



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У НОВОМ
САДУ



Милија Стојановић

**ЦЕМЕНТОМ СТАБИЛИЗОВАНИ НОСЕЋИ
СЛОЈЕВИ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА
НА БАЗИ РЕЦИКЛИРАНИХ МАТЕРИЈАЛА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Нови Сад, 2021.године

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА¹

Врста рада:	Докторска дисертација
Име и презиме аутора:	Милија Стојановић
Ментор (титула, име, презиме, звање, институција)	проф. др Властимир Радоњанин, редовни професор, Департман за грађевинарство и геодезију, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Наслов рада:	Цементом стабилизирани носећи слојеви коловозних конструкција на бази рециклираних материјала
Језик публикације (писмо):	Српски (ћирилица)
Физички опис рада:	Унети број: Страница - 278 Поглавља - 14 Референци - 116 Слика - 82 Табела - 111 Графикона - 129 Дијаграма - 38 Хистограма - 16 Алгоритама - 2 Шема - 7 Прилога - 2
Научна област:	Грађевинско инжењерство
Ужа научна област (научна дисциплина):	Теорија и технологија бетона
Кључне речи / предметна одредница:	Коловозна конструкција, стабилизација, рециклирани асфалт, летећи пепео, шљунак, цемент
Резиме на језику рада:	У докторској дисертацији су приказани резултати сопственог експерименталног истраживања могућности примјене рециклираних материјала (рециклираног асфалтног агрегата и електрофилтерског летећег пепела из термоелектрана) код израде цементних стабилизација коловозних конструкција. Поменути рециклирани материјали су коришћени као замјена дијела природног агрегата шљунка и цементног везива у стабилизацијским мјешавинама. Током експерименталног лабораторијског истраживања акценат је стављен на одређивање чврстоћа стабилизацијских мјешавина и на основу добијених резултата испитивања изведени су коначни закључци. Постављени циљеви су испуњени, а резултати испитивања су показали да се поменути рециклирани материјали, у одређеним процентуалним учешћима, могу успјешно користити у стабилизацијским мјешавинама.

¹ Аутор докторске дисертације потписао је и приложио следеће Обрасце:

5б – Изјава о ауторству;

5в – Изјава о истовјестности штампане и електронске верзије и о личним подацима;

5г – Изјава о коришћењу.

Ове Изјаве се чувају на факултету у штампаном и електронском облику и не кориче се са тезом.

Датум прихватања теме од стране надлежног већа:	28.03.2018.
Датум одбране: (Попуњава одговарајућа служба)	
Чланови комисије: (титула, име, презиме, звање, институција)	Председник: проф. др Мирјана Малешев, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду Члан: др Ксенија Јанковић, научни саветник, Институт ИМС, Београд Члан: проф. др Небојша Радовић, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду Члан: проф. др Бојан Матић, ванредни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду Ментор: проф. др Властимир Радоњанин, редовни професор, Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Напомена:	

KEY WORD DOCUMENTATION²

Document type:	Doctoral dissertation
Author:	Milija Stojanović
Supervisor (title, first name, last name, position, institution)	prof. dr Vlastimir Radonjanin, full professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
Thesis title:	Cement stabilized bearing layers of pavement construction based on recycled materials
Language of text (script):	Serbian language (cyrillic)
Physical description:	Number of: Pages - 278 Chapters -14 References - 116 Illustrations - 82 Tables - 111 Graphs - 129 Diagrams - 38 Histograms - 16 Algorithms - 2 Schemes -7 Appendices - 2
Scientific field:	Civil Engineering
Scientific subfield (scientific discipline):	Theory and technology of concrete
Subject, Key words:	Pavement construction, stabilization, reclaimed asphalt pavement, fly ash, gravel, cement
Abstract in English language:	The doctoral dissertation presents the results of our own experimental research on the possibility of using recycled materials (recycled asphalt aggregate and fly ash from thermal power plants) in the production of cement stabilizations of pavement structures. The mentioned recycled materials were used as a replacement for a part of the natural aggregate of gravel and cement binder in stabilization mixtures. During the experimental laboratory research, the emphasis was placed on determining the strength of stabilization mixtures and based on the obtained test results, final conclusions were drawn. The set goals have been met, and the test results have shown that the mentioned recycled materials, in certain percentages, can be successfully used in stabilization mixtures.

² The author of doctoral dissertation has signed the following Statements:

56 – Statement on the authority,

58 – Statement that the printed and e-version of doctoral dissertation are identical and about personal data,

5z – Statement on copyright licenses.

The paper and e-versions of Statements are held at the faculty and are not included into the printed thesis.

Accepted on Scientific Board on:	28.03.2018.
Defended: (Filled by the faculty service)	
Thesis Defend Board: (title, first name, last name, position, institution)	<p>President: prof. dr Mirjana Malešev, full professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad</p> <p>Member: dr Ksenija Janković, research associate, IMS Institute, Belgrade</p> <p>Member: prof. dr Nebojša Radović, full professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad</p> <p>Member: prof. dr Bojan Matić, associate professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad</p> <p>Member, Mentor: prof. dr Vlastimir Radonjanin, full professor, Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad</p>
Note:	

Мојој породици.
Ово је ваше.
Ја сам урадио лакши дио посла.

ЦЕМЕНТОМ СТАБИЛИЗОВАНИ НОСЕЋИ СЛОЈЕВИ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА НА БАЗИ РЕЦИКЛИРАНИХ МАТЕРИЈАЛА

Милија Стојановић,
Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука,
Депарتمان за грађевинарство и геодезију,
email: milijastojanovic@gmail.com

РЕЗИМЕ

Као и све конструкције, тако и коловозне, имају свој вијек трајања. У том периоду коловозна конструкција је скоро константно изложена саобраћајном оптерећењу, од кога у највећој мјери и зависе њен тип и карактеристике. Коловозна конструкција мора да задовољи потребе пројектованог саобраћајног оптерећења током периода експлоатације пута. Послије тог периода коловозна конструкција може да изгуби своју функцију и тада је неопходна њена реконструкција или рехабилитација, у зависности од степена оштећености. Приликом пројектовања нове коловозне конструкције потребно је прецизно дефинисати њен пројектни вијек, али исто тако потребно је направити и комплетан план и програм редовног инвестиционог одржавања исте. У пракси ту често настају проблеми. Коловозна конструкција се пројектује, изведе и остави тако да траје, не обраћајући пуно пажњу на њено (редовно инвестиционо) одржавање, које може значајно продужити њен вијек трајања. Сваки неуложени динар у редовном одржавању скупо ће касније коштати приликом њене реконструкције. Неодржавањем коловозне конструкције скраћује се њен животни вијек и неријетко долази до њеног пријевременог колапса. У случају изузетно лошег постојећег стања коловозне конструкције често је неопходна комплетна замјена постојећих материјала у њеним слојевима. Један од начина реконструкције постојеће коловозне конструкције, уз употребу постојећих материјала из исте, је рециклажа. Традиционална израда стабилизација коловозних конструкција, са природним агрегатима и цементним везивима, у задње вријеме се у свијету све мање користи, а предности се дају новијим типовима градње. Многа истраживања доказују да је израда стабилизација могућа и оправдана и уз употребу неких других, прије свега рециклираних и отпадних материјала. Тако се као замјена за камени агрегат, дијелом могу употријебити и рециклирани материјали, прије свега рециклирани: асфалт, бетон или опека. Као замјена за дио цементног везива, у стабилизацијским мјешавинама, могу се користити бројни нуспроизводи индустрије, као што су нпр.: електрофилтерски летећи пепео и шљака из термоелектрана или гранулисана згура из високих индустријских пећи. Њихова пуцоланска својства су већ доказана, а наведени материјали се већ дуги низ година успјешно примјењују као замјена за цемент и у класичним бетонским конструкцијама. Употреба рециклираног асфалта за израду стабилизација има оправданост примјене, јер се тим поступком постојећи материјал из коловозне конструкције опет користи у исту сврху, чиме се обнавља животни циклус датог материјала. Рециклирани асфалт у овом случају настаје стругањем асфалтних слојева коловозне конструкције, поступком хладне рециклаже на лицу мјеста (*in situ*).

Примјеном отпадних материјала, у својству везива у стабилизацијама, смањују се депоније тих материјала, које представљају велики проблем у многим државама, па и у Србији. Електрофилтерски летећи пепео је највећи индустријски отпадни

материјал у Србији. Годишње се у Србији, као нуспроизвод сагоријевања лигнита у термоелектранама, произведе око 7 милиона тона електрофилтерског летећег пепела. Велика предност примјене летећег пепела је та што је то један од ријетких отпадних материјала који се може користити у свом изворном облику, тј. без неке претходне обраде. Стога би могућност његове примјене у коловозним конструкцијама имала велику оправданост. Дакле, уколико се, као што је претходно наведено, у анализу могућности примјене стабилизација коловозне конструкције укључе отпадни материјали (рециклирани асфалт и електрофилтерски летећи пепео) овај тип реконструкције путева има још већу оправданост. Датим поступком би се оствариле бројне уштеде, које се огледају са: економског, еколошког, енергетског, временског, сигурносног и многих других аспеката.

У циљу одрживе градње и поновне употребе постојећих и отпадних материјала, у овој докторској дисертацији анализирана је могућност рециклирања асфалтних слојева флексибилне (асфалтне) коловозне конструкције, примјеном хладне рециклаже асфалта, поступком *in situ*. Рециклирани асфалт се заједно са природним агрегатом (шљунком) и уз додатак везива користи за израду слоја стабилизације. Као везивни материјали се користе хидраулично везиво - цемент и електрофилтерски летећи пепео (као његова замјена у одређеним процентима).

Повећањем укупне количине везива у мјешавинама повећавају се чврстоће стабилизације, а самим тим повећава се и укупна носивост коловозне конструкције. Међутим, примјена веће количине везива од потребне може негативно да утиче на коловозну конструкцију, јер се тим јављају велике разлике у крутостима сусједних слојева, те се стога количина додатог везива мора строго контролисати. На другој страни, са смањењем чврстоћа при притиску могућност настанка пукотина се повећава, чиме овај слој губи своје основно функционално својство и почиње да прима карактеристике невезаних носећих слојева. Правилним избором количине додатка везива (као и међусобног односа цемента и електрофилтерског летећег пепела) и варијабилних компоненти агрегата могу се постићи оптимални резултати физичко-механичких карактеристика за слој цементне стабилизације. Коловозна конструкција са овако стабилованим слојем може да прими већа саобраћајна оптерећења од постојеће флексибилне конструкције (за исте дебљине осталих слојева), што је позитивно и са становишта раста саобраћаја и повећања саобраћајног оптерећења.

Хладна рециклажа асфалта са додатком цемента и летећег пепела за израду стабилованих носећих слојева коловозних конструкција, је детаљно истражена од малог броја аутора. Истраживања на тему хладне рециклаже су углавном везана за примјену рециклираног асфалта само са цементом или са додатком битуменских емулзија или пјенушаваг битумена, и евентуално малим процентима додатка цемента или креча који имају функцији пунила. Комплексност анализе стабилизацијских мјешавинама са рециклираним асфалтом и летећим пепелом је још сложенија када се узме у обзир да у Србији не постоје одговарајући стандарди за њихову примјену. Међутим и у другим европским земаљама има проблема са стандардизацијом у овој области, јер не постоје јединствени прописи за израду цементних стабилизација, него се они разликују од државе до државе.

Кључне ријечи: коловозна конструкција, стабилизација, рециклирани асфалт, летећи пепео, шљунак, цемент.

SUMMARY

Like all structures, pavements have their own lifespan. In that period, the pavement structure is almost constantly exposed to traffic load, since when its type and characteristics depend to the greatest extent. The pavement structure must meet the needs of the designed traffic load during the period of road operation. After that period, the pavement structure can lose its function, and then its reconstruction or rehabilitation is necessary, depending on the degree of damage. When designing a new pavement structure, it is necessary to precisely define its design life, but it is also necessary to make a complete plan and program of regular investment maintenance of the same. In practice, problems often arise here. The pavement structure is designed, constructed and left to last, without paying much attention to its (regular investment) maintenance, which can significantly extend its lifespan. Every dime not invested in regular maintenance will cost dearly later during its reconstruction. Failure to maintain the pavement structure shortens its lifespan and often leads to its premature collapse. In the case of extremely poor existing condition of the pavement structure, it is often necessary to completely replace the existing materials in its layers. One of the ways to reconstruct the existing pavement structure, using existing materials from it, is recycling. The traditional production of pavement structure stabilizations, with natural aggregates and cement binders, has recently been used less and less in the world, and advantages are given to newer types of construction. Many studies prove that the production of stabilization is possible and justified with the use of some other, primarily recycled and waste materials. Thus, as a substitute for stone aggregate, recycled materials can be used in part, primarily recycled: asphalt, concrete or brick. As a substitute for a part of cement binder, in stabilization mixtures, numerous by-products of industry can be used, such as: fly ash and slag from thermal power plants or air-cooled slag from industrial blast furnaces. Their pozzolanic properties have already been proven, and the mentioned materials have been successfully used for many years as a replacement for cement in classic concrete structures. The use of recycled asphalt for the production of stabilizations is justified, because this procedure uses the existing material from the pavement structure for the same purpose again, which renews the life cycle of the given material. Recycled asphalt in this case is created by scraping the asphalt layers of the pavement structure, by the process of cold recycling on the spot (*in situ*).

The application of waste materials as a binder in stabilizations, reduces the landfills of these materials, which are a big problem in many countries, including Serbia. Fly ash is the largest industrial waste material in Serbia. About 7 million tons of fly ash are produced annually in Serbia, as a by-product of lignite combustion in thermal power plants. The great advantage of using fly ash is that it is one of the rare waste materials that can be used in its original form, ie. without any prior processing. Therefore, the possibility of its application in pavement structures would be very justified. Therefore, if, as previously mentioned, waste materials (recycled asphalt and fly ash) are included in the analysis of the possibility of applying the stabilization of the pavement structure, this type of road reconstruction is even more justified. This procedure would achieve numerous savings, which are reflected in: economic, environmental, energy, time, safety and many other aspects.

In order to sustainably build and reuse existing and waste materials, this doctoral dissertation analyzes the possibility of recycling asphalt layers of flexible (asphalt)

pavement structure, using cold asphalt recycling, *in situ*. Recycled asphalt is used together with natural aggregate (gravel) and with the addition of binders to create a stabilization layer. Hydraulic binder - cement and fly ash (as its replacement in certain percentages) are used as binding materials.

Increasing the total amount of binder in the mixtures increases the stabilization strengths, and thus increases the total load-bearing capacity of the pavement structure. However, the application of a larger amount of binder than necessary can negatively affect the pavement structure, because there are large differences in the stiffness of adjacent layers, and therefore the amount of added binder must be strictly controlled. On the other hand, with a decrease in compressive strength, the possibility of cracking increases, whereby this layer loses its basic functional property and begins to receive the characteristics of unbound bearing layers. By correctly choosing the amount of binder additive (as well as the mutual ratio of cement and fly ash) and variable components of the aggregate, optimal results of physical and mechanical characteristics for the cement stabilization layer can be achieved. A pavement structure with such a stabilized layer can receive higher traffic loads than the existing flexible structure (for the same thicknesses of other layers), which is positive from the point of view of traffic growth and increase of traffic load.

Cold recycling of asphalt with the addition of cement and fly ash for the production of stabilized bearing layers of pavement structures has been investigated in detail by a small number of authors. Research on the topic of cold recycling is mainly related to the application of recycled asphalt only with cement or with the addition of bitumen emulsions or foamed bitumen, and possibly small percentages of the addition of cement or lime that have the function of fillers. The complexity of the analysis of stabilization mixtures with recycled asphalt and fly ash is even more complex when we take into account that there are no appropriate standards for their application in Serbia. However, in other European countries there are problems with standardization in this area, because there are no uniform regulations for the development of cement stabilizations, but they differ from country to country.

Key words: pavement construction, stabilization, reclaimed asphalt pavement, fly ash, gravel, cement

САДРЖАЈ:

РЕЗИМЕ	9
СТРУКТУРА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ	25
ХИПОТЕЗЕ ИСТРАЖИВАЊА	26
1. УВОД	27
1.1. Историјат	27
1.1.1. Почеци градње путева	27
1.1.2. Историјат примјене асфалта и почеци његовог рециклирања	28
1.1.3. Цементне стабилизације коловозних конструкција кроз вријеме.....	29
1.1.4. Стабилизације са електрофилтерским летећим пепелом.....	31
2. ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА	34
3. ПОТРЕБЕ И ОПРАВДАНОСТ ИСТРАЖИВАЊА	37
3.1. Примјена старих и отпадних материјала	37
3.2. Економска анализа примјене битуменизираних материјала	38
3.3. Ниво услуге у зависности од стања пута током експлоатационог периода	39
3.4. Тенденције кретања путничког саобраћаја у Европи	40
3.5. Анализа безбједности путева у Србији и поређење са европским	41
3.6. Стање путне мреже Србије	43
4. ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА	46
5. НАУЧНЕ МЕТОДЕ У ИСТРАЖИВАЊУ	49
6. КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ	50
6.1. Уопштено о коловозним конструкцијама	50
6.2. Носећи слојеви коловозних конструкција	50
6.3. Коловозне конструкције са цементним стабилизацијама	51
6.3.1. Избор типа везива и карактеристике стабиловања различитих врста материјала	52
6.3.2. Утицај додатка хидрауличних везива на стабилизације некохерентних материјала	54
6.3.3. Разлике цементних стабилизација у односу на конвенционалне бетонске мјешавине	55
6.3.4. Основни поступци одређивања механичких карактеристика.....	58
6.3.5. Подручја примјене и ограничења при пројектовању и извођењу цементних стабилизација ..	61
6.3.6. Температурни услови уградње цементних стабилизација.....	62
6.3.7. Цементне стабилизације са аспекта водопорпусности и дејства мраза и соли	63
6.3.8. Могућност настанка прлина и пукотина у слоју цементне стабилизације	64
6.3.8.1. Механизам дјеловања рефлектованих пукотина	67
6.3.9. Стандардизација и захтјеви везани за примјену цементних стабилизација	69
7. РЕЦИКЛАЖА АСФАЛТНИХ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА	73
7.1. Типови и подјеле рециклаже	73
7.1.1. Подјела према врсти везива	73
7.1.2. Подјела према врсти агрегата	73
7.1.3. Подјела према температури справљања мјешавине	73
7.1.4. Подјела према мјесту рециклаже.....	74
7.2. Основни постулати и подручје примјене хладне рециклаже	74
7.3. Рециклирани асфалт као агрегат у изради нових коловозних конструкција	75
7.3.1. Рециклирани асфалт као материјал у енергетским и еколошким анализама	78
7.4. Везивни материјали у поступку рециклаже и подобности њихове примјене	78
7.4.1. Критеријуми за избор везива код рециклираног стабилизованог слоја.....	79
7.4.2. Предности и недостаци примјене цемента као везива у хладној рециклажи асфалта	80
7.4.3. Поступак додатка хидрауличних везива	81
7.5. Могућност примјене технологије хладне рециклаже у поступку реконструкције коловозних конструкција	82
7.6. Технологија извођења хладне рециклаже – поступак уградње цементне стабилизације.....	83

7.7.	Дубина рециклирања асфалтних коловоза	86
7.8.	Утицајни фактори и ограничења у поступку рециклаже асфалтних коловоза	87
7.9.	Избор техника реконструкције и рехабилитације коловоза у зависности од оштећења коловоза	89
7.10.	Предности и недостаци примјене хладне рециклаже асфалта на лицу мјеста	90
7.11.	Примјена рециклираног асфалта у свијету и могућности примјене у Србији	91
8.	ЕЛЕКТРОФИЛТЕРСКИ ЛЕТЕЋИ ПЕПЕО – ДОСТУПНОСТ И МОГУЋНОСТИ ПРИМЈЕНЕ	97
8.1.	Поријекло и настанак електрофилтерског летећег пепела	97
8.2.	Пуцоланска својства	98
8.3.	Хемијски састав	99
8.4.	Физичке карактеристике	102
8.5.	Подијеле летећег пепела	103
8.6.	Производња летећег пепела у Србији и свијету	104
8.7.	Примјена летећег пепела у свијету	105
8.8.	Досадашња примјена индустријских нуспроизвода (летећег пепела и згуре) у Србији	108
8.9.	Могућности употребе летећег пепела у путарству и другим гранама грађевинарства	109
8.10.	Примјена летећег пепела код стабилизација носећих слојева	110
8.11.	Летећи пепео у цементној индустрији и бетонским композитима	111
8.12.	Радиоактивност летећег пепела и утицај на здравље људи	112
8.13.	Летећи пепео и животна средина	114
8.14.	Одлагање летећег пепела	115
8.15.	Предности употребе летећег пепела у грађевинарству	116
8.16.	Законска регулатива и стандардизација	117
9.	ПРЕГЛЕД СТАЊА У ОБЛАСТИ	119
10.	ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ	195
10.1.	Физичко-механичка испитивања компонентних материјала	195
10.1.1.	Испитивање цемента	195
10.1.2.	Испитивање природног агрегата	196
10.1.3.	Испитивање рециклираног агрегата	197
10.1.4.	Електрофилтерски летећи пепео	200
10.1.5.	Вода за справљање стабилизацијских мјешавина	201
10.2.	Начин избора стабилизацијских мјешавина и учешћа компонентних материјала	202
10.3.	Реализација експерименталног истраживања	203
10.3.1.	Поступак израде узорка и претходна испитивања	205
10.4.	Резултати испитивања Proctor-овог опита	205
10.5.	Резултати испитивања физичко-механичких карактеристика цементних стабилизација	214
10.5.1.	Запреминска маса	214
10.5.2.	Чврстоћа при притиску	217
10.5.3.	Индиректна затезна чврстоћа и упоредни прикази чврстоћа	223
10.5.4.	Вријеме и брзина проласка ултразвука	236
10.6.	Анализа резултата експерименталног истраживања	239
10.7.	Интерпретација резултата испитивања методом факторијалног експеримента	243
10.7.1.	Анализа утицаја варираних параметара на чврстоћу при притиску	250
11.	ЗАКЉУЧАК	255
12.	НАУЧНИ ДОПРИНОС И ПРАВЦИ ДАЉЕГ ИСТРАЖИВАЊА	257
13.	ЛИТЕРАТУРА	259
14.	ПРИЛОЗИ	268

СПИСАК СЛИКА:

Слика 2.1. – Подужне пукотине	34
Слика 2.2. – Мрежасте пукотине	34
Слика 2.3. – Блокковске пукотине	34
Слика 2.4. – Ударне рупе.....	34
Слика 2.5. – Асфалтни застор са мрежастим пукотинама прије и након проласка рециклера [14]	35
Слика 2.6. – Стругање и рециклажа постојећег асфалтног застора уз додатак цемента [13].....	35
Слика 2.7. – Природни агрегат шљунак (G – Gravel), фракције 8/16, 4/8, 0/4mm	35
Слика 2.8. – Рециклирани асфалт (RAP – Recycled Asphalt Pavement), granulација 0/16mm	35
Слика 2.9. – Цемент (C)	35
Слика 2.10. – Летећи пепео (FA – Fly Ash)	35
Слика 2.11. – Поступак стабилизације оштећеног асфалтног коловоза, примјеном хладне рециклаже асфалта уз додатак цемента и летећег пепела [13].....	36
Слика 3.1. – Лоше постојеће стање комплетне коловозне конструкције пута Idrija-Idrijska Bela (Словенија) који је кандидат за хладну рециклажу асфалта [17].....	40
Слика 3.2. – Мрежасте пукотине на коловозном застору које условљавају смањење квалитета вожње, пут R432 у БиХ (Гацко - државна граница са Црним Гором)	40
Слика 3.3. – Просјечан број смртно страдалих особа у саобраћајним незгодама (у односу на милион становника), на европским путевима у 2019.години [101].....	42
Слика 4.1. – Приказ напона и деформација у слојевима коловозне конструкције [3]	46
Слика 4.2. – Утицај саобраћајног оптерећења на деформабилност коловозне конструкције [17]	46
Слика 4.3. – Пренос саобраћајног оптерећења кроз коловозну конструкцију са невезаним носећим слојевима.....	47
Слика 4.4. – Пренос саобраћајног оптерећења кроз коловозну конструкцију са везаним носећим слојем	47
Слика 4.5. – Затворени циклус изградње пута [19].....	48
Слика 4.6. – Степенести концеп поновне употребе материјала из коловозне конструкције [19].....	48
Слика 6.1. – Утицај саобраћајног оптерећења на промјену напона [7]	50
Слика 6.2. – Повећање пора у мјешавинама цементних стабилизација усљед смањења количине цемента и воде (цементне пасте) [23]	52
Слика 6.3. – Различити типови агрегата и врсте везива код стабилизација у Ј.Африци [23].....	53
Слика 6.4. – Цементом третирани материјали који се користе за различите намјене у путоградњи [23].....	55
Слика 6.5. – Структура цементних стабилизација и конвенционалних бетона [7]	56
Слика 6.6. – Шематски приказ испитивања чврстоће при притиску (f_c) [23]	58
Слика 6.7. – Лабораторијско испитивање чврстоће при притиску (f_c)	58
Слика 6.8. – Одговарајући ломови цилиндричних узорака приликом испитивања f_c [86].....	58
Слика 6.9. – Неодговарајући ломови цилиндричних узорака приликом испитивања f_c [86].....	58
Слика 6.10. – Шематски приказ испитивања индиректне затезне чврстоће (ITS).....	60
Слика 6.11. – Лабораторијско испитивање индиректне затезне чврстоће (ITS)	60
Слика 6.12. – Инструмент PUNDIT за испитивање брзине и времена проласка ултразвука	60
Слика 6.13. – Мјерење времена проласка ултразвучног таласа кроз цилиндрични узорак	60
Слика 6.14. – Издавање цементне пасте (усљед слијегања) на доњем површинском слоју очврслог стабилизацијског узорка.....	62
Слика 6.15. – Утицај дејства подземне воде на слојеве коловозне конструкције са невезаним и цементном стабилизацијом носећим слојевима [23]	63
Слика 6.16. – Циркулација воде у зони коловозне конструкције пута у засјеку [7].....	64
Слика 6.17. – Механизам настанка прелина у цементној пасту [23].....	65
Слика 6.18. – Напрезања у слоју цементне стабилизације усљед скупљања [7]	66
Слика 6.19. – Попречне прелине у плочи дужине L [7].....	66
Слика 6.20. – Механизми рефлектовања пукотина из слоја цементне стабилизације ка асфалтном застору и обрнуто [7].....	68
Слика 7.1. – Рециклирани асфалтни агрегат [14]	75
Слика 7.2. – Рециклирани асфалт са локације: Иришки венац (Државни пут IB реда (број 21), Нови Сад-Рума), који је коришћен у овом истраживању	75
Слика 7.3. – Нехомогеност рециклираног асфалта, а) чисто битуменско зрно, б) зрно од природног каменог агрегата, в) зрно са доминантним крупнијим природним агрегатом, г) зрно са приближно истим учешћем природног каменог агрегата и старог битумена [26]	76
Слика 7.4. – Специјализована машина за разстирање цемента (десно) и цистерна за воду (лијево) [13]	81
Слика 7.5. – Додатак цемента у прашкастом облику (dry cement) [77]	81
Слика 7.6. – Додатак цемента и воде у облику муља (cement slurry) [77].....	81

Слика 7.7. – Шематски приказ два начина извођења хладне рециклаже асфалта са додатком цемента [22]	84
Слика 7.8. – Различит приказ технологија стругања старог асфалта и справљања нове цементом стабилизоване мјешавине [93]	84
Слика 7.9. – Приказ воза за рециклажу на градилишту [30]	84
Слика 7.10. – Приказ поступка рециклаже коловозне конструкције, попречни пресјек ротора рециклера и ударне игле ротора [13]	85
Слика 7.11. – Коловозна конструкција са површинским слојем цементне стабилизације [30]	85
Слика 7.12. – а) Одговарајућа и б) неодговарајућа дубина рециклаже у два пролаза рециклера (уситњавање и стабилизација) [13]	86
Слика 7.13. – Рециклажа невезаних слојева коловозне конструкције у циљу повећања носивости [31]	87
Слика 8.1. – Процес настанка летећег пепела у термоелетранама [40]	97
Слика 8.2. – Микроскопски прикази честица уврћаних 1000 пута, за двије различите врсте летећег пепела [39]	98
Слика 8.3. – Однос између садржаја калцијум оксида и оксида силицијума, алуминијума и гвожђа, за летећи пепео са 110 локација у Сјеверној Америци [40]	102
Слика 8.4. – Летећи пепео са ниским садржајем угљеника [40]	103
Слика 8.5. – Летећи пепео (бакарне боје) из ТЕНТ-а Б.	103
Слика 8.6. – Коришћење летећег пепела при градњи ријечног терминала Norfolk у САД [43]	106
Слика 8.7. – Примјена летећег пепела при градњи саобраћајнице Burntwood Bypass (Staffordshire), Велика Британија (2001) [43]	107
Слика 8.8. – Изградња саобраћајнице RN 47 Lens – La Bassée (Француска) уз примјену летећег пепела у градњи носивих слојева [43]	107
Слика 9.1. – Додатак воде рециклираном асфалту	137
Слика 9.2. – Додатак летећег пепела	137
Слика 9.3. – Поступак мијешање и збијање стабилизованог слоја	137
Слика 9.4. – Попречни пресјек узорка са RAP-ом (75%) и природним агрегатом (25%), стабилованим са 4% цемента (локација Waco, америчка савезна држава Тексас)	138
Слика 9.5. – Метални цилиндрични калуп	141
Слика 9.6. – Узорак са слојевима гипса на горњој и доњој површини	141
Слика 9.7. – Преса за испитивање чврстоће при притиску	141
Слика 9.8. – Опрема за испитивање механичких карактеристика цементних стабилизација триаксијалним опитом	157
Слика 9.9. – Попречни пресјек коловозне конструкције: а) прије и б) након поступка рехабилитације, за двије различите дебљине стабилизованог слоја	158
Слика 9.10. – Отпадни бетон и зидарска опека, коришћени као дробљени рециклирани агрегат (MRA1 и MRA2) у стабилизацијама	177
Слика 9.11. – Приказ путних дионица на којима су испитане цементне стабилизације	178
Слика 9.12. – Попречни пресјек коловозне конструкције са слојем цементне стабилизације	179
Слика 9.13. – Оштећења банкина и појаве мрежастих пукотина на путу Idrija - Idrijska Bela	182
Слика 9.14. – Мрежасте пукотине и појава ударних рупа на путу Idrija - Idrijska Bela	182
Слика 9.15. – Додатак хидрауличног везива (цемента) у прашкастом облику	182
Слика 9.16. – Заштита стабилизованог слоја геотекстилом и поливање водом током периода његе	194
Слика 10.1. – Фракције (3) природног агрегата шљунка – G (0/4, 4/8 и 8/16mm)	197
Слика 10.2. – Фракције (3) рециклираног асфалтног агрегата (RAP-а) коришћеног у истраживању (0/4, 4/8 и 8/16mm)	198
Слика 10.3. – Мјерење димензија цилиндричних узорака	204
Слика 10.4. – Припрема узорака за испитивање чврстоћа при притиску	204
Слика 10.5. – Графички модел тро-параметарског факторијалног експеримента [16]	244

СПИСАК ТАБЕЛА:

Табела 1.1. – Примјена цементних стабилизација у Војводини [7]	31
Табела 1.2. – Бенефити примјене летећег пепела при градњи путева крајем XX вијека у Кини [12]	33
Табела 3.1. – Путна мрежа Србије према категоријама и врсти коловозног застора [20]	44
Табела 3.2. – Дужине државних путева I и II реда [104]	44
Табела 6.1. – Утицајни фактори за размак и ширину прслина	67
Табела 6.2. – Карактеристике цементом третираних материјала у доњим слојевима коловозне конструкције, по захтјевима Европске уније [24]	70

Табела 6.3. – Захтјеви појединих европских земаља за примјену цементних стабилизација са аспекта механичких карактеристика (уз употребу 100kg/m^3 цемента) [17]	71
Табела 7.1. – Препоруке за избор везива при рециклажи постојећег коловозног застора различитим поступцима рециклаже (+ препорука примјене, - примјена није пожељна) [19].....	79
Табела 7.2. – Предности и недостаци употребе цемента у рециклажи асфалтних слојева [22]	80
Табела 7.3. – Различити типови оштећења коловозне конструкције и могућности рехабилитације коловоза по приоритетима [4]	89
Табела 7.4. – Предности дубоке рециклаже по хладном поступку, у односу на врућу рециклажу асфалта [22]	91
Табела 7.5. – Карактеристике примјене хладне рециклаже асфалта у појединим свјетским земљама [36]... ..	94
Табела 7.6. – Доступне количине рециклираног асфалтног материјала у 2019. години и начин поновне употребе у појединим европским државама [37]	96
Табела 8.1. – Карактеристичан хемијски састав летећег пепела [41]	99
Табела 8.2. – Класе летећег пепела по стандарду ASTM C618-17 [40]	100
Табела 8.3. – Међународни систем класификација летећег пепела [11]	100
Табела 8.4. – Хемијски састав летећег пепела из колубарског (ТЕНТ А и ТЕНТ Б) и костолачког (ТЕКО А и ТЕКО Б) угљеног басена (2007.год.) [11]	101
Табела 8.5. – Канадска класификација летећег пепела на основу садржаја (СаО)–CSA класификација [40]	102
Табела 8.6. – Количина пепела и шљаке у Републици Србији и осталим земљама, прерачуната на површину коју заузимају и број становника [11]	104
Табела 8.7. – Количина произведених нуспроизвода у процесу сагоријевања угља у Европи у 2016. години [42] ..	105
Табела 8.8. – Употреба летећег пепела у бетонским мјешавинама [40]	111
Табела 9.1. – Лабораторијска испитивања у оквиру експеримента докторске дисертације	120
Табела 9.2. – Количине цемента (PC350) потребне за добијање просјечних чврстоћа при притиску у односу на референтну градацију А	120
Табела 9.3. – Вриједности оптималних влажности (ОМС) и максималних сувих запреминских маса ($\text{Max } \delta_d$) за различите мјешавине	124
Табела 9.4. – Резултати хемијске анализе: глине (S), цемента (C) и летећег пепела (FA)	126
Табела 9.5. – Оптималан садржај воде (ОМС) и максимална сува запреминска мјешавина ($\text{Max } \delta_d$)	126
Табела 9.6. – Вриједности ITS-а у сувом (dry) и водом засићеном (wet) стању, као и постојаност на дејсто воде (water stability)	127
Табела 9.7. – Оптималне влажности и максималне суве запреминске масе за различита учешћа агрегата ..	131
Табела 9.8. – Вриједности чврстоћа при притиску са и без дејства воде	132
Табела 9.9. – Резултати Простог-овог опита у зависности од учешћа компонентних материјала	133
Табела 9.10. – Вриједности ОМС-а у зависности од количине RAP-а и цемента	141
Табела 9.11. – Вриједности MDD-а у зависности од количине RAP-а и цемента	141
Табела 9.12. – Вриједности UCS-а у зависности од учешћа RAP-а и цемента	141
Табела 9.13. – Резултати хемијских анализа летећег пепела и шљаке из ТЕНТ-а Б	142
Табела 9.14. – Вриједности једноаксијалних чврстоћа послје 7 и 28 дана	143
Табела 9.15. – Резултати ITS-а за пепео, са додатком цемента и креча, послје 28 дана њега узорака	144
Табела 9.16. – Вриједности модула еластичности (E) за летећи пепео	144
Табела 9.17. – Захтјеви потребне збијености и 7-дневне чврстоће при притиску за различите државе	145
Табела 9.18. – Захтјеване количине цемента за стабилизације различитих агрегата (AASHTO стандард) ..	145
Табела 9.19. – Вриједности директне и индиректне затезне чврстоће у зависности од састава мјешавине	149
Табела 9.20. – Вриједности чврстоћа при притиску и затезних чврстоћа (након 28 дана њега изорака)	151
Табела 9.21. – Губитак воде током поступка збијања и вриједности максималних сувих запреминских маса	152
Табела 9.22. – Вриједности 28-дневних чврстоћа при притиску стабилизацијских узорака	153
Табела 9.23. – Зависности ОМС-а и MDD-а од врсте мјешавине	153
Табела 9.24. – Зависности ОМС-а и MDD-а од врсте агрегата (RC и CL) и гранулације агрегата	153
Табела 9.25. – Чврстоћа при притиску за различите стабилизацијске мјешавине и периоде њега узорака ..	154
Табела 9.26. – Модули еластичности за различите стабилизацијске мјешавине и периоде њега узорака	154
Табела 9.27. – Утицај локације испитивања на механичке карактеристике стабилизације	160
Табела 9.28. – Вриједности оптималних влажности и максималних сувих запреминских маса за различите агрегате и учешће летећег пепела	161
Табела 9.29. – Вриједности чврстоћа при притиску и динамичких модула еластичности стабилизација, за различите периоде њега и садржаје цемента	166
Табела 9.30. – Вриједности максималне суве запреминске масе, оптималне влажности и водоцементног фактора, за различита учешћа цемента у мјешавинама	171

Табела 9.31. – Процентуални пролази агрегата на појединим ситима и њихове граничне вриједности.....	171
Табела 9.32. – Аустралијски стандарди који су коришћени у истраживању	172
Табела 9.33. – Параметари смицања цементне стабилизације, за различита учешћа цемента	172
Табела 9.34. – Процентуални пролази рециклираних агрегата мјешавине кроз номинална сита и граничне вриједности.....	174
Табела 9.35. – Пролази агрегата кроз номинална сита и граничне вриједности за иста.....	176
Табела 9.36. – Вриједности ОМС-а и МДД-а за различита учешћа цемента	176
Табела 9.37. – Брзине проласка ултразвука и модули еластичности у зависности од количине додатка цемента.....	177
Табела 9.38. – Учешће појединих компонентних материјала у рециклираним материјалима	178
Табела 9.39. – Чврстоће при притиску и суве запреминске масе за различите мјешавине, периоде њега и постуке испитивања цементних стабилизација	179
Табела 9.40. – Вриједности 28-дневних чврстоћа при притиску узорака са 2 и 4% мас додатка цемента.....	180
Табела 9.41. – Чврстоће при притиску прије и након дејства мрза (HRN U.B1.050)	181
Табела 9.42. – Отпорност на мраз цементних стабилизација дефинисана преко чврстоћа при притиску (по EN 13286-54:2016).....	181
Табела 9.43. – Вриједности модула еластичности стабилизацијских мјешавина	184
Табела 9.44. – Чврстоће при притиску и отпорности коловозне конструкције на штетно дејство мрза.....	188
Табела 9.45. – Резултати контролних испитивања цементних стабилизација на путним дионицама Крапина-Maselj и Vrbovec-Gradec	189
Табела 9.46. – Резултати Proctor-овог опита и чврстоће при притиску КСМ-а	191
Табела 9.47. – Вриједности индиректних затезних чврстоћа КСМ-а.....	191
Табела 9.48. – Вриједности Poisson-их коефицијената и модула еластичности КСМ-а	191
Табела 9.49. – Максималне величине зрна агрегата у зависности од дебљине стабилизацијског слоја.....	192
Табела 9.50. – Вриједности механичких карактеристика цементне стабилизације у зависности од периода њега узорака	192
Табела 9.51. – Лабораторијско испитивање чврстоћа стабилизацијских узорака на кероновима из КК.....	193
Табела 10.1. – Резултати испитивања физичких и механичких карактеристика цемента	195
Табела 10.2. – Резултати испитивања физичких карактеристика природног агрегата	196
Табела 10.3. – Процентуални пролази природног агрегата шљунка	197
Табела 10.4. – Резултати испитивања физичких карактеристика RAP-а	198
Табела 10.5. – Процентуални пролази рециклираног асфалтног асфалта (RAP-а).....	199
Табела 10.6. – Хемијски састав летећег пепела коришћеног у експерименталном истраживању.....	200
Табела 10.7. – Резултати испитивања чврстоћа летећег пепела (након 28 дана њега)	200
Табела 10.8. – Резултати испитивања физичких карактеристика летећег пепела	201
Табела 10.9. – Састави мјешавина цементних стабилизација које су коришћене у експерименталном истраживању.....	202
Табела 10.10. – Вриједности максималних сувих запреминских маса ($\gamma_{s,max}$) и оптималних влажности (w_{opt}), за различите саставе стабилизацијских мјешавина.....	206
Табела 10.11. – Резултати Proctor-ог опита (за мјешавину M1).....	207
Табела 10.12. – Резултати Proctor-ог опита (за мјешавину M2)	207
Табела 10.13. – Резултати Proctor-ог опита (за мјешавину M3).....	208
Табела 10.14. – Резултати Proctor-ог опита (за мјешавину M4)	208
Табела 10.15. – Резултати Proctor-ог опита (за мјешавину M5).....	209
Табела 10.16. – Резултати Proctor-ог опита (за мјешавину M6)	209
Табела 10.17. – Резултати Proctor-ог опита (за мјешавину M7).....	210
Табела 10.18. – Резултати Proctor-ог опита (за мјешавину M8)	210
Табела 10.19. – Резултати Proctor-ог опита (за мјешавину M9)	211
Табела 10.20. – Резултати Proctor-ог опита (за мјешавину M10)	211
Табела 10.21. – Резултати Proctor-ог опита (за мјешавину M11)	212
Табела 10.22. – Резултати Proctor-ог опита (за мјешавину M12)	212
Табела 10.23. – Средње вриједности аксијалних сила лома и чврстоћа при притиску стабилизацијских мјешавина, за различите периоде њега узорака	217
Табела 10.24. – Средње вриједности сила лома и индиректних затезних чврстоћа стабилизацијских мјешавина, за различите периоде њега узорака	223
Табела 10.25. – Процентуални однос вриједности индиректних затезних чврстоћа (ITS) и чврстоћа при притиску (f_c), у зависности од врсте стабилизацијске мјешавине и периода њега узорака	235
Табела 10.26. – Описи утицајних фактора и могући ново њиховог разматрања.....	244
Табела 10.27. – Вриједности бездимензионих величина „ x_i “ и њихових производа (мјешавине са 0 или 20% FA)	245

Табела 10.28. – Вриједности бездимензионих величина „ x_i “ и њихових производа (мјешавине са 0 или 40% FA)	246
Табела 10.29. – Вриједности 7-дневних чврстоћа при притиску цементних стабилизација у зависности од варираних параметара (мјешавине са 0 и 20% FA)	247
Табела 10.30. – Вриједности 7-дневних чврстоћа при притиску цементних стабилизација у зависности од варираних параметара (мјешавине са 0 и 40% FA)	248
Табела 10.31. – Вриједности 28-дневних чврстоћа при притиску цементних стабилизација у зависности од варираних параметара (мјешавине са 0 и 20% FA)	248
Табела 10.32. – Вриједности 28-дневних чврстоћа при притиску цементних стабилизација у зависности од варираних параметара (мјешавине са 0 и 40% FA)	249
Табела 10.33. – Коефицијенти полинома за зависност „ $f_{c,7} = f_{c,7}(Z_1, Z_2, Z_3)$ “	250
Табела 10.34. – Коефицијенти полинома за зависност „ $f_{c,28} = f_{c,28}(Z_1, Z_2, Z_3)$ “	250
Табела 10.35. – Вриједности срачунатих тестних карактеристика којима се оцјењује значајност коефицијента полинома „ $f_c = f_c(Z_1, Z_2, Z_3)$ “	252
Табела 10.36. – Разлике између стварних и рачунских вриједности чврстоћа при притиску цементних стабилизација са 20% FA, за „ $f_{c,7}$ “	253
Табела 10.37. – Разлике између стварних и рачунских вриједности чврстоћа при притиску цементних стабилизација са 40% FA, за „ $f_{c,7}$ “	253
Табела 10.38. – Разлике између стварних и рачунских вриједности чврстоћа при притиску цементних стабилизација са 20% FA, за „ $f_{c,28}$ “	254
Табела 10.39. – Разлике између стварних и рачунских вриједности чврстоћа при притиску цементних стабилизација са 40% FA, за „ $f_{c,28}$ “	254

СПИСАК ГРАФИКОНА:

Графикон 3.1. – Раст цијене битумена у €/t, за период од 1991. до 2011.године [17]	39
Графикон 3.2. – Индикатори који утичу на квалитет возње [13]	39
Графикон 3.3. – Пад квалитета возње у функцији времена и повећање истог након реконструкције коловозне конструкције, поступком рециклаже [4]	40
Графикон 3.4. – Приказ расподеле различитих типова путничког саобраћаја у Европи, даме кроз број путника ($\times 10^9$) који користи одређени вид саобраћаја (Gpkm – Giga passenger kilometre) [97]	41
Графикон 3.5. – Број погинулих лица у саобраћајним незгодама на српским путевима, у периоду од 2000. до 2017.године [100]	41
Графикон 6.1. – Утицај додатка стабилизатора на повећање кохезије између зрна агрегата код некохерентних материјала [7]	55
Графикон 6.2. – Упоредни приказ односа чврстоћа класичних бетона и цементних стабилизација [13]	56
Графикон 6.3. – Потребне количине додатка цемента у зависности од гранулације и максималне запреминске масе агрегата [7]	57
Графикон 6.4. – Типске гранулометријске криве различитих материјала и подручје повољне гранулације за стабилизацију цементом [7]	61
Графикон 6.5. – Граничне гранулометријске криве агрегата (са максималним зрном 31,5mm) који се стабилизује цементом [22]	61
Графикон 6.6. – Минималне 7-дневне захтјеване чврстоће при притиску [7]	71
Графикон 7.1. – Избор типа реконструкције пута, поступком <i>in situ</i> , у зависности од стања и животног вијека коловозне конструкције [32]	90
Графикон 8.1. – Утицај учешћа летећег пепела на развој чврстоћа при притиску бетонских мјешавина [40]	112
Графикон 8.2. – Развој чврстоћа на савијање и њихове вриједности за стабилизације са различитим врстама везива [8]	112
Графикон 9.1. – Чврстоће при притиску у зависности од врсте везива и периода њега узорака	120
Графикон 9.2. – Зависност чврстоћа при притиску и индиректних затезних чврстоћа	121
Графикон 9.3. – Гранулометријски састав рециклираног асфалта (RAP-a) и природног агрегата (V.Agg.) ..	125
Графикон 9.4. – Чврстоће при притиску у зависности од учешћа цемента и периода њега узорака	125
Графикон 9.5. – Максимална сува запреминска маса и оптимална влажност у зависности од учешћа компонентних материјала стабилизације	126
Графикон 9.6. – Вриједности чврстоћа при притиску у зависности од учешћа компонентних материјала и присуства адитива	127
Графикон 9.7. – Одређивање w/c на основу референтне чврстоће при притиску	128
Графикон 9.8. – Гранулометријске криве мјешавина агрегата (3) и граничне криве	128

