled Materials Resource Center*, 2002.
- [38] Yoder, E.J.; Witczak, M.W. *Principles of pavement design*, 2nd Edition; John Wiley and Sons, 1975.
- [39] Kaniraj, S.R.; Gayathri, V. Permeability and consolidation characteristics of compacted fly ash. *J Energy Eng* 2004, 130(1), pp. 18-43. ([https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9402\(2004\)130:1\(18\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9402(2004)130:1(18)))
- [40] Kim, B.; Prezzi, M. Evaluation of the mechanical properties of class-F fly ash. *Waste manage* 2008, 28(3), pp. 49-59. (<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.04.006>)
- [41] Sharma, N.K.; Swain, S.K.; Umesh, C.S. Stabilization of a clayey soil with fly ash and lime: A micro level investigation. *Geotech Geol Eng* 2012, 30 (5); pp. 1197-1205.