Графикон 9.9. – Гранулометријске криве агрегата са обилазнице око Смедерева	129
Графикон 9.10. – Захтјеване и остварене вриједности чврстоћа за обилазницу око Смедерева	130
Графикон 9.11. – Захтјеване и остварене вриједности чврстоћа за државни пут IB реда, бр.15	130
Графикон 9.12. – Гранулометријске криве за два просијавања RAP-а	131
Графикон 9.13. – Зависност чврстоћа при притиску од: а) количине цемента и б) врсте агрегата	132
Графикон 9.14. – Зависност модула еластичности од фреквенције осциловања и температуре за: а) 45°C и б) 55°C.....	132
Графикон 9.15. – Вриједности CBR-а за RPM и RSG у зависности од количине додатка летећег пепела.....	134
Графикон 9.16. – Гранулометријске криве за нетретирани RPM и природни агрегат (Grade 2 gravel)	134
Графикон 9.17. – Чврстоће при притиску у зависности од количине додатка летећег пепела и периода њега	135
Графикон 9.18. – Збирни приказ вриједности CBR-а у зависности од учешћа RAP-а.....	135
Графикон 9.19. – CBR у зависности од учешћа летећег пепела	136
Графикон 9.20. – CBR у зависности од количине цемента и садржаја RAP-а.....	136
Графикон 9.21. – Утицај количине RAP-а у стабилованим мјешавинама на вриједности: а) угла унутрашњег трења [°] и б) кохезије [кПа]	136
Графикон 9.22. – Зависност чврстоће при притиску од: а) процента додатка RAP-а и б) врсте везива и периода њега узорака	136
Графикон 9.23. – Утицај количине додатка RAP-а и цемента на вриједности чврстоћа при притиску стабилизацијских мјешавина	137
Графикон 9.24. – Упоредне гранулометријске криве за рециклирани асфалтни агрегат (RAP) различитог поријекла.....	138
Графикон 9.25. – Упоредне гранулометријске криве за природни агрегат (Granular Base) различитог поријекла.....	139
Графикон 9.26. – Гранулометријске криве за природни (Base) и рециклирани (RAP) агрегат	140
Графикон 9.27. – Потребни садржај цемента у зависности од количине RAP-а у мјешавинама	141
Графикон 9.28. – Гранулометријски састав летећег пепела из ТЕНТ-а Б.....	142
Графикон 9.29. – Чврстоће при притиску узорака мјешавина са летећим пепелом и цементом, након 28 дана њега	143
Графикон 9.30. – Одређивање кохезије и угла унутрашњег трења.....	144
Графикон 9.31.а) – Кохезија у зависности од количине додатка везива б) – Угао унутрашњег трења у зависности од количине додатка везива.....	144
Графикон 9.32. – Гранулометријски састав за различите врсте агрегата	146
Графикон 9.33. – Утицај додатка цемента на 1-дневне и 1-годишње чврстоће при притиску цементних стабилизација са шљунком.....	146
Графикон 9.34. – Утицај периода њега узорака и количине цемента на чврстоћу при притиску добро гранулисаног пијеска и шљунка.....	147
Графикон 9.35. – Утицај суве запреминске масе и додатка воде и цемента на 7-дневне чврстоће при притиску цементних стабилизација, са порфиром и шљунком	147
Графикон 9.36. – Зависност чврстоћа при притиску (f_c) и модула еластичности (E)	147
Графикон 9.37. – Зависност затезних и једноаксијалних чврстоћа при притиску од врсте материјала и количине додатка цемента	147
Графикон 9.38. – Гранулометријски састав агрегата стабилизацијских мјешавина	150
Графикон 9.39. – Резултати модификованог Proctor-ов опита за различите количине додатка везива	150
Графикон 9.40. – Утицај додатка летећег пепела различитог поријекла на вриједности чврстоћа при притиску након: а) 7 дана и б) 28 дана њега узорака.....	152
Графикон 9.41. – Гранулометријске криве стабилизацијских мјешавина.....	153
Графикон 9.42. – Зависност чврстоћа при притиску од периода њега узорака, за мјешавине са: а) рециклираним бетоном (RC) и б) дробљеним каменим агрегатом (CL).....	154
Графикон 9.43. – Зависност чврстоћа при притиску од максималних сувих запреминских маса.....	155
Графикон 9.44. – Веза модула еластичности и чврстоћа при притиску	155
Графикон 9.45. – Граничне гранулометријске криве и гранулометријске криве за летећи пепео (Fly ash) и RAP.....	156
Графикон 9.46. – Међусобна корелација између количине додатка и замјене летећег пепела у стабилизацијским мјешавинама	157
Графикон 9.47. – Вриједности чврстоћа при притиску за различита учешћа летећег пепела употребљеног као: а) замјена, или б) додаток.....	158
Графикон 9.48. – Гранулометријске криве природног (Class 6) и рециклираног (RPM) агрегата коришћених у стабилизацијама.....	160
Графикон 9.49. – Гранлометријски састав природног (Base) и рециклираног (RAP) агрегата.....	161

Графикон 9.50. – Гранулометријска крива агрегата који је коришћен за израду цементних стабилизација	163
Графикон 9.51. – Вриједности оптималних влажности (Moisture Content) и максималних сувих запреминских маса (Dry Density) за: а) 2% мас додатка цемента и б) 6% мас додатка цемента.....	163
Графикон 9.52. – Зависност 7-дневних чврстоћа при притиску од количине додатка цемента и времена мијешања компонентних материјала.....	164
Графикон 9.53. – Зависност 7-дневних чврстоћа при притиску од количине додатка цемента и температура њега узорка.....	164
Графикон 9.54. – Зависност чврстоћа при притиску од начина дозирања и количине додатка цемента у стабилизацијским мјешавинама.....	164
Графикон 9.55. – Граничне гранулометријске криве и крива агрегата коришћеног у истраживању.....	164
Графикон 9.56. – Одређивање максималних сувих запреминских маса (MDD) и оптималних влажности (ОМС), за различите количине додатка цемента.....	165
Графикон 9.57. – Гранулометријски састав агрегата природног тла (Lateritic soil) и рециклираног асфалтног коловоза (RAP-a).....	166
Графикон 9.58. – Максимална сува запреминска тежина и оптимална влажности за природно латеритно тло и рециклирани асфалт.....	167
Графикон 9.59. – Максимална сува запреминска тежина и оптимална влажности за различита учешћа агрегата у стабилизацијским мјешавинама.....	167
Графикон 9.60. – Зависност чврстоћа при притиску (q_u) од количина додатка цемента (Cement Content) и садржаја битумена (AS) у RAP-у.....	167
Графикон 9.61. – Вриједности чврстоћа при притиску у односу на састав мјешавине и периоде њега узорка.....	168
Графикон 9.62. – Вриједности чврстоћа при притиску (q_u) за различите периоде њега и саставе мјешавина (S/RAP=60/40).....	168
Графикон 9.63. – Вриједности чврстоћа при притиску (q_u) за различите периоде њега и саставе мјешавина (S/RAP=50/50).....	168
Графикон 9.64. – Граничне и гранулометријске криве компонентних материјала стабилизације.....	169
Графикон 9.65. – Утицај додатка воде и летећег пепела на вриједности запреминских маса, за СВ.....	169
Графикон 9.66. – Утицај додатка воде и летећег пепела на вриједности запреминских маса, за RAP.....	169
Графикон 9.67. – Вриједности чврстоћа при притиску у зависности од додатка летећег пепела и температуре њега узорка за: а) дробљену опеку (СВ) и б) рециклирани асфалт (RAP).....	170
Графикон 9.68. – Зависност максималне суве запреминске масе (t/m^3) од количине додатка воде (%), за различита учешћа (з) цементног везива у мјешавинама.....	171
Графикон 9.69. – Зависност угла унутрашњег трења (\varnothing) и кохезије (с) од вриједности чврстоће при притиску (UCS) и индиректне затезне чврстоће (ITS).....	172
Графикон 9.70. – Утицај количине додатка цемента на вриједности чврстоћа при притиску (UCS).....	173
Графикон 9.71. – Вриједности индиректних затезних чврстоћа (ITS) за различите количине додатка цемента и периоде њега узорка.....	173
Графикон 9.72. – Резултати стандардног Proctor-овог опита.....	173
Графикон 9.73. – Вриједности чврстоћа при притиску у зависности од садржаја воде у мјешавинама.....	174
Графикон 9.74. – Оптималне влажности у зависности од додатка цемента и састава мјешавине.....	175
Графикон 9.75. – Максималне суве запреминске масе у зависности од додатка цемента и састава мјешавине.....	175
Графикон 9.76. – Зависност чврстоће при притиску од врсте агрегата и учешћа цемента.....	175
Графикон 9.77. – Зависност чврстоће при притиску од врсте агрегата и учешћа челичних влакана.....	175
Графикон 9.78. – Вриједности савојних чврстоћа у зависности од врсте агрегата и количине додатка челичних влакана.....	175
Графикон 9.79. – Утицај периода њега и количине додатка цемента на вриједности UCS-a.....	176
Графикон 9.80. – Гранулометријски састав агрегата (MRA1 и MR2), Fuller-ова крива и граничне криве.....	178
Графикон 9.81. – Гранулометријски састав стабилизацијске мјешавине.....	179
Графикон 9.82. – Суве запреминске масе за 2% мас додатка цемента и различите влажности.....	180
Графикон 9.83. – Суве запреминске масе за 4% мас додатка цемента и различите влажности.....	180
Графикон 9.84. – Вриједности 28-дневних чврстоћа при притиску узорка у сувом стању и након дејства мраза.....	181
Графикон 9.85. – Гранулометријска крива стабилизацијске мјешавине и граничне криве дате у техничким условима TSC 06.320.....	183
Графикон 9.86. – Чврстоћа при притиску за Vezivo A, након 7 (црвена линија) и 28 (плава линија) дана.....	183
Графикон 9.87. – Индиректна затезна чврстоћа за Vezivo A, након 7 (црвена линија) и 28 (плава линија) дана.....	183
Графикон 9.88. – Чврстоћа при притиску за Vezivo B, након 7 (црвена линија) и 28 (плава линија) дана.....	184

Графикон 9.89. – Индиректна затезна чврстоћа за Vezivo B, након 7 (црвена линија) и 28 (плава линија) дана.....	184
Графикон 9.90. – Гранулометријски састави мјешавина различитих отпадних материјала и граничне криве по аустралијским стандардима.....	185
Графикон 9.91. – Вриједности максималних сувих запреминских маса у зависности од количине додатка воде и састава стабилизацијске мјешавине	185
Графикон 9.92. – Утицај водоцементног фактора (water/cement ratio), састава мјешавине и периода њега узорака на вриједности чврстоћа при притиску.....	186
Графикон 9.93. – Зависности чврстоћа при притиску и модула еластичности.....	187
Графикон 9.94. – Граничне и гранулометријске криве агрегата коришћеног за стабилизацију дионице Krapina-Maselj.....	188
Графикон 9.95. – Граничне и гранулометријске криве агрегата коришћеног за стабилизацију дионице Vrbovec-Gradec.....	188
Графикон 9.96. – Зависност 7-дневних и 28-дневних чврстоћа при притиску стабилизације изведене поступком Mix in plant, за путну дионицу Krapina-Maselj.....	189
Графикон 9.97. – Зависност 7-дневних и 28-дневних чврстоћа при притиску стабилизације изведене поступком Mix in place за путну дионицу Vrbovec-Gradec.....	189
Графикон 10.1. – Гранулометријска крива природног агрегата шљунка	197
Графикон 10.2. – Гранулометријска крива рециклираног асфалтног агрегата (RAP-a).....	199
Графикон 10.3. – Упоредни приказ гранулометријских састава двије врсте агрегата и граничне криве (за стабилизацију агрегата гранулације 0/32mm) [22]	199
Графикон 10.4. – Зависност сувих запреминских маса од количине додатка воде – Proctor-ов опит (за мјешавину M1).....	207
Графикон 10.5. – Зависност сувих запреминских маса од количине додатка воде – Proctor-ов опит (за мјешавину M2)	207
Графикон 10.6. – Зависност сувих запреминских маса од количине додатка воде – Proctor-ов опит (за мјешавину M3)	208
Графикон 10.7. – Зависност сувих запреминских маса од количине додатка воде – Proctor-ов опит (за мјешавину M4)	208
Графикон 10.8. – Зависност сувих запреминских маса од количине додатка воде – Proctor-ов опит (за мјешавину M5)	209
Графикон 10.9. – Зависност сувих запреминских маса од количине додатка воде – Proctor-ов опит (за мјешавину M6)	209
Графикон 10.10. – Зависност сувих запреминских маса од количине додатка воде – Proctor-ов опит (за мјешавину M7)	210
Графикон 10.11. – Зависност сувих запреминских маса од количине додатка воде – Proctor-ов опит (за мјешавину M8)	210
Графикон 10.12. – Зависност сувих запреминских маса од количине додатка воде – Proctor-ов опит (за мјешавину M9)	211
Графикон 10.13. – Зависност сувих запреминских маса од количине додатка воде – Proctor-ов опит (за мјешавину M10).....	211
Графикон 10.14. – Зависност сувих запреминских маса од количине додатка воде – Proctor-ов опит (за мјешавину M11)	212
Графикон 10.15. – Зависност сувих запреминских маса од количине додатка воде – Proctor-ов опит (за мјешавину M12)	212
Графикон 10.16. – Међусобна зависност чврстоћа при притиску (f_c) и индиректних затезних чврстоћа (ITS): а) након 7 дана, б) након 28 дана и в) након 90 дана њега узорака	234
Графикон 10.17. – Зависност просјечног односа чврстоћа (ITS/f_c), за различите стабилизацијске мјешавине	235
Графикон 10.18. – Зависност просјечног односа чврстоћа (ITS/f_c), за различите периоде њега узорака	236

СПИСАК ДИЈАГРАМА:

Дијаграм 3.1. – Могући сценарији потражње за угљем у периоду до 2040.године, према извору IEA из 2019.год. [16].....	38
Дијаграм 3.2. – Јавни ризик у у појединим европским земљама [18].....	42
Дијаграм 3.3. – Саобраћајни ризик у појединим европским земљама [18].....	43
Дијаграм 3.4. – Путна мрежа Србије према категоријама и врсти коловозног застора [20].....	44
Дијаграм 6.1. – Подручје варијације цементне стабилизације [7].....	54

Дијаграм 6.2. – Минимална прописана количина везива за израду стабилизација [kg/m^3] у појединим европским државама [17].....	70
Дијаграм 7.1. – Потрошња енергије [MJ/t] за различите типове реконструкције путева [27].....	78
Дијаграм 7.2. – Примјена рециклираног асфалтног агрегата у односу на природни агрегат, при справљању нових асфалтних мјешавина у Јапану [35]	92
Дијаграм 8.1. – Учешће калцијум оксида (CaO) у 110 различитих узорака летећег пепела из Сјеверне Америке [40]	102
Дијаграм 8.2. – Процентуално учешће искоришћености летећег пепела у 15 земаља ЕУ [107]	106
Дијаграм 8.3. – Однос производње и примјене летећег пепела за поједине свјетске земље (током 2010.год.) [46]	107
Дијаграм 8.4. – Производња и примјена летећег пепела у САД (1991-2019) [108].....	108
Дијаграм 8.5. – Прекорачење максималних штетних емисија за 2018.годину у термоелектранама у Србији [116]	115
Дијаграм 9.1. – Вриједности чврстоћа при притиску (β_{28}).....	123
Дијаграм 9.2. – Вриједности индиректних затезних чврстоћа (ITS_{28})	124
Дијаграм 9.3. – Чврстоће при притиску за: а) рециклирани асфалт (RPM) и б) шљунак (RSG)	133
Дијаграм 9.4. – Утицај RAP-а и количине додатка цемента на вриједности: а) UCS-а и б) ITS-а.....	139
Дијаграм 9.5. – Вриједности UCS-а у зависности од врсте агрегата и количине додатка цемента, односно летећег пепела.....	140
Дијаграм 9.6. – Зависност 7-дневних чврстоћа при притиску од врсте агрегата и количине додатка цемента	146
Дијаграм 9.7. – Компаративна анализа цијена коштања нових и реконструкције постојећих коловозних конструкција употребом различитих материјала.....	148
Дијаграм 9.8. – а) Приказ потрошне енергије и б) Емисија CO_2 у поступку израде стабилизација коловозних конструкција.....	148
Дијаграм 9.9. – Утицај додатка (замјене) летећег пепела код стабилизација RAP-а на вриједности: а) оптималне влажности и б) максималне суве запреминске тежине.....	157
Дијаграм 9.10. – Вриједности: а) чврстоће при притиску (UCS) и б) индиректне затезне чврстоће (ITS), за различите периоде њега и учешћа цемента	159
Дијаграм 9.11. – Упоредни приказ чврстоћа при притиску (UCS) на основу: а) различитих стандарда испитивања и б) различите енергије збијања	159
Дијаграм 9.12. – Вриједности ОМС-а у зависности од количине RAP-а у мјешавинама	161
Дијаграм 9.13. – Вриједности MDD-а у зависности од количине RAP-а у мјешавинама	161
Дијаграм 9.14. – Зависност суве запреминске масе (Dry Density) од количине додатка цемента и RAP-а у мјешавинама.....	162
Дијаграм 9.15. – Зависност чврстоћа при притиску од учешћа цемента и RAP-а у стабилизацијама.....	162
Дијаграм 9.16. – Просјечне вриједности чврстоћа при притиску (UCS) за различите количине додатка цемента и периоде њега узорака	165
Дијаграм 9.17. – Вриједности чврстоћа при притиску (UCS) у зависности од периода њега узорака и састава мјешавина	186
Дијаграм 9.18. – Упоредни приказ карактеристичних трошкова код традиционалних поступака реконструкције и рециклаже <i>in situ</i>	193
Дијаграм 10.1. – Утицај периода њега узорака на вриједности чврстоћа при притиску (f_c), за различите стабилизацијске мјешавине.....	222
Дијаграм 10.2. – Утицај врсте стабилизацијске мјешавине на вриједности чврстоћа при притиску (f_c), за различите периоде њега узорака.....	222
Дијаграм 10.3. – Утицај периода њега узорака на вриједности индиректних затезних чврстоћа (ITS), за различите стабилизацијске мјешавине	228
Дијаграм 10.4. – Утицај врсте стабилизацијске мјешавине на вриједности индиректних затезних чврстоћа (ITS), за различите периоде њега узорака	228
Дијаграм 10.5. – Упоредни приказ вриједности чврстоћа при притиску (f_c) и индиректних затезних чврстоћа (ITS): а) након 7 дана, б) након 28 дана, в) након 90 дана њега узорака	233
Дијаграм 10.6. – Просјечно вријеме проласка ултразвука (t) [μs] за различите стабилизацијске мјешавине и различите периоде њега узорака.....	239
Дијаграм 10.7. – Просјечна брзина проласка ултразвука (V_t) [km/s] за различите стабилизацијске мјешавине и различите периоде њега узорака	239

СПИСАК ХИСТОГРАМА:

Хистограм 10.1. – Средње вриједности запреминских маса прије испитивања чврстоћа при притиску и индиректних затезних чврстоћа за различите стабилизацијске мјешавине (M1 – M12) и периоде њега узорака (7, 28 и 90 дана)	215
Хистограм 10.2. – Средње вриједности промјене маса (разлика маса мјерених након справљања и прије испитивања) на узорцима различитих стабилизацијских мјешавина (припреманих за различита испитивања чврстоћа (f _c и ITS)) и периода њега (7, 28 и 90 дана)	216
Хистограм 10.3. – Утицај периода њега узорака (7, 28 и 90 дана) на чврстоће при притиску различитих стабилизацијских мјешавина (мјешавине M1, M2, M3)	218
Хистограм 10.4. – Утицај периода њега узорака (7, 28 и 90 дана) на чврстоће при притиску различитих стабилизацијских мјешавина (мјешавине M4, M5, M6)	219
Хистограм 10.5. – Утицај периода њега узорака (7, 28 и 90 дана) на чврстоће при притиску различитих стабилизацијских мјешавина (мјешавине M7, M8, M9)	220
Хистограм 10.6. – Утицај периода њега узорака (7, 28 и 90 дана) на чврстоће при притиску различитих стабилизацијских мјешавина (мјешавине M10, M11, M12)	226
Хистограм 10.7. – Утицај периода њега узорака (7, 28 и 90 дана) на индиректне затезне чврстоће стабилизацијских мјешавина (мјешавине M1, M2, M3)	224
Хистограм 10.8. – Утицај периода њега узорака (7, 28 и 90 дана) на индиректне затезне чврстоће стабилизацијских мјешавина (мјешавине M4, M5, M6)	225
Хистограм 10.9. – Утицај периода њега узорака (7, 28 и 90 дана) на индиректне затезне чврстоће стабилизацијских мјешавина (мјешавине M7, M8, M9)	226
Хистограм 10.10. – Утицај периода њега узорака (7, 28 и 90 дана) на индиректне затезне чврстоће стабилизацијских мјешавина (мјешавине M10, M11, M12)	227
Хистограм 10.11. – Промјена вриједности чврстоћа при притиску (f _c) у зависности од укупне количине везива и периода њега узорака, за стабилизацијске мјешавине од чисто природног агрегата шљунка (100%G)	229
Хистограм 10.12. – Промјена вриједности чврстоћа при притиску (f _c) у зависности од укупне количине везива и периода њега узорака, за стабилизацијске мјешавине од природног агрегата шљунка (70%G) и рециклираног асфалтног застора (30%RAP)	230
Хистограм 10.13. – Промјена вриједности индиректних затезних чврстоћа (ITS) у зависности од укупне количине везива и периода њега узорака, за стабилизацијске мјешавине од чисто природног агрегата шљунка (100%G)	231
Хистограм 10.14. – Промјена вриједности индиректних затезних чврстоћа (ITS) у зависности од укупне количине везива и периода њега узорака, за стабилизацијске мјешавине од природног агрегата шљунка (70%G) и рециклираног асфалтног застора (30%RAP)	232
Хистограм 10.15. – Вријеме проласка ултразвука (t) [μs] за различите стабилизацијске мјешавине и различите периоде њега узорака (7, 28 и 90 дана), справљених за испитивање чврстоћа при притиску (f _c) и индиректних затезних чврстоћа (ITS)	237
Хистограм 10.16. – Брзина проласка ултразвука (V _i) [km/s] за различите стабилизацијске мјешавине и различите периоде њега узорака (7, 28 и 90 дана), справљених за испитивање чврстоћа при притиску (f _c) и индиректних затезних чврстоћа (ITS)	238

СПИСАК АЛГОРИТАМА:

Алгоритам 7.1. – Могућности рециклаже постојећег асфалтног застора и поновне употребе струганог асфалта [19]	77
Алгоритам 7.2. – Рехабилитација коловозне конструкције примјеном поступка хладне рециклаже асфалта [22]	82

СПИСАК ШЕМА:

Шема 6.1. – Носећи слојеви коловозних конструкција са аспекта компонентних материјала	51
Шема 6.2. – Стабилизација цементом	53
Шема 6.3. – Детаљи развоја пукотина у коловозној конструкцији иницирани од саобраћајног оптерећења и од термичких напрезања [7]	69
Шема 7.1. – Типови рециклаже асфалтних слојева у зависности од температуре на којој настаје нова мјешавина и мјеста гдје се она справља	74
Шема 8.1. – Приказ настанка летећег пепела [39]	98
Шема 9.1. – Хронолошки развој примјене цементних стабилизација у Западној Аустралији	170

(Western Australia) у периоду од 1970. до 2010. године [81]	170
Шема 10.1. – Програм експерименталног лабораторијског истраживања.....	203

СПИСАК ПРИЛОГА:

Прилог 1. – Комплетни резултати испитивања стабилизацијских мјешавина	269
Прилог 2. – Фотографије направљене током лабораторијских испитивања стабилизацијских мјешавина	284

СТРУКТУРА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Докторска дисертација је структурирана кроз сљедећа поглавља:

На самом почетку докторске дисертације, у уводном (првом) поглављу, дати су историјски параметри везани за градњу путева и почетке примјене цементних стабилизација код коловозних конструкција. Указано је на развој идеје поновне употребе старог (рециклираног) асфалтног агрегата у поступку реконструкције путева, као и на прве примјене електрофилтерског летећег пепела из термоелектрана у градњи путева;

У наредна 4 поглавља (од 2.-ог до 5.-ог поглавља) дефинисани су: предмет, потребе, оправданост и циљ истраживања, као и научне методе које су коришћене током истраживања;

Поглавље 6. обухватило је анализу коловозних конструкција, са акцентом на цементом стабилизоване слојеве;

Могућности реконструкције коловозних конструкција поступком хладне рециклаже асфалта *in situ* и општи постулати тог поступка дефинисани су у поглављу 7. У овом поглављу детаљно су дефинисане предности и недостаци датог поступка;

Карактеристике, доступност и могућности примјене електрофилтерског летећег пепела у изради стабилованих носећих слојева коловозних конструкција дати су у поглављу 8. Акцент је стављен на могућности примјене електрофилтерског летећег пепела у Републици Србији, с обзиром да се он сматра за највећи индустријски отпадни материјал;

У поглављу 9. приказан је свеобухватан преглед досадашњих истраживања у овој научној области;

Поглавље 10. обухватило је експериментално испитивање цементних стабилизација са рециклираним материјалима. На почетку су дефинисане карактеристике свих компонентних материјала и састава мјешавина које су се користиле у експерименту. Затим су дефинисани план и програм реализације експерименталног испитивања, а затим и интерпретација самог лабораторијског експерименталног испитивања физичко-механичких карактеристика стабилизације, на претходно припремљеним стабилизацијским узорцима. Посљедњи дио овог поглавља везан је за анализу и интерпретацију добијених резултата испитивања.

У поглављима 11. и 12. ове докторске дисертације дефинисани су редом збирни закључци истраживања, као и научни допринос заједно са могућим правцима даљих истраживања у овој области.

У 13.-ом поглављу дати су прикази литературе и стандарда који су се користили током истраживања. На крају докторске дисертације приказани су табеларно сви појединачни резултати експерименталног истраживања и фото документација.

ХИПОТЕЗЕ ИСТРАЖИВАЊА

Теоретским и експерименталним истраживањем, које је спроведено у овој докторској дисертацији провјериће се сљедеће хипотезе:

- 1) Примјена рециклираног асфалтног агрегата (као материјала замјене за природни агрегат шљунак) и индустријског нуспроизвода - електрофилтерског летећег пепела (као материјала замјене за дио цементног везива), у слоју цементне стабилизације, има оправданост приликом реконструкције постојећих и изградње нових коловозних конструкција;
- 2) Стабилизацијом рециклираног асфалтног агрегата цементом и електрофилтерским летећим пепелом добиће се задовољавајуће физичке и механичке карактеристике цементних стабилизација (у поређењу са стабилизацијом природног агрегата шљунка наведеним материјалима), при чему ће се укупни трошкови градње смањити;
- 3) Стабилизације са цементом и електрофилтерским летећим пепелом (у укупном учешћу везива од 20 и 40% m_{as}^3) имају каснији развој чврстоћа и исте или боље физичко-механичке карактеристике од чисто цементних стабилизација;
- 4) Лака доступност и велика могућност примјене отпадних материјала, као што су стари асфалтни застор и електрофилтерски летећи пепео, у Србији и
- 5) Повећаном примјеном датих отпадних материјала промовише се одржива градња и заштита животне средине.

³ % m_{as} – процентуално учешће у односу на масу агрегата

1. УВОД

Путеви престављају једне од главних инфраструктурних објеката сваке друштвене заједнице. Често се каже да су путеви жила куцавица и огледало друштва. Главни економски, привредни и друштвени циљ изградње путева је да олакшају кретање људи и робе, а исправна путна политика је изузетно важна за економски и социјални напредак сваке државе.

Широм свијета се сваке године велике количине материјала, првенствено асфалта, агрегата и бетона, употребе за градњу путева. Асфалт је компонентни материјал који се највише производи у путној инфраструктури [1]. У Европи се сваке године произведе око 400 милиона тона асфалта, док око 5,2 милиона километара путева има асфалтни застор. Путевима са асфалтним зазором обухватају више од 90% укупне европске путне мреже. Око 66.700km путева у Европи је класификовано као аутопутеви. У 2012. години у Европи је било око 4.700 асфалтних база. Више од 10.000 европских фирми се бави производњом или уградњом асфалта и оне запошљавају више од 180.000 радника [97]. Свјетска путна мрежа има укупну дужину од око 16,3 милиона километара [2]. На основу наведених података може се закључити да је у свијету најгушћа европска путна мрежа и она заузима око 30% од укупне дужине свјетских путева. Напомене ради, површина Европе, у којој живи око 11% свјетског становништва, заузима тек око 7% свјетског копна [98]. Битан је и податак да је асфалт материјал чија је рециклажа веома заступљена широм свијета, а у неким европским земљама чак и до 90% старог асфалта користи у производњи нових асфалтних и бетонских мјешавина.

За пројектовање, изградњу и одржавање путне инфраструктуре неопходна су значајна финансијска средства. Тако нпр. Европска унија годишње улаже 4,5 милијарде евра на развој и одржавање путне мреже [2]. Овај податак је посебно важан за развој и конкурентност економија малих земаља, међу којима је и Србија.

1.1. Историјат

1.1.1. Почети градње путева

Иако се не може тачно утврдити вријеме када је почела смишљена градња путева и ко су били први пројектанти и градитељи, на основу археолошких налазишта процјењује се да је се то десило прије око 5.000 година. Први путеви су изграђени вјероватно преко животињских стаза. Тежило се томе да буду издигнути изнад земље, да би били боље уочљиви. На почетку су се за градњу путева користили само невезани материјали. Путевима из древних цивилизација се још могу наћи у многим државама, широм свијета. Први запис о изградњи коловозне конструкције потиче из старог Египта, гдје је, према Херодоту, за потребе изградње Кеопсове пирамиде (око 3.000 година п.н.е.) изграђен коловоз од камених плоча великих димензија, ради лакшег превлачења камених блокова, који су имали масу и до 80t. Поред египатских и вавилонских, међу најстарије путеве у свијету се убрајају: персијски, индијски, кинески, путеви Старе Грчке и Рима. Неки од тих путева се могу наћи и сада на просторима широм Србије, као и цијелог Балкана. Напредак у технологијама пројектовања и извођења путева био је константан кроз вријеме. Најранији путеви у урбаним мјестима, са лоше носивим тлом, били су углавном

поплочани камењем или циглама, из разлога побољшања услова одвијања саобраћаја. Прва поплочавања су почела у земљама Блиског Истока. За тај простор се везује и прва употреба везивних материјала у градњи путева. Примјер томе је краљевски пут изграђен у Персији (521–485 п.н.е.) [3].

Битуменске мјешавине које се данас користе у путарству еволуирале су од сувих камених мјешавина, које су развила два проналазача, *Thomas Telford* и *John McAdam*, крајем XVIII-ог и почетком XIX-ог вијека. По инжењеру *McAdam*-у (1756–1836) добро позната врста неасфалтираних путева добила је назив *макадам*, које се и до данас задржао у употреби. Прво су камене мјешавине прскане катраном, који је везивао агрегат и чинио горњи слој пута непропусним. Макадамски путеви прекривени катраном нису дуго могли да задовоље предвиђене захтјеве, па се јавила потреба за повећањем квалитета и услова одвијања саобраћаја на њима. Појава моторних возила посебно је показала слабост тог изума. Убрзо након уградње на путевима су се јављале пукотине и такве коловозне конструкције су губиле своју функцију. Веће брзине су условиле повећање захтјева за квалитетом коловозне конструкције. Тражио се материјал који је могао да ријеша појаве пукотина и смањи трајне деформације које су се јављале усљед дејства саобраћајног оптерећења и спољних утицаја.

1.1.2. Историјат примјене асфалта и почечи његовог рециклирања

Историјат употребе асфалта, као грађевинског материјала, се не може тачно утврдити, али се зна да се он у почетку користио као непропусни материјал у бродоградњи. Његова употреба у путоградњи је новијег датума. Проналазак тзв. *асфалтног језера*, крајем XVI-ог вијека на Тринидаду, сматра се за почетак настанка ере битуменских везива [3]. Наиме, то је, касније се испоставило, било једно од ријетких природних резерви материјала данас познатијег као битумен, који се користи као основно везивно средство у производњи асфалта. Производња битумена данас је сведена углавном на производњу прерадом нафте, при чему се битумен добија као крајњи нафтни дестилат. Проналазак битумена је још више популаризовао употребу моторних возила, као начина превоза, а заступљеност друмског саобраћаја од тада до данас константно расте. Временом су се градили нови путеви, а стари су имали потребу да се обнављају, па се још у том раном периоду градње путева може тражити идеју о потреби за рециклирањем и поновној употреби постојећих материјала из коловозних конструкција. Градња путеве је од настанка до данас пролазила кроз различите фазе. Први писани траг о настанку асфалтног коловоза приказује да је он први пут употријебљен у Паризу 1854.године и био је направљен са везивом од природног битумена. Потом је тај материјал увезен у Велику Британију и тамо се користио од 1870.године до око 1930.године. Мана му је била што је био веома скуп материјал и користио се само на престижним локацијама. Занимљиво је било да је у том периоду катран коришћен за санације пукотина на коловозу. Током времена у потпуности је дошло до замјене катрана битуменом, који је имао мању температурну осјетљивост и већу отпорност на оксидацију.

До 1920.године путеви су углавном грађени на основу искуствених података. Увођење стандарда за коловозне конструкције, уз побољшање техника и материјала за израду, помогло је модернизацији путне мреже. Повећањем саобраћаја расли су и

трошкови изградње и одржавања путева, као и штетан утицај на животну средину. Први национални стандард за асфалт у Великој Британији издат је 1940.године, а његова примјена је била посебно значајна послје II свјетског рата. Тада је изградња путева пролазила кроз важан период, јер су се државе обнављале послје рата, а нових материјала углавном није било у довољним количинама. Реконструкција се обављала тако што се загријавао постојећи, оштећени коловоз и уз додатке одређених материјала опет стављао у функцију [3]. Иако су се потребе за реконструкцијом путева, уз употребу већ постојећих материјала, посебно јављале у том периоду, постоје аутори који спекулишу да је рециклажа стара колико и изградња путева [3]. Материјал са коловоза, који више није био у функцији, коришћен је и у другим областима грађевинарства. У сваком случају, концепт рециклаже није нов концепт. Хладна рециклажа асфалта са додатком везива датира још прије 1900.године [4]. Прва забиљежена мјешавина са рециклираним грађевинским материјалом, као агрегатом за нови бетон, забиљежена је у Њемачкој 1860.године.

Мање је познато да је асфалт данас један од основних рециклажних материјала, у неколико земаља свијета. Од 70-их година прошлог вијека рециклажа се са много успјеха примјењује у многим земљама Европе и свијета. Тако нпр. у Холандији се данас више од 50% старог асфалта користи у новим асфалтним мјешавинама. Један од разлога за повећану рециклажу асфалта у Холандији је недостатак ресурса природних агрегата. Други разлог је недостатак простора за складиштење оптадног материјала, усљед велике густине насељености [5]. Употреба рециклираног агрегата који се користи у новим коловозним конструкцијама је у порасту, у цијелом свијету.

На простору Балкана прича о рециклажи асфалтних коловоза је била посебно актуелна 70-их и 80-их година прошлог вијека. Потреба за рециклажом баш у тим годинама није случајна. Наиме, 1973.године је била прва нафтна криза, а производња асфалта је директно везана за производњу нафте, па се у том податку може тражити оправданост повећања потреба за рециклажом постојећих коловоза [6]. Међутим, од тада у Србији се није пуно напредовало на том пољу, док је у земљама Европске уније стање доста другачије. Тек је последњих година у Србији примјетна нешто већа присутност рециклирања старих асфалтних коловоза.

1.1.3. Цементне стабилизације коловозних конструкција кроз вријеме

Портланд цемент, као универзално хидраулично везиво, у грађевинарству је нашао своју широку примјену и у стабилизацијама материјала за израду носећих слојева коловозних конструкција, гдје има улогу стабилизатора [7]. Примјена цемента, као везива, у цементним стабилизацијама започела је почетком прошлог вијека у САД, а односила се на стабилизацију слабоносивог локалног материјала [7]. Резултати испитивања првих стабилизираних материјала били су доста непоуздани и различити. У САД је 1915.године изведено више од 160.000 kt подлога и носивих слојева за путеве, просјечне ширине 7,5 m [8]. Током 20-их година прошлог вијека предузећа за путеве у америчким савезним државама Охајо, Јужна Дакота, Калифорнија и Ајова започеле су израду и праћење пробних дионица путева са цементним стабилизацијама локалног материјала, коришћеног за подлоге и

постељице коловозних конструкција. У том, историјски почетном периоду примјене стабилизација на путевима, наука о тлу је била на почетку, јер је тек тада почињала добијати своје мјесто у грађењу путева, па су резултати ових покушаја били доста непоуздани и различити. Већ 1933. и 1934.године дирекција за путеве Јужне Каролине реализовала је истраживачки пројекат израде и праћења 5 кратких путних дионица, од цементом стабилизованог материјала. Ово истраживање покренуло је иницијативе за израду и већу примјену цементних стабилизација широм САД. *Protland Cement Association (PCA)* је у сарадњи са дирекцијом за путеве Јужне Каролине и управом за путеве (САД) реализовала експериментални пројекат пута дужине 2,4km са слојем цементне стабилизације [9]. Овај експеримент поркренуо је иницијативу за грађење цементних стабилизација широм САД. Пројекти стабилизација су након тога извођени у америчким државама Мичиген, Илионоис, Висконсин, Мисури.

У Европи је примјена цементних стабилизација почела 1937.године и то у Холандији, док је права експанзија изградње коловозних конструкција са цементним стабилизацијама почела 1956.године, у организацији холандског друштва *Deutch Healt Co* [9]. У Великој Британији системски рад на примјени цементних стабилизација датира од 1939.године, када је *Road and Research Laboratory (RRL)*, слиједећи америчка искуства, сачинила програм малих пробних дионица са цементном стабилизацијом. Већа примјена стабилизација са цементом на путевима почела је већ 1945.године на пројектима путева и улица у стамбеним насељима, као и на јавним путевима за лаки саобраћај. Занимљиво је да је у току II свјетског рата стабилизација цементом била веома популарна технологија брзог грађења привремених аеродромских писти у Африци и Азији, што је резултовало обогаћивању постојећег искуства у овој области. Шира примјена цементних стабилизација у остатку свијета, првенствено на градским улицама и путевима са лаким оптерећењем, имала је везе и са завршетком II свјетског рата. Слој са цементном стабилизацијом уграђен је у енглески аеродром *Hethrow* 1945.године, што се сматрало најзначајнијом примјеном цементних стабилизација до тада [10]. Од почетка 60-их година прошлог вијека, како у земљама западне Европе (Француска, Италија, Шпанија, Швајцарска и Њемачка) тако и у земљама истока (Пољска, Мађарска, земље бившег СССР), цементне стабилизације су се, пруградњи путева, све чешће налазиле у примјени и постале су конкуретан високовриједан материјал за градњу носећих слојева свих категорија путева [10].

У Србији, прва примјена стабилизације са цементом је изведена 1950.године, при градњи једног војног аеродрома [9]. Први систематски програм изградње коловозних конструкција од цементом стабилованих материјала, био је у сјеверној српској покрајини - Војводини, која је карактеристична по дефициту дробљеног каменог агрегата. Прва пробна дионица са цементном стабилизацијом урађена је у Футогу, код Новог Сада, 1957.године, на дужини од 256m. На поменутој саобраћајници рађена је стабилизација шљунка *Моравца* (са учешћем 65%) и локалног леса (35%), са додатком 10% портланд цемента (*PC-25*). Након ове експерименталне дионице стабилизација цементом постаје право „техно-економско” одређење друштвених и стручних институција у Војводини, а касније и у остатку државе. Тренд примјене цементних стабилизација је у Војводини показао значајан раст посебно у првих 5 година примјене ове технологије грађења (табела 1.1.) [7].

Табела 1.1. – Примјена цементних стабилизација у Војводини [7]

Година градње пута	1957.	1958.	1959.	1960.	1961.
Дужина путног правца [m']	546	2.250	7.032	19.538	44.240
Површина стабилизације [m ²]	38.222	11.250	40.412	62.124	189.050

Током 60-их година прошлог вијека примјена цементних стабилизација се проширила и на остале дијелове Србије и Балкана. Након тога, 1970.године усвајају се технички услови за израде цементних стабилизација – *JUS U.Eg.024:1970* [C1]. Наведени стандард је био основа за српски стандард – *SRPS U.Eg.024:1980* [C2], који се и данас примјењује у Србији и у ком су прописане неке од основних карактеристика компонентних материјала стабилизацијских мјешавина, као што су: квалитет цемента, квалитет зрнастог материјала, гранулометријски састав и граничне криве, подручје кретања механичких карактеристика (чврстоћа при притиску), минималан степен збијености, квалитет воде и друго. Неки од примјера путева (са слојем цементне стабилизације), који су грађени у другој половини XX-ог вијека, а који су и данас у функцији, су поједине дионице ауто-пута *E-75* (тј. пут *A1 – IA* реда), на дијелу од Београда до Новог Сада и пут бр.12 – *IB* реда (дионица од Новог Сада до Зрењанина).

1.1.4. Стабилизације са електрофилтерским летећим пепелом

За разлику од примјене стабилизација коловозних конструкција, гдје је као везиво коришћен цемент, стабилизације са електрофилтерским летећим пепелом су новијег датума. Овакве стабилизације се сматрају једним од првих случајева примјене отпадних материјала у носећим слојевима коловозних конструкција. Стабилизације са цементом или кречом у комбинацији са неким отпадним материјалима, као што су нпр. електрофилтерски летећи пепео или згура из високих пећи неки аутори називају комплексно стабилизоване мјешавине (*KCM*) [7]. Испитивања могућности примјене електрофилтерског летећег пепела (као отпадног материјала) у различитим слојевима коловозних конструкција, у свијету је посљедњих година доста заступљено. Све то је у циљу поновне употребе овог отпадног материјалу, који се у великим количинама налази на депонијама широм свијета, при чему ствара све више проблема.

Термин *електрофилтерски летећи пепео* (енг. *FA-fly ash*)⁴ први пут се службено помиње у литератури 1937.године у САД, када су објављени резултати његовог научног истраживања у публикацији америчког института за бетон – *ACI (American Concrete Institute)*. Подаци америчког института за бетон кажу да је летећи пепео први пут употријебљен још 1929.године у САД, гдје се приликом изградње бране *Hooverove* користио бетон који је уз цемент имао и додатак летећег пепела. Његова значајнија примјена, као додатка бетону, први пут је забиљежена код изградње бране *Hungry Horse Dam* (у америчкој држави Монтана) 1949.године, када је у брану уграђено 120.000т летећег пепела [8]. Као што је већ наведено, почетак примјене стабилизација са летећим пепелом везује се за САД, гдје је почела и да се примјењује мјешавина за израду носећих слојева коловозних конструкција под називом *Poz-o-Pac*. Овај производ садржао је мјешавину креча, летећег пепела и

⁴ У даљем тексту ће се користити термин *летећи пепео*.

агрегата, а био је у употреби до 70-их година прошлог вијека. Као агрегат у мјешавинама се користио дробљени камени агрегат или природни агрегат шљунак, локалног карактера. Повећана примјена летећег пепела је забиљежена 70-их година прошлог вијека, а имала је везе са повећањем цијене цемента. Тада се летећи пепео почео више користити као замјена за цемент и у стабилизацијским мјешавинама. Много фактора је утицало на то да се летећи пепео почне користити као замјена за цемент, а међу основним је економски фактор. Наиме, цијена цемента је била доста велика у односу на цијену летећег пепела, који је био скоро бесплатан, с обзиром да је отпадни материјал. Други важан разлог примјене је чињеница да летећи пепео има пуцоланска својства и могућност повећања чврстоћа кроз вријеме, некада и до пар година након његове уградње. Након одређеног периода њега мјешавине са летећим пепелом могу да достигну чврстоће које су карактеристичне за чисто цементне мјешавине. Ране чврстоће мјешавина на додатком летећег пепела су углавном ниске, а њихов прираст је спорији од мјешавина са додатком само цемента везива [8].

На самом почетку примјена летећег пепела у цементним стабилизацијама се односила само за локалне саобраћајнице нижег ранга и са лаким саобраћајним оптерећењем. Након тога летећи пепео се почео користити и за стабилизације са већим саобраћајним оптерећењем, па и на ауто-путевима. Примјена летећег пепела се односила, како на израду нових саобраћајница, тако и на реконструкцију постојећих коловозних конструкција. Од почетка примјене, па до данашњих дана спроведена су бројна лабораторијска и теренска истраживања, а стабилизације са додатком летећег пепела показале су добра својства и оправдале очекивања његове примјене. У многим свјетским земљама коришћење летећег пепела у путоградњи је уобичајна пракса. Земље које данас највише користе летећи пепео у изградњи саобраћајница су: САД, Аустралија, Индија и Кина, а од европских земаља ту су: Велика Британија, Мађарска, Француска, Холандија, Пољска, Чешка и друге [11]. Посљедњих година се биљежи константан раст примјене летећег пепела у свијету. Употреба летећег пепела је у зависности од његових ресурса, односно количине и квалитета угља који се користи за производњу електричне енергије у термоелектранама.

Примјена летећег пепела у грађевинској индустрији се развијала и усљед проблема са његовим депоновањем. У Кини су прва истраживања летећег пепела, као грађевинског материјала, почела 1950.године. Данас су цементаре, фабрике грађевинских материјала и фирме за извођење путева највећи потрошачи летећег пепела у Кини. Донедавно се летећи пепео користио у малим количинама у већини свјетских земаља. Примјера ради, 1978.године Индија је користила само 1% од укупне количине летећег пепела, а 1990.године потрошња је износила чак 30 милиона тона. Поред економских и еколошких предности коришћењем летећег пепела за справљање бетона временом је побољшана његова обрадивост, постигнуто је смањење развоја топлоте хидратације и пропусности, а бетон је постао отпорнији на дјеловање алаклија и сулфата. Удио летећег пепела, као додатка бетону, данас је у САД у укупној продукцији од око 20%.

У Европи је испитивање могућности коришћења летећег пепела из термоелектрана у грађевинарству почело након Другог свјетског рата. Разлог за то је сличан као и за почетак све веће примјене рециклираног асфалта – европске земље су имале потребу да се обнављају послје рата, а резерве материјала су биле углавном мале. Међу првим земљама које су се бавиле већим истраживањем и

примјеном летећег пепела била је Велика Британија. Летећи пепео је у већем обиму примјењен код изградње брана у Шкотској (*Lednock, Clathworthy, Lubreoch*). Код изградње наведених брана летећи пепео се користио као додаток бетону. Коришћењем летећег пепела уштедило се око 3.000t портланд цемента. Ускоро, након почетка примјене летећег пепела као додатка бетону, пепео је почео да се користи и за грађење насипа путева. Коришћење летећег пепела у ову сврху је први пут забиљежено 1952.године, у Великој Британији. Око 50% годишње производње летећег пепела у Великој Британији данас налази своју примјену у привреди. Примјена летећег пепела у градњи путева у САД је почела касније него у Европи. Тек током 70-их годинама XX-ог вијека је у неким државама САД-а почела примјена летећег пепела при градњи и реконструкцији насипа. И у другим земљама се летећи пепео углавном користио као додаток цементу или као материјал за грађење конструкција и насипа путева [11].

Посљедних деценија једна од битнијих примјена летећег пепела у грађевинарству је код механичких стабилизација слабоносивог тла. При стабилизацији тла летећи пепео се најчешће користи у комбинацији са кречом или цементом. У таквим видовима стабилизација тла установљено је да се носивост тла, као и отпорности тла на дејство мраза и промјену агрегатног стања значајно повећавају (спорије квашење и сушење тла). У Кини (која је највећи свјетски произвођач летећег пепела и држава са највећом количином емитавања CO₂) је још у периоду од 1983. до 1997.године забиљежена значајна примјена (више од 97 милиона тона) летећег пепела при градњи путева (табела 1.2.)[12].

Табела 1.2. – Бенефити примјене летећег пепела при градњи путева крајем XX вијека у Кини [12]

Период	Примјена	Утрошак пепела ($\times 10^6$)	Дужина (km)	Уштеде земљишта (ha)	Еколошки и економски бенефити
(1989-1997)	Насипи за аутопутеве	25,05	499,1	1314,6	Инвестиционе уштеде од 3,94 милијарде RMB (јуана)
(1983-1997)	Насипи за путеве нижег ранга	36,65	6500	15600	Инвестиционе уштеде ТЕ од 1,61 милијарде RMB
(1983-1997)	Плануми путева	36,65	11000	1600	Мања емисија CO ₂ за 25.000t
(1994-1997)	Бетонски коловози	0,19	460	626,6	Утрошак нуспроизвода у ТЕ (летећег пепела) 13,6 $\times 10^6$ t

Табела 1.2. показује да примјена летећег пепела у изградњи путева има прије свега економске и еколошке предности. У Кини је, у наведеном периоду, уз примјену летећег пепела изграђено укупно 18.459km путева и аутопутева, при чему је на нивоу државе остварена уштеда од око 480 милиона долара, док су термоелектране оствариле уштеде око 196 милиона долара [12].

С обзиром на вишегодишња позитивна искуства примјене летећег пепела у грађевинарству, као и тенденције ка очувању и заштити човјекове околине и све присутнију бригу о поновној употреби отпадних материјала, може се очекивати да се наредних година и у Србији повећа примјена овог материјала, који због своје велике заступљености на депонијама ствара све веће проблеме.

2. ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА

Коловозна конструкција, током свог вијека трајања, пролази кроз разна оштећења, при чему су најчешћа, најизраженија и најочљивија површинска оштећења. Међу њима се издвајају различите врсте пукотина, а најчешће су то: подужне (слика 2.1.), мрежасте (слика 2.2.), попречне, рефлектоване, блоковске (слика 2.3.), пукотине на спојницама и друге.



Слика 2.1. – Подужне пукотине



Слика 2.2. – Мрежасте пукотине



Слика 2.3. – Блоковске пукотине



Слика 2.4. – Ударне рупе

Након што се на коловозном застору појави пукотина, вода улази у асфалтне и носеће слојеве. Тиме почиње штетно дејство воде у коловозној конструкцији, које се манифестује на различите начине, а као крајњи резултат је смањење чврстоће коловозне конструкције, која условљава смањену носивост, а она даље погоршање услова и квалитета вожње. Продор воде условљава и повећање брзине оштећења и разарање структуре коловозне конструкције под понављаним саобраћајним оптерећењем (слике 2.1.–2.4.). При оваквим околностима, услед дејства саобраћајног оптерећења на коловозну конструкцију, ситне фракције материјала из доњих слојева постају покретљиве и избацује се кроз пукотине на површину и та појава је позната као тзв. „пумпање”. Ускоро, иза тога слиједи стварање ударних рупа (слика 2.4.) и убрзано пропадање коловоза. У зимским условима вожње (када су температуре мржњења) слободна вода у коловозу се шири при преласку у лед, па тако повећава притисак и разара коловозну конструкцију. Пукотине узроковане понављаним циклусима смрзавања и одмрзавања, најгори су сценарио за коловозну конструкцију и додатно доприносе бржем пропадању пута [13]. Тако оштећењу коловозну конструкцију, да би се функционално вратила у почетно стање и намјену, неопходно је реконструисати. Један од начина реконструкције коловозне конструкције је анализиран и у овом истраживању, а то је реконструкција поступком хладне рециклаже постојећег коловоза на лицу места (поступак *in situ*) и њен приказ је дат на сликама 2.5. и 2.6..



Слика 2.5. – Асфалтни застор са мрежастим пукотинама прије и након проласка рециклера [14]



Слика 2.6. – Стругање и рециклажа постојећег асфалтног застора уз додаток цемента [13]

Поред наведеног постоји много других поступака и типова реконструкције оштећеног коловоза, а некада је тешко одредити која опција је најбоља [4]. При одабиру типа реконструкције битно је детаљно анализирати оштећења и то усагласити са путном политиком. Типови реконструкције су везани за реконструкцију коловозног застора и/или реконструкцију комплетне коловозне конструкције. Током експлоатационог периода асфалтни застор је подложен и хабању, али то углавном не утиче на смањење квалитета материјала који се рециклирају.

У овом истраживању анализирани су утицаји додатка цемента и летећег пепела агрегату од природног материјала (шљунка) и рециклираног асфалтног коловоза, при изради стабилизација носећих слојева, у поступку реконструкције коловозних конструкција. Претходно наведеним поступком коловозна конструкција, поред асфалтних везаних слојева, добија још један везани слој. Приказ компонентних материјала који су се користили у експерименталном истраживању дат је на сликама 2.7. – 2.10.



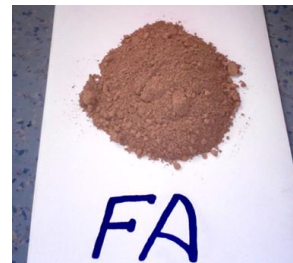
Слика 2.7. – Природни агрегат шљунка (G – Gravel), фракције 8/16, 4/8, 0/4mm



Слика 2.8. – Рециклирани асфалт (RAP – Recycled Asphalt Pavement), гранулација 0/16mm



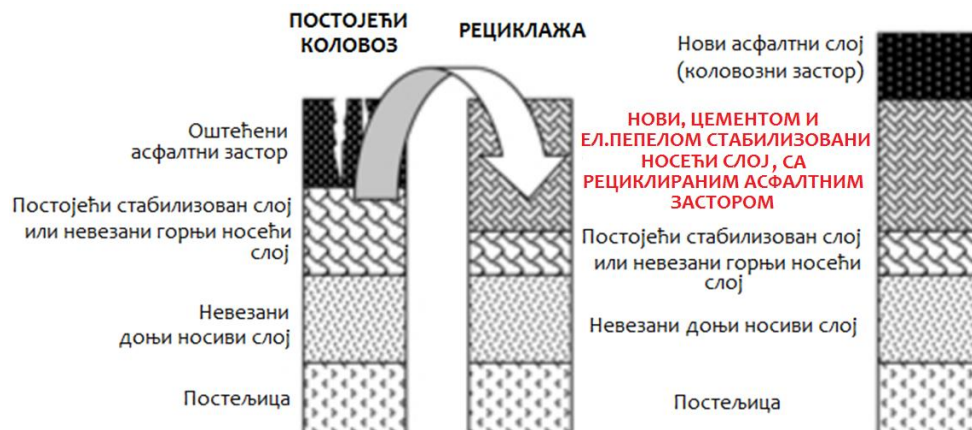
Слика 2.9. – Цемент (C)



Слика 2.10. – Летећи пепео (FA – Fly Ash)

Стабилизацијске мјешавине се справљају примјеном наведених материјала уз додаток воде. Уколико се стабилизација обавља поступком хладне рециклаже *in situ* (слика 2.5. и 2.6.) агрегат се користи из постојеће коловозне конструкције која се рециклира. Постојећа коловозна конструкција из флексибилне прелази у полукруту,

при чему стабилизација постаје подлога за нове асфалтне слојеве, чиме се повећава и носивост комплетне коловозне конструкције (слика 2.11.).



Слика 2.11. – Поступак стабилизације оштећеног асфалтног коловоза, примјеном хладне рециклаже асфалта уз додатак цемента и летећег пепела [13]

Стандардно везиво које се користи код стабилизација коловозних конструкција је цемент. Посебна пажња у овом истраживању се посветила могућностима примјене индустријског отпадног материјала – летећег пепела, као материјала који је коришћен као замјена учешћу дијела цемента, а самим тим и материјала који смањује његову укупну примјену у стабилизацијама. Као што је раније наглашено, искоришћеност летећег пепела у Србији, у односу на његове доступне количине на депонијама, је веома ниска. Његовом већом примјеном у градњи коловозних конструкција остварили би се бројни позитивни ефекти и резултати, првенствено са економског и еколошког аспеката.

Поред претходно наведеног поступка хладне рециклаже за израду носећих слојева постојећих коловозних конструкција, истраживање које је спроведено у овој докторској дисертацији може се у потпуности успјешно примијенити и код изградње нових саобраћајница, тј. стабилованих носећих слојева, при чему се рециклирани асфалтни материјал (RAP), за разлику од поступка реконструкције, допрема на градилиште са депонија (као и природни материјали). Приликом израде наведених стабилизација и справљања стабилизацијских мешавина, без обзира на састав истих, важе стандардни принципи који су између осталог описани у стандардима (20) са почетном ознаком SRPS EN 13286 (Невезане и хидрауличним везивом везане мешавине), као и у стандарду SRPS U.Е9.024:1980 [С2].

3. ПОТРЕБЕ И ОПРАВДАНОСТ ИСТРАЖИВАЊА

3.1. Примјена старих и отпадних материјала

Сваке године у свијету се употребе велике количине природног каменог агрегата, како за градњу објеката високоградње и хидроградње, тако и за градњу путева и других објеката нискоградње. Из тог произилази да своје мјесто и примјену у грађевинарству могу да пронађу и неки отпадни и рециклирани материјали. Узимајући у обзир да су путеви линијски објекти, чија дужина се обично мјери километрима, може се закључити да је примјена агрегата у путоградњи једна од највећих у грађевинарству. У исто вријеме, постојећи асфалтни застор се током времена оштећује и пропада и као такав постаје нефункционалан за нормално одвијање саобраћаја. То условљава потребу за реконструкцијом или рехабилитацијом путних дионица. Често пута се асфалтни застор у лошем стању руши и одлаже на депоније (углавном неконтролисано), чиме се његов животни вијек завршава. У Србији не постоје подаци који указују на количине старог асфалтног коловоза који се налази на депонијама, али оне свакако нису занемарљиве. Рециклирањем старог асфалта и његовом поновном употребом (у различитим слојевима коловозне конструкције) депоније истог би се значајно смањиле, а самим тим би се остварили и бројни други бенефити.

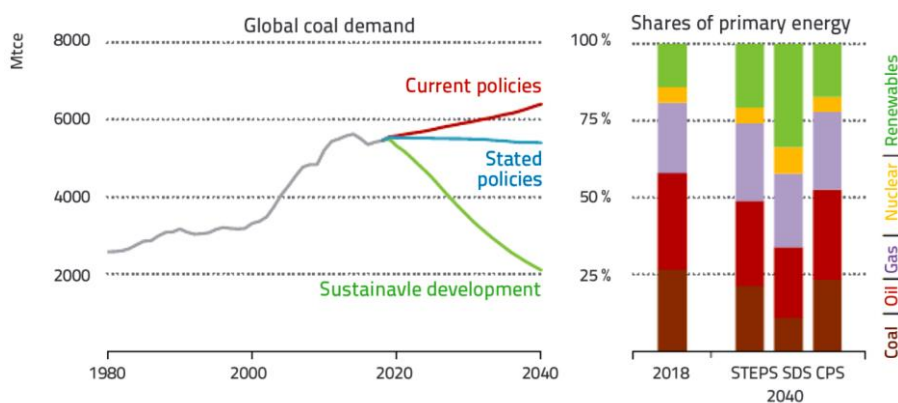
У погледу примјене отпадних материјала у грађевинарству, која је посљедних година све више популарна, своје мјесто проналази и летећи пепео. Поред својих пуцоланских карактеристика и позитивних утицаја на физичка и механичка својства конструкција употреба летећег пепела је оправдана и са економског становишта. Летећи пепео је, као индустријски нуспроизвод, један од најзаступљенијих отпадних материјала у свијету. На његову штетност и могућност његове поновне употребе у Србији се још увијек не обраћа превише пажње, иако се његове количине мјере милионама тона. Његова искоришћеност у Србији, а и земљама окружења, је у односу на развијене земље свијета доста ниска, али се у задње вријеме јављају индиције да би се стање могло поправити. Занимљив је и податак да су неке савезне државе из САД почеле да увозе летећи пепео (првенствено за градњу путева), због недостатка истог на својим депонијама. Један од разлога за то је све већа производња електричне енергије ван термоелектрана, а самим тим и мања употреба угља – ресурса за настанак пепела. Занимљиво је напоменути и да су представници арапских земаља, са Блиског Истока, посљедних година имали иницијативу да увозе пепео из Србије и осталих земаља окружења, који би, у одсуству сопствених ресурса, користили у путарству и другим гранама грађевинарства. Несумњиво, повећана примјене летећег пепела би смањила цијене постојећих материјала (агрегата и везива) па је свакако у државном интересу да се његова примјена повећа. Поред наведене анализе, пепео који се деценијама складишти на депонијама представља проблем по здравље људи и има штетан утицај на животну средину. Те депоније, поред тога што заузимају земљиште, које се на други начин може много боље искористити, углавном су незаштићене и пепео доста лако доспијева у околна подручја. Неке депоније пепела у Србији се налазе близу великих водотокова, што представља додатни проблем [11].

Резултати бројних истраживања у земљи и иностранству су доказали да се летећи пепео може успјешно примјењивати у бројним гранама грађевинарства, а

посебно у путарству. При изградњи разних типова насипа и носећих слојева коловозних конструкција летећи пепео може битно да редукује примјену неких природних материјала, чији су ресурси ограничени.

Повећаном примјеном наведених отпадних материјала би се постигли бројни позитивни ефекти, а њихов негативан утицај на човјека и животну средину би се свео на минимум. Један од начина њихове примјене је у изради стабилизација коловозних конструкција.

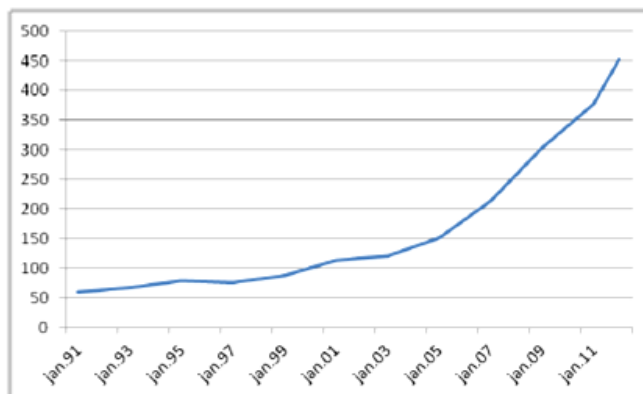
Према изворима *International Energy Agency (IEA)* из 2019.године [15] постоје 3 могућа сценарија за глобалну потражњу угља у периоду до 2040.године, а то су: 1) наставак тренутне политике (*Current Policies Scenario - CPS*), 2) тзв. *STEPS* сценарио (*Stated Policies Scenario*) и 3) сценарио одживог развоја (*Sustainable Development Scenario - SDS*) (дијаграм 3.1.). Уколико би се у будућности ишло по једном од прва два наведена сценарија, раст потражње угља, а самим тим и укупна количине пепела, би остале на данашњем нивоу или би расле, а ако би се пак ишло у правцу трећег сценарија, који је заснован на концепту заштите животне средине и широј примјени обновљивих извора енергије, онда би се количине поменутих материјала значајно смањила [16].



Дијаграм 3.1. – Могући сценарији потражње за угљем у периоду до 2040.године, према извору IEA из 2019.год. [16]

3.2. Економска анализа примјене битуменизираних материјала

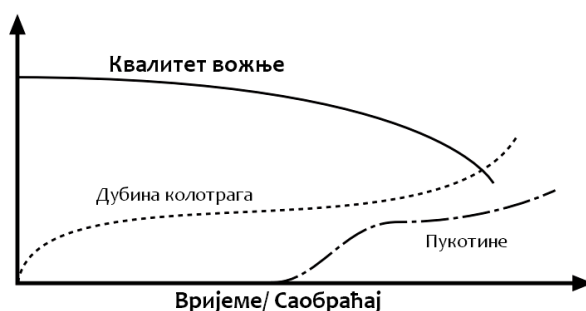
Данас се државе и јавне путне институције суочавају са бројним проблемима у ограничењима везаним за производњу асфалта, како у економским, тако и еколошким аспектима. Једна од битнијих ставки у економској анализи примјене асфалтних мјешавина је цијена основног везивног средства асфалтних мјешавина – битумена, која је посљедњих година у порасту. Раст цијене битумена је био најизраженији у периоду од 1991. до 2011.године (графикон 3.1.)[17]. Овај проблем условљава потребу за смањењем употребе битумена и тражења алтернатива у градњи и одржавању путева, како у смислу избора материјала тако у смислу технологија грађења. Један од начина рјешавања тог проблема је и могућност примјене наведеног типа рециклаже асфалтног застора, изостављајући битумен као везивно средство за израду носећих слојева, у свим својим облицима (најчешће битуменске емулзије и пјенушави битумени).



Графикон 3.1. – Раст цијене битумена у €/t, за период од 1991. до 2011.године [17]

3.3. Ниво услуге у зависности од стања пута током експлоатационог периода

У току експлоатационог периода пута, усљед спољашњих утицаја, настају разна оштећења коловозне конструкције, која условљавају смањење квалитета вожње, као једне од основних карактеристика стања пута (графикон 3.2.). Постоји више фактора који узрокују оштећење коловоза, а два најважнија су утицај околине и саобраћајно оптерећење. Предуслов за безбједно одвијање саобраћаја у експлоатационом периоду пута је да је постојећа коловозна конструкција исправно пројектована и изведена. Оштећење коловоза се некада мјери индиректно, процјеном квалитета вожње, алу су исто тако важна видљива оштећења, као што су: дубине колотрага, површинска неравност (*IRI – International Roughness Index*) или разне врсте пукотина (слике 2.1.–2.4.). На графикону 3.2. су приказане три индикатора стања коловоза (квалитет вожње, дубина колотрага и настанак пукотина), у функцији времена и кумулативног саобраћајног оптерећења.



Графикон 3.2. – Индикатори који утичу на квалитет вожње [13]

Анализа пада квалитета вожње (а самим тим и нивоа услуге пута) изражена у процентима, у току времена, је приказана на графикону 3.3. [4]. Такође, приказан је и утицај поступка реконструкције асфалта (кроз процес рециклаже) на побољшање услова вожње. Тим поступком се продужава животни вијек коловозне конструкције и пролонгира њен колапс.



Графикон 3.3. – Пад квалитета возње у функцији времена и повећање истог након реконструкције коловозне конструкције⁵, поступком рециклаже [4]

Приказ два путна правца који се налазе пред колапсом и којима је потребна хитна реконструкција дати су на сликама 3.1. и 3.2. Једно од могућих рјешења у њиховој реконструкцији је примјена хладна рециклажа асфалта, поступком *in situ*. Поред оштећења коловозног застора, у попречном пресеку коловозне конструкције видљива су оштећења и у осталим слојевима (слика 3.1.), те је неопходна комплетна реконструкција на пуној дебљини коловозне конструкције (тзв. *FDR* поступак⁶).



Слика 3.1. – Лоше постојеће стање комплетне коловозне конструкције пута Idrija-Idrijska Bela (Словенија) који је кандидат за хладну рециклажу асфалта [17]



Слика 3.2. – Мрежасте пукотине на коловозном зазору које условљавају смањење квалитета возње, пут R432 у БиХ (Гацко - државна граница са Црном Гором)

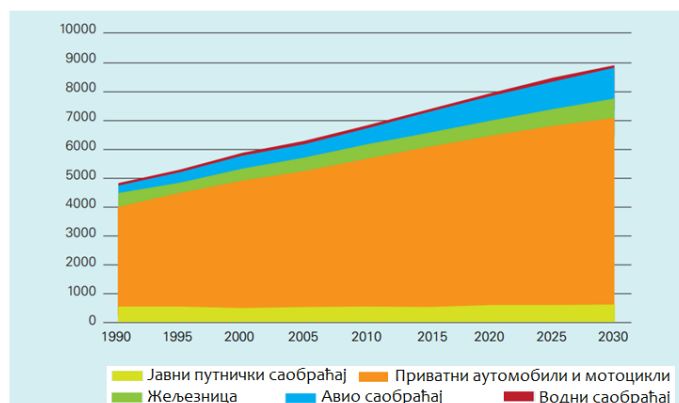
3.4. Тенденције кретања путничког саобраћаја у Европи

У саобраћајном погледу, путнички вид саобраћаја је најпопуларнији и најзаступљенији вид саобраћаја у свијету. ЕАРА (European Asphalt Pavement Association) [97] је спровела истраживања о различитим типовима саобраћаја који се користи у Европи и дошло се до закључка да ће путнички саобраћај биљежити највећи раст у наредном периоду, а то се посебно односи на повећање у смислу броја путничких возила. Истраживањем је обухваћен период од 1990. до 2015. године и претпоставка расподјеле саобраћаја до 2030. године. (графикон 3.4.) На основу наведених података може се закључити да су потребе за квалитетним путевима

⁵ Ознака КК представља скраћеницу за коловозну конструкцију

⁶ FDR - Full Depth Reclamation

сталне и биће повећане у наредном периоду, а ти захтјеви се дијелом могу испунити и примјеном претходно наведених техника реконструкције и рехабилитације коловоза.

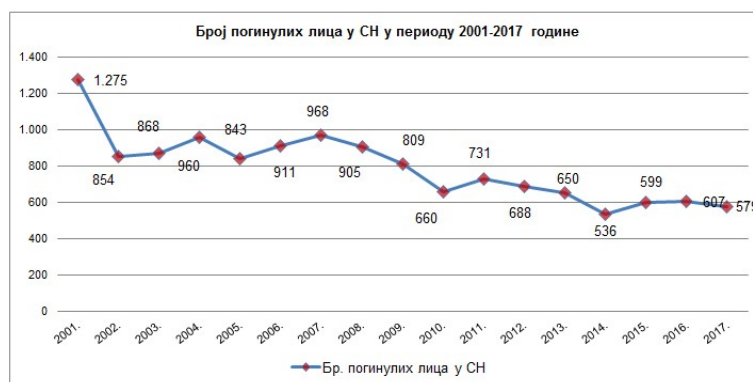


Графикон 3.4. – Приказ расподеле различитих типова путничког саобраћаја у Европи, дате кроз број путника ($\times 10^9$) који користи одређени вид саобраћаја (Gpkm – Giga passenger kilometre) [97]

3.5. Анализа безбједности путева у Србији и поређење са европским

Оправданост за наведеним типом реконструкције путева може се анализирати и са аспекта безбједности саобраћаја. Наиме, квалитетно урађена коловозна конструкција је један од основних предуслова за безбједно одвијање саобраћаја. У току периода експлоатације квалитет коловозне конструкције и ниво услуге пута опадају (графикони 3.2. и 3.3.), а самим тим и могућности за настанак саобраћајних незгода се повећавају.

Број људи који страдају на путевима, у току једне године, је један од основних показатеља квалитета путне мреже и сигурности одвијања саобраћаја сваке државе. Србија се не може похвалити да има безбједне и сигурне путеве јер је, по званичној статистици ЈП Путеви Србије, број погинулих лица на српским путевима у 2017. години износио чак 579. Да ствар буде гора, наведена бројка је мања од просјечних вриједности у посљедњих 15-ак година. Примјетан је пад броја смртних случајева на путевима у том периоду (графикон 3.5.), као и током претходне двије године (што у многоме има везе и са паднемијом вируса Корона), али је ситуација и даље лоша [100].



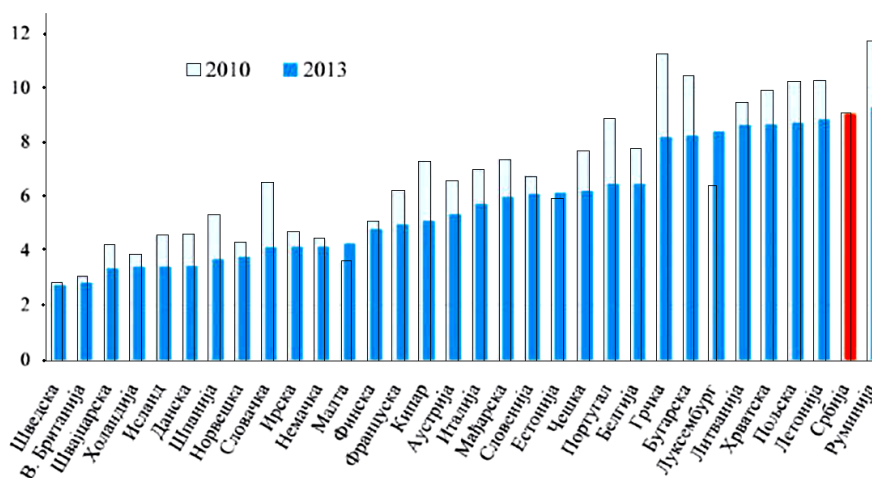
Графикон 3.5. – Број погинулих лица у саобраћајним незгодама на српским путевима, у периоду од 2000. до 2017. године [100]

Поредећи са статистиком осталих европских земаља (слика 3.3.), Србија се сврстава у групу земаља са великим бројем саобраћајних незгода са смртним исходима. Ако се претходно наведена бројка (за број лица страдалих у току једне године на путевима) прерачуна у број смртних случајева на милион становника и ако се претпостави да Србија има око 7 милиона становника, смртност на српским путевима износи скоро 90 смртних случајева на милион становника, док је та бројка за 2001.годину била више него дуго већа. На основу наведених података српски путеви се сврставају у једне од небезбједнијих у Европи, а један од разлога је и лоше стање путне инфраструктуре, о чему ће бити више ријечи у поглављу 3.6..

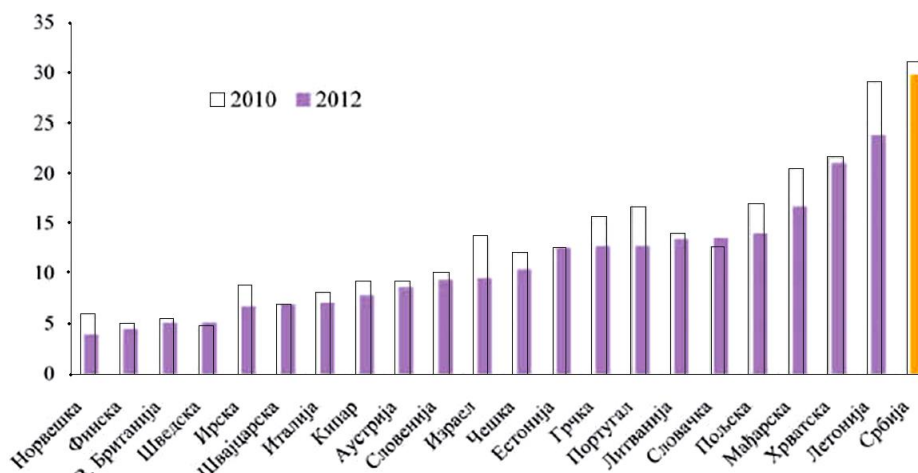


Слика 3.3. – Просјечан број смртно страдалих особа у саобраћајним незгодама (у односу на милион становника), на европским путевима у 2019.години [101]

Ризик страдања у саобраћајним незгодама у Републици Србији је вишеструко већи у односу на државе са развијеним и стабилним системом безбједности саобраћаја, попут: Шведске, Велике Британије, Холандије и других. Анализом броја погинулих у саобраћајним незгодама у односу на 100.000 становника (јавни ризик) и у односу на 100.000 регистрованих моторних возила (саобраћајни ризик), за период од 2010. до 2013.године, јасно се уочава да је Република Србија била међу најнебезбједнијим државама Европе (дијаграми 3.2. и 3.3.) [18].



Дијаграм 3.2. – Јавни ризик у у појединим европским земљама [18]



Дијаграм 3.3. – Саобраћајни ризик у појединим европским земљама [18]

Европска унија је 2010.године, на основу увида у све статистичке податке од 2001.године, направила студију смањења броја смртних случајева на путевима. У тој анализи је наведено да се број смртних случајева са 31.500 требао смањити за више од три пута, у периоду од 20 година (до 2020.године). Наведена прогноза је била доста прецизна за прве четири године анализе, док је веће одступање и повећан број смртних случајева у односу на претпоставке забиљежен од 2014.године, али је ипак остварен знатан напредак, јер је сваке наредне године регистрован мањи број смртних случајева у односу на претходну [102].

Примјеном нових технологија и материјала у грађењу путева битно се утиче на повећање квалитета и дуготрајности путне мреже, а самим тим и на безбједност свих учесника у саобраћају, што је једна од основних функција путева.

3.6. Стање путне мреже Србије

Улагање у развој и обнову путних праваца је од виталног значаја за сваку државу. Путна мрежа представља крвоток друштва и у многоме одређује њен привредни и друштвени развој. Да би једна држава нормално функционисала она мора да има јасно дефинисану путну политику. Погрешна путна политика може условити низ проблема који се у њој јављају и који увијек повлаче нове за собом. Прављење и редовно ажурирање базе података о државној путној мрежи, правилно пројектовање и извођење, редовно и превентивно одржавање неке су од основних ставки исправне путне политике, које су у међусобној корелацији. На основу тога се може закључити да потребе за одржавањем путне мреже у многоме зависе од квалитета пројектовања и извођења исте. Грешке настале у тим фазама узрокују проблеме и потребе ранијих рехабилитација и реконструкција од планираних.

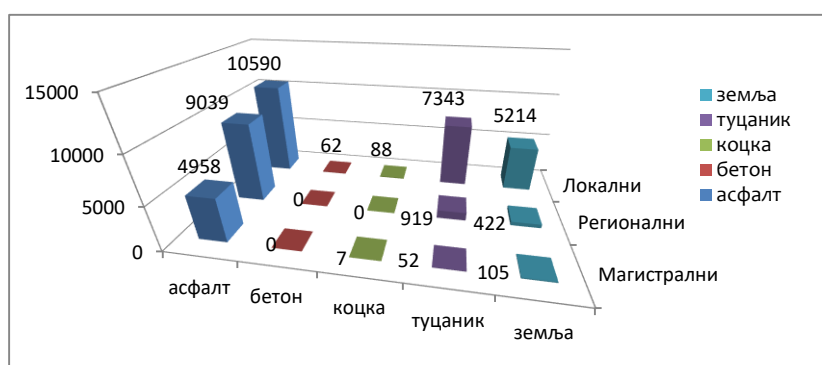
Иако се претходних година биљежи повећан обим радова на путевима у Србији, квалитет путне мреже још увијек није на задовољавајућем нивоу. На листи Свјетског економског форума (*World Economic Forum*) за 2019. годину Србија је по квалитету путева (*Quality of roads*) била на 100. мјесту (са индексом 3,5) од укупно 141 земље на листи. У односу на земље окружења, Хрватска је била на 12. мјесту, Словенија на 36., Црна Гора на 79., а Македонија на 103. мјесту [103]. Један од узрока, али никако и оправдање, данашњег лошег стања путне мреже у Србији је да су многи

путеви, који су данас у употреби, у другој половини прошлог вијека били димензионисани за мања саобраћајна оптерећења од данашњих.

Како у свијету, тако је и у Србији велика већина путева направљена са асфалтним коловозним застором. Ти путеви су категорисани на различите начине, а један од начина класификације путне мреже Србије, у зависности од ранга пута и врсте материјала коловозног застора, сликовито је приказан је у табели 3.1. и на дијаграму 3.4., а на основу старог правилника о категоризацији путева [20].

Табела 3.1. – Путна мрежа Србије према категоријама и врсти коловозног застора [20]

Година 2006.	Укупно (km)	Савремени коловоз					
		свега	асфалт	бетон	коцка	туцаник	земља
Магистрални	5.122	4.965	4.958	0	7	52	105
Регионални	10.448	9.039	9.039	0	0	919	422
Локални	23.229	10.740	10.590	62	88	7.343	5.214
М+Р+Л	38.799	24.744	24.587	62	95	8.314	5.741



Дијаграм 3.4. – Путна мрежа Србије према категоријама и врсти коловозног застора [20]

На основу претходно наведених података може се закључити да је највећа потреба за одржавањем путева са асфалтним засторима, јер је њихова мрежа најгушћа. Тај податак, између осталог, може бити један од аргумената оправданости поновне примјене рециклираног асфалта.

Поред наведене, постоји и новија категоризација путева у Србији, коју је урадио ЈП Путеви Србије (Сл. Гласник РС, бр. 105/2013 и 119/2013 [21]). Према новој категоризацији путна мрежа Србије има укупну дужину око 45.000km. По новој категоризацији путну мрежу Србије чине јавни и некатегорисани путеви [104]. Јавни путеви се дијеле на државне путеве I и II реда, општинске путеве и улице. Државни путеви I и II реда се дијеле на 4 подкатегије (табела 3.2.) [104].

Табела 3.2. – Дужине државних путева I и II реда [104]

Државни путеви I и II реда	
Државни путеви IA реда (ауто-путеви), укупна дужина 741,46km	Државни путеви IIA реда, укупна дужина 7.765,00km
Државни путеви IB реда, укупна дужина 4.486,10km	Државни путеви IIB реда, укупна дужина 3.170,15km

У Републици Србији је 32% путева првог и другог реда старо преко 25 година, а свега око 14% је до 10 година старости [20]. Општински путеви имају укупну дужину 23.780km. Значајан дио путева у Републици Србији је још увијек без савременог коловоза (на нивоу цијеле путне мреже чак 2/5 дионица имају туцаничке и земљане коловозе), нарочито у брдско-планинским крајевима Србије, а претпоставља се и да је око 40% путева на надморској висини већој од 600m [104].

Генерално посматрано, путна мрежа у Србији, као што је и раније наведено, по свом квалитету је у прилично лошем стању. На многим дионицама је неопходна ургентна рехабилитација или реконструкција. Једна од начина побољшања квалитета коловозних конструкција је и израда цементних стабилизација носећих слојева, које су детаљно анализирале у овом истраживању.

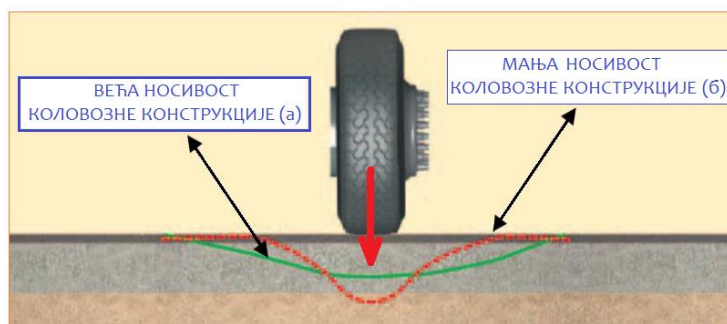
4. ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

Циљ овог истраживања је да се стари, стругани асфалтни застор, из оштећене и дотрајале коловозне конструкције, кроз поступак хладне рециклаже и уз додатак природног агрегата шљунка и хидрауличног цементног везива (и летећег пепела) поново употреби у градњи путева. Та употреба може бити приликом реконструкције и рехабилитације постојеће или приликом градње нове коловозне конструкције. Испитивањем механичких, физичких и хемијских карактеристика овако стабилизованог рециклираног асфалтног агрегата потребно је доказати да нова коловозна конструкција има боље карактеристике квалитета и услове вожње од постојећег коловоза. Стабиловањем материјала смањују се напрезања и пролонгирају се могућности настанка деформација у слојевима коловозне конструкције, које настају као резултат дејства саобраћајног оптерећења и замора материјала (слика 4.1.). Циљ употребе ових материјала у коловозним конструкцијама је да се смање напони притиска и затезања у њеним слојевима (слика 4.1.), а самим тим и да се појаве оштећења слојева коловозне конструкције (као што су: настанак разних типова прлина и пукотина, појава колотрага, оштећења усљед дејства воде, мраза и соли, могућност „пумпања” материјала из доњих слојева и друго) сведу на минимум.



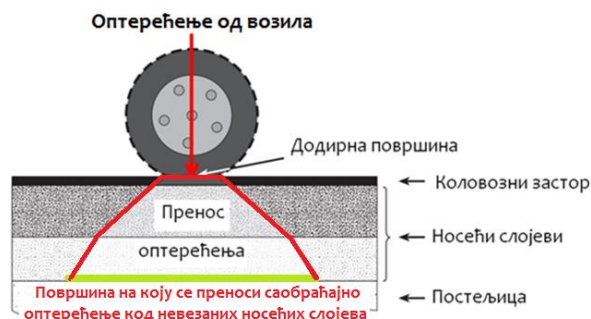
Слика 4.1. – Приказ напона и деформација у слојевима коловозне конструкције [3]

Коловозна конструкција се у зависности од материјала од којих је направљена различито понаша (за исто саобраћајно оптерећење), при чему треба тежити да се саобраћајно оптерећење расподјељује на што већу контактну површину слојева коловозне конструкције (да би се угиби свели на минимум – слика 4.2.), што се наведеним типом рециклаже асфалтног коловоза и стабилизацијом са цементом и летећим пепелом и остварује.

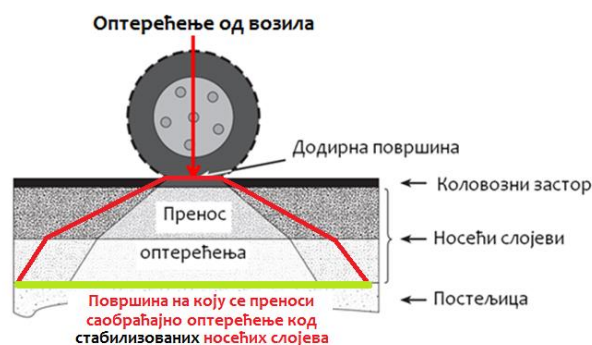


Слика 4.2. – Утицај саобраћајног оптерећења на деформабилност коловозне конструкције [17]

Саобраћајно оптерећење се кроз коловозну конструкцију распростире трапезно, у зависности од карактеристика појединих слојева. Са повећањем површине на коју се оптерећење расподјељује повећава се и носивост коловозне конструкције, при чему се деформације у доњим слојевима смањују (слике 4.3. и 4.4.). То се постиже уградњом квалитетнијих слојева у коловозну конструкцију у које, између осталих, спада и цементна стабилизација.



Слика 4.3. – Пренос саобраћајног оптерећења кроз коловозну конструкцију са незваним носећим слојевима



Слика 4.4. – Пренос саобраћајног оптерећења кроз коловозну конструкцију са везаним носећим слојем

Крајњи циљеви стабилизације рециклираног асфалта и шљунка, са цементом и летећим пепелом су да се:

- Смањи потребна дебљина асфалтних слојева у реконструисаној (или новој) коловозној конструкцији;
- Побољша способност коловозне конструкције да прихвати већа саобраћајна оптерећења и да се смање деформације у истој;
- Повезивањем зрна рециклираног и природног агрегата повећа се контактна површина, што условљава пренос саобраћајног оптерећења на доње слојеве преко веће површине;
- Продужи вијек трајања коловозне конструкције;
- Омогући поновна употреба материјала који су изгубили своју функцију у постојећој конструкцији (постојећи асфалти застор);
- Употријебе отпадни материјли као што је летећи пепео и стари асфалт;
- Смање потребне количине цемента при стабилизацијама;
- Редукција употребе природних камених материјала;
- Побољша квалитет коловозне конструкције и услови одвијања саобраћаја;
- Остваре економске уштеде поновном употребом материјала из постојећег коловоза и
- Испуне еколошки и енергетски захтјеви и промовише одржива градња.

Улога цементне стабилизације је да ојача новонасталу (полукруту) коловозну конструкцију и да прими и пренесе веће саобраћајно оптерећење од постојеће (флексибилне) коловозне конструкције. За овај поступак се користи материјал из горњих слојева коловозне конструкције, док материјал из доњих носећих слојева остаје у изворном облику (слика 2.11.). Некада су потребна побољшања механичких карактеристика доњих носећих слојева у смислу повећања збијености и носивости, а тај поступак се обавља тако што се, након скидања горњих слојева (који се рециклирају), врши збијање постојећих носећих слојева (а некада и замјена материјала) и потом уградња слоја цементне стабилизације (поглавље 7.7.).

Економски аспекти, заједно са изнијетим ставовима, погодују позитивној путно-политичкој клими, а све у циљу што бољег разумијевања концепта тзв. затвореног циклуса изградње (слика 4.5.) и приказа могућности поновне употребе отпадних материјала (летећег пепела и старог асфалта). Ефикасније коришћење постојећих старих и отпадних материјала представља добробит за свако друштво.



Слика 4.5. – Затворени циклус изградње пута [19]

Истраживања и развој метода и опреме погодних за рециклирање коловоза посљедних година су у успону. Нове технологије омогућавају да се значајне количине материјала из коловоза поново употријебе. Даљи развој технологије рециклирања требало би да представља изазов за истраживаче у смислу унапређења и имплементирања ефикаснијих метода рециклирања. Стратегија која се примјењује у многим равнијим земљама, а односи се на начин употребе материјала, назива се *степенаста концепт* (слика 4.6.). У овом концепту акценат се ставља на употребу најтрајнијих материјала, нпр. употреба материјала са дугим вијеком трајања, у коловозној конструкцији. Ако је неопходна реконструкција, постојећи материјал треба искористити за изградњу истог слоја, са истим карактеристикама као и у постојећој конструкцији. Међутим, ако то није могуће, нпр. када је агрегат запрљан и када би рециклирање имало штетан утицај на околину, материјал треба употријебити у слојевима са нижим нивоом квалитета. Опција некоришћења материјала из коловоза је посљедња прихватљива са аспекта економије и очувања животне околине и треба је избјегавати кад год је то могуће [19].



Слика 4.6. – Степенаста концепт поновне употребе материјала из коловозне конструкције [19]

5. НАУЧНЕ МЕТОДЕ У ИСТРАЖИВАЊУ

Дато истраживање је конципирано из теоретских основа, резултата експерименталних испитивања и анализе њихове међусобне зависности.

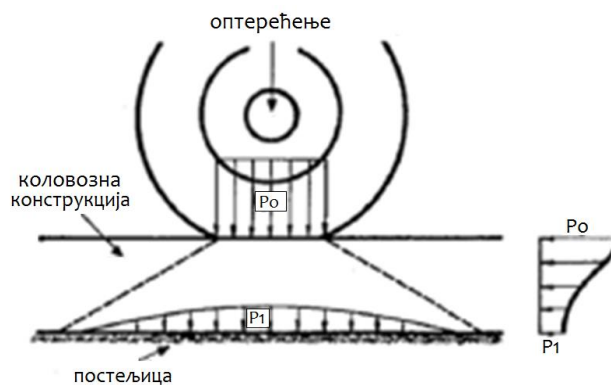
Теоретске основе су углавном засноване на обради више или мање познатих чињеница, које су полазна основа за правилан избор врста и количина компонентних материјала и поступака експерименталног испитивања, на коме се и базира израда докторске дисертације. На основу тога, у научно-истраживачком раду је примјењено више научних метода, а неке од њих су нумеричке методе анализе и синтезе, као и логичке методе индукције и дедукције. Имајући у виду предмет и циљ истраживања неопходно је било користити и статистичке методе, као и неке опште методе. На почетку су детаљном анализом истраживања стања у области других аутора дефинисане хипотезе у раду и направљен план експерименталних истраживања.

Након испитивања компонентних материјала и одређивања састава мјешавина, приступило се справљању узорака и лабораторијском испитивању истих, па су се у раду користиле и експерименталне методе. За утврђивање односа анализираних својстава цементних стабилизација приказана је и статистичка анализа преко математичких функција, кроз табеларно и графичко представљање добијених резултата. На крају је урађен и факторијални експеримент, којим су додатно анализирани резултати лабораторијског испитивања. На основу свега претходно наведеног су анализирани крајњи резултати и изведени закључци и правци за даља истраживања у овој области.

6. КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ

6.1. Уопштено о коловозним конструкцијама

Површина коловоза или коловозни застор су једини видљиви дио пута. Коловозни застор „покрива” коловозну конструкцију, израђену од слојева са различитим дебљинама материјалима и физичко-механичким карактеристикама. Коловозна конструкција је дио пута који прима и преноси саобраћајно оптерећење. Као што је и раније наведено, саобраћајно оптерећење се преко слојева коловозне конструкције трапезно преноси на доње слојеве и постељицу (завршни слој насипа), која углавном има малу носивост у односу на слојеве изнад. На тај начин се саобраћајно оптерећење распоређује по већој површини у односу на површину гдје дјелује (слика 6.1. и слике 4.3. и 4.4.).



Слика 6.1. – Утицај саобраћајног оптерећења на промјену напона [7]

Узевши у обзир да се оптерећење по доњим слојевима расподјељује на већу контактну површину, вриједност напрезања се смањује по дубини (слика 6.1.) и може се компензовати лошијим квалитетом материјала (нпр. несепарисаним шљунком или дробљеним каменим материјалом). Као резултат тога, материјали у доњим слојевима имају слабије механичке карактеристике и јефтинији су у односу на оне у горњим слојевима коловозне конструкције.

Устаљена подјела слојева коловозне конструкције је на асфалтне и носеће слојеве. Овим истраживањем су обухваћени и једни и други слојеви, тј. израда носећих слојева од природног агрегата и агрегата који настаје у поступку хладне рециклаже асфалних слојева.

6.2. Носећи слојеви коловозних конструкција

Носећи слојеви коловозне конструкције су слојеви који се уграђују изнад постељице, а испод асфалтних слојева. Главна улога им је прихватање и пренос саобраћајног оптерећења на постељицу (слике 4.3. и 4.4.) и обезбјеђење носивости комплетне коловозне конструкције. Поред тога, ови слојеви су и подлога за асфалтне слојеве, па је приликом њихове уградње потребно обратити више пажње на нивелацију. Носећи слојеви могу бити везани и неvezани и могу се изводити од природног или рециклираног агрегата. Најчешћа везива која се користе у изради стабилизација коловозних конструкција су: цемент, битумен и креч (шема 6.1.).

Шема 6.1. – Носећи слојеви коловозних конструкција са аспекта компонентних материјала

Врста слојева	Карактеристике	Агрегат	Везиво
Носећи слојеви	Везани носећи слојеви	Природни материјали (шљунак, дробљени камен, туцаник)	Цемент Битуменска везива Креч
	Невезани носећи слојеви	Рециклирани материјали (рециклирани: асфалт, бетон опека...)	Летећи пепео Гранулисана гура...

6.3. Коловозне конструкције са цементним стабилизацијама

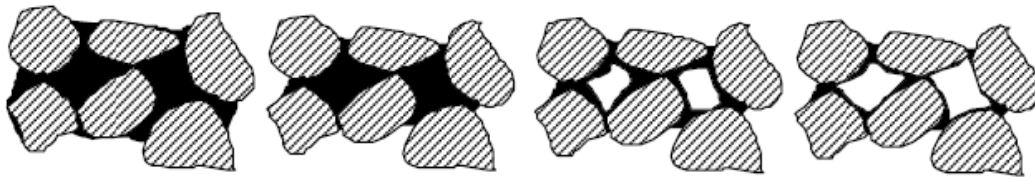
Коловозне конструкције које садрже носећи слој стабилизован неким од хидрауличних везива, данас су у широкој употреби широм Европе и свијета. Такве стабилизације су подједнако заступљене, како у флексибилним (чијом употребом постају полукруте), тако и у крутим (бетонским) коловозним конструкцијама. У полукрутим коловозним конструкцијама улога цементних стабилизација је повећање носивости исте, а у крутим коловозним конструкцијама стабилизације се првенствено користе као подлога испод бетонских плоча, при чему, осим функције повећања носивости, имају улогу спречавања „пумпања” материјала из доњих невезаних слојева.

Стабилизација материјала цементом представља мјешавину агрегата са одговарајућом количном везива, уз додатак оптималне количине воде, која се одређује на основу максималне збијености мјешавине датих материјала (тј. за максималну запреминску масу). Умјесто природних агрегата (шљунка и дробљеног каменог агрегата) могу се користити и рециклирани материјали (нпр. стругани асфалт или дробљени бетон), а умјесто цемента (чија примјена је најчешћа) некада се у стабилизацијама примјењују и друга хидраулична везива сличног дјеловања, најчешће на бази креча, летећег пепела и згуре [7]. Количине додатка цемента су доста мале (најчешће 3-6% у односу на масу агрегата [22]), у поређењу са конвенционалним бетонима. Примјеном мале количине додатка цемента добијају се бетони ниских чврстоћа, чиме се смањује могућност настанка већих пукотина на континуалним површинама, у којима се цементне стабилизације изводе. Да би се спријечила или свела на минимум појава настанка таквих, непланираних пукотина у континуалним цементом стабилованим површинама некада се праве „контролисана” пукотине, пар сати након уградње цементне стабилизације.

Поред камених агрегата, стабилизације хидрауличним везивима се раде и за природна тла, о чему ће више ријечи бити у наредном поглављу (6.3.1.).

Карактеристике цементне стабилизације директно су зависне од количина додатка цемента и воде. Веће количине цемента у мјешавини условљавају повећање

количине додатка воде. Са смањењем тих количина смањује се и укупна запреминска маса мјешавине, која се компензује повећањем порозности, тј. појавом тзв. „ваздушних јастука” унутар исте. Утицај смањења количине цемента и воде на текстуру цементних стабилизација приказан је на слици 6.2. [23].



Слика 6.2. – Повећање пора у мјешавинама цементних стабилизација услед смањења количине цемента и воде (цементне пасте) [23]

Стога је приликом уградње цементних стабилизација неопходно постићи што бољу обавијеност зрна агрегата цементом пастом и остварити већу запреминску масу мјешавине, тј. смањити проценат „ваздушних јастука” у стабилизацији на што је могуће мањи ниво. То се постиже уз оптималан додаток воде мјешавини, чија се количина одређује лабораторијски, у поступку одређивања Стандардног или Модификованог Proctor-овог опита. Поред количине цемента и воде, на проценат „ваздушних јастука” у стабилизацијама битно утиче и упакованост зрна агрегата у поступку збијања стабилизације.

6.3.1. Избор типа везива и карактеристике стабиловања различитих врста материјала

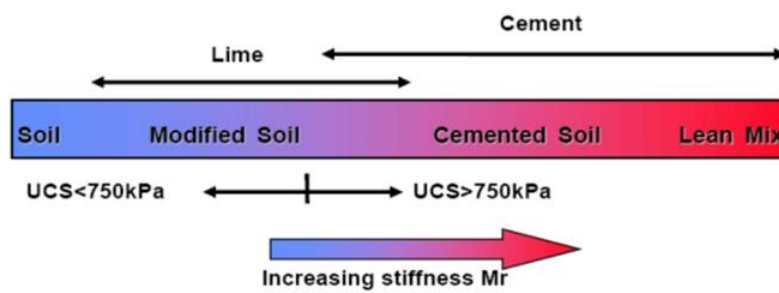
Било да се ради о стабилизацијама у носећим слојевима коловозних конструкција или стабилизацијама тла у постељици, веома битан детаљ код стабилизације коловозних конструкција је избор типа везива при стабилизацији. Досадашња пракса је показала да од типа везива и агрегата зависи понашање стабилизације. Поред битумена, цемента и креча, у свијету је у новије вријеме све више у употреби примјена индустријских нуспроизвода (посебно летећег пепела из термоелектрана и гранулисане згуре из високих пећи), као додатка везиву у стабилизацијама. Карактеристика летећег пепела је та да, за разлику од цемента, има каснији развоја чврстоћа и на основу тога има могућност тзв. „самоизлијечења”, тј. „зарастања” евентуалних прлина и пукотина које су настале у почетном периоду очвршћавања изведеног слоја. Аутор P. Braunović [7] је дао класификацију и поље примјене основних стабилизацијских везива (цемента, битумена и креча) у зависности од гранулације агрегата који се стабилизује. Примјена креча препоручена је код материјала који имају више ситних честица, те је стога примјена креча заступљенија код стабилизација ситнозрног тла (прашине и глине), него код стабилизација крупнозрних материјала.

Избор везива за стабилизацију може се посматрати и са аспекта пластичности материјала. Коришћење цемента је оправдано код материјала са индексом пластичности (I_p) мањим од 10, док је за пластичније материјале погоднија стабилизација кречом [22]. Главни ефекат примјене везива је повећање отпорности материјала, које се заснива на смањењу индекса пластичности. У процесу хидратације креч реагује са честицама глине, што у пластичним материјалима доводи до смањења пластичности. Чврстоћа стабилизованог материјала зависи од

количине везива и врсте основног материјала који се стабилизује. Стабилизован материјал се понаша као полукрут, али се повећањем количине везива повећава и крутост, што изнад одређене границе негативно утиче на отпорност коловозне конструкције на замор и појаву прлина и пукотина [22].

Из претходно наведеног може се закључити да је у стабилизацијама потребно ограничити количину додатка везивних материјала, на тај начин да се постигне довољна носивост (уз минималну количину везива), а да притом стабилизирани слој има ограничену крутост (уз максималну количину везива).

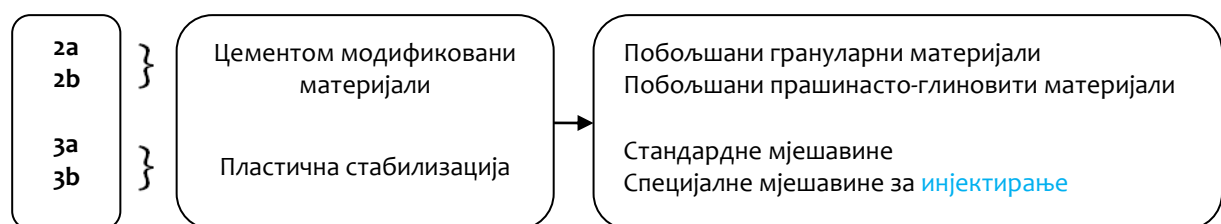
Постоји више типова стабилизација материјала. Аутор А. Estrada [14] наводи да стабилизације рециклираног материјала могу да буду: механичке, битуменске и хемијске. Од типа и количине везива директно зависе и вриједности чврстоћа при притиску, као основне механичке карактеристике стабилизација. Аутор Y.S.Yeo [23] наводи препоруке за стабилизације различитих материјала кречом и цементом (слика 6.3.) На слици 6.3. се види да се са повећањем чврстоће при притиску запажа и повећање резилијентног модула M_r , који се углавном користи као механичка карактеристика код стабилизација тла.



Слика 6.3. – Различити типови агрегата и врсте везива код стабилизација у Ј.Африци [23]

Аутор P.Braunović [7] је дао објашњење принципа стабилизације агрегата цементом (шема 6.2.).

Шема 6.2. – Стабилизација цементом



Подјеле у шеми 6.2. су објашњене на следећи начин:

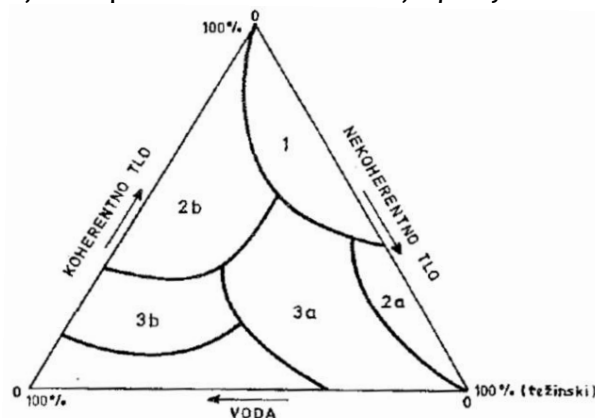
1) Стабилизација цементом је очврсли материјал који је настао механичким збијањем мјешавине агрегата (материјала тла), цемента и воде, након чега је његован при одговарајућим условима. Количине цемента и воде које се додају у мјешавину одређене су на основу претходно одређене максималне збијености;

2) Модификација цементом је обрада материјала тла цементом у случају када се нека тла не могу економично стабилизирати, као што су нпр. глиновита тла. Цемент се додаје у количинама потребним за измјену физичких својства материјала да би он у модификованом облику могао да одговори захтјевима за израду доњих носећих слојева или постељице коловоза. Када се анализира модификација

цементом на гранулисаним заглињеним материјалима који имају високу пластичност, количина цемента која се додаје овим поступком не може бити довољна да материјал стабилизује и очврсне, али може да побољша његове физичке карактеристике у природном облику и

3) *Пластична стабилизација цментом*, представља очврсли материјал добијен његовањем материјала тла стабилизованог са довољним количинама цемента и воде, да би се добила конзистенција слична малтеру у моменту мијешања и уграђивања. Наведени тип стабилизације се углавном користи као материјал за спречавање ерозије и у начелу захтјева око 4% више цемента у односу на потребне количине за извођење класичних стабилизација цментом.

Претходно објашњена подјела, у зависности од (не)кохерентности материјала, приказана је на тро-компонентном дијаграму 6.1..



Дијаграм 6.1. – Подручје варијације цементне стабилизације [7]

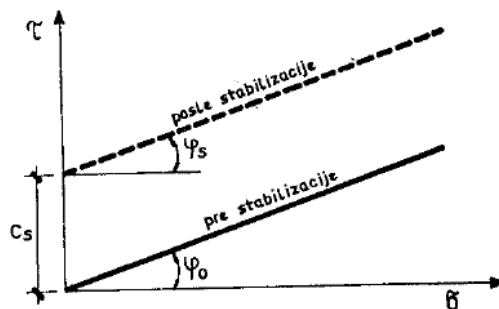
6.3.2. Утицај додатка хидрауличних везива на стабилизације некохерентних материјала

Кохерентни и некохерентни материјали се код стабилизација материјала различито понашају у контакту са хидрауличним везивима и водом. Кохерентни материјали се углавном налазе у доњем строју пута и нису обухваћени овим истаживањем па ће се у наставку акценат ставити на анализу понашања некохерентних материјала (укључијући шљунак и стругани асфалтни застор), код стабилизација са цментом и сличним хидрауличним везивима. Од некохерентних материјала који се користе у стабилизацијама најзаступљенији су: пијесак, шљунак, дробљени камени агрегати (природни или рециклирани) и међусобне комбинације наведених зрнастих материјала.

Услед додатка цемента и воде обавијеност зрана агрегата цементном пастом за некохерентна тла је знатно већа у односу на кохерентне материјале, јер је њихова специфична површина доста мања. Иста анализа се може успоставити и код стабиловања ситнозрних (фракција 0/4mm) и крупнозрних агрегата (фракције 8/16 и 16/31,5mm), те је стога, за постизање истих механичких карактеристика различитих агрегата употреба цемента доста већа код стабиловања ситнозрних агрегата (најчешће 10-14%mas) [8].

Некохерентни материјали у свом природном облику немају кохезије ($c=0$), па су и тангенцијални напони (τ) у том случају једнаки нули. Стабиловањем тих материјала неким хидрауличним везивом и водом успоставља се веза између зрна

агрегата, а самим тим се кохезија (c_s) и тангенцијални напони (τ_s) повећавају (графикон 6.1.), док углови унутрашњег трења остају приближно исти ($\varphi = \varphi_s$).

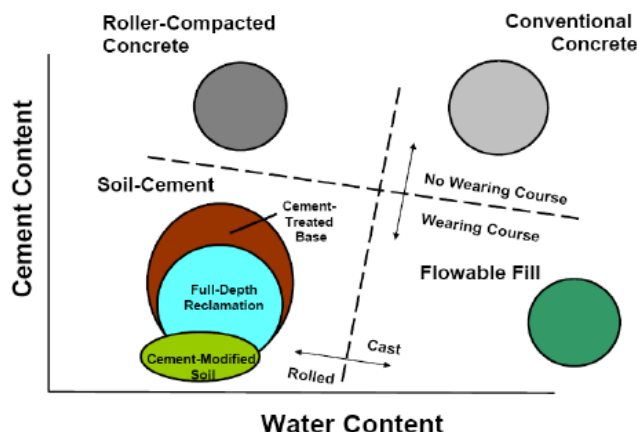


Графикон 6.1. – Утицај додатка стабилизатора на повећање кохезије између зрна агрегата код некохерентних материјала [7]

Количина додатка воде у мјешавинама цементних стабилизација некохерентних материјала је такође битна. Са повећањем додатка воде (у односу на оптималан садржај) код материјала који имају добро унутрашње трење (као што је нпр. пијесак) то трење ће се смањити, што значи да ће се и стабилност мјешавине смањити [7].

6.3.3. Разлике цементних стабилизација у односу на конвенционалне бетонске мјешавине

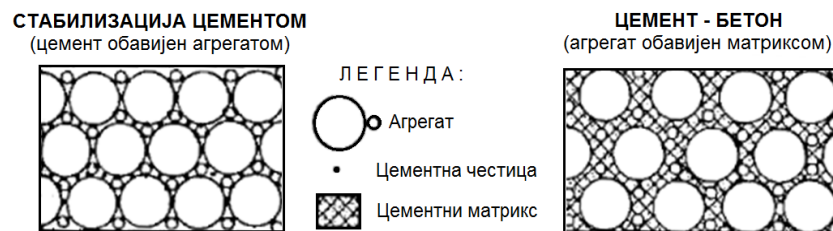
За разлику од конвенционалних бетона, вода у цементним стабилизацијама (с обзиром на поступак уградње истих) поред стандарде улоге у бетонским мјешавинама има још једну битну улогу, а то је осигурање максималне збијености материјала који се стабилизује. Обрадивост која се захтјева у овим мјешавинама такође се разликује у односу на конвенционалне бетоне, с обзиром да се материјал за цементне стабилизације (за разлику од конвенционалног бетона) уграђује поступакком интензивног збијања, најчешће помоћу вибрационих ваљака. На слици 6.4. су приказани различити случајеви примјене бетонских мјешавина за градњу путева, у зависности од врсте агрегата и количина додатка цемента и воде.



Слика 6.4. – Цементом третирани материјали који се користе за различите намјене у путоградњи [23]

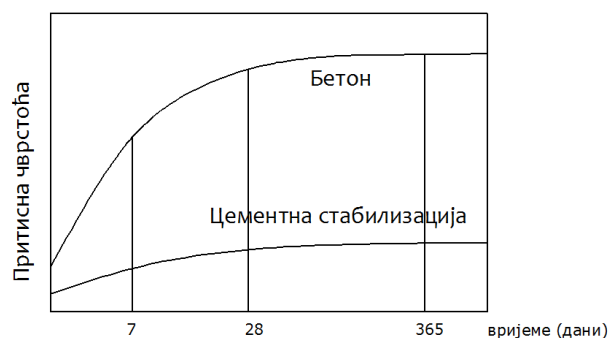
Са слика 6.4. се види да се најмање количине цемента у градњи путева управо користе при цементним стабилизацијама тла и стабилизацијама у поступку рециклаже асфалта.

Стабилизација цементом може се посматрати и са становишта технологије бетона, с обзиром да су компонентни материјали као и у класичном бетону: агрегат, цемент и вода, али је чињеница да цементне стабилизације имају другачију структуру материјала у односу на структуру бетона (слика 6.5.). Та разлика се огледа у томе што у цементним стабилизацијама материјал обавија честице (зрна цемента), док код бетона камени агрегат ја обавијен цементним матриксом (цемент + ситне фракције агрегата) [7].



Слика 6.5. – Структура цементних стабилизација и конвенционалних бетона [7]

Њемачка фирма *Wirtgen* [13] је, као свјетски лидер на пољу производње и употребе механизације за извођење стабилизација са рециклираним асфалтним материјалима, у задњих 20-ак година израдила низ упутстава и препорука за пројектовање и извођење разних типова рециклаже. Све оне указују на то да је прва битна ствар код хладне рециклаже асфалта (са додатком цемента) та да треба разграничити појмове цементна стабилизација и бетон, посебно са аспекта развоја чврстоћа при притиску кроз вријеме. Опште је познато да су чврстоће при притиску цементних стабилизација са природним агрегатима доста мање од чврстоћа при притиску класичних бетона (графикон 6.2.).

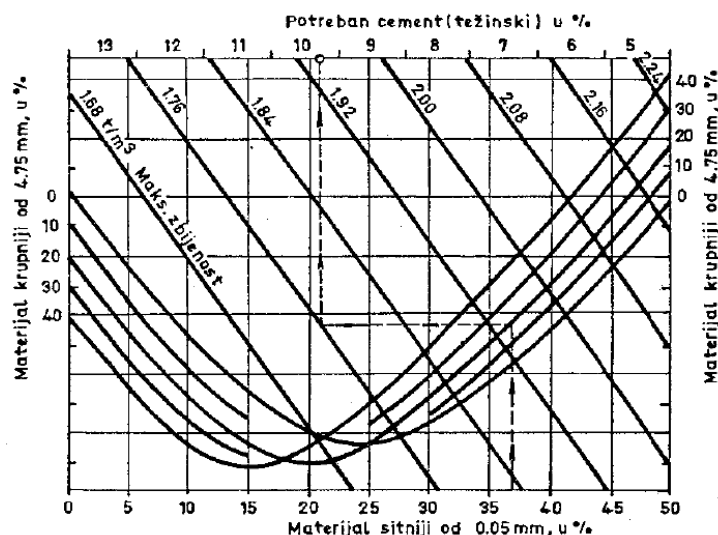


Графикон 6.2. – Упоредни приказ односа чврстоћа класичних бетона и цементних стабилизација [13]

Wirtgen је дао и објашњења за различите типове стабилизација и потребе употребе цемента у њима. Наиме, лоше чврстоће при притиску неких цементних стабилизација, које се стабилизују битуменским везивима (посебно емулзијама), разлог су употребе стабилизација агрегата са додатком и цемента, у различитим процентима примјене. У тим случајевима битуменском везиву се додају релативно мале количине цемента (0,5-1,5%*mas*), гдје цемент има улогу активног пунила. Генерално посматрано, један од разлога примјене цемента у стабилизацијама је и његова лака доступност у многим земљама. Други разлог је што је цемент довољно истражен и његове особине су познате. Стабилизације које су рађене са локалним

материјалом и цементом прије пар десетина година добро су се показале у пракси и трају до данас. Из тих разлога, цемент је широм свијета најчеће коришћено везивно средство у грађевинарству. Стабилизације цементом захтјевају правилан приступ у пројектовању и извођењу. Дакле, основни циљ додавања цемента је повећање носивости коловозне конструкције (која се огледа кроз повећање чврстоће при притиску стабилизације), али се са повећањем количине цеменета повећава и крутост исте. Крутост коловозне конструкције се обрнуто пропорционална вриједностим динамичких модула еластичности (E_{din}) који се могу одредити на два начина: методом ултразвука и методом резонантне фреквенције. На основу претходно наведеног може се извести закључак да је при пројектовању мјешавина цементних стабилизација битна ставка одабир врсте и класе цемента. Због високих чврстоћа углавном се избјегавају цементи класа 42,5 и веће, па је за израду стабилизација најчешћа примјена цемента класа 32,5 или 22,5. Цементи нижих класа од 22,5 се такође не препоручују због малих чврстоћа које постижу, посебно у раном периоду процеса очвршћавања. Приликом пројектовања оваквог типа стабилизације, између осталог, треба водити рачуна и о контроли вриједности индиректне затезне чврстоће, као и могућностима стварања прлина и пукотина у изведеној конструкцији. *Wirtgen* у својим препорукама наводи да поред количине цемента, на физичке и механичке карактеристике овакве стабилизације, утиче много фактора, а прије свега квалитет агрегата (природног и/или рециклираног) и степен збијености [13].

Потребна количина цемента за стабиловање различитих мјешавина агрегата се одређује на основу детаљне анализе више утицајних фактора. Аутор *P. Braunović* [7] је анализирао зависност потребне количине додатка цемента стабилизацијским мјешавинама од гранулације агрегата (на основу процентуалног учешће агрегата крупнијег од 4,75mm и ситнијег од 0,05mm), и максималне запреминске масе (дефинисане у току поступка одређивања максималне збијености мјешавине *Proctor*-овим опитом), а резултати те зависности су приказани на графикону 6.3..



Графикон 6.3. – Потребне количине додатка цемента у зависности од гранулације и максималне запреминске масе агрегата [7]

6.3.4. Основни поступци одређивања механичких карактеристика

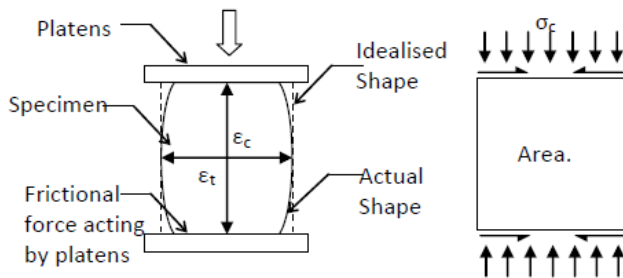
Након одређивања физичких карактеристика цементне стабилизације, као и свих појединачних компонентних материјала, приступа се дефинисању и испитивању механичких карактеристика очврсле мјешавине цементом стабилизованог агрегата. Од механичких карактеристика посебна пажња се обраћа на одређивање чврстоће при притиску (f_c) и индиректне затезне чврстоће (ITS).

Чврстоћа при притиску – f_c (или UCS – *Unconfined Compressive Strength*):

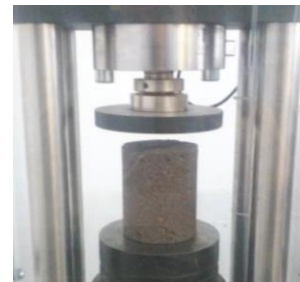
Одређивање чврстоће при притиску се испитује по стандарду *SRPS EN 13286-41:2012* [C3], на цилиндричним узорцима димензија $\varnothing 100\text{mm}$ (или $\varnothing 150\text{mm}$) и $h=120\text{mm}$.

Димензије цилиндричних узорака цементне стабилизације су ограничене јер се праве уз помоћ Proctor-овог опита и калупа који се користе при одређивању истог (*SRPS EN 13286-2:2012* [C4]).

Чврстоћа при притиску се одређује на одговарајућим пресемама и зависна је од граничне силе лома (F) која дјелује на цилиндрични узорак кружног попречног пресека површине A (слика 6.6. и слика 6.7.).



Слика 6.6. – Шематски приказ испитивања чврстоће при притиску (f_c) [23]



Слика 6.7. – Лабораторијско испитивање чврстоће при притиску (f_c)

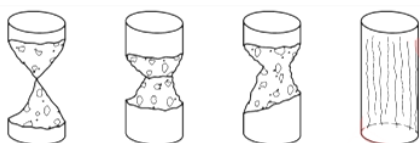
Вриједност чврстоће при притиску (f_c) се одређује на основу следеће релације *SRPS EN 13286-41:2012* [C3]:

$$R_c = \frac{F}{A_c} \text{ [N/mm}^2\text{]} \dots\dots\dots (6.1.)$$

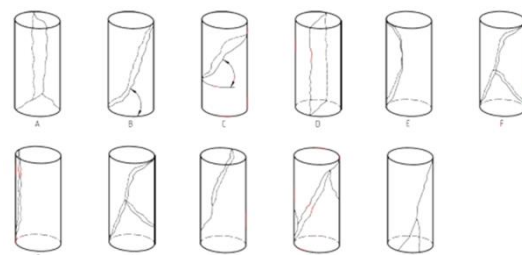
гдје је:

- R_c – чврстоћа при притиску (f_c) [MPa];
- F – сила лома [kN];
- A_c – површина основе цилиндра [cm²].

Карактеристични случајеви одговарајућег и неодговарајућег лома узорка који се јављају код одређивања чврстоћа при притиску дати су на сликама 6.8. и 6.9. [86].



Слика 6.8. – Одговарајући ломови цилиндричних узорака приликом испитивања f_c [86]



Слика 6.9. – Неодговарајући ломови цилиндричних узорака приликом испитивања f_c [86]

Индриректна затезна чврстоћа – ITS (Indirect Tensile Strength):

Испитивање затезне чврстоће за носеће слојеве стабилизоване цементом није прописано српским стандардом. У свијету постоји више метода за испитивање затезних чврстоћа бетонских мјешавина, а најпознатије су:

- директна затезна чврстоћа,
- чврстоћа на савијање и
- индиректна затезна чврстоћа – бразилски опит цијепања [7].

Избор методе испитивања, између осталог, зависи и од димензија узорака, а узорци који се справљају за испитивање осталих карактеристика цементних стабилизација одговарајућих су димензија и за одређивање индиректне затезне чврстоће. Индиректна затезна чврстоћа се одређује на основу стандарда SRPS EN 13286-42:2012 [C5]. Узорци на којима се врши испитивања истих су димензија као и за одређивање чврстоћа при притиску ($\varnothing 100\text{mm}$ или $\varnothing 150\text{mm}$ и $h=120\text{mm}$). Током опита индиректне затезне чврстоће на цилиндру се мјери гранична сила при лому који је изложен константном прирасту деформације од $50,8\text{mm}/\text{min}$, у правцу дијаметралне осе. Цилиндри који се испитују претходно су његовани на константној температури и влажности. Испитивање ITS-а може се радити на пресама на којима се одређује и чврстоћа при притиску, а поступак је сљедећи:

- Положити цилиндар у пресу за испитивање;
- Између узорка и плочица за пренос оптерећења поставити полуцилиндре преко којих ће се оптерећење са пресе линијски преносити на узорак;
- Поставити узорак тако да полуцилиндри налијежу на изводницу цилиндра и да буду паралелни и центрисани на вертикалну дијаметралну раван;
- Ставити плочу за пренос на горњи полуцилиндар;
- Изложити цилиндар притиском оптерећењу, без наглих промјена, уз стопу повећања оптерећења од $50,8\text{mm}/\text{min}$, до достизања максималне силе и
- Забиљежити максималну силу F (у kN) са тачношћу од $0,1 \text{ kN}$.

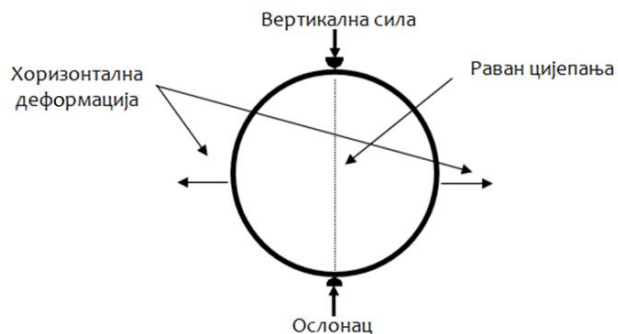
Индиректна затезна чврстоћа (ITS) се одређује на основу формуле (6.2.), преузете из стандарда SRPS EN 13286-42:2012 [C5]:

$$R_{it} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot H \cdot D} \dots \dots \dots (6.2.)$$

гдје су:

- | | | |
|----------|---|--|
| R_{it} | – | индиректна затезна чврстоћа - ITS [MPa]; |
| F | – | сила лома [N]; |
| H | – | висина узорка [mm]; |
| D | – | пречник узорка [mm]. |

Приказ опита одређивања индиректне затезне чврстоће дат је на сликама 6.10. и 6.11..



Слика 6.10. – Шематски приказ испитивања индиректне затезне чврстоће (ITS)



Слика 6.11. – Лабораторијско испитивање индиректне затезне чврстоће (ITS)

Сви материјали који садрже цемент у себи подложни су стварању прлина. Повећање носивости коловозне конструкције и раст чврстоћа стабилизације у функцији је времена очвршћавања (графикон 6.2.) и класе цемента. Добијање пројектоване чврстоће при притиску (f_c) и индиректне затезне чврстоће (ITS), прије пуштања у функцију саобраћајнице (у чијој коловозној конструкцији је и слој цементне стабилизације), изузетно је важно са становишта смањења појаве настанка прлина у слоју цементне стабилизације.

Чврстоћа при притиску и индиректна затезна чврстоћа се на стабилизацијама са цементом најчешће одређују након 7 дана његе узорака, док се тај период његе повећава за мјешавине са летећим пепелом (због његове касније пуцоланске реакције) [8].

Поред претходно дефинисаних основних механичких карактеристика цементне стабилизације некада се испитују и: динамички модули еластичности (методом ултразвука или резонантне фреквенције), Poisson-ов коефицијет, брзина проласка ултразвука.

Брзина проласка ултразвучног импулса кроз материјал одређује се на основу времена потребног да импулс пређе одређени пут. Тај пут је дефинисан растојањем између предајника и пријемника импулса. У овом истраживању, на једној кружној површини узорака био је постављен предајник, а на другој пријемник, који је регистровао импулс (слика 6.12. и слика 6.13.). Вријеме проласка ултразвука се најчешће мјери у микросекундама, а брзина проласка се одређује на основу времена проласка и пута који импулс пређе, односно висине узорака. Метода за испитивање ултразвука развијена је још средином прошлог вијека (скоро истовремено у Канади и Енглеској) и тада се кренуло са испитивањима на бетонским мјешавинама, док су испитивања на стабилизацијским мјешавинама у том периоду ријетко рађена [7].



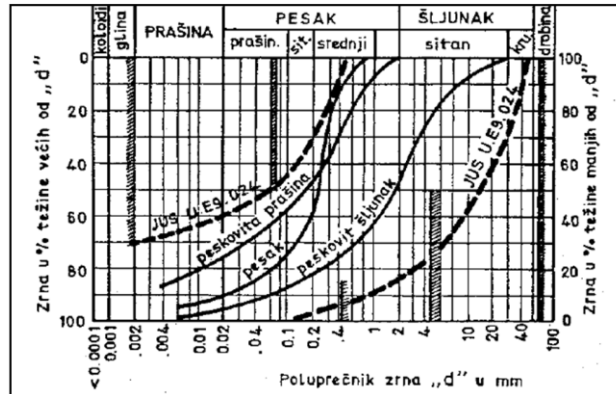
Слика 6.12. – Инструмент PUNDIT за испитивање брзине и времена проласка ултразвука



Слика 6.13. – Мјерење времена проласка ултразвучног таласа кроз цилиндрични узорак

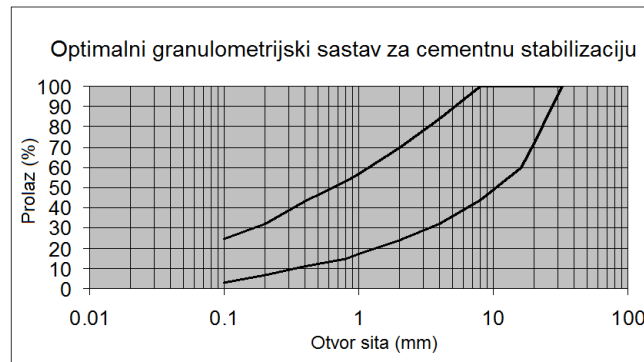
6.3.5. Подручја примјене и ограничења при пројектовању и извођењу цементних стабилизација

Као што је наведено у поглављу 6.3.1. стабилизације цементом различитих материјала у носивим слојевима коловозне конструкције зависе и од гранулације материјала. На графикону 6.4. су дате гранулометријске криве материјала које дефинишу подручје повољне гранулације за стабилизацију цементом, унутар граничних кривих датих у стандарду SRPS U.E9.024:1980 [7] (бивши JUS U.E9.024:1970 стандард) [7].



Графикон 6.4. – Типске гранулометријске криве различитих материјала и подручје повољне гранулације за стабилизацију цементом [7]

Đ.Uzelac i grupa autora [22] су, између осталог, дали препоруке за гранулометријски састав агрегата који се стабилизује цементом (графикон 6.5.). Битно је напоменути да учешће прве фракције ($0/4\text{mm}$) у стабилизацијским мјешавинама треба да износи минимум 30%, првенствено због услова добре уградљивости.



Графикон 6.5. – Граничне гранулометријске криве агрегата (са максималним зрном 31,5mm) који се стабилизује цементом [22]

Приликом пројектовања и извођења саобраћајница које садрже слојеве цементне стабилизације, без обзира да ли се ради о реконструкцији постојеће саобраћајнице поступком рециклаже или изради нове коловозне конструкције, јављају се бројна ограничења. Проблеми при градњи оваквих саобраћајница углавном су већи у градским условима јер су ту и ограничења већа. Распоред комуналних инсталација и њихова доступност након извођења овог типа стабилизације представљају највећи проблем у градским условима. Наиме, у случају да је потребно вршити неке накнадне радове, на одређеним инсталација које се налазе у коловозној конструкуцији са цементом стабилизованим носећим слојем,

проблем представља то што су оне у том случају теже доступне него код коловозних конструкција са невезаним носећим слојевима. Тиме се повећава обим и укупни трошкови радова. Тај проблем је мање заступљен код ванградских саобраћајница, јер код њих углавном нема инсталација испод пута или су заступљене у мањем обиму.

Проблеми током уградње слоја цементне стабилизације могу да настану и у тзв. нехомогеним мјешавинама, тј. када се из мјешавине издваја дио цемента пасте (сегрегација). У лабораторијским условима та појава се јавља на горњим површинама узорка усљед равнања, прије вађења из калупа, или на доњим површинама, усљед гравитационе сегрегације цементне пасте (слика 6.14.). Слична појава може да се јави у теренским условима, приликом уградње и равнања стабилизације вибро ваљцима.



Слика 6.14. – Издвајање цементне пасте (усљед слијегања) на доњем површинском слоју очврслог стабилизацијског узорка

Разлози за појаву издвајања цементне пасте, осим у поступку равнања површине, могу да буду и неадекватно збијање мјешавине. Такође, неправилно пројектовање оптималне количине додатка воде и цемента и примјена неодговарајуће гранулације агрегата (најчешће због недостатка ситних фракција) може довести до издвајања цементне пасте у току и након уградње стабилизације.

Организација посла и обезбјеђење нормалног одвијања саобраћаја током уградње су захтјевнији приликом реконструкција саобраћајница у градским условима вожње, па се и тај аспект треба анализирати при пројектовању и извођењу цементних стабилизација.

На основу претходно наведеног може се закључити да је примјена цементних стабилизација пожељнија и лакша за извођења на ванградским саобраћајницама, јер су код тих типова саобраћајница ограничења мања, а самим тим и могућност извођења цементом стабилизационих слојева коловозне конструкције једноставнија.

Са аспекта носивости коловозних конструкција слојеви са цементним стабилизацијама (без обзира да ли се раде са природним или рециклираним материјалима) у свијету су скоро неизоставан елемент код изградње путева са тешким и врло тешким саобраћајним оптерећењем, у које улазе ауто-путеви и прометнији магистрални путеви (по постојећој категоризацији путева у Србији у те групе углавном спадају државни путеви *IA* и *IB* реда).

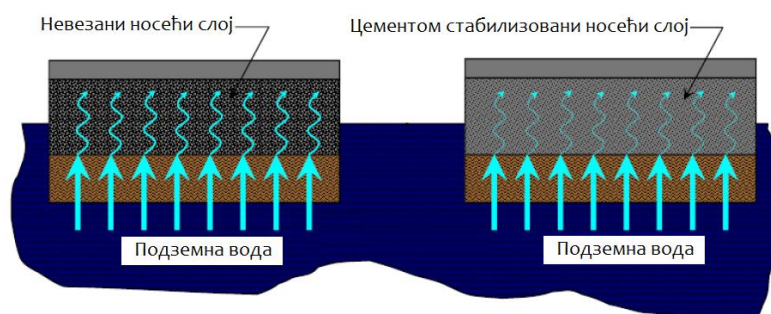
6.3.6. Температурни услови уградње цементних стабилизација

У *Wirtgen*-овим препорукама [13] се напомиње да температура околине утиче на прираст чврстоћа стабилизације у току времена, а том проблематиком се и ауторка *S.Dimter* детаљно бавила у својој докторској дисертацији [8]. Са повећањем температуре њега узорака (од 5°C до 35°C) примјетно је повећање вриједности

чврстоћа при притиску и осталих механичких карактеристика, посебно за узорке његоване 7 и 28 дана. Међумолекулске везе почињу да се остварују чим цемент дође у контакт са водом (у процесу мијешања) као и код стандардних бетона. Неке везе се нарушавају у току збијања стабилизације, што директно утиче на смањење чврстоћа. Због тога је важно процес уградње и збијања убрзати, како би се избјегло збијање у процесу очвршћавања и добиле жељене чврстоће, односно процес збијања би требало обавити у првих сат времена након мијешања компонентних материјала са водом. Посебно треба бити обазрив када су температуре околине (током уградње) изнад 40°C и гдје су стабилизације склоне бржем расту чврстоће, а и брзом губитку воде. У таквим случајевима, некада треба избјегавати употребу портланд цемента, као стабилизатора, и замјенити га неким другим хидрауличним везивом. Након уградње стабилизација при високим спољашњим температурама некада се ради и заштита тог слоја прекривањем влажним тканинама преко површине (ради смањења губитка воде). Такође, стандард SRPS U.Еg.024:1980 [7] налаже да се стабилизације цементом не смију уграђивати при ниским температурама (мањим од 5°C) и у току падавина (због могућности повећања садржаја воде, што условљава отежано збијање стабилизације и немогућност добијања максималне збијености предметне мјешавине).

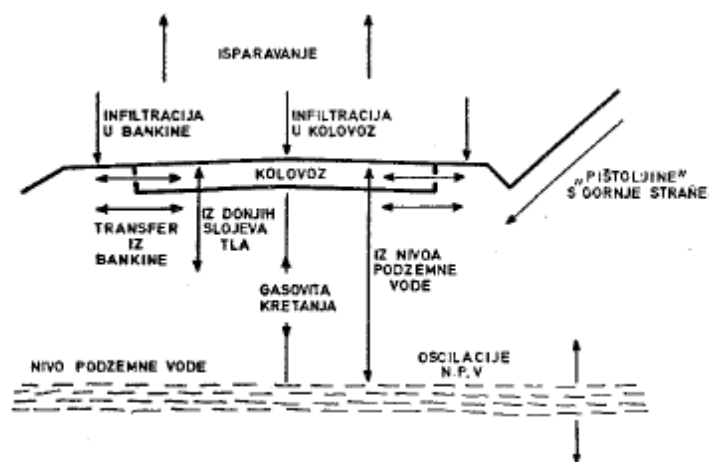
6.3.7. Цементне стабилизације са аспекта водопорпусности и дејства мрза и соли

Један од највећих непријатеља коловозних конструкција је вода. Поред атмосферске воде која прво долази у контакт са коловозним застором проблем представља и дејство подземне воде. Дејство воде на коловозну конструкцију посебно представља проблем у зимском периоду, када усљед дејства ниских температуре, долази до појаве смрзавања воде у слојевима коловозне конструкције, при чему лед (усљед повећања запремине у односу на воду) дјелује разарајуће на материјал у коловозној конструкцији. Посљедице штетног дејства леда најбоље се виде у прољеће, након отапања ледених кристала [20]. Уколико су попречни и подужни нагиби застора правилно изведени и уколико нема оштећења у асфалтним слојевима (код коловозних конструкција са асфалтним засторима) проблем не представља атмосферска вода (јер се коловозна конструкција сматра водонепропусном), већ подземна вода. Коловозне конструкције са невезаним слојевима имају добру пропусност за подземну воду, па је један од начина рјешавања тог проблема и израда цементних стабилизација, чија је водопорпусност доста мања (слика 6.15.).



Слика 6.15. – Утицај дејства подземне воде на слојеве коловозне конструкције са невезаним и цементом стабилизованим носећим слојевима [23]

Кретање воде и могућност доспијећа у коловозну конструкцију, анализирани су на једном попречном профилу пута у засјеку [7]. На слици 6.16. се види да, уколико је коловозни застор оштећен, атмосферска вода продире кроз асфалтне слојеве и долази до доњих (невезаних) слојева коловозне конструкције, чија је отпорност на њено штетно дејство најмања. Присуство атмосферске воде у доњим слојевима коловозне конструкције условљава даља оштећења и почетак пропадања исте. Када се томе додају и утицаји подземне воде, и воде која кроз банкине и косине долази до носећих слојева, појаве настанка оштећења и пропадање коловозне конструкције постају интензивније. Слој цементне стабилизације има улогу баријере за пролаз воде из горњих у доње слојеве коловозне конструкције (за атмосферску воду) и обрнуто (за подземну воду – слика 6.15.).



Слика 6.16. – Циркулација воде у зони коловозне конструкције пута у засјеку [7]

Са аспекта отпорности на штетно дејство мраза коловозне конструкције које имају слојеве цементне стабилизације се сматрају боље отпорним на његово дејство, управо због претходно објашењене функције цементне стабилизације у регулисању кретања воде кроз исту. Приликом претходних лабораторијских испитивања цементне стабилизације се углавном не испитују на дејство мраза као стандардне бетонске мјешавине или мјешавине стабилизованог тла (стандард SRPS U.B1.050:1970 [С6]) нити се одређује водопрпусност стабилизације, јер је утицај воде на овај слој коловозне конструкције доста мањи него код већине других бетонских конструкција. Заштита слоја цементне стабилизације битуменском емулзијом (након уградње) свакако још више доприноси водонепропусности овог слоја. Сматрајући да је асфалтни застор непропустан и да се, којом се путеви одржавају у зимском периоду, не може доћи до слоја цементне стабилизације овакве цементне мјешавине се углавном не провјеравају на њено штетно дејство.

6.3.8. Могућност настанка прлина и пукотина у слоју цементне стабилизације

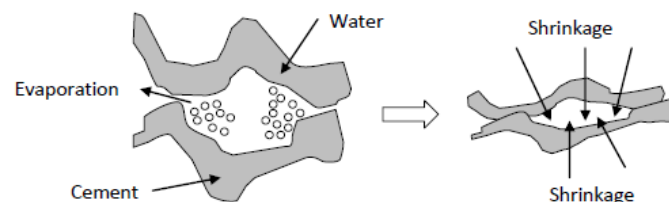
Поред добрих физичких и механичких карактеристика стабилованих носећих слојева коловозне конструкције цементом, након извођења и током експлоатационог вијека трајања коловозне конструкције јављају се и неке негативне појаве. Једна од њих је и појава прлина (и пукотина) у слоју цементне стабилизације. У слоју цементне стабилизације се већ након извођења и почетка очвршћавања могу

појавити прслине и пукотине различитих димензија и облика. Анализом појаве настанка прслина у слоју цементне стабилизације и могућностима смањивања или санације истих бавило се више аутора [8]. За главне узроке настанка прслина у цементним стабилизацијама сматрају се:

- Скупљање слоја стабилизације, усљед присуства цемента;
- Скупљање настало усљед температурних разлика и
- Дејство саобраћајног оптерећења.

Усљед ослобађања топлоте током процеса хидратације цемента (у периоду везивања), те каснијих хлађења и скупљања (у периоду очвршћавања) у изведеном слоју цементне стабилизације може доћи до промјене запремине и настанка прслина. Скупљање цементне стабилизације је директно пропорционално количини и класи цемента и воде. То је један од разлога зашто се у пројектовању треба ограничити количина додатка цемента и дефинисати одговарајућа класа истог. На основу тога се намеће закључак да се оптимална количина цемента одређује на основу најмањег скупљања стабилизације, при чему се добијају задовољавајуће чврстоће [8].

Да би се лакше схватио механизам настанка прслина и пукотина у цементним материјалима анализа мора да крене од појаве скупљања усљед губитка воде у цементној пасти. Током хидратације цемента јавља се губитак воде усљед хемијске реакције, који је познат под називом *самоусушивање (self-desiccation)* [23]. Термичко скупљање усљед фактора околине и губитак влажности из финих пора цементне пасте резултују значајним напрезањима у свим бетонским мјешавинама, па и у цементним стабилизацијама. Тај процес условљава појаву настанка прслина, а касније и пукотина у цементној пасти мјешавине (слика 6.17.) [23].



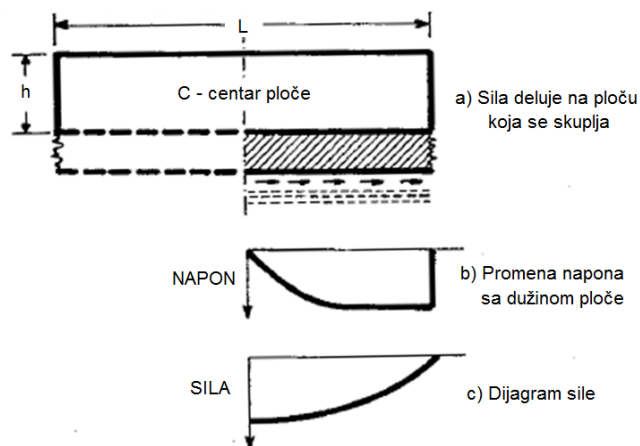
Слика 6.17. – Механизам настанка прслина у цементној пасти [23]

Цементне стабилизације не трпе велике температурне промјене, па се тај аспект треба узети у обзир при анализи настанка прслина. Имајући у виду да су температуре подлоге, на које се стабилизације уграђују (невезани носећи слојеви или постељица) и температуре на површини изведеног слоја стабилизације често различите, некада је, након уградње, потребно радити заштиту површинских слојева да би се температурне разлике смањиле, самим тим и појава настанка прслина свела на што мањи ниво. Проблем настаје и приликом варирања температура околине током периода очвршћавања стабилизације. Температуре мјешавине која се уграђује такође имају битну улогу у наведеној анализи. Неки аутори [8] наводе да повећање температуре мјешавине са 25°C на 40°C у многоме повећава могућности настанка прслина.

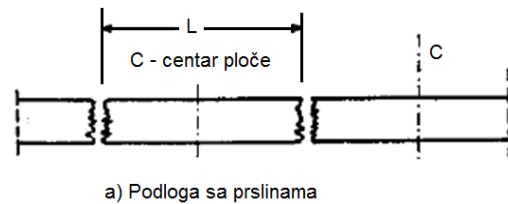
Цементом стабилизовани носећи слој, који настоји да се скупи због унутрашњих промјена у својој структури, уколико је потпуно или дјелимично спријечен да то учини, биће изложен силама затезања. Када се максимална затезна чврстоћа прекорачи почињу се формирати прслине [7]. Прслине могу да буду

затвореног и отвореног типа. У анализи прслина дефинишу се ширине појединачних и растојања између сусједних прслина.

У цементом стабилизованом носећем слоју, усљед напрезања од затезања, прслине настају као резултат линеарног скупљања, при чему се плоча у подужном правцу посматра као линијски елемент. Уколико се слој цементне стабилизације слободно помјера по слоју испод ње (без трења) неће доћи до напрезања. На слици 6.18. приказане су силе које усљед скупљања дјелују на плочу, расподјела напона од трења (између цементне стабилизације и слоја испод ње), као и расподјела сила.



Слика 6.18. – Напрезања у слоју цемента стабилизације усљед скупљања [7]



Слика 6.19. – Попречне прслине у плочи дужине L [7]

Када се посматрају попречне прслине у плочи дужине L (слика 6.19.) може се претпоставити да се на наведеној плочи скупљају оба краја, док центар плоче (средина) остаје непомерљив. Имајући у виду да исти принцип важи и за сусједне плоче, може се закључити да од скупљања плоча највише зависи и ширина попречних прслина [7].

Помјерање напрегнуте плоче (скупљање) се повећава од нуле у центру до максимума према слободном крају (слика 6.18.б)). Услов равнотеже је испуњен када је сума сила трења од центра плоче до слободног краја једнака укупном напрезању у плочи [7], односно када је:

$$R \cdot b \cdot h = \mu \cdot \gamma \cdot b \cdot h \cdot L/2 \dots \dots \dots (6.3.)$$

Гдје су:

R – чврстоћа на затезање у центру плоче [MPa];

b – ширина коловоза [m];

h – дебљина цементне стабилизације [cm];

μ – коефицијент трења клизања између слоја стабилизације и подлоге;

γ – запреминска маса цементне стабилизације [kg/m^3];

L – дужина плоче [m].

Из формуле (6.3.) се може закључити да дужина плоче (L_{max}) при којој затезно напрезање постаје критично износи:

$$L_{max} = \frac{2 \cdot R}{\mu \cdot \gamma} \dots \dots \dots (6.4.)$$

На основу претходне формуле (6.4.) може се извести закључак да је размак између прслина у плочи директно завистан од вриједности максималне затезне чврстоће, а прслине које се јављају од скупљања су углавном попречне.

Аутор *P. Brajnović* [7] је табеларно дао зависност појаве настанка прслина (и размака између њих) од појединачних фактора (табела 6.1.).

Табела 6.1. – Утицајни фактори за размак и ширину прслина

Прслине	Коеф. трења клизања (μ)	Чврстоћа на затезање (R)	Запреминска маса (γ)
Размак прслина се повећава са	смањењем (>1)	повећањем (>1)	смањењем (1)
Размак прслина се смањује са	повећањем (1)	смањењем (1)	смањењем (1)

Саобраћајно оптерећене може изазвати појаву настанка прслина у слоју цементне стабилизације и то на три начина:

- Уколико се саобраћај одвија преко тек изведене конструкције или констркције која није постигла пројектоване чврстоће;
- Ако је саобраћајно оптерећење које прима коловозна конструкција са слојем цементне стабилизације веће од пројектованог оптерећења, у периоду експлоатације и
- Настанак пукотина усљед понављаног оптерећења стандардних осовина у току експлоатације пута (замор материјала).

У свим претходно наведеним случајевима се у слоју цементне стабилизације јављају напрезања већа од допуштених, која условљавају појаву настанка прслина, а касније и развој пукотина.

Приликом уградње слоја цементне стабилизације потребно је направити „планиране пукотине” (у току поступка збијања), како би се могућност појаве непланираних прслина у периоду експлоатације пута смањила. Тиме се смањују и укупна оштећења коловозне конструкције, што је главни предуслов за нормално одвијање саобраћаја.

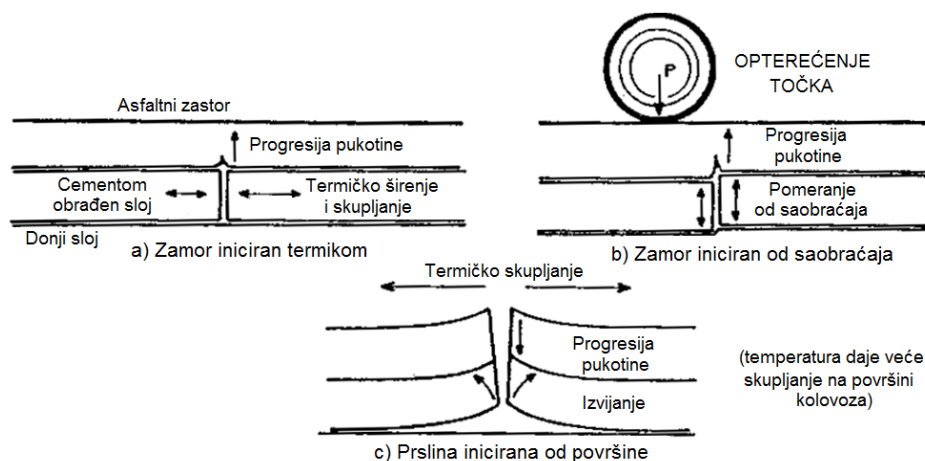
6.3.8.1. Механизам дјеловања рефлектованих пукотина

Цементна стабилизација се данас у свијету широко примјењује као носећи слој у спрегнутој коловозној конструкцији са асфалтним слојевима [7]. Проблем настанка прслина и пукотина постаје комплексији када се напрезања у слоју цементних стабилизација суперпонирају са дејством саобраћајног оптерећења, у које се касније може сврстати и замор материјала.

Прслине својим ширењем постају пукотине и неповољно дјелују, не само на слој цементне стабилизације, у коме настају, већ и на комплетну коловозну конструкцију, јер се у асфалтним слојевима, под дејством саобраћајног оптерећења и оптерећења усљед темепратурних промјена јављају концентрисана напрезања, која условљавају појаву рефлектованих пукотина из доњих слојева. То даље условљава могућност уласка воде у слојеве коловозне конструкције и настанак бројих оштећења. У случају релативно танких асфалтних застора (дебљине мање од 10cm) рефлектоване, попречне прслине/пукотине су готово редовна појава, док су код

дебљих асфалтних застора рјеђе или су потпуно елиминисане. Са економског аспекта посматрано смањење појаве настанка прлина и пукотина представља негативно компензовање на рачун повећања дебљине асфалтног застора. Комплексност овог проблема у пројектовању, грађењу и одржавању коловозних конструкција (са носећим слојевима од цементних стабилизација) упућује на свестрано сагледавање овог феномена и проналазак оптималног рјешења [7].

Код проучавања настанка прлина на слојевима цементне стабилизације и у асфалтном застору (код спергнутих коловозних конструкција високих механичких перформанси и отпорних на деформације) анализирају се механизми настајања рефлектованих прлина, које под утицајем саобраћајног оптерећења и температурних промјена расту и постају пукотине. У новијој литератури се налази више претпоставки о настанку рефлектујућих пукотина. По једној од њих се пукотине начелно иницирају на изложеној површини застора и са прогресијом на доље се сучељавају са пукотинама у носећем слоју. По другим изворима пукотине „крећу” одоздо и невидљиве су све док се не појаве на површини коловоза. Санација пукотина у првом случају је доста лака и захтјева површинску обраду, док је у другом знатно сложенија и некада захтјева комплетну замјену површинских слојева, уз потпуну обуставу саобраћаја. Приступ проучавању механизма рефлектованих пукотина заснива се на аналитичким и лабораторијским испитивањима, при чему се анализирају три могућа случаја настанка која су дата на слици 6.20. [7].



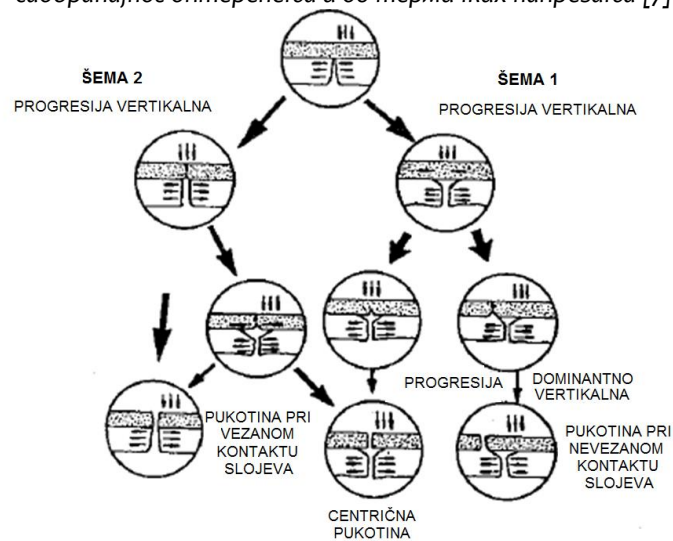
Слика 6.20. – Механизми рефлектовања пукотина из слоја цементне стабилизације ка асфалтном застору и обрнуто [7]

У анализи настанка рефлектованих пукотина помињу се три узрока, а то су:

- Замор инициран од термичких утицаја;
- Замор инициран од саобраћајног оптерећења и
- Пукотине инициране од асфалтног застора [7].

Генерализована шема развоја пукотина у полукрутим коловозним конструкцијама, под комбинованим утицајем саобраћајног оптерећења и термичких напрезања дата је у шеми 6.3..

Шема 6.3. – Детаљи развоја пукотина у коловозној конструкцији иницирани од саобраћајног оптерећења и од термичких напрезања [7]



Утврђено је да од свих параметара скупљање има највећи утицај на настанак прлина у цементном стабилованом слоју, као и да се ефекат скупљања може смањити употребом адитива. Од доступнијих материјалима у те адитиве се могу сврстати: креч, летећи пепео или неки битуменски производи. У претходно наведеном се може тражити оправданост примјене летећег пепела у цементним стабилизацијама. Поред тога, летећи пепео има и могућност „самоизлијечења” што је појашњено у поглављу 6.3.1.. Аутор *P.Braunović* [7] наводи да се код добро гранулисаних материјала јављају мања скупљања него код стабилованог локалног тла, као и да је код њих примјена адитива много ефикаснија.

6.3.9. Стандардизација и захтјеви везани за примјену цементних стабилизација

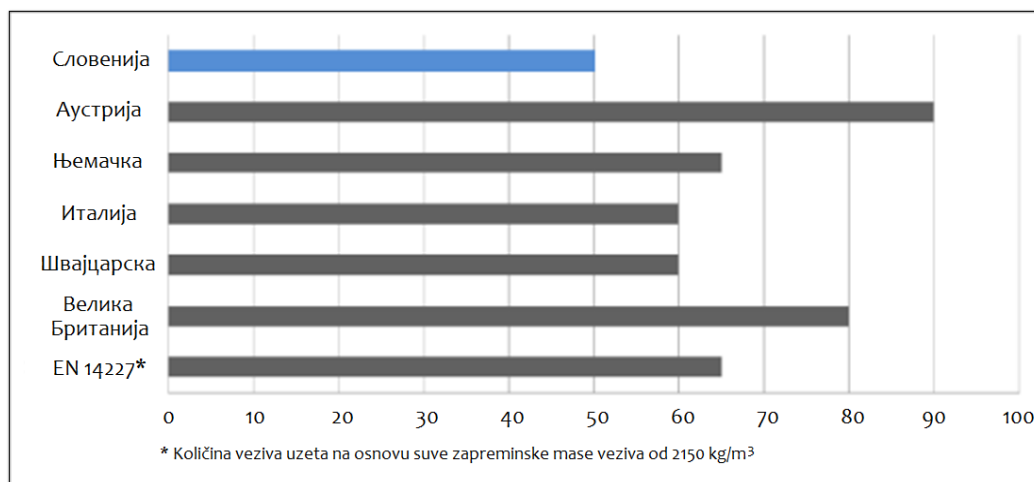
Стандарди Европске уније, као и британски стандарди дефинишу категоризацију хидрауличних везивних материјала (*Hydraulically Bound Materials*) на основу вриједности чврстоћа при притиску након 28 дана његе, као и вриједности модула еластичности и директне затезне чврстоће. Европске земље, на основу поменутог стандарда (*EN 14227-1:2013* [C7]), прописују минималне количине хидрауличних везива у оваквим мјешавинама. Захтјев у смислу минималне количине везива за цементом третиране основне слојеве, по наведеном стандарду, износи 1% (*Specification 800*) [24]. Аутор *J.Kennedy* [24] наводи очекиване вриједности: чврстоћа при притиску (*Indicative Compressive Strength [MPa]*), модула еластичности (*Indicative Laboratory Static Elastic Modulus [GPa]*) и количине додатка везива (*Indicative additions [kg/m³] assuming components are added separately*), за различите врсте материјала који се стабилизују цементом (табела 6.2.).

Табела 6.2. – Карактеристике цементом третираних материјала у доњим слојевима коловозне конструкције, по захтјевима Европске уније [24]

Material	Indicative Compressive Strength (MPa)	Indicative Laboratory Static Elastic Modulus (GPa)	Indicative additions (kg/m ³) assuming components are added separately
Well-graded & hard	> 8	15	90
Well-graded sand	> 8	10	140
Poorly-graded	> 8	10	200
Weak rocks	> 8	10	200
Brickearth	> 4	5	170

Српски стандард *SRPS U.Е9.024:1980* [С2] односи се на техничке услове и начин изградње горњих и доњих носивих слојева коловозних конструкција од основних материјала стабилованих цементом и сличним хидрауличним везивима (за путеве свих разреда) са асфалтним и цементно-бетонским коловозним застором. Наведени стандард се односи на употребу природних шљунковитих и дробљених камених агрегата. У овом стандарду, поред карактеризације појединих материјала, начина пројектовања и технологије извођења дате су препоруке за контролу извођења стабилизације, а оне се огледају се кроз: збијања мјешавина, гранулометријски састав агрегата, квалитет везива, равност површина, тачност профила као и испитивања механичких карактеристика стабилизације. Употреба рециклираних агрегата и начин извођења рециклаже за израду стабилизација није стандардизован у држави Србији, већ се у пројектовању и извођењу оваквих стабилизација углавном користе страни стандарди, препоруке и упуства, као што је између осталих и претходно помињано *Wirtgen*-ово упуство [13].

У Европи се више аутора бавило одређивањем минималних количина везивних материјала у стабилизацијским мјешавинама. Један од њих је и *V.Hrast* [17] који је дао препоруке минималне количине везива (за неке европске земље) и референтну вриједност из стандарда *EN 14227-1:2013* [С7] (дијаграм 6.2.). Такође, наведени аутор је и приказао вриједности захтјеваних механичких карактеристика цементних стабилизација по државама (табели 6.3.) [17].

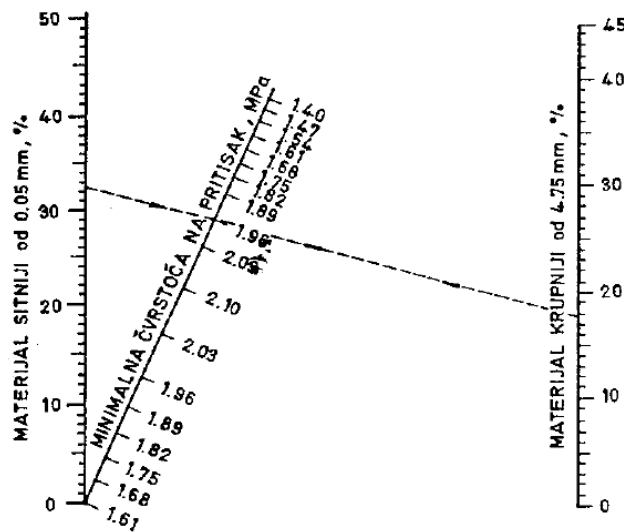
Дијаграм 6.2. – Минимална прописана количина везива за израду стабилизација [kg/m³] у појединим европским државама [17]

Табела 6.3. – Захтјеви појединих европских земаља за примјену цементних стабилизација са аспекта механичких карактеристика (уз употребу 100kg/m^3 цемента) [17]

Држава	Чврстоћа при притиску [MPa]		Индиректна затезна чврстоћа [MPa]	
	на 7 дана	на 28 дана	на 7 дана	на 28 дана
Словенија	$\geq 2,5$ –4,5	-	-	-
Аустрија	$\geq 2,5$ –3,5	-	-	-
Њемачка	-	$\geq 3,5$	-	-
Италија	$\geq 3,5$ –6,5	-	$\geq 0,35$	-
Швајцарска	$\geq 2,0$ –4,0	-	-	-
Хрватска	$\geq 1,5$ –5,5	$\geq 2,5$ –6,0	-	-

У цементним стабилизацијама је дозвољена примјена хидрауличних везива која су дата у стандардима: SRPS B.C8.022:1976 [C8], SRPS B.C8.023:1982 [C9], SRPS B.C8.024:1964 [C10], SRPS B.C1.011:2001 [C11] и SRPS EN 197-1:2010 [C12]. Поред тога, могу се примијенити и друга хидраулична везивна средства уколико се докаже њихова могућност примјене (иако не подлијежу наведеним стандардима), као што су нпр. нека специјализована везивна средства (*NovoCrete, InfraCrete, Latex...*) [58], [90].

Аутор P.Braunović [7] је анализирао вриједности потребних чврстоћа при притиску, у зависности од гранулације материјала и то првенствено приликом стабилизација ситнозрних материјала цементом (графикон 6.7.).



Графикон 6.6. – Минималне 7-дневне захтјеване чврстоће при притиску [7]

Приликом пројектовања цементних стабилизација неопходна је и примјена стандарда којима се одређује максимална збијеност мјешавине, тј. Proctor-ов опит (SRPS EN 13286-1:2012 [C13], SRPS EN 13286-2:2012 [C4], SRPS U.B1.038:1997 [C14]).

Овакве мјешавине могу се третирати као бетонске мјешавине специјалне намјене (као и тзв. мршави бетони), па се за справљање узорака може користити вода из градског водовода која испуњава услове дефинисане стандардом за израду цементних стабилизација (SRPS U.E9.024:1980 [C2]), а то су:

- рН фактор већи од 6,0;
- Садржај сулфата (SO_4) мањи од 2700mg/l воде;

- Количина хлор-јона садржаних у води не прелази 300mg/l воде;
- Показатељ органских састојака (лимунске киселине, шећера и др.) изражен као утрошак калијум-перманганата ($KMnO_4$) по методи оксидације није већи од 200mg/l воде и
- Укупна количина соли, изражена као суви остатак, није већа од 500mg/l воде.

Списак свих стандарда, који су коришћени у овом истраживању и који се примјењују приликом пројектовања и извођења цементних стабилизација дат је на крају дисертације.

7. РЕЦИКЛАЖА АСФАЛТНИХ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА

7.1. Типови и подјеле рециклаже

Са повећањем рециклаже асфалтних (флексибилних) коловозних конструкција, у другој половини XX-ог вијека, развијале су се и технологије за њено извођење. С тим у вези настале су и подјеле рециклаже на основу различитих критеријума. Неке од најчешћих подјела су према: врсти везива и агрегата, начину справљања мјешавине (тј. температури при којој се процес обавља), мјесту на којем се рециклажа изводи, поступку додатка везива и друго.

7.1.1. Подјела према врсти везива

Једна од основних подјела у поступку рециклаже асфалта је према врсти везива које се додаје рециклираном агрегату, при справљању нове мјешавине. Као везиво се користе битуменска или хидраулична везива. Код битуменских везива најчешћа је примјена битуменске емулзије или пјенушавог битумена, док је код хидрауличних везива најчешћа употреба цемента и креча, самостално или у комбинацији. Као што је раније напоменуто, у новије вријеме све је већа употреба летећег пепела и гранулисане згуре, као замјене за дио неког од хидрауличних везива. Избор хидрауличног везива углавном зависи од врсте агрегата који се стабилизује (поглавље 6.3.1.).

7.1.2. Подјела према врсти агрегата

Стари асфалтни застор, након скидања са постојеће саобраћајнице и поступка рециклаже, постаје агрегат за справљања нових мјешавина. Због начина на који настаје овај агрегат се назива и стругани асфалт. Нове мјешавине, у зависности од будуће намјене, поред струганог асфалта, могу да садрже и разне типове природног агрегата (шљунка или дробљеног каменог агрегата), као и локалног материјала тла [7]. Стабилизација локалног тла у комбинацији са везивом и рециклираним асфалтом (или природним материјалима) углавном се ради код слабоносивог тла основе пута, тј. за побољшање карактеристика постелеице. Рециклирани асфалт се може користити и као основни агрегат у поступку израде нових слојева (углавном за израду битуменизованих носећих слојева) или као замјена за дио природног агрегата, уколико се нпр. изводе стабилизације. Стругани асфалтни застор се може примијенити при изради нових или реконструкцији постојећих коловозних конструкција.

7.1.3. Подјела према температури справљања мјешавине

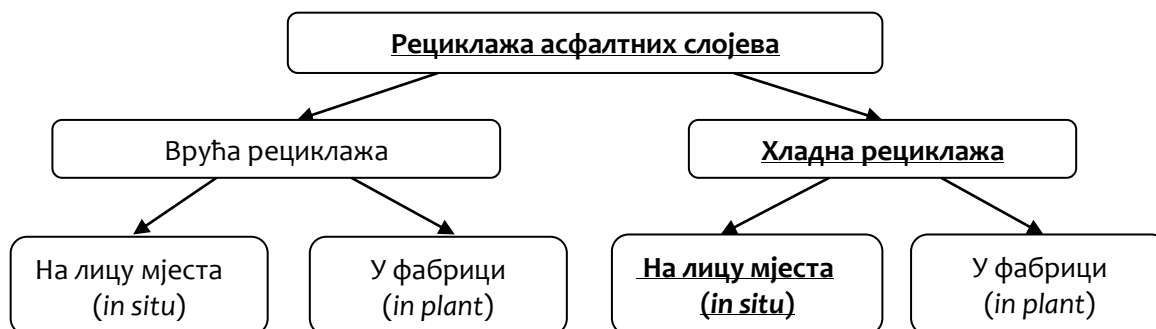
Начин справљања мјешавине првенствено је везан за температуру при којој се везују њени компонентни материјали. Температура везивања компонентних материјала је посебно битна за мјешавине које имају неко од битуменских везива и у зависности од тога се и дефинише. За мјешавине које садрже цемент или неко друго

хидраулично везиво примјењују се препоруке које се користе и за температуре справљања класичних бетонских мјешавина.

7.1.4. Подјела према мјесту рециклаже

Поред претходно наведених, једна од најбитнијих подјела у процесу рециклаже асфалта је и подјела према мјесту гдје се рециклажа изводи и начину на који се нова мјешавина справља. Рециклажа асфалта може се обављати на постојећој коловозној конструкцији (поступак стругања на лицу мјеста – *in situ*), или у централном посторојењу (*in plant*), при чему се стари асфалт допрема са неке од депонија или директно са мјеста гдје се струже. Рециклажа поступком *in situ* је једноставнија и доста чешћа у пракси. Мјесто справљања мјешавине одређује се у склопу технолошког поступка рециклаже. Подјела рециклаже асфалта у зависности од температуре и мјеста справљања мјешавине приказана је на шеми 7.1.

Шема 7.1. – Типови рециклаже асфалтних слојева у зависности од темертатуре на којој настаје нова мјешавина и мјеста гдје се она справља



У овом раду је анализиран поступак хладне рециклаже асфалта, који се обавља на лицу мјеста (*Cold In-place Recycling – CIR* [4]).

7.2. Основни постулати и подручје примјене хладне рециклаже

Хладна рециклажа коловоза је поступак поновне употребе материјала из оштећених асфалтних слојева коловозне конструкције, а да се у процесу производње нове мјешавине постојећи слој не загријава. Наведена технологија дубоке рециклаже развијена је крајем 80-их година XX-ог вијека, као поступак за рехабилитацију коловоза. Развој ове технологије био је омогућен прије свега развојем одговарајуће опреме, која на лицу мјеста може да уситни постојећи материјал из горњих слојева коловозне конструкције, до дубине веће од 20cm [22]. Хладна рециклажа асфалта се често поистовјећује са појмом рециклажа на пуној дебљини, тј. *FDR* поступак [4]. У овом поступку се рециклирају и материјали испод постојећих асфалтних слојева коловозне конструкције, а то су углавном невезани камени материјали. Прије развоја технологије дубоке рециклаже по хладном поступку, примјена расположивих рјешења је углавном била ограничене употребе.

Хладно рециклирање је прихватљиво рјешење у већини случајева обнове асфалтних застора и механички збијених невезаних слојева (макадамски путеви). Крајњи производ хладне рециклаже коловоза је хомогени слој коловозне

конструкције, који у зависности од употребе може бити доњи или горњи носиви слој. Хладно рециклирани асфалтни застор обично се уграђује у слојеве дебљине од 100 до 300mm. Битно је напоменути да се хладно рециклирана асфалтна мјешавина по свом саставу битно разликује од мјешавина справљених у врућем поступку рециклаже.

Поред наведене примјене, рециклирани асфалтни застор налази и примјену код градње привремених саобраћајница, паркинга, путева нижег ранга и некатегорисаних путева, при чему има функцију површинског невезаног слоја (застора). Такође, није занемарљива ни примјена рециклираног асфалта код израде нових банкина или побољшања стања постојећих (које се оштећују током периода експлоатације пута, усљед испирања материјала из истих).

7.3. Рециклирани асфалт као агрегат у изради нових коловозних конструкција

Рециклиран асфалт је материјал сиве, до тамносиве боје, који због присуства битумена у себи, у контакту са водом добија црну боју. Садржај битумена у рециклираном асфалту варира, у зависности од количине додатка битумена у поступку справљања првобитног асфалтног слоја. Због понашања битумена у контакту са водом рециклирани асфалт се може третирати као хидрофобан материјал, а самим тим му је и упијање воде мање него код неких других камених материјала, о чему треба водити рачуна у процесу уградње слојева са рециклираним асфалтом. Такође, упијање воде код рециклираног асфалта зависи и од поријекла основног каменог материјала. Ту су углавном заступљени кречњачки или еруптивни агрегати, чија упијања воде се знатно разликују. Приказ рециклираног асфалта, који се може користити као агрегат за израду стабилизација, приказан је на сликама 7.1. и 7.2.



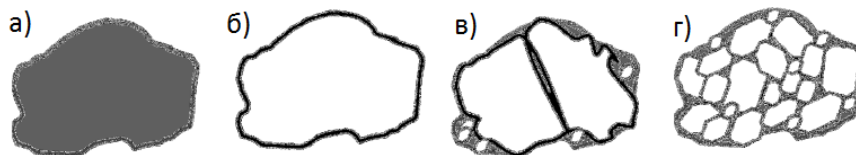
Слика 7.1. – Рециклирани асфалтни агрегат [14]



Слика 7.2. – Рециклирани асфалт са локације: Иришки венац (Државни пут 1Б реда (број 21), Нови Сад-Рума), који је коришћен у овом истраживању

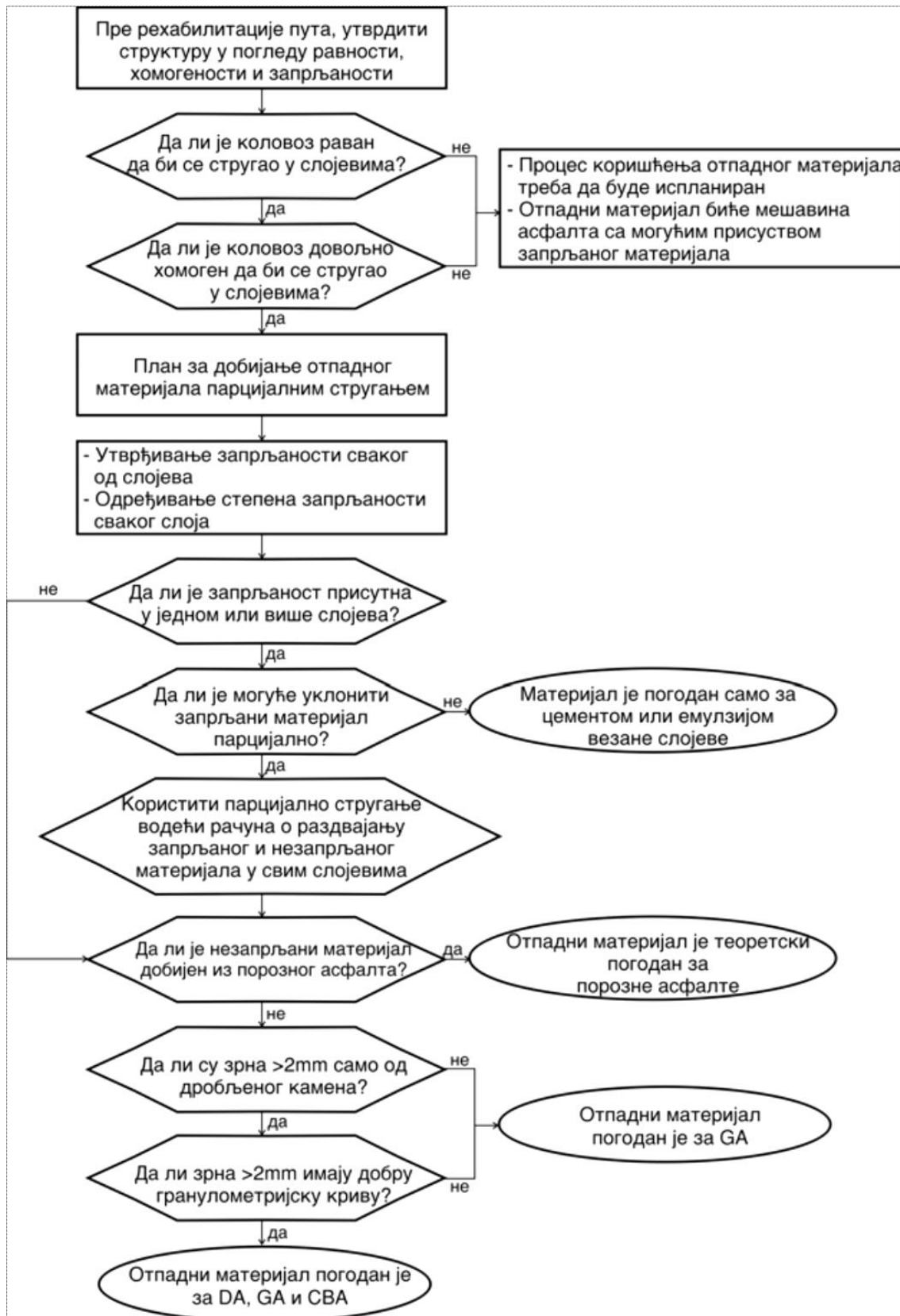
Учешће рециклираног асфалтног агрегата у стабилизацијским мјешавинама може да варира, при чему се у већини истраживања не користи као једини агрегат, већ се додаје и природни камен материјал. Ово истраживање је базирано на примјени веће количине природног агрегата – шљунка и могућностима његове замјене са рециклираним асфалтом, уз примјену различитих стабилизатора. Квалитет рециклираног асфалта у изради цементних стабилизација није дефинисан стандардом SRPS U.Еg.024:1980 [С2].

Физичке и механичке карактеристике мјешавина са рециклираним (струганим) асфалтом у многоме зависе од карактеристика зрна агрегата. Наиме, зрна струганог асфалта су углавном хетерогеног састава, а састав им варира од зрна која имају само очврсли стари битумен, преко зрна која имају комбинацију природног агрегата (који је коришћен за справљање асфалтних мјешавина) и битуменског матрикса у различитим омјерима, до зрна која се састоје само од природног каменог агрегата (слика 7.3.). Пожељнији агрегат је свакако онај који има више каменог агрегата у себи, јер углавном има боље механичке карактеристике (носивост) и бољу адхезију са цементом (у стабилизацијама). Стругани асфалт је настао у поступку дробљења, па је облик зрна агрегата приближнији облику дробљеног каменог агрегата, него шљунка. Уколико је могуће било би добро познавати поријекло каменог материјала у старим асфалтним слојевима који се рециклирају, јер се на основу тога могу лакше објаснити и особине рециклираног асфалтног агрегата.



Слика 7.3. – Нехомогеност рециклираног асфалта, а) чисто битуменско зрно, б) зрно од природног каменог агрегата, в) зрно са доминантним крупнијим природним агрегатом, г) зрно са приближно истим учешћем природног каменог агрегата и старог битумена [26]

У алгоритму 7.1. дате су препоруке при коришћењу старог асфалтног застора, за различите слојеве коловозне конструкције [19]. Анализом алгоритма 7.1. се, између осталог, може закључити да су критеријуми квалитета постојећих асфалтних слојева (првенствено мислећи на запрљаност материјала) доста блажи у случајевима када се рециклирани асфалтни застор користи као носећи стабиловани слој, него када се рециклажа примјењује за поновну израду асфалтног застора.

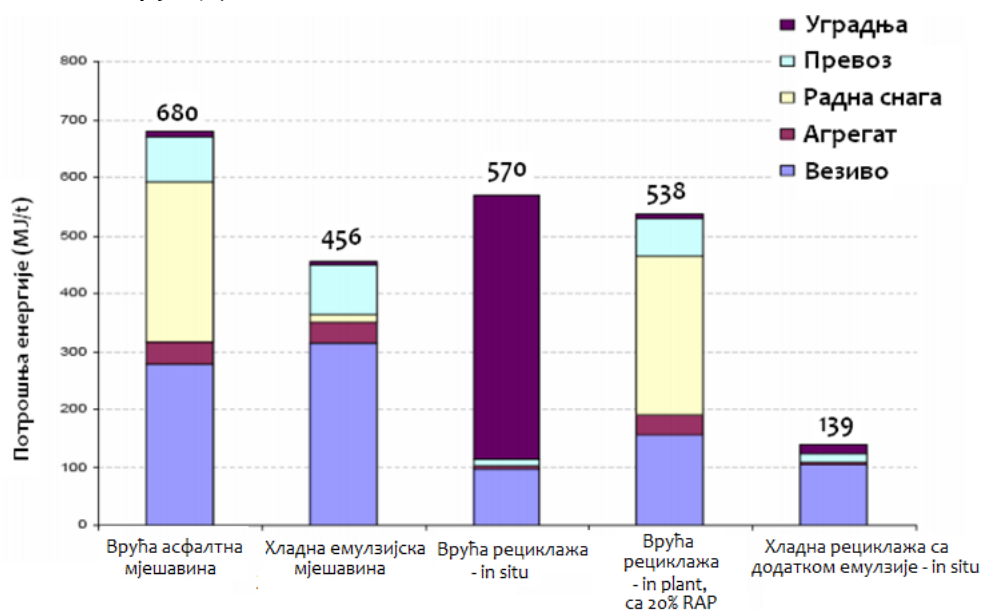


Алгоритам 7.1. – Могућности рециклаже постојећег асфалтног застора и поновне употребе струганог асфалта [19]⁷

⁷ DA – Затворена асфалтна мјешавина (хабајући слој); GA – Битуменизирани шљунак (носећи слој); CBA – Цементна стабилизација (носећи слој)

7.3.1. Рециклирани асфалт као материјал у енергетским и еколошким анализама

Америчка фирма FMG (која се бави рециклажом асфалта) је у свом истраживању [27] анализирали могућности поновне употребе рециклираних асфалтних агрегата, са енергетског и еколошког аспекта, који у посљедње вријеме попримају све већи значај, посебно у развијеним земљама. Потрошња енергије код различитих типова рециклаже је битан аспект при одабиру оптиманог рјешења за рехабилитацију и реконструкцију путева. На дијаграму 7.1. је приказан утрошак енергије код различитих типова израде нових и реконструкције постојећих коловозних конструкција.



Дијаграм 7.1. – Потрошња енергије [MJ/t] за различите типове реконструкције путева [27]

Анализом дијаграма 7.1. може се закључити да је далеко најмања потрошња енергије код хладне рециклаже асфалта поступком *in situ*. Притом се највећа потрошња енергије односи на употребу везива, а то везиво у наведеном истраживању је било битуменског поријекла. Такође, занимљиво је направити поређење између потрошње енергије при уграњи рециклираног асфалта технологијама вруће и хладне рециклаже, при чему је утрошак енергије код вруће рециклаже многоструко већи. Из претходно наведеног, изводи се закључак да употреба рециклираног асфалта са додатком цемента (или других хидрауличних везива) има још мањи утрошак енергије од наведених случајева, па самим тим примјена овог типа рециклаже има и највећу енергетску и еколошку оправданост.

7.4. Везивни материјали у поступку рециклаже и подобности њихове примјене

У зависности од мјеста гдје се рециклажа изводи, (поступак *in situ* или *in plant*), као и од температурног третмана компонентних материјала, зависи и избор везива које се користи у овој технологији (табела 7.1.). Истраживањем ауторке Д.Дрндарски [19] у анализи примјене везива и одабира технолошког поступка, били су обухваћени

путеви различитог ранга. Из табеле 7.1. се може закључити да је у хладној рециклажи асфалта, поступком *in situ*, пожељна употреба цемента и осталих хидрауличних везива. Циљ наведеног истраживања је био да се смање депоније великих количина старог асфалта и анализира могућност његове поновне употребе на путевима у Србији, уз присуство различитих врста везива и технологија рециклаже.

Табела 7.1. – Препоруке за избор везива при рециклажи постојећег коловозног застора различитим поступцима рециклаже (+ препорука примјене, - примјена није пожељна) [19]

Везиво		Температура рециклаже		Мјесто рециклаже	
Групе везива	Врсте везива	Хладан поступак	Врућ поступак	Поступак <i>in situ</i>	Поступак <i>in plant</i>
Битумени	Угљоводонични	+	+	+	+
	Емулзија	+	-	+	-
Емулзија и портланд цемент		+	-	+	+
Хидраулична везива	Цемент	+	-	+	+
	Згура	+	+	+	+
	Креч	+	-	+	-
	Летећи пепео	+	+	+	+

Примјена хидрауличних и битуменских везива у међусобној комбинацији је позната дуги низ година. У тој комбинацији примарно везиво је битуменско. Аутори *Y.Niazi, M.Jalili* [28] испитивали су могућност употребе рециклираног асфалтног агрегата у новим мјешавинама, при чему су као основно везиво користили битуменско везиво (емулзију), а као додатак су користили хидраулична везива, између осталог и цемент (као пунило), у количини од 2% мас. Доказано је да додатак цемента утиче на побољшање физичких и механичких карактеристика мјешавина. Аутори су радили испитивања тих карактеристика на битуменским мјешавинама са и без додатка цемента и направили упоредну анализу. Тако је за мјешавину без додатка цемента вриједност индиректне затезне чврстоће (*ITS*) износила 244,6кПа, а за мјешавину са 2% цемента ова чврстоћа је износила 418,9кПа. Разлика у модулима еластичности је такође била значајна – без додатка модул еластичности износио је 1,19МПа, а са 2% додатка цемента 2,09МПа.

7.4.1. Критеријуми за избор везива код рециклираног стабилизованог слоја

Подјела хладно рециклираних мјешавина може се дефинисати и у зависности од комбинације везивних средстава. Поред чврстоћа при притиску и индиректних затезних чврстоћа, *Poisson*-ов коефицијент и модули еластичности зависе од врсте везива. Мјешавине са доминантним битуменским везивима имају 28-дневне модуле еластичности између 2.000 и 5.000МН/м² (са додатком 5% везива, при температури њега од 25°C), док мјешавине са доминантним хидрауличним везивом имају, модуле еластичности између 7.000 и 12.500МН/м² [22]. Према томе, хладно рециклиране мјешавине се могу справљати са чисто угљоводоничним везивом, чисто хидрауличним везивом или са њиховом међусобном комбинацијом [28][2]. Мјешавине справљене комбинацијом везива могу имати карактеристике блиске хидрауличним везивним носећим слојевима или асфалтним слојевима, у зависности од међусобног односа везивних средстава [22].

Приликом избора типа везива, за стабилизацију струганог асфалта по хладном поступку, могу се узети у обзир сљедеће препоруке:

- Мјешавине са доминантним битуменским везивом погодније су код рециклажа слојева са великим удјелом асфалта, односно када у материјалу који се стабилизује има много битуменом обавијених зрна. Такви материјали углавном имају добар гранулометријски састав или то постиже додавањем одговарајућих фракција. Претпоставка је да доњи слојеви (подлога) имају довољну носивост и
- Мјешавине са доминантним хидрауличним везивом има већи ефекат примјене код материјала са неповољним гранулометријским саставом (нпр. више ситнијих фракција) и у случајевима када корекције гранулометријског састава нису могуће. Поред тога, хидраулична везива у стабилизацијама се користе у случају слабе носивости подлоге. Приликом справљања мјешавине, и у једном и у другом случају, потребно је остварити што бољу хомогеност компонентних материјала [22].

7.4.2. Предности и недостаци примјене цемента као везива у хладној рециклажи асфалта

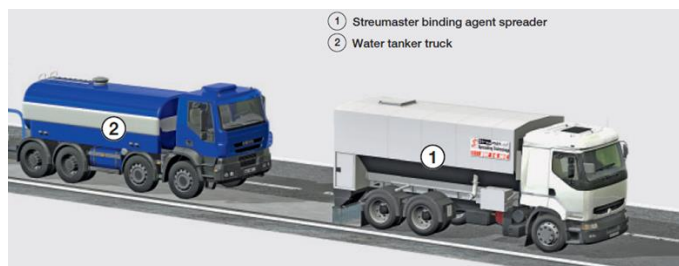
У раду *Љ. Uzelca i grupe autora* [22] дата су упутства и технички услови за дубоку хладну рециклажу асфалта, на основу инжењерског искуства и информација из иностраних извора. Аутори наводе да је у овој радној верзији упутства остављен простор и за будућа истраживања, јер ова технологија у Србији раније није била у већој примјени. Наведене су могућности употребе различитих агрегата и везива у процесу рециклаже асфалтног агрегата, гдје се посебна пажња посветила типу везива (битуменска и хидраулична везива). Постоји низ предности и недостатака примјене одређеног типа везива у рециклажи, а у табели 7.2. су дате карактеристике цементних везива, које треба познавати при одабиру врсте везива.

Табела 7.2. – Предности и недостаци употребе цемента у рециклажи асфалтних слојева [22]

Могућности примјена цемента	
Предности	Недостаци
<ul style="list-style-type: none"> • Распоживост – цемент се углавном лако може набавити и допремити до градилишта; • Цијена – у поређењу са битуменом, цемент је јефтинији; • Апликативност – цемент се лако може разастирати и доzirати разастирачима или пумпама (као водена суспензија), па чак и ручно; • Прихватљивост – цемент је материјал који има широку примјену у грађевинарству, а његове спецификације и методе испитивања су добро познате; • Значајно повећава чврстоћу код већине основних материјала; • Смањује осјетљивост материјала на воду. 	<ul style="list-style-type: none"> • Појава прлина услед скупљања при везивању је неизбежна, али се може умањити; • Повећава крутост слоја, што умањује отпорност на замор; • Захтјева се одговарајућа нега послје уграђивања; • Прерано пуштање саобраћаја може оштетити коловозну површину.

7.4.3. Поступак додатка хидрауличних везива

Технологија извођења стабилизација коловозних конструкција у многоне зависи од везива које се користи у мјешавинама. Угљоводонична везива, као што су битуменска емулзија и пјенушави битумен, су осјетљивији на температурне промјене од хидрауличних везива. Поступак додавања хидрауличних везива зависи од начина поступка израде цементних стабилизација. Свјетске фирме које су специјализоване за рециклажу асфалтних коловоза поступком *in situ*, у возовима за рециклажу имају и машине са аутоматским дозаторима за хидраулична везива и воду (слика 7.4.) [13].



Слика 7.4. – Специјализована машина за разастирање цемента (десно) и цистерна за воду (лијево) [13]

Аутори Lewis, Collings су се у свом истраживању [29] бавили начином извођења хладне рециклаже. Аутори су навели да се код рециклаже асфалта може додати цемент, као стабилизатор, најчешће у количини 2-4%*mas*. Постоје три начина додавања цемента код овог типа рехабилитације и реконструкције путева:

- 1) Цемент се разастире у прашкастом облику (*dry cement*) по површини коловоза (слика 7.4. и 7.5.), прије наилаaska машине за рециклирање. Потом, рециклер прелази преко површине коловоза прекривене цемента и мијеша га са основним рециклираним агрегатом. Приликом додавања цемента у облику праха треба водити рачуна да се уградња не обавља када је вријеме вјетровито, јер постоји могућност распршивања цемента (слика 7.5.);
- 2) Вода и цемент се мијешају у специјализовано дизајнираној комори, а потом се у муљевитом облику (*cement slurry*) директно доводе у главну комору за мијешање са агрегатом или се наносе на површину која се рециклира (слика 7.6.) Овакав начин омогућује тачно одређивање количине потребног цемента и воде и губици су сведени на минимум (што у претходном примјеру није случај) и
- 3) Употреба специјализованих цементних везива која се директно додају у посебну комору рециклера.



Слика 7.5. – Додатак цемента у прашкастом облику (*dry cement*) [77]

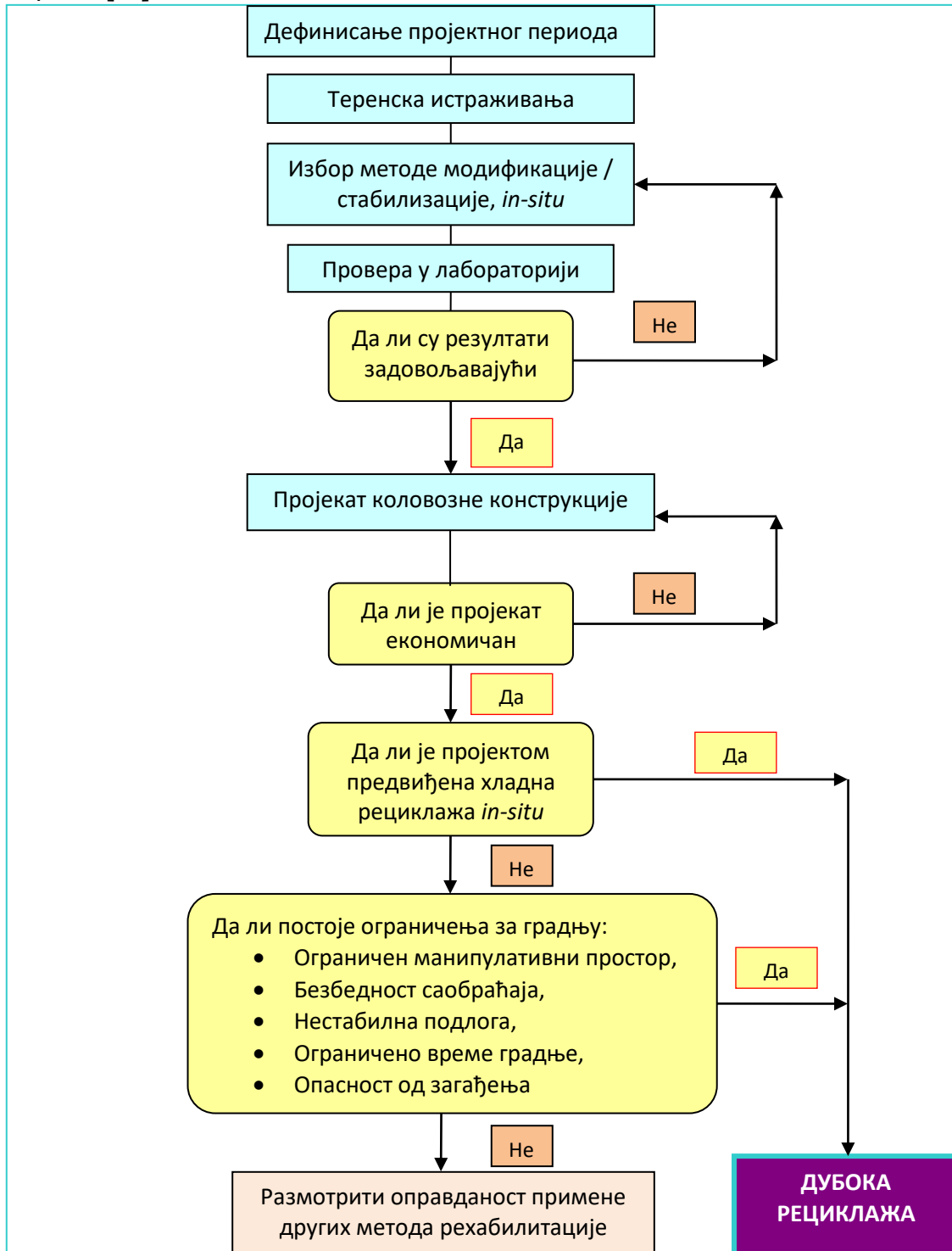


Слика 7.6. – Додатак цемента и воде у облику муља (*cement slurry*) [77]

Поред претходно наведених начина додатка цемента у поступку рециклаже познат је и случај мијешања везива са минералним агрегатом у одговарајућој мијешалици [22], који је од свих поменутих најрјеђе примјењен у пракси.

7.5. Могућност примјене технологије хладне рециклаже у поступку реконструкције коловозних конструкција

Избор одговарајућег поступка реконструкције коловозне конструкције и разрада алгоритма његове примјене су једни од основних ставки у пројектовању рехабилитације и реконструкције путева. У алгоритму 7.2. је дата анализа поступка рехабилитације коловозне конструкције, примјеном поступка хладне рециклаже асфалта [22].



Алгоритам 7.2. – Рехабилитација коловозне конструкције примјеном поступка хладне рециклаже асфалта [22]

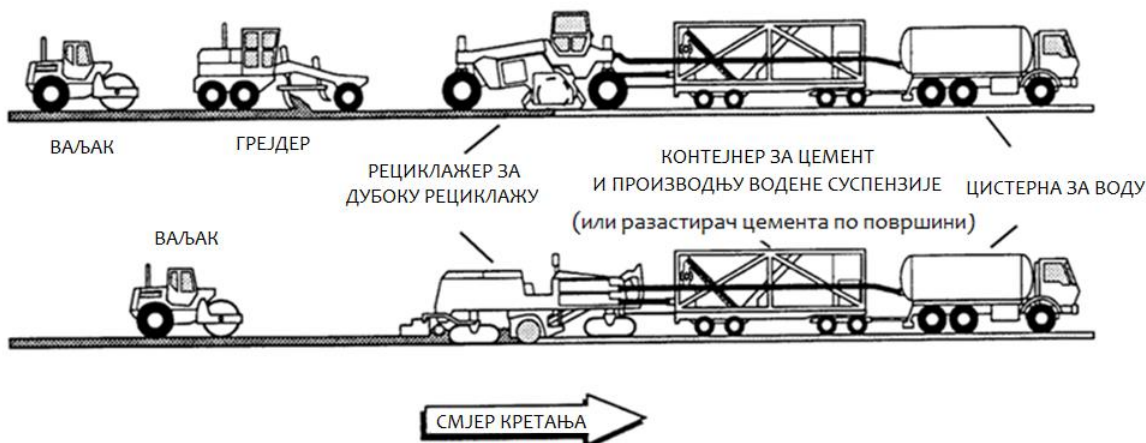
7.6. Технологија извођења хладне рециклаже – поступак уградње цементне стабилизације

Хладна рециклажа је добила име по температури на којој се мјешавина справља и уграђује. Та температура је много нижа од температуре при којој се изводи врућа рециклажа и има вриједности температуре околине (при којима се справљају и класичне бетонске мјешавине). Поступак хладне рециклаже асфалта пролази кроз више фазе, а то су:

- Скидање постојећег асфалтног застора (стругање) специјализованим машинама;
- Дробљење и уситњавање старог асфалта;
- Гранулисање асфалтног агрегата, који ће се користити за израду стабилизације нове коловозне конструкције;
- Додатак и хомогенизација са цементом, водом и евентуално новим, додатним агрегатом;
- Полагање цементом стабилизованог агрегата (који ће бити подлога за нове асфалтне слојеве);
- Разастирање и збијање стабилизације;
- Нивелација стабилизованог слоја и
- Заштита слоја цементне стабилизације са битуменском емулзијом и припрема за израду нових асфалтних слојева [22].

Рециклирани асфалтни агрегат се, поред наведене уградње поступком *in situ*, са истом успјешности може примијенити и при градњи стабилизација на новим коловозним конструкцијама. Притом се рециклирани агрегат узима са неке од његових депонија. Те депоније су настале стругањем старог застора или дробљењем асфалтних плоча, које се након рушења старог коловоза одлажу, при чему се други случај мање примјењује у пракси. Сви наведени типови рециклаже имају посебне технологије справљања и уградње мјешавина. У наставку је дат скраћени поступак хладне рециклаже асфалта поступком *in situ*.

Поступак извођења хладне рециклаже *in situ* се данас углавном обавља уз помоћ воза за рециклажу. Воз за рециклажу се најчешће састоји од: рециклера (машине која на лицу мјеста струже постојећи оштећени коловозни застор, до одређене дубине, и користи га као агрегат за израду нове мјешавине), контејнера за цемент (или неко друго везиво) и цистерне за воду. Иза поменутог воза се налазе грејдер и/или ваљак, који имају улогу разастирања, равнања и додатног збијања наведеног слоја. Смјер кретања воза за рециклажу, шематски приказ и један случај из праксе наведеног поступка је дат на сликама 7.7., 7.8. и 7.9..



Слика 7.7. – Шематски приказ два начина извођења хладне рециклаже асфалта са додатком цемента [22]



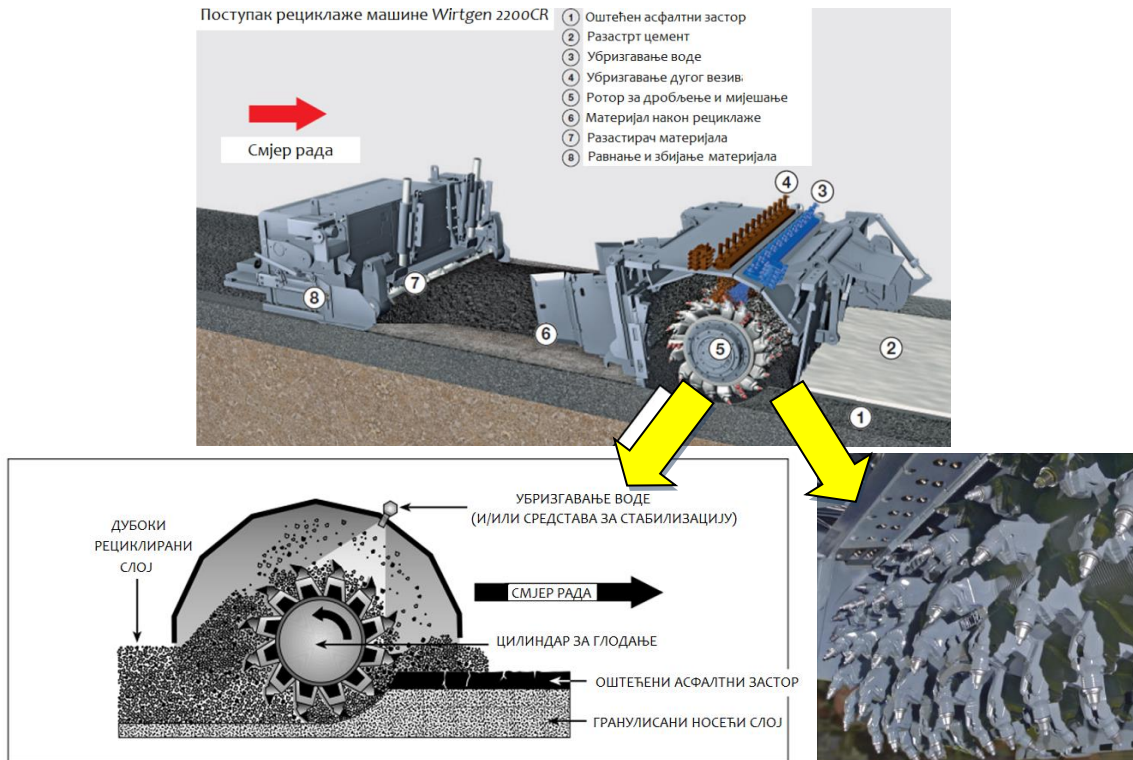
Слика 7.8. – Различит приказ технологија стругања старог асфалта и справљања нове цемента стабилизоване мјешавине [93]



Слика 7.9. – Приказ воза за рециклажу на градилишту [30]

Наведени тип рециклаже асфалтног застора се сматра за дугорочну реконструкцију коловозне конструкције. Код рјешавања проблема везаних за реконструкцију коловоза треба напоменути да та оштећења углавном нису везана за оштећења материјала унутар коловозне конструкције, већ за слојеве конструкције као цјелине. Рециклажа, као и генерално реконструкција коловоза, треба да се обавља до дубине до које се сматра да се оштећење простире. Специјализоване машине које се користе у овом поступку хладне рециклаже и фирме за њихову производњу, у задње вријеме биљеже значајан технолошки напредак. Возови

(стројеви) за рециклажу развили су се током посљедњих година, од модификованих глодалица и стабилизатора тла, па до данашњих претходно поменутих машина. Будићи да је радна способност ових стројева таква да могу рециклирати веће дебљине коловоза у једном пролазу, те машине су на гусјеницама или на великим пнеуматичима. Централни дио строја за рециклажу је ротор за глодање и мијешање, опремљен великим бројем специјалних алата (слика 7.10.).



Слика 7.10. – Приказ поступка рециклаже коловозне конструкције, попречни пресјек ротора рециклера и ударне игле ротора [13]

Цилиндар у стандардном случају ротира према горе, уситњавајући материјал у постојећем асфалтном застору, коме се у поступку израде стабилизације додаје везивно средство.

Поред стандардног поступка уградње цементних стабилизација (испод асфалтних слојева) позната је и примјена цементних стабилизација у изради површинских слојева коловозних конструкција, углавном код путева нижег ранга (слика 7.11.).



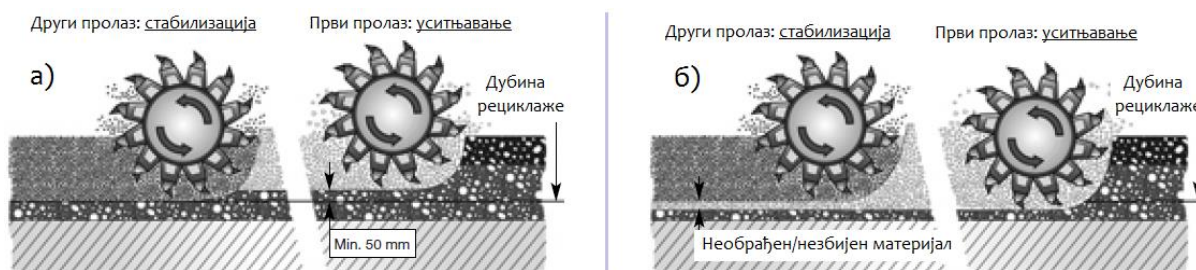
Слика 7.11. – Коловозна конструкција са површинским слојем цементне стабилизације [30]

Приликом извођења хладне рециклаже потребно је водити рачуна о бројним технолошким ограничењима [22]. Неки од предуслова правилног извођења

цементних стабилизација у поступку рециклаже су: одговарајућа равност доњих носећих слојева (који се не рециклирају) и површинских слојева стабилизације, контрола нивелације површина прије и након поступка рециклаже, избор оптималне гранулације агрегата (агрегати са малим бројем фракција се теже збијају), избор врсте и учешћа везива, одређивање оптималне количине воде за постизање максималне збијености, израда радних спојница, заштита и нега изведеног слоја цементне стабилизације, праћење појаве настанка путкотина и друго.

7.7. Дубина рециклирања асфалтних коловоза

У анализи поступка рециклирања коловозних конструкција битан аспект је и дефинисање дубине слојева који се рециклирају. Дебљина и квалитет постојећих асфалтних слојева битно утиче на брзине кретања машина за рециклажу. Ако су дебљине асфалтних слојева веће рециклажа може значајно да се успори, јер су карактеристике материјала који се рециклира такве да је потребно више времена за његово стругање и уситњавање. У случају да је постојећи коловоз значајније оштећен и има пуно ударних рупа, рециклажа ће се брже обављати. Такође, у току рециклаже се мора водити рачуна да дубина рециклаже не обухвата слојеве који имају малу носивост и велику запрљаност материјала (постељица и насип). Рециклажа и стабилизација могу да се обављају у једном или два пролаза рециклера. Притом, ако се рециклажа изводи у два пролаза, други пролаз мора да обухвати комплетан материјал који је уситњен у првом пролазу, као и минимално 50mm постојећег носећег слоја. На слици 7.12. су приказани случајеви правилног и неправилног избора дубине рециклирања, када се рециклажа обавља у два пролаза рециклера [13].



Слика 7.12. – а) Одговарајућа и б) неодговарајућа дубина рециклаже у два пролаза рециклера (уситњавање и стабилизација) [13]

Приликом рециклирања коловозних конструкција потребно је на самом почетку обавити рециклирање пробне дионице, да би се утврдило стварно понашање појединачних материјала и понашање комплетне конструкције. У току самог процеса потребна је детаљна анализа гранулације агрегата и учешће других материјала у новој мјешавини, као и стална контрола збијања стабилизације. Такође, потребно је направити поређење теренских резултата испитивања са лабораторијским резултатима физичко-механичких карактеристика стабилизација и на крају успоставити корелацију између њих.

Поред наведеног поступка рециклаже асфалтних слојева, рециклажа може да се обавља и код неvezаних слојева, при чему је претходно потребно скинути асфалтни застор. Такав случај рециклаже и стабилизације носећих слојева приказан је на слици 7.13., при чему се, након скидања асфалтног застора, разастире хидраулично везиво по неvezаном слоју, које се након тога мијеша са рециклираним

материјалном из доњих слојева и формира стабилизацију, као подлогу за нове асфалтне слојеве.



Слика 7.13. – Рециклажа неvezаних слојева коловозне конструкције у циљу повећања носивости [31]

7.8. Утицајни фактори и ограничења у поступку рециклаже асфалтних коловоза

Много фактора утиче на успјешност извођења рециклаже асфалтних слојева и на анализу оправданости њене употребе. Неки од тих фактора су:

- 1) Постојећи асфалт (који се рециклира) мора да испуни функционалне захтјеве;
- 2) Материјал за рециклажу не смије да има краћи животни вијек него што је животни вијек коловозне конструкције;
- 3) Трошкови одржавања не смију да пређу трошкове улагања;
- 4) Енергетски аспект је један од основних код анализе могућности избора поновне употребе материјала (поглавље 7.3.1.);
- 5) Осигурање квалитета конструкције уз употребу рециклираног материјала;
- 6) Тржишна цијена рециклираног материјала мора бити нижа од вриједности природног материјала и
- 7) Поступак рециклирања мора испунити еколошке стандарде и не смије угрозити здравље људи и животну средину.

За разлику од вруће рециклаже асфалтног застора, наведени тип реконструкције путева побољшава носивост комплетне коловозне конструкције. Правилним избором учешћа рециклираног агрегата, учешћа постојећег агрегата из коловозне конструкције, као и евентуалног додатка новог агрегата може се постићи оптималан гранулометријски састав, који ће играти битну улогу у одређивању карактеристика цементном стабилизованог носећег слоја.

Битан аспект при анализи могућности примјене цементних стабилизација код реконструкције путева је положај нивелете пута, тј. дозвољена висина њеног одступања. Тај проблем је посебно изражен у градским условима, јер су у том случају ограничења већа, а она се углавном односе на уклапање саобраћајница у постојеће стање – тј. уклапање у околне ивичњаке, стазе, путеве (улице) са којима се укршта

дата саобраћајница, паркинг просторе и слично. Наиме, нова коловозна конструкција, поред асфалтних слојева има и нови слој цементне стабилизације који, уколико се користи комплетан материјал из постојеће коловозне конструкције, условљава повећање укупне висине коловозне конструкције. Осјетљивост промјене висине нивелете је мања на ванградским условима, јер су и ограничења мања и углавном се односе на уклапање у постојеће стање са приступним путевима. Из претходно наведених разлога некада је приликом реконструкције саобраћајница потребно уклонити вишак материјала (агрегата) који настаје током израде цементних стабилизација (наведеним поступком рециклаже), јер би се у супротном нивелета повећала (слика 4.11.).

Реконструкција коловоза примјеном наведеног типа рециклаже асфалта може са великом оправданости да се обавља на већини флексибилних коловозних конструкција. Као што је речено у поглављу 3.6., велики број асфалтних путева у Србији је у лошем стању и њихова реконструкција је неопходана. Реконструкција поступком рециклаже асфалта доноси посебне економске уштеде код путева који се налазе далеко од асфалтних база или у крајевима који су сиромашни са резервама природног каменог агрегата. У случају да се цементна стабилизација са рециклираним асфалтом ради у новим коловозним конструкцијама (што је рјеђи случај) потребно је урадити економску анализу трошкова транспортa и употребе других типова механизације.

Прије поступка извођења рециклаже постојећи асфалт треба очистити од свих нечистоћа, јер агрегат настао рециклажом не смије да их садржи. Приликом извођења стабилизације са рециклираним агрегатом, између осталог, треба водити рачуна да постојећа подлога за цементну стабилизацију има добру носивост. Након уградње стабилизације, преко ње је потребно нанијети заштитни слој са битуменском емулзијом. Неки од фактора који утичу на физичко-механичка својства оваквих тзв. лоших бетона су: количина, врста и класа цемента, проценат додатка других везива, учешћа и гранулације рециклираног и додатног агрегата, сува запреминска маса агрегата, збијеност, додаток воде...

Аутори J.J.A. Gerrardu, C.F. Hendriks [6] у свом раду анализирају ограничења у поступку рециклирања, која је потребно детаљно сагледати и дефинисати прије него се крене у процес пројектовања и извођења. Одговор на ово питање треба тражити у стању и особинама постојеће коловозне конструкције која се рециклира. Релевантне хемијске, физичке и механичке карактеристике старог асфалтног агрегата морају се одредити претходним лабораторијским испитивањима, а током саме реконструкције треба обратити пажња и на искуствене резултате. Материјали који учествују у рециклажи морају одговорити функционалним захтјевима, јер ће од тога зависити и понашање реконструисаног пута. Аутори наводе да су енергетске карактеристике одлучујући фактор при избору типа рециклаже. У неким случајевима могуће је увести нове захтјеве и спецификације за одређене материјале, као и за теренска испитивања.

7.9. Избор техника реконструкције и рехабилитације коловоза у зависности од оштећења коловоза

Америчка асоцијација за рециклирани асфалт – *Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA)*, под покровитељством *U.S. Department of Transportation* и *Federal Highway Administration*, објавила је приручник за рециклажу асфалта [4] у коме се дају информације, смјернице и главни принципи пројектовања и извођења коловозних конструкција уз употребу рециклираног асфалтног агрегата, првенствено стављајући акценат на анализу различитих типова рехабилитација. У наведеној анализи се помиње више различитих врста оштећења коловозне конструкције и на основу тога се врши избор типа рехабилитације/реконструкције коловоза. У складу са тим дата је и табела 7.3., са најчешћим типовима оштећења и најповољнијим опцијама избора поправке таквих коловозних конструкција.

Табела 7.3. – Различити типови оштећења коловозне конструкције и могућности рехабилитације коловоза по приоритетима⁸ [4]

Оштећења коловоза	ТЕХНИКЕ РЕХАБИЛИТАЦИЈЕ							
	CP	HIR	CIR	Танки НМА	Дебели НМА	FDR	Комбиновани третмани	Реконструкција
Стварање пукотина								
Ударне рупе								
Течење битумена								
Клизав коловоз								
Оштећење банке								
Колотрази 1								
Попречне таласне деф.								
Колотрази 2								
Пукотине од замора								
Ивичне пукотине								
Оштећења од клизања								
Блоковске пукотине								
Подужне пукотине								
Попречне пукотине								
Рефлектоване пукотине								
Дисконтинуалне пук.								
Бубрење								
Неравнине на путу								
Угиби								
Депресије								
Пад квалитета вожње								
Пад чврстоће								

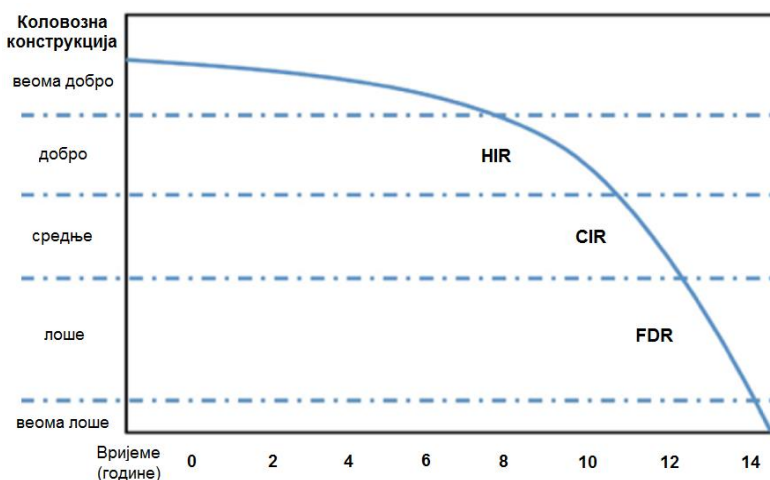
ВЕЋИ ПРИОРИТЕТ
→
МАЊИ ПРИОРИТЕТ

У табели 7.3. примјетно је да се већина површинских оштећења на коловозу може санирати примјеном поступка хладне рециклаже асфалта (CIR), што је још један од доказа широке могућности примјене овог типа рециклаже у реконструкцији и рехабилитацији путева.

У једном истраживању које је спроведено у САД [32] анализиран је избор техника реконструкције пута (поступком *in situ*) у зависности од стања и животног вијека коловозне конструкције (графикон 7.1.). Са повећањем оштећења коловозне конструкције квалитет вожње опада, а технике реконструкције иду од вруће

⁸ CP – Cold Planing (Хладно планирање); HIR – Hot In-Place Recycling (Врућа рециклажа на лицу мјеста); CIR – Cold In-Place Recycling (Хладна рециклажа на лицу мјеста); НМА – Hot Mix Asphalt (Врућа асфалтна мјешавина)

рециклаже (HIR), преко поступка хладног рециклирања (CIR), до FDR поступка, који се примјењује у случајевима лошег и веома лошег стања пута.



Графикон 7.1. – Избор типа реконструкције пута, поступком *in situ*, у зависности од стања и животног вијека коловозне конструкције [32]

7.10. Предности и недостаци примјене хладне рециклаже асфалта на лицу мјеста

Због бројних енергетских, еколошких и економских предности технологија хладне рециклаже асфалта заслужује већу пажњу и значајнију примјену. Овом технологијом се уз релативно једноставан поступак, са максималном искоришћеношћу постојећих материјала, могу постићи задовољавајућа својства у погледу носивости коловозне конструкције. У односу на класичне поступке реконструкције коловоза, хладном рециклажом се смањује употреба природних агрегата и везива, чиме се, уз значајно скраћење времена извођења радова, остварују енергетске уштеде и смањују штетни утицаји на животну средину. Примјеном ове технологије се рјешавају и проблеми депонија отпадних материјала. Претходно наведене предности сврставају хладну рециклажу коловоза у незаобилазну савремену методу управљања путевима [33].

Аутор *M.A.Estrada* [14] указује на предности употребе рециклаже на лицу мјеста, на основу практичних примјера. Те предности се посебно огледају у поновној употреби материјала који се на лицу мјеста рециклира и у великом проценту уграђује у нову конструкцију. Тиме се остварују велике економске уштеде у градњи (изградња два или три путна правца по цијени једног) и смањењу трошкова одржавања у току експлоатације пута.

Предност хладне рециклаже асфалта поступком *in situ*, у односу на рециклажу поступком *in plant*, је значајна и са аспекта трошкова транспорта. Наиме, рециклажа поступком *in situ* не захтјева додатни транспорт материјала до депоније и са депоније на градилиште, као што је то случај код рециклаже асфалта поступком *in plant*. Хладна рециклажа асфалта има бројне предности примјене и са технолошког аспекта извођења. Специјализована опрема за дубоку рециклажу асфалта поступком *in situ* омогућава извршење 4 операције у једном пролазу рециклера, а то су:

- Ископ и уситњавање постојећег материјала до потребне дубине коловозне конструкције;

- Континуално праћење количине агрегата и дозирање везива и воде;
- Мијешање уситњеног агрегата са водом, везивом и евентуалним додацима и
- Разастирање и збијање рециклираног материјала (у случају када је у воз за рециклажу укључен и разастирач могућа је велика прецизност нивелације слоја) [22].

Неке од најважнијих предности дубоке рециклаже асфалта по хладном поступку, у односу на конвенционалну рециклажу асфалта по врућем поступку, дате су у табели 7.4.

Табела 7.4. – Предности дубоке рециклаже по хладном поступку, у односу на врућу рециклажу асфалта [22]

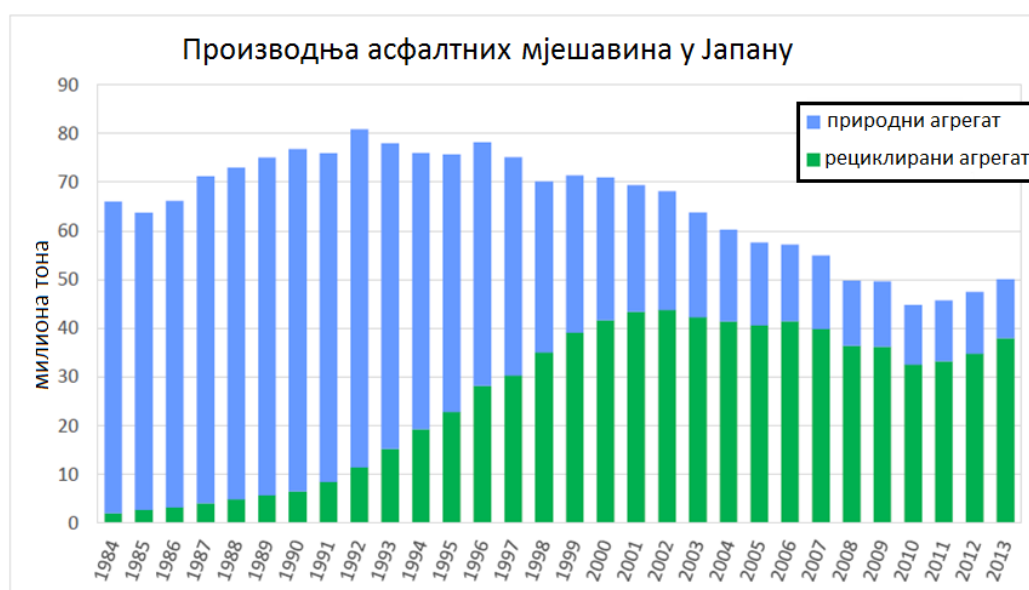
Карактеристика	Дубока рециклажа по хладном поступку	Рециклажа по конвенционалном (врућем) поступку
Контрола дубине рециклаже	да ($\pm 5\text{mm}$)	не
Прецизна контрола влажности	да	не
Вријеме између мијешања и уграђивања	врло кратко	дуго
Искоришћење постојећег материјала	100% рециклиран	има губитака
Осјетљивост на временске услове	мала	велика
Проблеми нестабилне подлоге	не	да
Могућа дубина рециклаже на половини ширине коловоза	$>300\text{mm}$	150mm
Трајање радова на траси	кратко	дуже
Конфликти са текућим саобраћајем	умјерени	чести

7.11. Примјена рециклираног асфалта у свијету и могућности примјене у Србији

У развијеним земљама свијета раде се студије утицаја примјене рециклираних материјала коловозних конструкција на животну средину, као и праћење укупног нивоа рециклаже. Једна од тих земаља је и Норвешка која је крајем XX вијека развила програм управљања грађевинским отпадом. Занимљив је податак да је у тој земљи количина новонасталог асфалтног отпада, за сада већ давну 2002.години, износила 470.000 тона. Од те количине чак 462.000 тона је рециклирано (око 98%), али проценат укупне рециклаже старог асфалта, у тој години, је био око 105%. Објашњење за то се може добити ако се узме у обзир да је рециклиран и асфалт који је претходних година био складиштен на депонијама. Претходно наведени подаци доводе до закључка да је рециклажа асфалта, једна од најзаступљенијих рециклажа код грађевинских материјала. У свијету је задњих година фокус стављен на побољшања технологија рециклаже и система управљања старим (отпадним) асфалтом [34]. Њемачка је свакако једна од водећих земаља на том пољу. Искоришћеност старог асфалтног агрегата у Њемачкој износи више од 80%. Од укупно око 14 милиона тона старог асфалта годишње се рециклира око 11,5 милиона тона [106]. Још током 90-их година прошлог вијека, америчка агенција за заштиту животне средине процијенила је да је у САД рециклирано више од 90 милиона тона асфалта. Тако рециклирани асфалт се користио дијелом као агрегат у везаним (асфалтним) слојевима, а дијелом као агрегат за невезане носеће слојеве.

Поред наведених, висок проценат рециклаже од европских земаља данас имају: Шведска, Данска, Финска, Португал, Шпанија, Италија док су у свијету, поред САД, међу водећим у овој области: Канада, Јапан и Тајланд [19]. Повећане потребе за рециклажом асфалта посебно имају земље чији су ресурси природних камених материјала релативно мали, као што је нпр. Холандија. Подаци за Европу указују на то да је тренутно потребно уклонити око 50 милиона тона старог асфалта, а велики дио од те количине може се рециклирати и поново употребити, како у коловозним конструкцијама тако и у другим гранама грађевинарства.

Јапан се сматра једном од земаља са највећом поновном употребом отпадних материјала у свијету. У складу са том чињеницом је и податак да се у посљедње двије деценије у производњи нових асфалтних мјешавина у Јапану користе веће количине рециклираног асфалта него природног агрегата. Рециклирани агрегат је имао највећи раст своје примјене током посљедњих 10-ак година ХХ-ог вијека. (дијаграм 7.2.) [35].



Дијаграм 7.2. – Примјена рециклираног асфалтног агрегата у односу на природни агрегат, при справљању нових асфалтних мјешавина у Јапану [35]

У табели 7.5. су дати примјери хладне рециклаже асфалта у коловозним конструкцијама и њеним појединачним слојевима, уз примјену различитих везивних материјала [36], а у табели 7.6. доступне количине рециклираног асфалта за поједине европске земље (за 2019.годину) и његова поновна примјена [37].

Прецизни подаци за количину асфалта који се рециклира у Србији не постоје, али је сигурно да су те количине, у односу на неке развијене свјетске земље и могућности рециклаже, доста мале, а да су притом депоније старог асфалта доста велике. Највећа примјена рециклираног асфалта у Србији посљедњих година је у поновној примјени агрегата при справљању нових, врућих асфалтних мјешавина, код израде стабилизацијских слојева и у изградњи привремених саобраћајница или саобраћајница нижег ранга, које углавном имају невезани застор од датог материјала.

Свјетски лидер на пољу рециклаже асфалтних коловоза је њемачка фирма Wirtgen [13], која је у задњих 20-ак година развила низ упустава и препорука за пројектовање и извођење разних типова рециклаже коловозних конструкција. Притом, Wirtgen је и произвођач механизације специјализоване за извођење

рециклаже. У развијеним свјетским земљама постоје компаније које се уско баве рециклажом асфалта. Поред *Wirtgen*-а, најпознатије свјетске фирме за производњу механизације, која се користи у рециклажи асфалта, су *Vomag* и *Caterpillar*.

Табела 7.5. – Карактеристике примјене хладне рециклаже асфалта у појединим свјетским земљама [36]

Држава	Тип хладне рециклаже	Нови слојеви након рециклаже	Постојећи слојеви за рециклажу	Употреба везива		Коришћење адитива
				примарно	секундарно	
Чешка	<ul style="list-style-type: none"> • <i>in situ</i> (90%); • <i>in plant</i> (10%) 	<ul style="list-style-type: none"> • основни (базни) слојеви; • везани слојеви 	<ul style="list-style-type: none"> • асфалтни слојеви; • цементни и/или кречом стабилизирани основни слојеви; • макадам; • гранулисани носећи слојеви; • стабилизирани тло 	<ul style="list-style-type: none"> • битуменске емулзије; • пјенушави битумен; • комбинација са цементом 	<ul style="list-style-type: none"> • цемент; • хидратисани креч 	<ul style="list-style-type: none"> • средства за повећање адхезије и упјењености се не користе у хладној рециклажи
Финска	<ul style="list-style-type: none"> • <i>in situ</i> (углавном) – 2-3 милиона m^2 по години; • <i>in plant</i> (мање) 	<ul style="list-style-type: none"> • основни (базни) слојеви; • везани слојеви 	<p>Асфалтни слојеви:</p> <ul style="list-style-type: none"> • класа I - обухвата само врућу рециклажу (преко 5 милиона m^2 по години); • класа II; • класа III 	<ul style="list-style-type: none"> • пјенушави битумен; • битуменска емулзија 	<ul style="list-style-type: none"> • цемент у случају повећања носивости; • шљунак 0/32mm и шљунак 0/55 mm, у зависности од садржаја ситних честица 	<ul style="list-style-type: none"> • понекад се користи летећи пепео (<i>fly ash</i>)
Француска	<ul style="list-style-type: none"> • углавном <i>in situ</i>; 	<ul style="list-style-type: none"> • основни (базни) слојеви; • везани слојеви 	<ul style="list-style-type: none"> • класа I: Невезани слојеви и носећи слојеви са дебелинама <4cm; • Класа II и III; асфалтни слојеви са дебелинама 5-12cm 	<ul style="list-style-type: none"> • битуменска емулзија; • пјенушави битумен 	<ul style="list-style-type: none"> • цемент; • хидратисани креч 	<ul style="list-style-type: none"> • понекад се користе средства за повећање упјењености
Њемачка	<ul style="list-style-type: none"> • углавном <i>in situ</i>; 	<ul style="list-style-type: none"> • основни (базни) слојеви 	<ul style="list-style-type: none"> • асфалтни слојеви; • специјалне методе за слојеве са садржајем катрана; • цементом и/или кречом стабилизирани основни слојеви; • неvezани носећи слојеви; • стабилизирани тло 	<ul style="list-style-type: none"> • битуменска емулзија + цемент; • пјенушави битумен 	<ul style="list-style-type: none"> • хидраулична везива за путеве; • цемент 	<ul style="list-style-type: none"> • средства за повећање адхезије

Држава	Тип хладне рециклаже	Нови слојеви након рециклаже	Постојећи слојеви за рециклажу	Употреба везива		Коришћење адитива
				примарно	секундарно	
Ирска	У Ирској се хладно рециклирани материјали традиционално користе на руралним путевима са малим оптерећењима. Посљедњих година тежи се промоцији хладне рециклаже, али искуство каже да се примјена у пракси није значајније повећала			<ul style="list-style-type: none"> • битуменска емулзија; • пјенушави битумен 	<ul style="list-style-type: none"> • цемент; • хидратисани креч 	<ul style="list-style-type: none"> • средства за повећање упјењености и адхезије
Норвешка	<ul style="list-style-type: none"> • рециклирани асфалтни слојеви (орјентационо 85% <i>in situ</i>, 15% <i>in plant</i>); • невезани носећи слојеви (99% <i>in situ</i>, 1% <i>in plant</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> • површински слојеви; • базни слојеви; • везани слојеви 	<ul style="list-style-type: none"> • горњи и доњи асфалтни слојеви; • гранулисани носећи слојеви; • стари шљунчани носећи слојеви у основи пута 	<ul style="list-style-type: none"> • битуменска емулзија; • пјенушави битумен; • лигнин (лигно-сулфати) 	<ul style="list-style-type: none"> • додатак воде асфалтном гранулату због побољшава мијешање и збијање 	<ul style="list-style-type: none"> • адитиви за повећање адхезије у пјенушавом битумену - амини
Португал	<ul style="list-style-type: none"> • 100% <i>in situ</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • основни слојеви; • везани слојеви 	<ul style="list-style-type: none"> • асфалтни слојеви (укључујући и битуменизирани макадам); • површински обрађени слојеви; • цементом стабилизирани основни слојеви (и стабилизирани макадам); • невезани носећи слојеви 	<ul style="list-style-type: none"> • битуменска емулзија 	<ul style="list-style-type: none"> • цемент; • хидратисани креч 	/
Шпанија	<ul style="list-style-type: none"> • 90% <i>in situ</i>, • 10% <i>in plant</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • основни слојеви; • везани слојеви 	<ul style="list-style-type: none"> • асфалтни слојеви (укључујући и битуменизирани макадам); • површински обрађени слојеви; • цементом стабилизирани основни слојеви (хидраулично стабилизирани макадам) 	<ul style="list-style-type: none"> • битуменска емулзија; • цемент 	<ul style="list-style-type: none"> • хидратисани креч 	/
Уједињено Краљевство	<ul style="list-style-type: none"> • 95% <i>in situ</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • основни слојеви (<i>road base i sub-base</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> • главни или основни (темељни) структурни слојеви пута 	<ul style="list-style-type: none"> • битуменска емулзија; • пјенушави битумен 	<ul style="list-style-type: none"> • цемент; • хидратисани креч; • летећи пепео; • згура 	<ul style="list-style-type: none"> • адитиви за повећање упјењености
Јужна Африка	<ul style="list-style-type: none"> • 70% <i>in situ</i>; • 30% <i>in plant</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> • углавном базни слојеви 	<ul style="list-style-type: none"> • Танки површински и високо квалитетни носећи слојеви 	<ul style="list-style-type: none"> • пјенушави битумен 	<ul style="list-style-type: none"> • цемент; • хидратисани креч 	<ul style="list-style-type: none"> • углавном се не користе

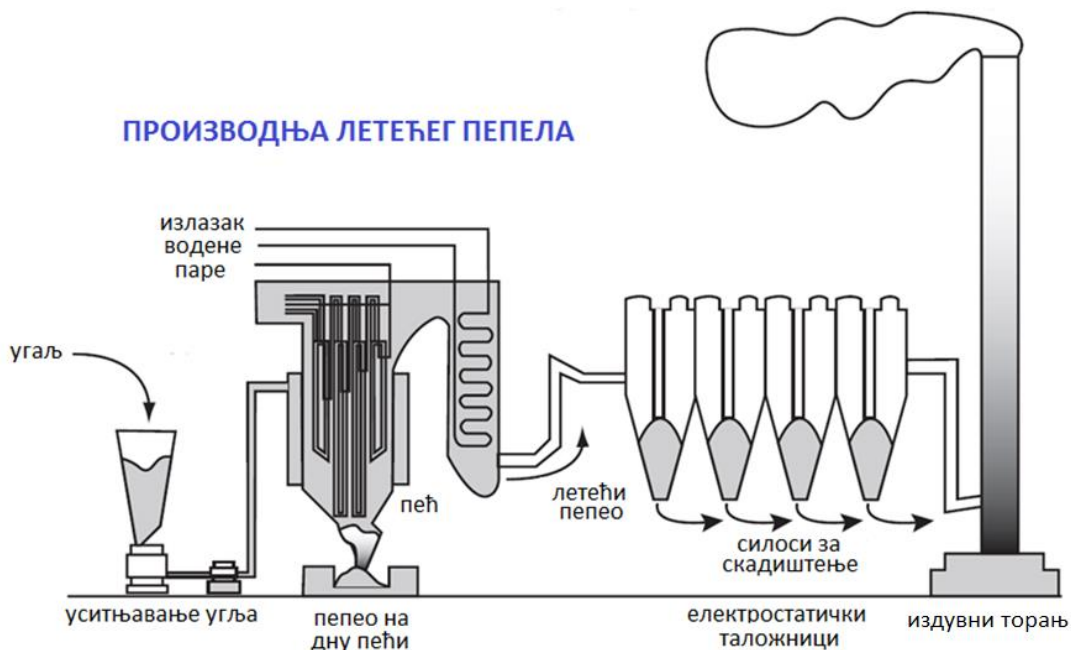
Табела 7.6. – Доступне количине рециклираног асфалтног материјала у 2019.години и начин поновне употребе у појединим европским државама [37]

Country	All available Reclaimed Asphalt in 2019 in tonnes	% of available reclaimed asphalt used in							Applied area in m2 of hot reuse of existing asphalt pavement material in-situ / on the road (Remixing, Repaving, Reshaping, Road Train etc.)	The amount of "only" reheated (reused) asphalt material in-situ / on the road (Remixing, Repaving, Reshaping, Road Train etc.) in metric tonnes	
		Hot and Warm Mix Asphalt Production	Half Warm Mix Asphalt Production	On-Site Cold Re-use**	Plant Cold Re-use**	Unbound Road Layers	Other Civil Engineering Applications	Put to Landfill / Other Applications / Unknown			
Austria	1.800.000	70	30							no data	no data
Belgium	1.637.000	79	0	0	0	no data	no data	no data	no data	no data	
Croatia	210.000	35	no data	2,5	no data	no data	no data	no data	no data	no data	
Czech Republic	2.800.000	14	0	25	0	25	10	26	>400.000	>420.000	
Denmark	1.255.000	70	no data	no data	no data	6	no data	24	no data	no data	
Finland	1.500.000	100	0	0	0	0	0	0	9.700.000	no data	
France	8.074.000	75	10	no data	no data	no data	no data	0	1.750.000	318200	
Germany	13.400.000	82	0	0	0	18	0	0	no data	no data	
Great Britain	6.050.000	30	70							Increasing	no data
Hungary	105.000	98	0	1	1	0	0	0	no data	no data	
Italy	9.500.000	25	75							no data	no data
Norway	1.173.000	28	0	0	1	70	0	0	no data	no data	
Romania	612.500	0	0	5	0	20	0	75	285.000	30.625	
Slovakia	165.600	40	0	48	0	12	0	0	no data	no data	
Slovenia	150.000	23	0	10	0	5	47	15	no data	no data	
Spain	1.486.000	59,6	0,1	8,7	1,0	6,3	0,0	24,3	no data	no data	
Switzerland	1.650.000	90	<1	<1	<1	7	<1	1	no data	no data	
Turkey	1.038.000	9	0	0	0	91	0	0	no data	no data	

8. ЕЛЕКТРОФИЛТЕРСКИ ЛЕТЕЋИ ПЕПЕО – ДОСТУПНОСТ И МОГУЋНОСТИ ПРИМЈЕНЕ

8.1. Поријекло и настанак електрофилтерског летећег пепела

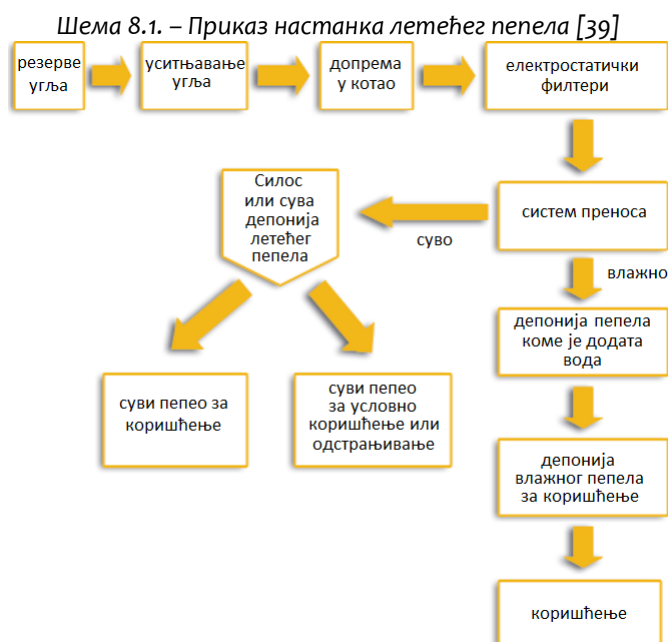
Електрофилтерски летећи пепео (FA – Fly Ash) представља фини минерални остатак спаљивања мљевеног угља у пећима термоелектрана, при чему заједно са издувним гасовима излази из котла. У процесу настанка електричне енергије, угаљ сагоријева у термоелектранама при температурама од 1000 до 1600°C. У том процесу органски састојци изгоре, а минералне нечистоће из угља (као што су кварц и глина) остају као неизгорјели. Тај остатак се брзо транспортује у зону са нижим температурама (гдје се солидификује), у облику сферних честица, те се добије врло фини прах који се, заједно са гасовима из димњака, сакупља у електростатичким филтерима у посебне силосе за пепео (слика 8.1.) Такав пепео је познат као уситњени пепео и чини око 75-85% укупне количине пепела. Остатак представљају крупније честице пепела које падају на дно пећи, гдје се формира тзв. пепео са дна пећи [8].



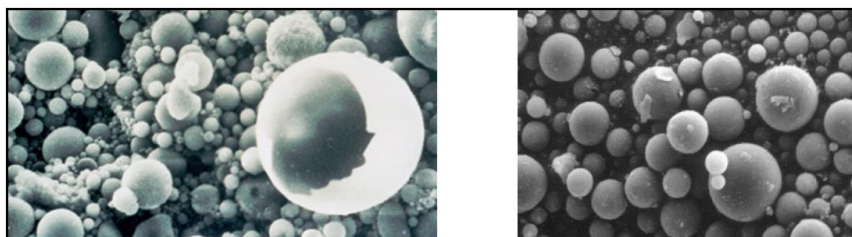
Слика 8.1. – Процес настанка летећег пепела у термоелектранама [40]

На XIII Свјетском конгресу за путеве, који је одржан 1983.године у Сиднеју (Аустралија), летећи пепео из термоелектрана је класификован као индустријски нуспроизвод, који настаје у постројењима за производњу електричне енергије [40]. У Републици Србији је летећи пепео дефинисан као најважнији неоргански, секундарни материјал [38]. Такође, према аутору Р.Враиновићу [7] летећи пепео се може сврстати у групу вјештачких пуцоланских материјала, о чему ће више ријечи бити касније.

Шематски приказ настанка и депоновања летећег пепела, у процесу сагоријевања угља у термоелектранама дат је у шеми 8.1. [39].



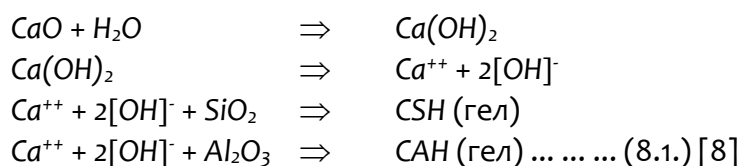
Фини прах летећег пепела чине зрна која је састоје од сферичних стакластих честица (слика 8.2.).



Слика 8.2. – Микроскопски прикази честица уврћаних 1000 пута, за двије различите врсте летећег пепела [39]

8.2. Пуцоланска својства

Још од раније је познато да летећи пепео има пуцоланске карактеристике и као такав проналази своју битну примјену у бетонским мјешавинама. Пуцоланска својства летећег пепела, као вјештачког пуцоланског материјала [11], испитују се према стандарду SRPS B.С1.018:2015 [С15]. Према овом стандарду, пуцолански материјали су природне или вјештачке, силикатне, силико-алуминатне, силико-карбонатне супстанце или њихове комбинације. Летећи пепео је самостално слабо или нимало хидраулично активно везиво [7]. Пуцолански материјали (међу којима је и летећи пепео), када су фино самљевени и у присуству воде, реагују на температури околине са раствореним калцијум-хидроксидом ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) и стварају калцијум-силикат (CSH) и калцијум-алуминат (CAH), који дају чврстоћу (формула 8.1.). У овој реакцији креч (CaO) има улогу активатора. Пуцоланска реакција која се одвија том приликом у цементним стабилизацијама је дата у наставку:



Пуцоланске рекације летећег пепела су доста различите. Неки истраживачи су разматрали однос између особина летећег пепела и пуцоланске реактивности. Добру пуцоланску реактивност условљавају сљедећи утицајни фактори:

- Већи проценат ситнијих честица летећег пепела (пречник честице мањи од $45\mu\text{m}$), што условљава повећање специфичне површине;
- Повећан садржај (SiO_2), ($\text{SiO}_2+\text{R}_2\text{O}$)⁹ и ($\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$);
- Мали садржај угљеника и губитак жарењем и
- Повећан садржај алкалија [7].

8.3. Хемијски састав

Хемијске карактеристике летећег пепела и шљаке су најбитнији индикатор код оцјене њихове могућности примјене у својству грађевинског материјала, или као сировине за њихову производњу. Многа лабораторијска испитивања су показала да пресудни утицај на физичко-хемијска својства летећег пепела имају сљедећи фактори:

- Тип и врста угља;
- Степен уситњености угља и
- Мјесто истакања пепела [11].

Поред претходно наведеног битно је напоменути да је састав летећег пепела доста неуједначен и да варира у зависности од тренутног квалитета угља, тј. сировине за његову производњу. Лабораторијским испитивањима је утврђено да се летећи пепео настао од лигнитског и мрког угља знатно разликује по свом саставу и квалитету у односу на пепео добијен сагоревањем каменог угља. Степен уситњености угља као и тип и конструкција котла и његов начин рада, утичу на гранулометријски састав пепела, величину губитка код жарења и садржај сумпор триоксида (SO_3). Такође, мјесто истакања пепела знатно утиче на облик зрна и концентрацију појединих хемијских елемената [11].

Истраживања су показала да се летећи пепео углавном састоји од преко 85% алумината, силиката, оксида гвожђа и магнезијума, у широким распонима варијација појединих компоненти [41]. Карактеристичан хемијски састав летећег пепела (према подацима из САД) дат је у табели 8.1.

Табела 8.1. – Карактеристичан хемијски састав летећег пепела [41]

Хемијски састав	Учешће у летећем пепелу (%)
SiO_2	28 – 52
Al_2O_3	15 – 34
Fe_2O_3	3 – 20
CaO	1 – 10
MgO	0 – 2
SO_3	0 – 4
Губитак жарењем	1 – 3

Хемијске карактеристике летећег пепела, као што је наведено, зависе од геолошких фактора везаних за лежишта угља и од оперативних услова

⁹ R = Ca^{++} Mg^{++} или комбинација ових јона

термоелектране, али оне могу бити условљене и поступцима његовог одлагања и чувања. У састав летећег пепела добрим дијелом улазе и инертни материјали, као што је силицијум. Међутим, велики број осталих елемената се налазе у малим, али потенцијално опасним количинама у летећем пепелу. У саставу летећег пепела су до сада пронађена 64 хемијска елемента, укључујући и микроелементе као што су As, B, Cu, F, Fe, Mn, Pb, Hg, Mo, Se, Ni, Zn и други [12]. Једињења која улазе у састав летећег пепела могу утицати на загађење земљишта које се налази око термоелектрана и депонија, при чему се загађују и површинске и подземне воде. Хемијски састав летећег пепела доста је промјенљив и зависи од више фактора. Основни разлог промјенљивости хемијског састава је присуство јаловине неорганоског поријекла у угљеним слојевима [11]. Битно је напоменути и да летећи пепео има високе pH виједности (11-13).

На основу европског стандарда који дефинише летећи пепео који се користи у хидрауличним мјешавинама (EN 14227-4:2013 [C20]) разликују се двије врсте пепела и то кречњачки и силикатни. Разлика је у томе што се, поред оксида силицијума (SiO_2) и алуминијума (Al_2O_3), код кречњачког пепела запажа присуство оксида калцијума (CaO) и сулфати (SO_3), док су код силикатног пепела присутни и оксиди гвожђа (Fe_2O_3). Кречњачки летећи пепео се може користити и самостално као везивно средство, а силикатни летећи пепео захтјева употребу активатора као што су цемент или креч. Њихово присуство је битно ради покретања пуцоланске реакције [C20]. Летећи пепео, као пуцолански материјал (на бази силицијума, алуминијума и калцијума) у комбинацији са кречом (или цементом) и водом ствара материјал добрих везивних својстава. У САД је летећи пепео класификован у складу са америчким нормама ASTM C618-17 [C16] и дијели се на двије класе (табела 8.2.). Пепео класе F има мањи процнат калцијум оксида (кисели пепео), док пепео класе C (алкални пепео), има већа пуцоланска својства [11].

Табела 8.2. – Класе летећег пепела по стандарду ASTM C618-17 [40]

Класа пепела	Опис по стандарду ASTM C618-17	Хемијски захтјеви
F	Настаје спаљивањем антрацита и битуменизованог угља. Ова врста пепела има пуцоланска својства	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70\%$
C	Настаје спаљивањем дјелимично битуменизованог угља и лигнита. Поред пуцоланских својстава (као додаток) има и цементне особине. Некада пепео ове класе може да садржи >10% креча (CaO)	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 50\%$

Постоји више класификација летећег пепела на основу хемијског састава, а у најважније се убрајају међународни систем класификација и подјела пепела према модулу (R) (табела 8.3.) [11].

Табела 8.3. – Међународни систем класификација летећег пепела [11]

Група	Пепео	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	CaO (%)	SO_3 (%)
I	алумо-силикатни	<2	<15	недефинисано
II	силикатно-алуминатски	>2	<15	<3
III	сулфат-алкални	недефинисано	>15	>3
IV	остали (кречни)	недефинисано	>15	<3

Модул R се рачуна по формули 8.2.:

$$R = \frac{(SiO_2 + Al_2O_3)}{(CaO + MgO + Fe_2O_3)} \dots\dots\dots (8.2.)$$

Подјела летећег пепела према величини модула R је на:

- силикатно-калцијумски ($R < 2$),
- силикатни ($R = 2-6$) и
- силикатно-алуминијски ($R > 6$) [11].

Испитивања хемијског састава летећег пепела из термоелектрана у Србији трају више од 35 година и она се обављају према стандарду SRPS B.H8.359:1973 [C17]. Хемијски састав летећег пепела из највећих термоелектрана у Србији приказане су у табели 8.4..

Табела 8.4. – Хемијски састав летећег пепела из колубарског (ТЕНТ А и ТЕНТ Б) и костолачког (ТЕКО А и ТЕКО Б) угљеног басена (2007.год.) [11]

Хемијско једињење / поријекло пепела	ТЕНТ А ¹⁰		ТЕНТ Б ¹¹		ТЕКО А ¹²		ТЕКО Б ¹³	
	јун 2007.год.	просјек (1983-2004)	јун 2007.год.	просјек (1983-2004)	јун 2007.год.	просјек (1996-2004)	јун 2007.год.	просјек (1999-2000)
Губитак при жарењу	7,20	-	2,11	-	4,18	4,30	1,98	3,89
SiO ₂	51,43	53,30	51,88	59,06	44,55	53,58	46,64	54,58
Al ₂ O ₃	22,01	20,72	22,49	21,71	20,80	19,93	21,67	18,35
Fe ₂ O ₃	6,03	7,23	6,61	5,93	11,23	7,56	11,44	7,44
CaO	1,16	8,74	10,44	5,17	11,71	6,26	11,10	6,40
MgO	2,83	2,64	3,28	2,02	2,73	1,28	2,64	1,23
SO ₃	0,54	1,76	0,66	1,75	2,45	2,76	2,27	3,74
S	0,21	0,70	0,26	0,70	0,98	1,11	0,88	1,50
Na ₂ O	0,43	0,32	0,58	0,44	0,50	0,58	0,51	0,60
K ₂ O	1,16	0,74	1,23	0,89	0,69	0,80	0,67	0,84
модул R	7,32	3,97	3,65	6,15	2,54	4,87	2,71	4,84
SiO ₂ / Al ₂ O ₃	2,33	2,57	2,30	2,72	2,14	2,67	2,15	2,98

На основу табеле 8.2. (о класама пепела) и табеле 8.4. (о хемијском саставу) може се закључити да већина летећег пепела у Србији припада класи F, а на основу стандарда EN 14227-4:2013 већина се може класификовати као кречњачки летећи пепео. Детаљна студија о карактеристикама летећег пепела који се производи у Србији је рађена током 2007. године [11].

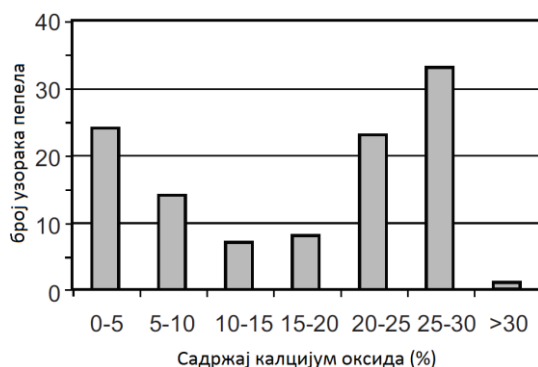
У Сјеверној Америци (САД и Канада) је спроведено једно истраживање о садржају калцијум оксида (CaO) у лећетем пепелу, на 110 различитих узорака пепела. Резултати истраживања су показали да се садржај (CaO) креће од 0 до око 30%, при чему је најмање узорака било са 10-20% учешћа (CaO) – дијаграм 8.1. [40].

¹⁰ Термоелектрана Никола Тесла А, Обреновац

¹¹ Термоелектрана Никола Тесла Б, Обреновац

¹² Термоелектрана Костолац А, Костолац

¹³ Термоелектрана Костолац Б, Костолац



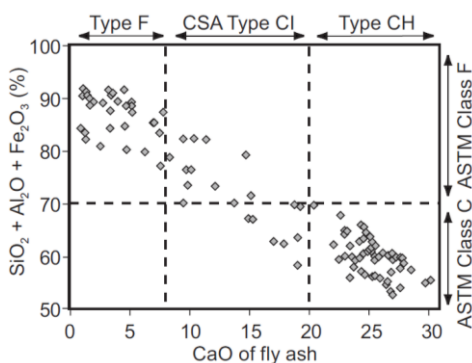
Дијаграм 8.1. – Учешће калцијум оксида (CaO) у 110 различитих узорака летећег пепела из Сјеверне Америке [40]

У Канади је количина калцијум оксида (CaO) у летећем пепелу дефинисана на основу стандарда CAN/CSA-A3001-13:2013 [C18] и на основу те класификације постоје 3 врсте летећег пепела (табела 8.5.) [40].

Табела 8.5. – Канадска класификација летећег пепела на основу садржаја (CaO)–CSA класификација [40]

CSA класификација летећег пепела	Учешће калцијум оксида (CaO) у летећем пепелу
Тип F	<8%
Тип CI	8-20%
Тип CH	>20%

Упоредни приказ класификације пепела по канадском CSA и америчком ASTM стандарду, а за претходно наведено испитивање летећег пепела (са 110 локација), дат је на слици 8.3. [40].



Слика 8.3. – Однос између садржаја калцијум оксида и оксида силицијума, алуминијума и гвожђа, за летећи пепео са 110 локација у Сјеверној Америци [40]

8.4. Физичке карактеристике

Летећи пепео се састоји од пуних или шупљикавих прашкастих честица углавном лоптастог облика (слика 8.2.). Структура летећег пепела је углавном стакласте (аморфне) природе. Угљенична материја у пепелу је састављена од честица оштријих ивица. Честице пепела, који је настао од битуменизованог угља, су обично сличне честицама муља или ситног пијеска ($d < 0,075 \text{ mm}$). Честице летећег пепела од дјелимично битуменизованог угља су исте величине као честице муља, мада су крупније од честица летећег пепела насталог од битуменизованог угља.

Специфична маса летећег пепела варира у зависности од његовог поријекла, а најчешће је у распону од око 1700 до 3000 kg/m^3 , мада су најзаступљеније вриједности између 2000 и 2800 kg/m^3 [43].

Боја летећег пепела је непоуздан индикатор његовог хемијског састава, а углавном варира од свијетлог тона, преко нијанси сиве до црне. Пепео који се добија од лигнита или дјелимично битуменизованог угља обично има свијетлу или блиједу мркожуту боју, што указује на ниску количину угљеника, као и присуство креча или калцијума (слика 8.4.). Летећи пепео од битуменизованог угља је углавном сиве боје. Свијетлије нијансе сиве боје указују на бољи квалитет пепела, а тамно сива и црна боја се приписују повећаном садржају несагорјелог угљеника. Поред карактеристика угља, боја пепела зависи и од технологија сагоријевања у термоелектранама. Бакарна боја (слика 8.5.) је обично повезана са присуством феро-оксида, а тамније нијансе са присуством угљеника.



Слика 8.4. – Летећи пепео са ниским садржајем угљеника [40]



Слика 8.5. – Летећи пепео (бакарне боје) из ТЕНТ-а Б

Летећи пепео се сматра материјалом ниске или веома мале водопропусности. Коефицијент водопропусности зависи од начина депоновања пепела, а најчешће има ред величине 10^{-5} до 10^{-6} m/s . Влажност пепела у природном облику, након издвајања на филтерима термоелектрана, је приближно једнака нули [11]. Да би се знало гдје, када и у којој количини се може употријевити летећи пепео неопходно је детаљно познавати његове физичке, хемијске и механичке карактеристике.

8.5. Подијеле летећег пепела

Постоји више различитих подјела летећег пепела, а у овом поглављу ће, поред претходно наведених бити приказане још неке.

Према технологији обраде летећи пепео се дијели на:

- **Суви пепео** – који се примјењује за готове мјешавине, бетонске префабрикате, производњу блокова, инјектирање и друго;
- **Сепарисани пепео** – суви пепео у којем су одстрањени грубљи комади и
- **Обрађени пепео** – садржи одређену количину воде [44].

Према могућности употребе у сврху испуне летећи пепео се може сврстати у три групе:

- **Обрађени пепео** – узима се директно из силоса у термоелектранама. Вода му се додаје у малим количинама, ради смањења прашења и постизање одређене збијености на градилишту;
- **Одложени пепео** – узима се са депоније, при чему му је прије одлагања на депонију додата вода, ради лакшег транспорта и

- **Пепео у лагунама** – пепео који се пумпањем, у течном облику, одлаже на депонију [44].

8.6. Производња летећег пепела у Србији и свијету

Према статистичким подацима у Републици Србији се у термоелектранама годишње троши од 35-40 милиона тона угља, углавном лигнитског поријекла [11]. Од те количине угља произведе се око 74% укупне количине електричне енергије у Србији [45]. Поред произведене електричне енергије годишње се произведе и око 8 милиона тона летећег пепела и шљаке, као нуспроизвода, при чему њихов међусобни однос најчешће износи 90% : 10% редом. Производња летећег пепела и шљаке у просјеку износи око 20% од количине употријебљеног угља. У Србији су најпознатији угљени басени Колубаре и Костолца. Више од 2/3 укупне годишње производње летећег пепела у Србији отпада на колубарски басен. Укупне залихе летећег пепела и шљаке (настале у протеклих 40-50 година) процјењују се на око 300 милиона тона, при чему оне на депонијама заузимају површину од око 1700ha. Пепео се на депоније углавном допрема у присуству воде (у ТЕНТ-у Б, однос пепела и воде је 1:1). Наведени подаци сврставају летећи пепео и шљаку у најзаступљенији секундарни отпад у Србији. Највеће количине летећег пепела се произведу у термоелектранама ТЕНТ А и Б, које су уједно и двије највеће термоелектране у Србији [11]. У термоелектрани ТЕНТ Б, у Обреновцу, је током ремонта 2010.године, успостављен нови систем сакупљања, транспорта и одлагања пепела. Примјеном нове технологије омогућено је сакупљање сувог пепела у силосима, спремног за његову испоруку за потребе индустрије. Ради лакшег транспорта пепела, прво се врши гравитационо одвајање пијеска из пепела, а остатак се затим раздваја на четири групе, према величини зрна [45].

Према количини произведеног летећег пепела и шљаке у току једне године (у односу на површину коју заузима и број становника) Србија се налази у самом свјетском врху (табела 8.6.) [11].

Табела 8.6. – Количина пепела и шљаке у Републици Србији и осталим земљама, прерачуната на површину коју заузимају и број становника [11]

Држава	Количине пепела и шљаке у односу на:	
	површину (t/km ²)	становништво (t/st.)
Србија (без КиМ) (2006.год.)	78,00	0,80
Централна Србија (2006.год.)	107,00	1,09
бивша заједница Србија и Црна Гора (1995.год.)	72,25	0,70
бивша држава СФРЈ (1991.година)	43,00	0,46
Чешка и Словачка (бивша заједница ЧССР)	152,30	1,22
Пољска	97,60	0,80
Бугарска	93,70	1,16
Велика Британија	53,30	0,22
Холандија	19,10	0,05
Индија	12,20	0,05
Јапан	11,70	0,04
САД	6,70	0,25
Бивше совјетске републике (СССР)	0,53	0,42
Италија	4,00	0,02
Канада	0,53	0,21

Битно је напоменути да је и у земљама окружења производња летећег пепела у термоелектранама значајна. Његова искоришћеност је најмања у Црној Гори и Босни и Херцеговини. У Републици Српској годишња производња летећег пепела у термоелектранама Гацко и Угљевик је око милион тона, притом се летећи пепео, као нуспроизвод индустрије, у Републици Српској скоро уопште не користи [12]. Један од разлога, али свакако не и оправдање, је и тај што на простору Републике Српске не постоји цементна индустрија, која се на нашим просторима сматра за индустрију са најзначајнијом примјеном летећег пепела.

Проблем великих количина произведеног и депонованог отпадног летећег пепела (како у свијету тако и код нас) није нов, већ је стар онолико колико је стара производња електричне енергије у термоелектранама. Аутор Р. Брауновић [7] наводи да су се још 1980. године јављали проблеми са великим количинама летећег пепела, чија је производња у том периоду у САД износила око 40 милиона тона/години.

Према статистичким подацима ЕСОВА-е (Европско удружење за производе настале у процесу сагоријевања угља) укупна количина отпадних материјала у процесу сагоријевања угља за 2016. годину (за државе чланице) је износила 40 милиона тона (табела 8.7.). Од те количине на летећи пепео отпада 30 милиона тона, док је укупна количина летећег пепела који се произвео у Европи била већа од 124 милиона тона [42]. Значајан дио ове производње отпада на земље Западног Балкана, међу којима Србија предњачи.

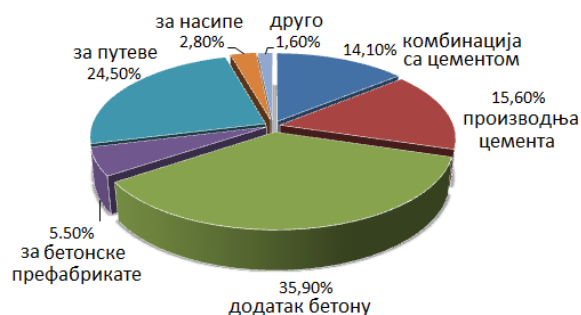
Табела 8.7. – Количина произведених нуспроизвода у процесу сагоријевања угља у Европи у 2016. години [42]

	EU 15 countries - ESOBA	EU 28 countries	Europe
Production	(million tons)		
CCP total	40.33	> 105	> 145
Ashes	30.42	> 88	> 124
Desulph. products	9.92	> 21	> 21

Највећи свјетски произвођачи летећег пепела су Кина, Индија и САД. Годишња производња летећег пепела у Кини за 2018. годину износила је 500 милиона тона, а укупна количина пепела на депонијама у Кини се процјењује на преко 3 милијарде тона. Производња летећег пепела у Индији у 2017. години износила је око 180 милиона тона [42].

8.7. Примјена летећег пепела у свијету

За разлику од Србије, већи дио Европе, има нешто мање проблема са летећим пепелом и његовим депонијама, јер је његова примјена у индустрији значајно већа. У 15 земаља Европске Уније годишње се (према ЕСОВА-и) искористи око 14 милиона тона летећег пепела, а од те количине највећи дио у производњи бетона (око 36%) и за градњу путева (око 25%). (дијаграм 8.2.) [107].



Дијаграм 8.2. – Процентуално учешће искоришћености летећег пепела у 15 земаља ЕУ [107]

Летећи пепео је нашао своју ширу примјену код градње и неких од најпознатијих објеката и грађевина широм свијета, као што су торњеви *Castor* и *Pollux* у Француској. Бетонска плоча на којој су саграђени торњеви направљена је са $180\text{kg}/\text{m}^3$ цемента и $120\text{kg}/\text{m}^3$ летећег пепела. Такође, летећи пепео је коришћен и при градњи торња *Picasso* у Мадриду (Шпанија), као и моста *East Bridge* у Данској. Око 10.000 тона летећег пепела је искоришћено при градњи једне од највећих лучних брана у Француској (*Puy-laurent*), а његова значајна примјена се биљежи и при градњи ријечног терминала *Norfolk* у САД. (слика 8.6.) [43].



Слика 8.6. – Коришћење летећег пепела при градњи ријечног терминала *Norfolk* у САД [43]

Већ дуги низ година летећи пепео се успјешно користи при градњи путева, како за израду насипа, тако и за израду носећих слојева коловозних констрикција. При градњи носивих слојева коловозне констукције за саобраћајницу *Burntwood Bypass* (*Staffordshire*) у Великој Британији (2001.године) учешће летећег пепела је износило чак 97%, а креча свега 3% (слика 8.7.). Летећи пепео је коришћен и за израду носећих слојева коловозне конструкције при градњу пута *RN 47 Lens – La Bassée*, у сјеверном дијелу Француске (слика 8.8.). На том путу је на дужини од 7,5km употребљено скоро 5.000 тона летећег пепела. Доњи носећи слојеви су рађени са 91% (на дебљини $d=22\text{cm}$), а горњи са 13% ($d=28\text{cm}$) летећег пепела, изнад којих су била два асфалтна слоја дебљине 7 и 5cm.

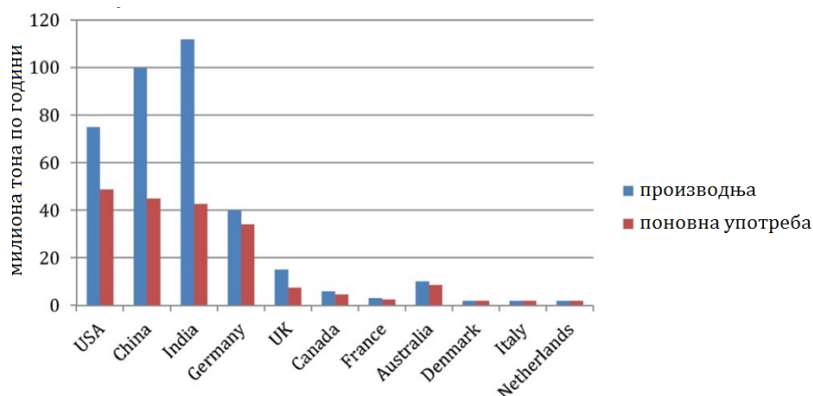


Слика 8.7. – Примјена летећег пепела при градњи саобраћајнице Burntwood Bypass (Staffordshire), Велика Британија (2001) [43]



Слика 8.8. – Изградња саобраћајнице RN 47 Lens – La Bassée (Француска) уз примјену летећег пепела у градњи носивих слојева [43]

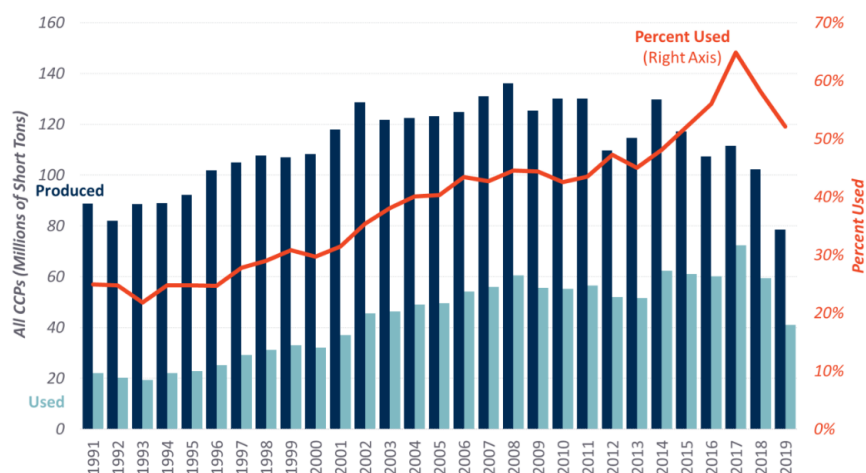
Разлика у количини произведеног и употријебљеног летећег пепела у свијету варира из године у годину, али посљедњих година има тенденцију постепеног смањења. На дијаграму 8.3. се види да је искоришћеност летећег пепела (за 2010.годину) била највећа у неким европским земљама (искоришћеност у Данској, Холандији и Италији је била и до 100%) и Аустралији, док је за највеће свјетске произвођаче (Индију и Кину) та искоришћеност била испод 50% [46]. У поређењу са наведеним земљама Србија би са својом скромном искоришћености летећег пепела (која је мања од 3% [11]), била при дну листе.



Дијаграм 8.3. – Однос производње и примјене летећег пепела за поједине свјетске земље (током 2010.год.) [46]

Иако је у новије вријеме све популарнија производња електричне енергије засноване на обновљивим ресурсима и еколошки прихватљивим рјешењима већина електричне енергије у свијету се још увијек произведе у термоелектранама. Како потребе за производњом електричне енергије из године у годину у свијету расту, тако и производња летећег пепела посљедњих година биљежи пораст. Процјењује се да је Кина тренутно највећи свјетски произвођач летећег пепела, а годишња производња у тој азијској земљи иде и до 500 милиона тона [47]. Посљедњих година Кина жели да постане свјетски лидер у одрживој градњи, а у складу са тим иде и чињеница да је она највећи свјетски произвођач грађевинског материјала од летећег пепела. Због све већег присуства алтернативних начина производње електричне енергије, протеклих година производња летећег пепела у САД биљежи значајан пад, али зато проценат његове употребе, као индустријског нуспроизвода (још од почетка 90-их година прошлог вијека) биљежи углавном раст (дијаграм 8.4.). Одступање од претходно наведене констатације се јавља у посљедње 4 године. Разлог за то се може пронаћи у смањењу производње летећег пепела послје 2016.године [108]. Ови

подаци су свакако позитиван примјер примјене летећег пепела и за остале земље, међу којима је и Србија.



Дијаграм 8.4. – Производња и примјена летећег пепела у САД (1991-2019) [108]

Неке од најпознатијих свјетских организација које се баве анализама производње и примјеном летећег пепела у индустрији су:

- ACAA – American Coal Ash Association [109];
- CIRCA – Association of Canadian Industries Recycling Coal Ash [110];
- ECOBA – European Coal Combustion Products Association [111];
- SACAA – South African Coal Ash Association [112];
- ASIANCAA – Asian Coal Ash Association [113];
- JCOAL – Japan Coal Ash Center [114] и друге.

Све појединачне организације земаља и региона удружене су у кровну свјетску организацију *The World Wide Coal Combustion Product Network (WWCCPN)* [115]¹⁴.

8.8. Досадашња примјена индустријских нуспроизвода (летећег пепела и згуре) у Србији

Као што је претходно наведено, употреба летећег пепела у Србији, у односу на његову укупну производњу, веома је мало заступљена [11]. Једина сигурна примјена летећег пепела у Србији је у производњи цемента. Подаци за 2011. годину показују да је из ТЕНТ-а Б искоришћено 40.336 тона летећег пепела за потребе цементаре Lafarge (Беочин), а 3.045 тона у цементари Titan (Косјерић), док је Јавно предузеће за изградњу Обреновца употребило 5.267 тона шљаке за израду некатегорисаних путева у тој општини [48]. Новији подаци за употребу летећег пепела у производњи цемента нису били доступни.

Поред наведених постоје само појединачни примјери дионица на којима је рађена коловозна конструкција са додатком летећег пепела, док државне стратегије за његову већу примјену још увијек нема. Током 70-их година прошлог вијека летећи пепео се користио у комбинацији са цементом за стабилизацију тла пробних путних

¹⁴ За све нуспроизводе који настају сагоревањем угља у термоелектранама, у свијету је опште прихваћена скраћеница CCP (Coal combustion by-products).

дионица, а неке од њих су: траса пута *Лазаревац – Ибарски пут*, улица *Београдског батаљона* на Бановом Брду, саобраћајница у кругу *Рударског института* у Београду и др. То су били издвојени случајеви употребе летећег пепела, на којима нису рађена даља праћења, како би се могли извући неки свеобухватнији закључци [38]. Такође, 80-их година прошлог вијека су урађене неколике опитне дионице са летећим пепелом у кругу *ТЕ Никола Тесла* и на градским улицама у *Обреновцу*. Међутим, проблем је што данас не постоје увиди у наведене пројекте. Такође, није познато ни које фирме су изводиле радове на наведеним саобраћајницама [11].

Током 2002.године *Институт за путеве* је у сарадњи са *ТЕ Костолац* започео извођење опитних дионица на приступним путевима, у околини сопствене депоније пепела. Опитне дионице (израда трупца пута, привремене коловозне конструкције и затрпавање ровова) су рађене од летећег пепела у комбинацији са локалним материјалима. *Институт за путеве* је још 1995.године, на захтјев *ЈП Електропривреда Србије* урадио пројекат истраживања под називом „*Истраживање могућности примене електрофилтерског пепела и шљаке из термоенергетских постројења Србије, за израду доњег строја и коловозних конструкција путева*”. Наведени пројекат је прошао стручну верификацију, али по њему нису започета истраживања јер су проблем биле финансије. Други истраживачко-развојни пројекат, који је такође радио *Институт за путеве* (Републике Србије) био је: „*Коришћење електрофилтерског пепела и шљаке произведених у термоелектранама Никола Тесла А и Б и термоелектранама Костолац А и Б за потребе путограђе*” [11]. Инвеститор пројекта је било *ЈП Путеви Србије*. Наведени пројекат је завршен 2008.године, али ни послје његове реализације није забиљежена већа примјена летећег пепела у градњи путева Србије. У мају 2017. године *Влада Републике Србије* је са *ЈП Електропривреда Србије* уговорила сарадњу о примјени 3.500 тона летећег пепела из *ТЕНТ-а* у градњи нових саобраћајница на *Коридору Х*, што може бити почетак његове веће примјене у грађевинарству Србије, посебно у изградњи путева.

На основу претходно наведеног и узимајући у обзир податак да је у 2017.години почела изградња трећег блока *ТЕ Костолац*, може се закључити да Србија у годинама које слиједе мора повећати искоришћеност овог индустријског нуспроизвода, чије се резерве свакодневно повећавају и представљају све већи проблем за друштвену заједницу.

8.9. Могућности употребе летећег пепела у путарству и другим гранама грађевинарства

Летећи пепео, као отпадни производ у термоелектранама, већ дуги низ година постаје озбиљан проблем, како због велике заступљености тако и због утицаја на животну средину. У Србији се рјешавању тог проблема углавном није придавала велика важност, зато је и примјена пепела у разним гранама индустрије била занемарљива.

Бројне су могућности употребе летећег пепела у грађевинарству, самостално или у комбинацији са другим материјалима. Неке од могућих примјена су:

- За побољшање физичких и механичких својстава очврслог бетона;
- Као замјена за цемент (или додатак у бетонским мјешавинама);
- У производњи цемента;

- У производњи лаких агрегата и бетона;
- У производњи бетонских префабриката;
- За исушивање подтла грађевинских објеката (услед превелике влажности);
- За стабилизацију слабо носивог тла, самостално или у комбинацији са другим везивним средствима (најчешће кречом или цементом) и геотекстилом и/или геомережама;
- За стабилизацију доњих и горњих носећих слојева коловозних конструкција;
- За стабилизацију насипа;
- У изради асфалтних мјешавина (при чему летећи пепео са величином зрна <math><0,075\text{mm}</math> има улогу пунила);
- Код санације оштећених површина коловоза;
- Код санације клизишта;
- У производњи неких грађевинских материјала (нпр. опеке, гдје има функцију агрегата);
- За инјектирање, тј. прављење инјекционих смјеса (мјешавина са цементом или кречом);
- За стабилизацију отпада и његово очвршћавање (укрућивање) и друго.

8.10. Примјена летећег пепела код стабилизација носећих слојева

Као што је раније наглашено, због способности да испољи пуцоланска својства или својства самовезивања, летећи пепео се може успјешно користити као везиво или допуна везиву, у изради стабилованих горњих и доњих носећих слојева коловозних конструкција, било да се ради о ситнозрном или крупнозрном агрегату [8]. Лабораторијска и теренска испитивања су показала да се летећи пепео у том случају може укључити у прорачун носивост полукрутих коловозних конструкција.

Сам за себе летећи пепео је мало или нимало хидраулично активно везиво, међутим у прашкастом стању и у контакту са водом, реагује хемијски са калцијум-хидроксидом ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) и калцијум оксидом (CaO) и при собној температури формира једињења која имају везивна својства (формула 8.1.) [7].

Уколико се у мјешавинама за стабилизацију користи пепео класе F (по ASTM класификацији) или силикатни (по EN класификацији) мора се додати и активатор, како би се подстакла пуцоланска реакција. Најчешће коришћени активатори, или хемијска везива, су креч и цемент, мада се користе и цементна и кречњачка прашина из пећи за жарење. Комбинација креча, цемента и пуцоланске прашине се такође користи у изради пуцоланских стабилизација. Самовезујући пепео не захтјева активатор и тако нуди економичније алтернативе за широк спектар примјена у стабилизацијама.

Повољне карактеристике пуцоланских стабилизација (*pozzolan-stabilized base - PSB*) зависе од прираста чврстоће унутар масе, која настаје пуцоланском реакцијом између пепела и активатора. Ова везивна маса има улогу да држи заједно зрна агрегата, слично као код бетона ниских чврстоћа.

Правна регулатива је битан фактор који условљава могућности примјене овог отпадног материјала и разликује се од државе до државе. У америчкој савезној држави Висконсин употреба летећег пепела у стабилизацијама је значајно порасла због примјене регулатива које се тичу заштите животне средине и које прописују

његову одговарајућу примјену. Употреба летећег пепела у геотехници зависи од његових карактеристика. Резултати различитих испитивања су показали да стабилизације пепелом класе С (без икаквог активатора) дају одличне резултате физичко-механичких карактеристика.

Летећи пепео се, нарочито у Европи и неким развијенијим свјетским земљама, користи као замјена за природне материјале при изради насипа или гранулисаних (структурних) испуна. Та примјена траје већ неколико деценија. Пепео који се користи у ту сврху мора да се депонује и чува у условима оптималне влажности. Провјером носивости у склопу теренских испитивања утврђено је да летећи пепео збијен под условима оптималне влажности има исте геомеханичке карактеристике као добро збијено тло и као такав је пожељан материјал у коловозним конструкцијама [7].

8.11. Летећи пепео у цементној индустрији и бетонским композитима

Као вјештачки пуцолански материјал, летећи пепео је интересантан, не само у путном инжењерству (као адитив при изради слојева коловозне конструкције у многим пројектиним рјешењима), већ и у цементној индустрији [7]. Једна од најчешћих употреба летећег пепела у свијету је управо тој грани индустрије. Ознака по којој се учешће летећег пепела (пуцоланских својстава) препознаје у цементима је V. Међутим, постојеће количине пепела у свијету су много веће од оних које су потребне цементној индустрији, па се његова примјена мора проширити и на друге гране грађевинарства.

Примјена летећег пепела, у контексту материјала који се користи у бетонским мјешавинама као замјена за цемент, позната је дуги низ година. Америчка асоцијација за пепео који настаје сагоријевањем угља (*American Coal Ash Association-АСАА*) [40] дала је класификацију која се односи на садржај пепела у бетонским мјешавинама (табела 8.8.) [40].

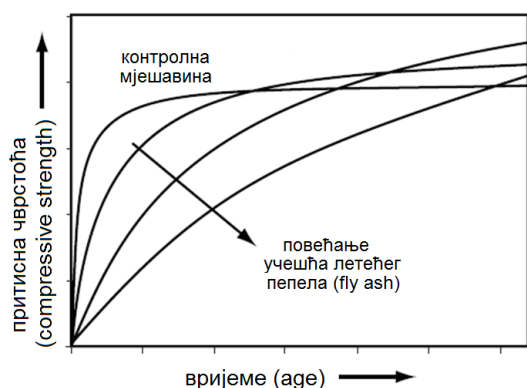
Табела 8.8. – Употреба летећег пепела у бетонским мјешавинама [40]

Количина пепела који се користи као замјена за цемент (%mas)	Класификација (садржај) пепела
<15	Низак
15-30	Средњи
30-50	Висок
>50	Веома висок

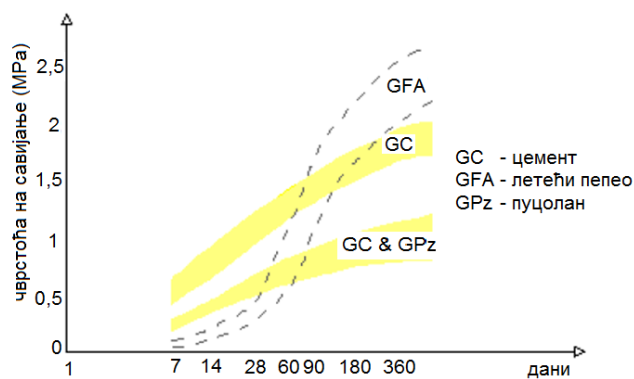
Досадашња истраживања су показала да је утицај летећег пепела у бетонским композитима изузетно добар и пожељан, поготово уколико је ријеч о цементима који се користе у агресивним срединама, тј. срединама са повећаним присуством сулфата и хлорида. Улога летећег пепела у бетонским композитима је углавном двостука и то: хемијска (активно учествује у одвијању пуцоланских реакција) и физичка (дјелује као нуклеацијско мјесто али и као пунило) [7].

Негативна карактеристика оваквих цементних композитних материјала су њихове углавном ниске ране чврстоће, што представља битан параметар који некада ограничава употребу летећег пепела (графикони 8.1. и 8.2.). Ту чињеницу и чињеницу да бетони са додатком летећег пепела при нижим температурама имају нижу топлоту хидратације треба узети у обзир приликом пројектовања и извођења свих

бетонских конструкција [39]. Са повећањем учешћа летећег пепела у бетонским мјешавинама ране чврстоће при притиску се углавном смањују, а касније повећавају (графикони 8.1. и 8.2.) [40]. Исто понашање се запажа и код анализе чврстоћа на савијање бетонских мјешавина са додатком летећег пепела. На основу графикана 8.1. и 8.2. може се закључити и да су чврстоће при притиску и савијању након 180 и више дана њега, код мјешавина са већим учешћем летећег пепела, исте или веће у односу на контролне, чисто цементне мјешавине.



Графикон 8.1. – Утицај учешћа летећег пепела на развој чврстоћа при притиску бетонских мјешавина [40]



Графикон 8.2. – Развој чврстоћа на савијање и њихове вриједности за стабилизације са различитим врстама везива [8]

8.12. Радиоактивност летећег пепела и утицај на здравље људи

У Србији је летећи пепео дуго био дефинисан као опасан отпад. Појам опасан отпад односи се на отпад који, због своје количине, концентрације или због својих физичких и хемијских карактеристика може изазвати или значајно допринијети погоршању људског здравља и појави многих обољења као и повећању морталитета. Такође, опасан отпад има штетан утицај и на животну средину. Усвајањем одговарајућих закона летећи пепео је постао отпад са употребном вриједности, што је омогућило разматрање могућности његовог коришћења [49].

У оквиру истраживачко-развојног пројекта „Коришћење електрофилтерског пепела и шљаке произведених у термоелектранама Никола Тесла А и Б и термоелектранама Костолац А и Б за потребе путограње” [11], испитан је садржај радионуклида на узорцима летећег пепела и шљаке из поменутих термоелектрана и установљено је да су њихове вриједности испод граница радиоактивности контаминације прописане за грађевинске материјале, па су се анализирани летећи пепео и шљака могли користити у изради објеката високоградње и нискоградње. Такође, у наведеном истраживању анализирано је присуство тешких метала у летећем пепелу и изведен је закључак да дати пепео не спада у групу опасног отпада, али да се према садржају укупног хрома (Cr), и појединачним садржајима арсена (As), летећи пепео може сматрати штетним по животну средину уколико се одлаже на депоније инертног отпада [11].

Испитавањем састава летећег пепела са депоније ТЕНТ-а 2012.године, утврђено је да се у пепелу налазе веће количине арсена (As) од прописаних и да се, између осталог, и из тог разлога треба водити рачуна о управљању депонија пепела. Лош утицај микроелементна арсена на биљни и животињски свијет добро је познат, па

је то још један у низу разлога за проналажење одговарајуће употребе пепела и шљаке у индустрији, чиме би се његове количине на депонијама смањиле [49].

Група аутора [48] 2013. године је испитивала радиоактивност угља и летећег пепела из ТЕНТ Б. Наведена истраживања су рађена на Рударско-геолошком факултету у Београду, у склопу пројекта који је финансирало Министарство науке и заштите животне средине Републике Србије. Угаљ је био већим дијелом сачињен од органске материје, али неки елементи који су се у њему налазили у траговима, били су природно радиоактивни. Ови радиоактивни елементи укључују уранијум (U), торијум (Th), те њихове бројне продукте распадања укључујући радијум (Ra) и радон (Rn). У току сагоријевања угља већина уранијума, торијума и њихових продуката распадања одлази из његове структуре и распоређује се између гасне фазе и чврстих продуката сагоријевања, као што је летећи пепео. У наведеном истраживању је испитан садржај радионуклида на 95 узорака, из 8 угљених басена у Србији и Црној Гори, а садржај уранијума ^{238}U и ^{235}U , радијума ^{226}Ra , торијума ^{232}Th и калијума (^{40}K) детектован је на узорцима угља, шљаке и летећег пепела. Испитивањем је установљено да је садржај природних радионуклида већи код летећег пепела него код угља. Да би неки материјал могао да се користи у грађевинарству, гама индекс, тј. специфичне активности ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K морају да задовоље услов дат у формули (8.3.):

$$\frac{C_{\text{RA}}}{\text{Max}(\text{Ra})} + \frac{C_{\text{Th}}}{\text{Max}(\text{Th})} + \frac{C_{\text{K}}}{\text{Max}(\text{K})} < 1 \dots\dots\dots (8.3.)$$

У формули (8.3.) су са C_x означене концентрације одговарајућих радионуклида, а са $\text{Max}(X)$ означене границе садржаја радионуклида, за одговарајућу категорију примјене. Максималне вриједности радионуклида за примјену летећег пепела у нискоградњи износе за: ^{226}Ra - 700Bq/kg, ^{232}Th - 500Bq/kg и ^{40}K - 8000Bq/kg, док су дозвољене вриједности за примјену код објеката високоградње мање, у зависности да ли се летећи пепео примјењује код израде енетеријера или екстеријера објеката. На основу података о специфичној активности радионуклида у летећем пепелу, у ТЕНТ-у Б и коришћењем формуле (8.3.) израчунато је да су просјечне вриједности наведених гама индекса мање од 1. Конкретно за градњу путева и игралишта просјечна вриједност гама индекса је износила 0,37, па се може закључити да је примјена летећег пепела из ТЕНТ Б била дозвољена у грађевинарству, а приоритет примјене је управо био у путарству, због најмање вриједности гама индекса [48].

Из анализе претходно наведених истраживања може се закључити да учешће појединих опасних материја у летећем пепелу (као и сам хемијски састав и физичке особине) варијабилна компонента и да је потреба за њиховом контролом и праћењем стална.

На истраживањима која су спроведена у САД установљено је да летећи пепео контаминира површинске и подземне воде са неколико неорганских једињења која штетно дјелују на биљни и животињски свијет, али и на здравље људи. У Србији се пепео, са еколошког аспекта, сматра материјалом који значајно загађује животну средину. Поред тога, постоје и мишљења која летећи пепео дефинишу као материјал опасан по здравље људи и то неки виде као разлог за његову ограничену употребу. Међутим, исти тај материјал се често одлаже на отворене депоније, које се између осталог неријетко налазе и близу насеља, чиме је опасност по здравље људи повећана [12]. Посебан проблем представљају депоније летећег пепела које се налазе

близу великих водотокова (као што је случај са депонијом ТЕНТ А која се налази у непосредној близини ријеке Саве, код Обреновца), јер је у том случају могућност доспијевања микроелемената у воду знатно већа [49]. Летећи пепео у српским термоелектранама се углавном састоји од 65–70% силицијум-диоксида (SiO_2). Из тога произилази да постоје услови за настанак обољења на бази силикозе и упале слузокоже, као и од рака плућа, па се и на основу тога може закључити да утицај пепела на здравље људи свакако није замемарљив. Доказ тој констатацији су резултати једног истраживања које је рађено у општини Оберновац, гдје је утврђено да је од сса 70.000 становника чак 42.000 имало неке од болести органа за дисање, а када се зна да се двије највеће термоелектране у Србији (ТЕНТ А и ТЕНТ Б) налазе управо у општини Обреновац разлог за такве резултате је јасан [11]. Овај и претходни подаци су више него довољни аргументи због којих Србија у наредним годинама треба наћи рјешења употребе отпадног летећег пепела у разним привредним гранама, чиме би се више пажње посветило заштити живорне средине, а штетни утицај летећег пепела свео на минимум.

8.13. Летећи пепео и животна средина

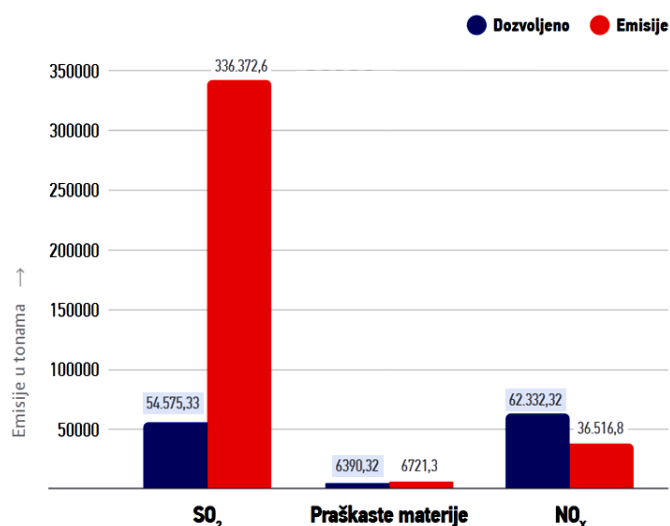
Како у свијету, тако и у Србији, потребе за електричном енергијом стално расту, а самим тим и потребе за већом експлоатацијом угља, као сировине за њену прозводњу у термоелектранама. Паралелно са тим повећавају се и резерве летећег пепела, као нуспроизвода у процесу производње, па је због тога потребно посветити већу пажњу рјешавању веома сложеног проблема његовог депоновања. Да би смањиле присуство летећег пепела на депонијама и штетни утицај по човјека и околину развијене свјетске земље константно откривају нове могућности примјене овог индустријског нуспроизвода. У анализи добити примјене пепела битно је укључити и директне и индиректне добити, те у ту сврху многе развијене земље стимулишу научне институције и фирме које се баве примјеном пепела.

Државна регулатива САД, која се односи на заштиту животне средине, обезбиједила је управљање депонијама летећег пепела због могућности растварања микроелемената у атмосферским водама које пролазе кроз исти. Ако се летећи пепео користи у бетону, могућност издвајања микроелемената је веома ниска. Разлог томе је што су састојци пепела затворени у бетонској маси. Издвајање микроелемената из летећег пепела је могуће код његове неизоловане употребе. Употреба летећег пепела у насипима или стабилованим слојевима коловозне конструкције захтјева пажљиву употребу, како се не би појавили негативни утицаји на животну средину.

Према подацима које је објавила еколошка организација CARMA (Carbon Monitoring for Action) термоелектране Никола Тесла у Обреновцу, су 2007.године са годишњом емисијом од 18,7 милиона тона CO_2 биле на чак 5. мјесту највећих загађивача на свијету [99]. У међувремену ситуација се није пуно побољшала, па је Србија још увијек, по емисији штетног CO_2 , у врху свјетске листе. Цементна индустрија је одговорна за емисију најмање 5-7% укупног угљен-диоксида (CO_2) у атмосферу. До емисије CO_2 у цементарама долази у току процеса добијања оксида калцијума из кречњака (око 60%) и усљед високих температура, потребних за одвијање ових процеса (око 40%) [45]. Већом примјеном летећег пепела, као замјене за цемент,

емисија CO_2 у атмосфери би се значајно смањила. Гасови као што су угљен-диоксид и азотни оксиди, настали усљед производње цемента или сагоријевања угља, поред већ познатих штетних ефеката, утичу и на појаву киселих киша и ефекта стаклене баште.

Термоелектране у Србији и региону се у посљедње вријеме сусрећу са многим проблемима у погледу емисије штетних гасова и ограничења која прописује Европска унија. С обзиром на високе вриједности загађења које емитују термоелектране на цијелом западном Балкану притисци у погледу заштите животне средине ће у наредном периоду бити све већи. Једна од најпроблематичнијих ставки у том погледу је емисија штетног сумпор-диоксида (SO_2). Само једно постројење у Србији (ТЕ Костолац Б) емитује више SO_2 него што је то дозвољено за све земље западног Балкана заједно. Такође, веће вриједности од дозвољених биљеже се и код емисије прашкасте материје (тј. летећег пепела). Једино је емисија азотних оксида (NO_x), у термоелектранама у Србији, у границама прописаних вриједности (дијаграм 8.5.) [116].



Дијаграм 8.5. – Прекорачење максималних штетних емисија за 2018.годину у термоелектранама у Србији [116]

8.14. Одлагање летећег пепела

Издвојени пепео на електрофилтерима термоелектрана се хидраулички, најчешће помијешан са водом, транспортује на одлагалишта (депоније) пепела. Због великих количина пепела јављају се проблеми његове допреме, сакупљања и највећи проблем чување на депонијама. Депоније пепела, као и прашина која се таложи у ужем и ширем рејону термоелектрана, утичу на загађење вода, ваздуха и земљишта. Начин и интензитет утицаја на околину зависе од технологија одлагања пепела, карактеристика тла гдје се врши одлагање, као и од физичких и хемијских карактеристика пепела. Те депоније се често налазе у близини насеља и углавном нису заштићена од утицаја вјетра, па проблем представља и лако доспијевање сувих честица пепела у атмосферу. Мјеста на којима се пепео одлаже на депонију морају бити довољно влажна, да би се настанак прашине свео на минимум. Емисија летећег пепела у атмосферу је законски ограничена на количину мању од 1%, од укупно произведене количине пепела.

Мјере које се предузимају ради заштите од разношења пепела могу бити различите:

- Одржавање воденог огледала;
- Прскање водом;
- Хумунизирање и сијање вишегодишњих трава и
- Формирање вјетрозаштитних појасева.

Одлагалишта пепела обично имају велику запремину, па се приликом њиховог пројектовања треба водити рачуна о њиховој стабилности, да пепео не би дошао у контакт са околним земљиштем. Више од 65% летећег пепела произведеног у термоелектранама широм свијета се депонује на одлагалиштима отпада. Због тога је рециклирање летећег пепела постала све битнија ставка у систему управљања истим. Због повећања трошкова одржавања одлагалишта и интереса за одрживи развој и градњу посљедњих година се у свијету све више пажње придаје његовој поновној употреби [50].

8.15. Предности употребе летећег пепела у грађевинарству

Предности примјене летећег пепела у грађевинарству најчешће се анализирају са аспекта његове примјене као додатка бетонским мјешавинама. Те предности су вишеструке, а неке од њих су:

- Повећавање механичких карактеристика у току времена (због касније пуцоланске реакције летећег пепела);
- Повећавање трајности бетона са учешћем летећег пепела;
- Повећавање обрадивости мјешавина;
- Повећавање носивости бетонских коловозних конструкција;
- Редукција издвајања воде у мјешавинама са летећим пепелом;
- Смањење/редукција водопропусности;
- Већа отпорност на дејство сулфата и алкално-силикатне реакције (ASR);
- Нижа цијена коштања конструкције;
- Смањење примјене скупљих везива (цемента и креча);
- Смањење порозности бетона;
- Могућност „зарастања” прслина и пукотина у бетонским мјешавинама и цементним стабилизацијама током времена;
- Смањење скупљања у конструкцијама;
- Смањење топлотне хидратације цемента;
- Смањење емисије CO₂ у атмосферу и
- Смањење депонија летећег пепела, а самим тим и штетног утицаја на екосистем.

Поред наведених, при градњи насипа путева постоји низ предности коришћења летећег пепела, у односу на остале материјале испуне. Неке од тих предности су:

- Летећи пепео је лакши од природних материјала, па усљед мањег притиска смањује оптерећење на подтло, а самим тим и редукује слијегања;

- Смањење трошкове експлоатације и транспорта у односу на природне материјале испуне;
- Ако је летећи пепео добро збијен у току уградње доњих носећих слојева слијегање изнад тих слојева је скоро занемарљиво;
- Способност самоочвршћавања летећег пепела у току времена;
- Постизање пројектованих чврстоћа у кратком временском периоду након збијања;
- Уколико је слој са летећим пепелом правилно изведен може бити изложен саобраћајном оптерећењу у свим временским условима [44];
- Смањење водопропусности слојева са летећим пепелом, а самим тим и смањење могућности доласка воде у подтло и
- Већа примјена локалног, слабоносивог тла за израду коловозних конструкција.

Летећи пепео, као материјал испуне у конструкцијама путева, се користи самостално или у комбинацији са другим хидрауличним везивима (најчешће цементом или кречом) и/или материјалима испуне (разне врсте агрегата или локалног тла) и водом.

8.16. Законска регулатива и стандардизација

У Републици Србији постоји правна регулатива која дефинише примјену и карактер отпадних материјала, а која се може примијенити и за анализу летећег пепела. У ту регулативу се убрајају:

- Закон о управљању отпадом – који дефинише поновну употребу отпада у које се сврстава и летећи пепео, (Сл.Гласник РС, бр. 36/2009 и 88/2010, члан 38.) [51];
- Правилник о категоријама, испитивању и класификацији отпада, (Сл.Гласник РС, бр. 56/2010) [52];
- Правилник о условима и начину сакупљања, транспорта, складиштења и третмана отпада који се користи као секундарна сировина или за добијање енергије, (Сл.Гласник РС, бр. 98/2010) [53] и
- Удредба о техничким и другим захтевима за пепео, као грађевински материјал намијењен за употребу у изградњи, реконструкцији, санацији и одржавању инфраструктурних објеката јавне намене (Сл.гласник РС, бр. 56/2015) [54].

Поред наведене законске регулативе, за анализу карактеристика и могућности примјене летећег пепела у грађевинарству у Србији користе се и сљедећи стандарди:

- SRPS B.C1.018:2015 [C15],
- SRPS B.H8.359:1973 [C17].

У Европи је коришћење летећег пепела у градњи путева (за мјешавине ојачане хидрауличним везивним материјалом) уређено европским нормама серије EN 14227, које су усвојене од стране земаља чланица CEN-а, а то су:

- EN 14227-3:2013 [C19],
- EN 14227-4:2013 [C20],
- EN 14227-14:2006 [C21].

Европски стандарди који дефинишу примјену летећег пепела у бетону су:

- EN 450-1:2012 [C22],
- EN 450-2:2012 [C23].

Два америчка стандарда, која се најчешће примјењују у анализи употребе летећег пепела у бетонским конструкцијама су:

- ASTM C618-17 [C16],
- ASTM C311/C311M-17 [C24].

У Европској Унији се примјењују норме које регулишу примјену летећег пепела са становишта утицаја на животну средину (*Environmental Code of Practice for the Sale and Use of Pulverised Fuel Ash (PFA)*). Ове норме дефинишу :

- Производњу и примјену летећег пепела;
- Испитивања загађености животне средине;
- Процјену ризика и
- Развој законодавства [44].

Поред наведених, у наставку су дати неки од стандарда који се користе у свијету и који дефинишу употребу летећег пепела у грађевинарству:

САД:

- ASTM D5239-12 [C25],
- ASTM E850-10 [C26],
- ASTM E1861-97 [C27],
- ASTM D5370-14 [C28].

Аустралија:

- AS 1129-1971 [C29],
- AS/NZS 3582.1:2016 [C30].

Канада:

- CAN/CSA A23.5-97 [C31].

Велика Британија:

- BS EN 450-1:2012 [C32],
- BS 6610:1996 [C33].

Њемачка:

- DIN EN 450-1:2012 [C34],
- DIN EN 445:1996-07 [C35],
- DIN EN 446:1996-07 [C36],
- DIN EN 447:1996-07 [C37],
- DIN EN 450:1995-01 [C38],
- DIN EN 451-1:1995-01 [C39],
- DIN EN 451-2:1995-01 [C40].

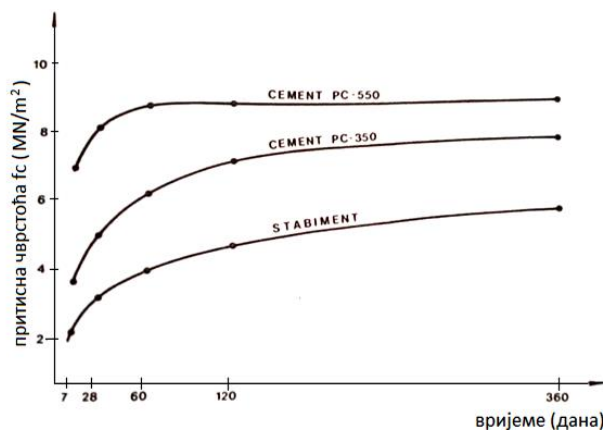
9. ПРЕГЛЕД СТАЊА У ОБЛАСТИ

У овом поглављу дат је прегледан приказ радова аутора који су се бавили испитивањима физичких и механичких карактеристика цементних стабилизација (ЦС)¹⁵, у зависности од учешћа компонентних материјала у мјешавинама.

Аутор *V.Babić* [10] је, у својој докторској дисертацији, испитивао физичко-механичка својства ЦС-а које су биле стабилизоване: портланд цементима (PC) класа 550 (ранија ознака за цемент PC52,5) из фабрике *Podused* (Хрватска) и 350 (ранија ознака за цемент PC32,5) из фабрике *Anhovo* (Хрватска), као и хидрауличним везивом *Stabiment*. *Stabiment* је материјал коришћен као специјализовано хидраулично везиво за израду ЦС-а, који је био произведен у фабрици *Radonja*, у Сиску (Хрватска). Агрегат који је коришћен у експерименталном истраживању био је савски шљунак, из шљункаре *Rakitje* у Загребу и био је једини агрегат у мјешавинама. Фракције агрегата су биле: 0/1, 1/4, 4/8, 8/16 и 16/25mm, при чему су се користиле 3 различите гранулације агрегата: А (најкрупнија), В (средња) и С (најситнија). Агрегат се углавном састојао од: кречњака, кварцног пијеска и кварца.

Лабораторијска испитивања ЦС-а су спроведена на основу тадашњег стандарда за њихову израду – *JUS U.Еg.024:1970* [С1], при чему су гранулометријске криве А и С биле граничне криве у наведеном стандарду. Количина цемента је варијала 0-10%mas. Узорци на којима су се спроводила испитивања били су цилиндричног ($\varnothing 152mm$ и $h=152mm$) и призматичног (12x12x36cm) облика и правили су се на основу *Proctor*-овог опита, тј. одређивања максималне суве запреминске масе ($\gamma_{s,max}$) за оптималну влажност (w_{opt}). У свакој мјешавини је коришћења само по једна врста везива, при чему је утицај врсте везива на оптималну влажност био занемарљив. Испитивања су рађена за различите степене збијености (90, 95 и 98%) и периоде њега узорака (7, 28, 60, 120 и 360 дана). Испитиване вриједности механичких карактеристика стабилизације (чврстоћа при притиску (f_c), индиректна затезна чврстоћа (ITS) и динамички модул еластичности (E_{din})) су били у директној зависности од степена збијености мјешавине и највеће вриједности су имали за максималну збијеност (98%). Такође, наведене карактеристике су биле директно пропорционалне и са периодом њега узорака. Са порастом збијености мјешавине вриједности ITS -а су расле брже него хоризонтални напони затезања, што се позитивно одражавало на понашање ЦС-а. Поред наведених механичких карактеристика одређени су и: модул смицања (G_d), *Poisson*-ов коефицијент (ν) и брзина проласка ултразвука кроз стабилизацијске узорке (V), а накнадно је успостављена и међусобна зависност појединих механичких карактеристика. Анализиран је утицај температуре на ЦС (за различите дебљине асфалтних слојева) и објашњен је механизам настанка пукотина у истој. Могућност настанка пукотина била је директно пропорционална класи цемента. Чврстоћа при притиску била је у зависности од класе цемента и периода њега узорака, као што је приказано на *графикону 9.1.*

¹⁵ У наставку ће се за термин цементна стабилизација користити скраћеница ЦС



Графикон 9.1. – Чврстоће при притиску у зависности од врсте везива и периода њега узорка

Обим спроведених лабораторијских испитивања у наведеној докторској дисертацији приказан је у табели 9.1., у којој су дефинисани варирајући елементи и наведене физичко-механичке карактеристике које су испитаване.

Табела 9.1. – Лабораторијска испитивања у оквиру експеримента докторске дисертације

ГРАДАЦИЈА	А (најкрупнија)			В (средња)			С (најситнија)		
	PC-550	PC-350	Stabiment	PC-550	PC-350	Stabiment	PC-550	PC-350	Stabiment
ВРСТА ВЕЗИВА	1,5 до 7,5	1,5 до 7,5	2,5 до 10	1,5 до 7,5	1,5 до 7,5	2,5 до 10	1,5 до 7,5	1,5 до 7,5	2,5 до 10
САДРЖАЈ ВЕЗИВА (%)	5,0	5,0	5,0	6,0	6,0	6,0	7,0	7,0	7,0
САДРЖАЈ ВОДЕ (%)	98, 95, 90	98, 95, 90	98, 95, 90	98, 95, 90	98, 95, 90	98, 95, 90	98, 95, 90	98, 95, 90	98, 95, 90
ЗБИЈЕНОСТ (%)									
ЊЕГА (дани)	28	f _c , f _i f _c , f _i , E _d , G _d , v	f _c , f _i , E _d , G _d , v	f _c , f _i	f _c , f _i , E _d , G _d , v	f _c , f _i , E _d , G _d , v	f _c , f _i	f _c , f _i , E _d , G _d , v	f _c , f _i , E _d , G _d , v
	100		E _d , G _d , v, V		E _d , G _d , v, V	E _d , G _d , v, V		E _d , G _d , v, V	E _d , G _d , v, V

Количина цемента која је коришћена при справљању стабилизацијских узорка била је у зависности од степена збијености и гранулације агрегата. Највеће количине цемента су биле потребне за стабилизацију најситније гранулације агрегата (С) и највећу збијеност мјешавине (табела 9.2.).

Табела 9.2. – Количине цемента (PC350) потребне за добијање просјечних чврстоћа при притиску у односу на референтну градацију А

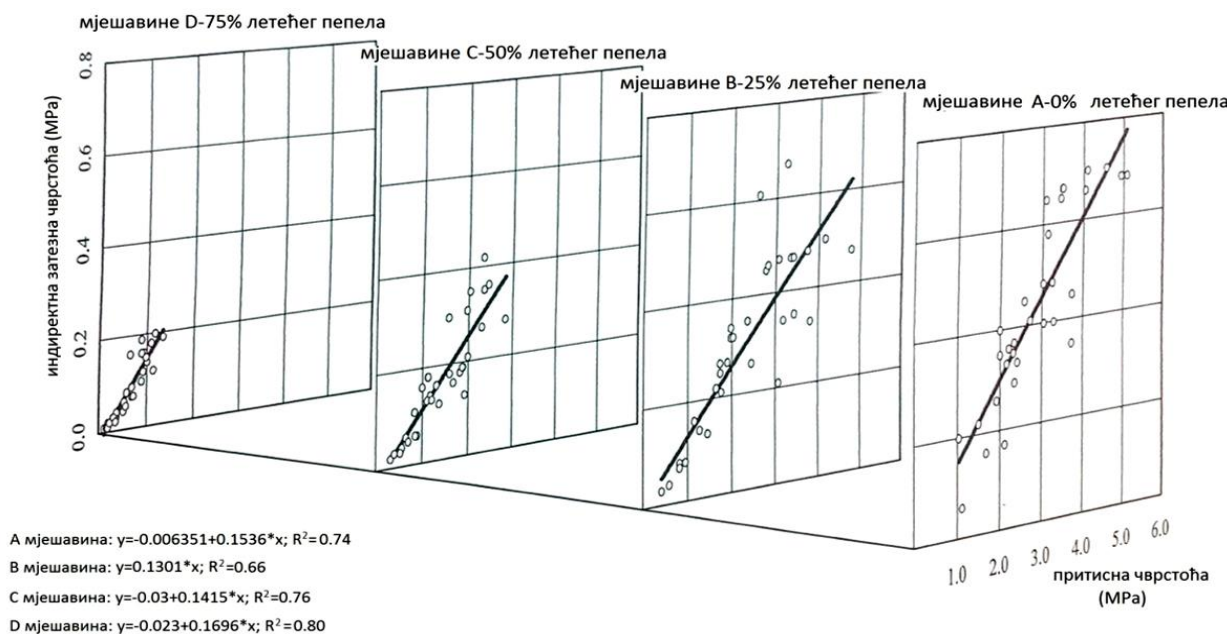
Градација	Збијеност		
	98%	95%	90%
А – најкрупнија	1	1	1
В	1,35	1,33	1,33
С – најситнија	2,15	2,00	-

Стабилизацијом ситног агрегата (пијеска) са цементним везивом и летећим пепелом бавила се ауторка S.Dimter [8]. За испитивање физичких и механичких карактеристика у истраживању је коришћен дравски пијесак, а као везивна средства цемент PC30 из цементаре Našice (Хрватска) и летећи пепео, из ТЕ Pécs (Мађарска).

Током експеримента коришћена су 4 различита односа везива и то:

- А (100% цемент + 0% летећи пепео),
- В (75% цемент + 25% летећи пепео),
- С (50% цемент + 50% летећи пепео) и
- Д (25% цемент + 75% летећи пепео).

Укупан садржај везива износио је 10%*mas* и 14%*mas*. Оправданост за овако висок садржај везива у стабилизацији може се пронаћи у анализи гранулације агрегата. Наиме, ситнијим зрнима агрегата је, због велике специфичне површине, потребна већа количина везива да би повезала сва зрна у мјешавини и на основу тога побољшала механичке карактеристике ЦС. Дати летећи пепео је на основу хемијског поријекла припадао групи киселих пепела (садржај СаО је износио 2,5%), па његова самостална примјена није оправдана, већ се користи само у комбинацијама са другим хидрауличним везивима (у овом случају са цементом). Стабилизацијски узорци су справљани на основу резултата испитивања Proctor-овог опита. Варирајући фактори при испитивању су били период његе (7, 28, 90 и 180 дана) и температуре његе узорака (5, 15, 25, 35°C). Лабораторијска испитивања су рађена на узорцима димензија $\varnothing 100\text{mm}$ и $h=200\text{mm}$, по хрватском стандарду HRN U.Eg.024/80 [C41]. Од механичких карактеристика одређени су: чврстоћа при притиску (f_c), индиректна затезна чврстоћа (ITS), динамички модул еластичности (E_{din}) у оквиру кога су одређени и модул смицања (G), Poisson-ов коефицијент (ν) и брзина проласка ултразвука (V). Успостављена је и међусобна функционална зависност између појединих механичких карактеристика. Зависност између чврстоће при притиску и индиректне затезне чврстоће била је линеарна (графикон 9.2.). Поред наведене, у истраживању су приказане и зависности између чврстоће при притиску и динамичког модула еластичности, односно брзине проласка ултразвука.



Графикон 9.2. – Зависност чврстоћа при притиску и индиректних затезних чврстоћа

Вриједности Poisson-ов коефицијента су се кретале у границама 0,20-0,24, што је у опсегу карактеристичних вриједности за ЦС. Брзина проласка ултразвука се повећавала са временом његе узорака, а примијећено је и да је била обрнуто

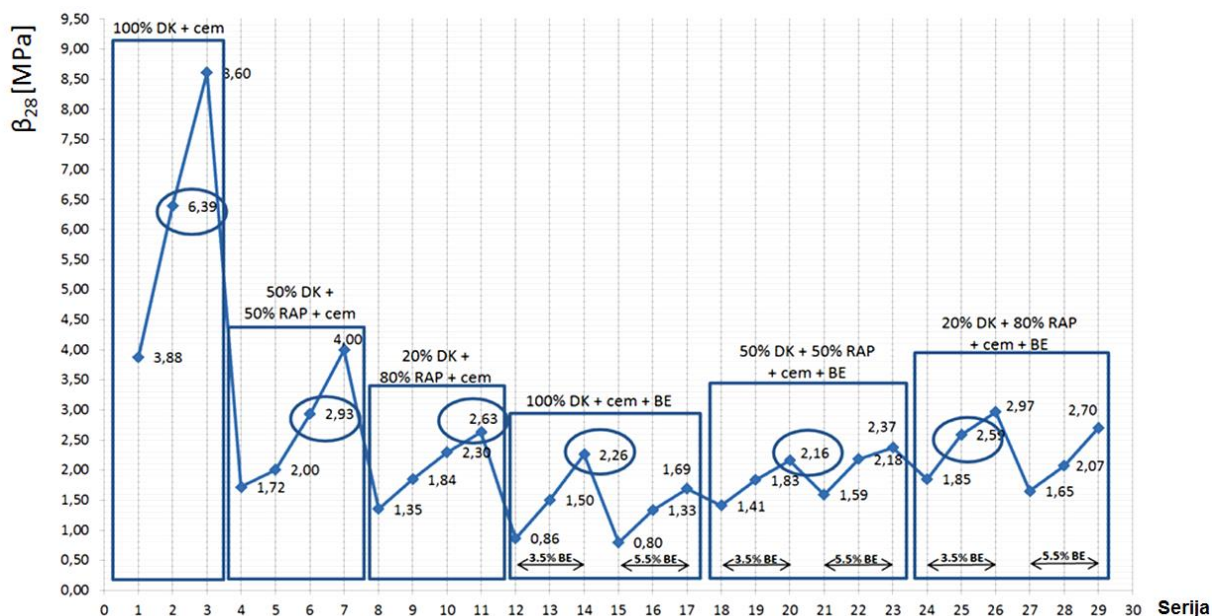
пропорционална са количином летећег пепела у мјешавинама. Са повећањем процента везива запажено је повећање вриједности механичких карактеристика, при чему се највећи раст уочио код вриједности индиректне затезне чврстоће, а најмањи код динамичког модула еластичности. Са повећањем количине везива повећавала се и запреминска маса узорака. Примјеђено је да се при њези узорака на вишим температурама запреминска маса везива смањује, што се може објаснити губитком влаге у току периода његе. Анализиран је и утицај летећег пепела у мјешавинама и закључено је да мјешавине са 25% летећег пепела имају приближно исте вриједности чврстоћа као и мјешавине без додатка пепела (чак се за узорке његоване на температури од 5°C примјеђује и раст чврстоће при притиску након 90 дана за 4,6%, односно 5,6% након 180 дана његе). На узорцима који су имали више од 25% летећег пепела примјеђено је да чврстоће опадају у односу на узорке који имају само цемент као везиво, тако да се додаток летећег пепела у количини до око 25% сматра оправданим у изради ЦС-а, јер наведена количина пепела не утиче на смањење механичких карактеристика и успјешно замијењује цемент (уколико се минимална количина укупног везива ограничити на 12%*mas*). Мјешавине стабилизоване са 75% летећег пепела и 25% цемента не показују задовољавајуће резултате физичких и механичких карактеристика. Са повећањем периода његе узорака повећавале су се и вриједности механичких карактеристика, за све стабилизацијске мјешавине. То се може објаснити каснијом пуцоланском реакцијом мјешавина са додатком летећег пепела. Анализиран је утицај температуре његе на механичке карактеристике стабилизација и примјеђено је да, при дуготрајној њези узорака, вриједности чврстоћа и модула еластичности имају веће вриједности на нижим температурама његе (5 и 20°C).

Могућност употребе рециклираног асфалтног коловоза (RAP-а)¹⁶ у ЦС-у, анализирао је аутор *R. Jakovljević* [25]. Дато истраживање је базирано на анализи механичких карактеристика цементних стабилизација које настају у поступку хладне рециклаже асфалта на лицу мјеста (CIR). Везива која су коришћена у мјешавинама су била цемент и битумен. Поред рециклираног асфалта, коришћен је и дробљени камени агрегат (ДКА)¹⁷ из каменолома Ковиловача, Деспотовац (Србија). Гранулација за ДКА је била 0/22mm, а за RAP 0/16mm, при чему је учешће ситне фракције (0/4mm) за ДКА износило 40%, а за RAP 37%. Веће учешће ситније фракције било је оправдано са становишта обрадивости и лакше уградње стабилизацијских мјешавина. Приликом просијавања RAP-а кроз сито 16mm сва крупнија зрна су одбачена, па надмјерених зрна у мјешавинама није било. Њиховим визуелним прегледом је примјеђено да су дата зрна била слијепљена (усљед присуства битумена), тј. садржала су грудве RAP-а. Приликом просијавања било је и комада старог асфалта који су били недовољно уситњени у току стругања коловозног застора. Сарджај битумена у датом агрегату је просјечно износио око 4,9%. Процент RAP-а (у односу на укупну масу агрегата) у мјешавинама је варирао и износио је 0, 50 и 80%*mas*. Одређивање гранулометријског састава је рађено на основу стандарда SRPS U.B1.018:2005 [C42]. Цемент који је коришћен у истраживању је био CEMIII 32,5R, из фабрике Lafarge, Беочин (Србија). Количине цемента су, у зависности од стабилизацијске мјешавине, износиле 3, 4 и 5%*mas*. Оптимална влажност и

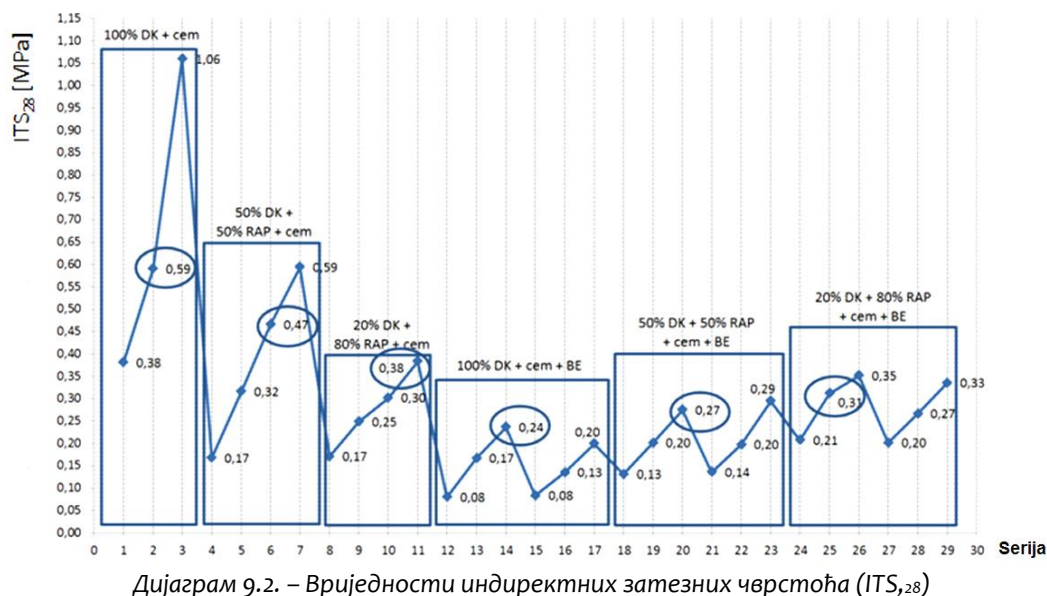
¹⁶ У наставку ће се за термин рециклирани (или стругани) асфалтни коловоз користити скраћеница RAP

¹⁷ У наставку ће се за термин дробљени камени агрегат користити скраћеница ДКА

максимална сува запреминска маса одређени су на основу стандардног Proctor-овог опита. Збијање узорака је рађено уз помоћ цилиндричног калупа ($\varnothing 150\text{mm}$ и $h=120\text{mm}$) и набијача масе $2,5\text{kg}$. Збијање је вршено у три слоја, са по 25 удараца набијача. Запреминска маса је зависила од учешћа различитих врста агрегата и била је обрнуто пропорционална повећању количине рециклираног асфалта. За мјешавине само са ДКА запреминска маса је износа око 2200kg/m^3 , док је за мјешавине са 20% ДКА и 80% RAP-а износила око 1900kg/m^3 . Од механичких карактеристика одређени су: чврстоћа при притиску (β), индиректна затезна чврстоћа (ITS), отпорност на замор и модул крутости. Стабилизацијски узорци су справљани у цилиндричним калупима, уз помоћ Proctor-овог опита (димензије узорака су биле исте као и при одређивању оптималне влажности и максималне суве запреминске масе). Испитивање узорака рађено је након 28 дана његе. Узорци су вађени из калупа одмах након справљања, а до дана испитивања су његовани у PVC фолијама, при влажности од 95% и на собној температури (20°C). Припремљено је по 6 узорака за сваки садржај везива (по 3 за чврстоћу при притиску и индиректну затезну чврстоћу). На основу резултата испитивања изведен је закључак да пораст количине рециклираног асфалта у мјешавинама утиче на смањења: чврстоћа при притиску (за мјешавине са 50% RAP-а чврстоће при притиску су просјечно износиле 37%, а за 80% RAP-а 30% вриједности чврстоћа које су имале мјешавине само са ДКА) и индиректних затезних чврстоћа (за мјешавине са 50% RAP-а индиректне затезне чврстоће су просјечно износиле 47%, а за 80% RAP-а 38%, у односу на вриједности за мјешавине само ДКА). На дијаграму 9.1. приказане су вриједности чврстоћа при притиску у зависности од врсте агрегата и везива. Анализом дијаграма 9.1. може се примијетити да (као што је претходно речено) чврстоће при притиску опадају са повећањем количине рециклираног материјала, а исто запажање може се уочити и код анализе вриједности индиректних затезних чврстоћа (дијаграм 9.2.).



Дијаграм 9.1. – Вриједности чврстоћа при притиску (β_{28})



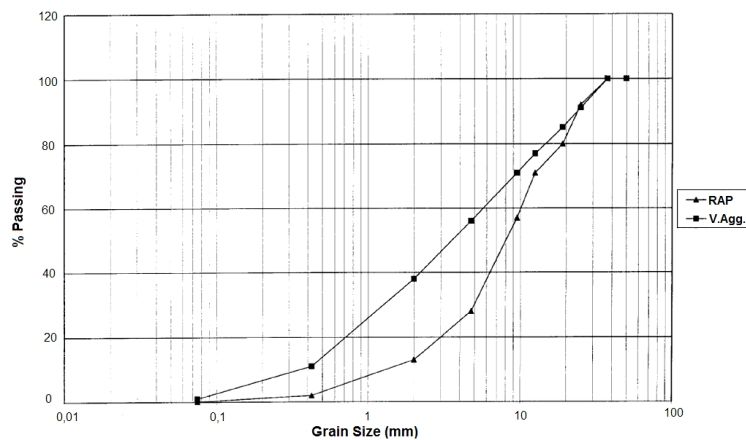
Са повећањем учешћа рециклираног асфалта у мјешавинама смањују се вриједности модула крутости. Приликом одређивања отпорности на замор примijeђено је да се на испитиваним узорцима дилатације повећавају са већом употребом рециклираног асфалта. Са повећањем учешћа RAP-а са 0 на 50 и 80% дилатације расту за око 60, односно 100%. Испитивање замора материјала се са једног аспекта може сматрати одређивањем реолошких карактеристика ЦС-а, јер се тим поступком симулира утицај понављаног саобраћајног оптерећења на коловозну конструкцију са стабилованим слојем.

Стабилизацијом природног агрегата (*Virgin aggregate-V.Agg.*) и рециклираног асфалтног коловоза (RAP-а) цементом бавили су се и аутори *R.Taha, A.S.Al-Harthy, K.Al-shamsi* [55]. Рециклирани асфалтни коловоз који је коришћен у експерименту био са једног ауто-пута у Оману (*Batinah Highway*), док је природни агрегат био дробљени камени агрегат (*crushed rock*). Испитивања су рађена на 5 мјешавина са различитим учешћем рециклираног асфалта и природног агрегата (100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 0/100, редом). Као везиво је коришћен цемент *CEM I* (из фабрике *Oman Cement Company, Al-Rusayl*) у количинама 0, 3, 5 и 7%*mas*. Рециклирани асфалт и природни агрегат су коришћени за израду стабилизација у поступку реконструкције постојеће коловозне конструкције. Утврђено је да је влажност RAP-а износила 0%, након излагања на сувом ваздуху, у трајању од 48h. Испитивања су показала да је сува запреминска маса била у директној зависности од количине цемента и запажено је њено повећавање са повећањем количине додатка везива ($\gamma_{s,max}$ је измјерена за 7% додатка цемента). Такође, сува запреминска маса се повећавала и са повећањем количине природног агрегата (табела 9.3.). Природна влажност RAP-а је износила 0,23%, а природног агрегата 0,86%.

Табела 9.3. – Вриједности оптималних влажности (ОМС) и максималних сувих запреминских маса ($Max \delta_d$) за различите мјешавине

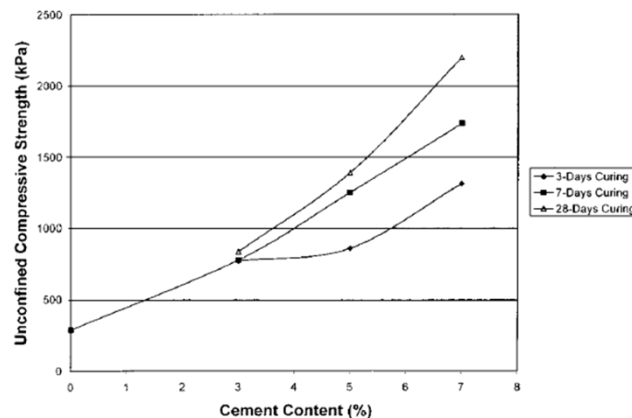
Percent cement	100% RAP ^a		90% RAP ^a		80% RAP ^a		70% RAP ^a		100% virgin aggregate	
	ОМС ^b (%)	Max δ_d (g/cm ³)	ОМС ^b (%)	Max δ_d (g/cm ³)	ОМС ^b (%)	Max δ_d (g/cm ³)	ОМС ^b (%)	Max δ_d (g/cm ³)	ОМС ^b (%)	Max δ_d (g/cm ³)
0	7.0	1.885	7.2	1.937	8.0	1.952	8.2	2.174	5.7	2.250
3	7.8	1.921	8.0	1.988	8.2	2.060	8.6	2.187	6.0	2.313
5	8.2	1.993	8.8	2.056	8.4	2.104	8.8	2.238	6.4	2.381
7	8.5	2.014	9.0	2.096	9.0	2.116	9.1	2.246	7.4	2.387

Гранулометријски састав RAP-а и природног каменог агрегата (V.Agg.) одређен је према америчком стандарду AASHTO T27-14 [C43] (графикон 9.3.). Величина зрна агрегата је била 0/25mm.



Графикон 9.3. – Гранулометријски састав рециклираног асфалта (RAP-а) и природног агрегата (V.Agg.)

Чврстоћа при притиску (UCS) је одређена према америчком стандарду ASTM D1633-17 [C44]. Испитивања стабилизацијских узорака су рађена након: 3, 7 и 28 дана његе (на собној температури). Примјеђено је да се чврстоће при притиску (UCS) и резилијентни модули еластичности (M_r) повећавају са процентом додатка везива и највеће вриједности имају за 7% додатка цемента. Утицај количине додатка цемента и периода његе узорака на вриједности чврстоћа при притиску је приказан на графикону 9.4..



Графикон 9.4. – Чврстоће при притиску у зависности од учешћа цемента и периода његе узорака

Узорци за механичка испитивања су били цилиндричног облика ($\varnothing 102\text{mm}$, $h=127\text{mm}$) и справљани су уз помоћ модификованог Proctor-овог опита (амерички стандард AASHTO T180-17 (Method C) [C45]).

Рециклирани асфалтни коловоз (RAP) може да се користи и како агрегат за повећање носивости природног тла (S-Soil). У истраживању групе кинеских аутора (LI Xiangguo, YIN Xiaobo, MA Baoguo, HUANG Jian, LI Junxiao) [56] стабилизација тла и RAP-а је рађена са цемента и летећим пепелом, при чему је коришћен и минерални адитив (Modify agent-MA), који је био мјешавина алкалних и сулфатних једињења. Цемент (C), који је коришћен у истраживању, је био из фабрике Huaxin Cement (Кина), а летећи

пепео (FA) из термоелектране Qinshan, такође из Кине. Учешће везива у мјешавинама ($m_{cem} + m_{FA}$) је износило од 2 до 6% у односу на укупну масу агрегата ($m_S + m_{RAP}$), при чему је однос $m_{cem} : m_{FA}$ износио 1:1. Маса адитива (МА) је била константна и износила је 5% од масе везива ($m_{cem} + m_{FA}$). Природно тло је било састављено од црвене глине (red clay-S). Рециклирани асфалт је садржао стари битумен у количини од 4% мас. Учешће RAP-а и природног тла је варијало у мјешавинама, а испитана су три различита односа (RAP/S=0,25; 0,50; 0,75). Из наведених односа се закључује да је учешће природног тла било веће од учешћа RAP-а.

У датом истраживању су коришћени кинески JTG стандарди. Урађена су и хемијска испитивања компонентних материјала: природног тла, цемента и летећег пепела (табела 9.4.), као и микроскопска испитивања појединих материјала.

Табела 9.4. – Резултати хемијске анализе: глине (S), цемента (C) и летећег пепела (FA)

Compositions/%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	LOI ^Δ
Clay(S)	62.61	12.2	6.19	6.1	2.49	1.41	0.89	0.96	0.23	6.52
Cement(C)	24.08	4.72	2.46	58.24	1.95	0.78	0.07	2.31	-	3.82
Fly ash(FA)	50.49	30.68	3.74	3.48	0.51	1.34	0.56	0.92	-	6.22

Δ LOI.: loss on ignition at 950-1000 °C

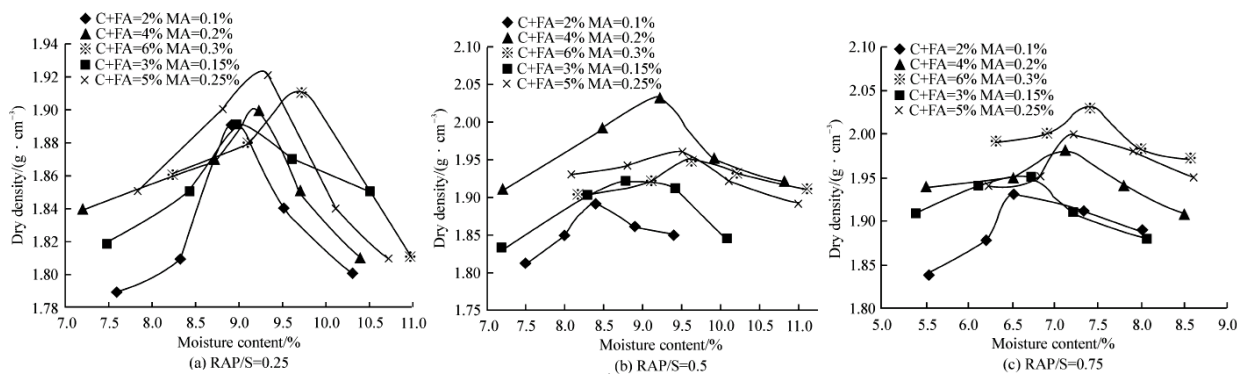
Максимална сува запреминска маса и оптимална влажност (табела 9.5.) су одређени на основу стандардног Proctor-овог опита, по стандарду JTG E51-2009 [C46] (који је сличан америчком стандарду ASTM D698-12 [C47]).

Табела 9.5. – Оптималан садржај воде (ОМС) и максимална сува запреминска мјешавина (Max δ_d)

C+FA ^Δ (%)	RAP/S=0.75(80%RAP)		RAP/S=0.5(50%RAP)		RAP/S=0.25(20%RAP)	
	ОМС/%	Maxδ _d /(g·cm ⁻³)	ОМС/%	Maxδ _d /(g·cm ⁻³)	ОМС/%	Maxδ _d /(g·cm ⁻³)
2	6.5	1.93	8.4	1.89	8.9	1.89
3	6.7	1.95	8.8	1.92	9.0	1.89
4	7.1	1.98	9.2	2.03	9.2	1.90
5	7.2	2.00	9.5	1.96	9.3	1.92
6	7.4	2.03	9.6	1.95	9.7	1.91

Δ the mixtures containing 5 % MA of C+FA

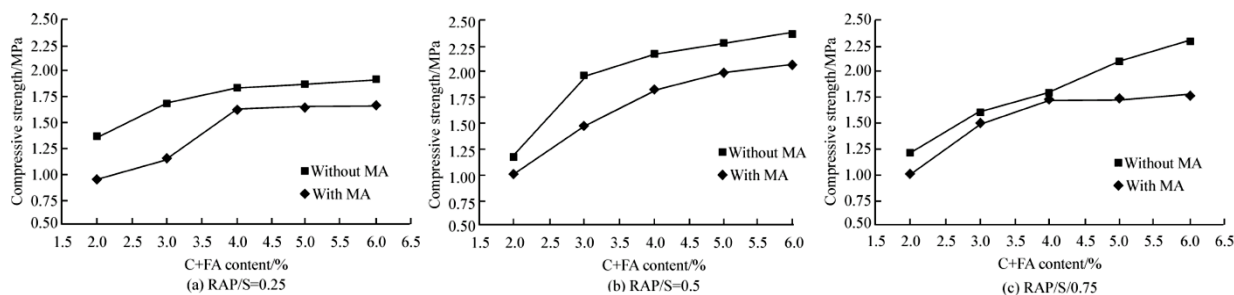
Вриједности ОМС и Max δ_d биле су у зависности од врсте везива и учешћа рециклираног асфалта и природног тла у мјешавинама. Оптимална влажност је била мања од 10%, а максимална сува запреминска маса је износила и преко 2,00g/cm³ (графикон 9.5.).



Графикон 9.5. – Максимална сува запреминска маса и оптимална влажност у зависности од учешћа компонентних материјала стабилизације

Механичке карактеристике (UCS и ITS) су одређене на цилиндричним узорцима ($\varnothing 10,0\text{cm}$ и $h=17,0\text{cm}$), при збијености узорака од 97%. Чврстоћа при

притиску (UCS) је рађена на основу стандарда JTG E51-2009 [C46] (који је сличан америчком стандарду ASTM D2166 [C48]). Додатком минералног додатка (МА) мјешавинама механичке карактеристике стабилизације (UCS и ITS) су се повећавале и до 20%. Примјеђено је да се са повећањем учешћа RAP-а повећавају и механичке карактеристике стабилизације. Максималне вриједности чврстоћа при притиску су биле за мјешавине са 6% додатка везива (C+FA), а њихова вриједност је била у зависности од односа RAP/S и присуства минералног додатка (графикон 9.6.).



Графикон 9.6. – Вриједности чврстоћа при притиску у зависности од учешћа компонентних материјала и присуства адитива

Аутори су, због карактеристика стабилизованог агрегата, испитивали и постојаност узорака на дејство воде (*water stability*), на основу одређивања индиректне затезне чврстоће у водом засићеном стању – *wet ITS* (табела 9.6.). Ово испитивање је рађено имајући у виду чињеницу да је природно тло подложно бубрењу, што у материјалима доњих слојева коловозне конструкције представља проблем.

Табела 9.6. – Вриједности ITS-а у сувом (*dry*) и водом засићеном (*wet*) стању, као и постојаност на дејство воде (*water stability*)

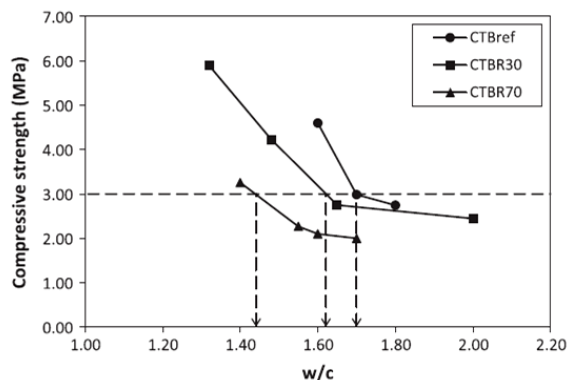
RAP/S	C+FA/%	ITS(without MA)/MPa			ITS (with MA)/MPa		
		Dry ITS	Wet ITS	Water stability	Dry ITS	Wet ITS	Water stability
0.25	2	0.28	Damaged	-	0.37	0.24	0.64
	3	0.37	0.17	0.45	0.49	0.32	0.65
	4	0.49	0.24	0.49	0.53	0.37	0.69
	5	0.51	0.25	0.48	0.56	0.40	0.72
	6	0.45	0.23	0.51	0.57	0.40	0.71
0.5	2	0.27	Damaged	-	0.31	0.21	0.69
	3	0.46	0.19	0.41	0.51	0.36	0.71
	4	0.55	0.31	0.57	0.60	0.45	0.75
	5	0.56	0.32	0.57	0.62	0.46	0.74
	6	0.59	0.31	0.52	0.66	0.51	0.77
0.75	2	0.24	Damaged	-	0.39	0.24	0.62
	3	0.38	0.19	0.50	0.48	0.34	0.70
	4	0.49	0.28	0.58	0.51	0.36	0.71
	5	0.51	0.28	0.55	0.59	0.40	0.68
	6	0.52	0.29	0.53	0.62	0.45	0.72

Оптималан однос рециклираног асфалта и природног тла у мјешавинама је износио 1:1, а укупна количина додатка везива од 3 до 5%*mas*, док се оптимална количина минералног додатка кретала од 0,15 до 0,25%.

Стабилизацију рециклираног асфалтног коловоза (RAP-а) и природног тла са цементом истраживали су и аутори M.Isola, G.Betti, A. Marradi, G.Tebaldi [57]. Ова група аутора је испитивала утицај варијације количина компонентних материјала на својства цементних стабилизација. Рад је приказан кроз двије цјелине и то лабораторијски експеримент и тест саобраћајног оптерећења. У зависности од врсте и количине агрегата (RAP, ситнозрно и крупнозрно тло) анализирана су 3 различита типа мјешавина са:

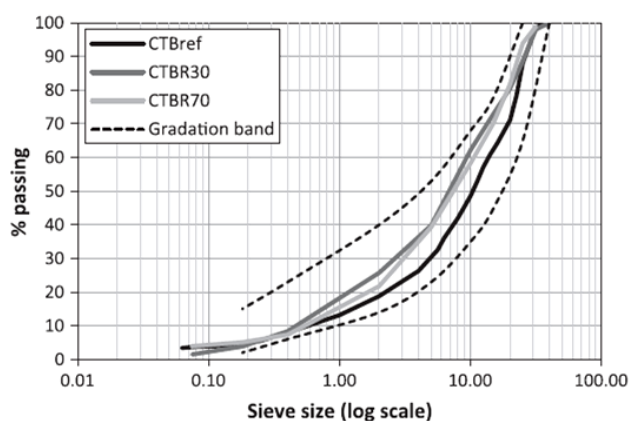
- 70% ситних + 30% крупних честица природног тла (мјешавина: CTBref¹⁸);
- 50% ситних + 20% крупних честица природног тла + 30% RAP-а (CTBR30¹⁹) и
- 10% ситних + 20% крупних честица природног тла + 70% RAP-а (CTBR70).

Садржај цемента је варирао у количинама од 2,9%, 3,56% и 3,97%*mas*. Дате количине су усвојене на основу количина потребних за добијање референтне чврстоће при притиску од 3,0МПа. Вриједности водоцементног фактора (*w/c*) су такође одређене на основу наведене референтне чврстоће (графикон 9.7.).



Графикон 9.7. – Одређивање *w/c* на основу референтне чврстоће при притиску

Садржај битумена у рециклираном асфалу је износио 5,5%*mas*, а присуство шупљина у укупној запремини 4%. Оптимална влажност и сува запреминска масу су одређена на узорцима Ø15,24cm и *h*=17,78cm, уз помоћ модификованог Proctor-овог опита. Од механичких карактеристика испитани су чврстоћа при притиску, затезна чврстоћа и модул еластичности. Испитивања су рађена по италијанским UNI стандардима, који су у складу са европским EN стандардима. Спецификације материјала су рађене на основу стандарда UNI EN 13242:2013 [C49] и UNI EN 12620:2008 [C50]. Гранулација агрегата је била 0/31,5mm (графикон 9.8.).



Графикон 9.8. – Гранулометријске криве мјешавина агрегата (з) и граничне криве

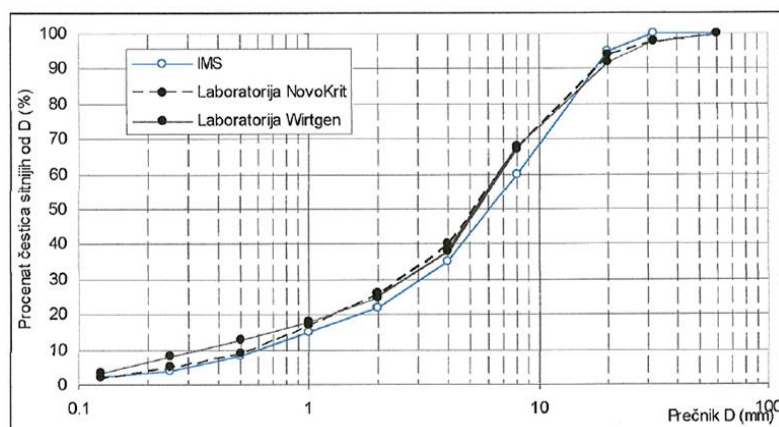
Влажност на којој су стабилизацијски узорци његовани износила је 90%. Аутори су објаснили разлику између термина цементна стабилизација и третман тла цементом. Термин третман тла се првенствено односи на мјешавине цемента

¹⁸ CTB - Cement Treated Base

¹⁹ CTBR - Cement Treated Base with RAP

и ситнозрног тла, а термин *цементна стабилизација* на мјешавине цемента и каменог агрегата (или RAP-а). У раду наведених аутора дата је зависност између количина воде и количине додатка цемента у бетонским мјешавинама, које се користе при градњи коловозних конструкција (слика 8.4.). У раду је дата и анализа промјена које настају у стабилизованом слоју коловозне конструкције са високим садржајем RAP-а. Оптималне количине влаге су се кретале између 7 и 8% (у зависности од учешћа RAP-а). У другом дијелу истраживања изграђене су 4 референтне дионице пута (са различитим учешћима компонентних материјала) и анализирана су њихова понашања под различитим утицајем саобраћајног оптерећења. Примјеђено је да вриједности чврстоћа при притиску и модула еластичности зависе од температуре околине и највише вриједности имају при ниским температурама (тј. зими).

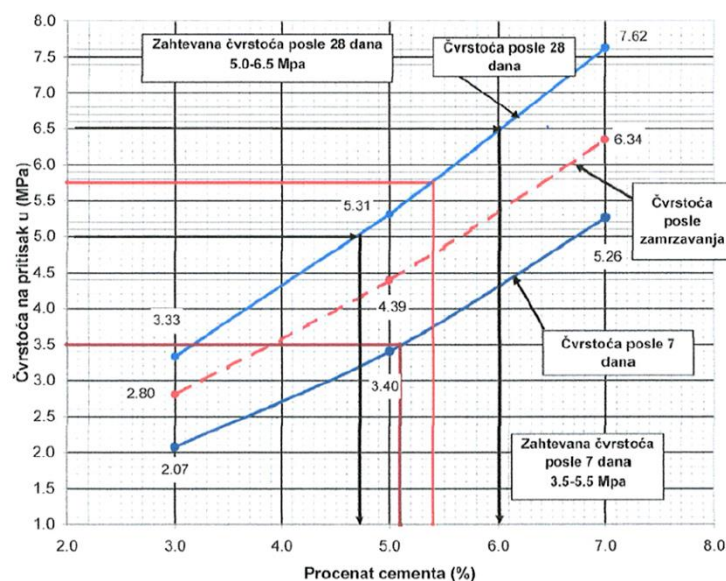
У циљу поновне употребе старог асфалта и промоције одрживе градње у Србији, а на основу искустава развијених европских и свјетских држава, *Институт за материјале Србије (ИМС)* је крајем 2015.године анализирао могућности примјене рециклираног асфалтаног коловоза и додатка адитива у изради цементних стабилизација реконструисаних коловозних конструкција. Анализа је спроведена на два путна правца у Србији и то на обилазници око Смедерева (од *km 262+704* до *km 268+700*) и на државном путу *IV* реда, број 14 (од *km 108+197* до *km 110+450*) [58]. Испитивања узорака цементне стабилизације су рађена у три лабораторије и то у: *ИМС-овој лабораторији (Србија)*, *Wirtgen-овој лабораторији (Њемачка)* и *NovoCrete лабораторији (такође Њемачка)*. Веће разлике у рецептурама за израде оба путна правца нису постојале (иако су издате у 3 различите лабораторије). За израду узорака коришћен је агрегат од рециклираног асфалтног коловоза (стругани асфалт) и туцаника. Однос рециклираног асфалта и туцаника је износио 70:30 редом. На основу *USCS* класификације наведени материјал се класификовао као добро гранулисани материјал. Гранулација агрегата је била *0/31,5mm*, а гранулометријске криве за обилазницу око Смедерева (рађене у три лабораторије) су приказане на графикану 9.9.



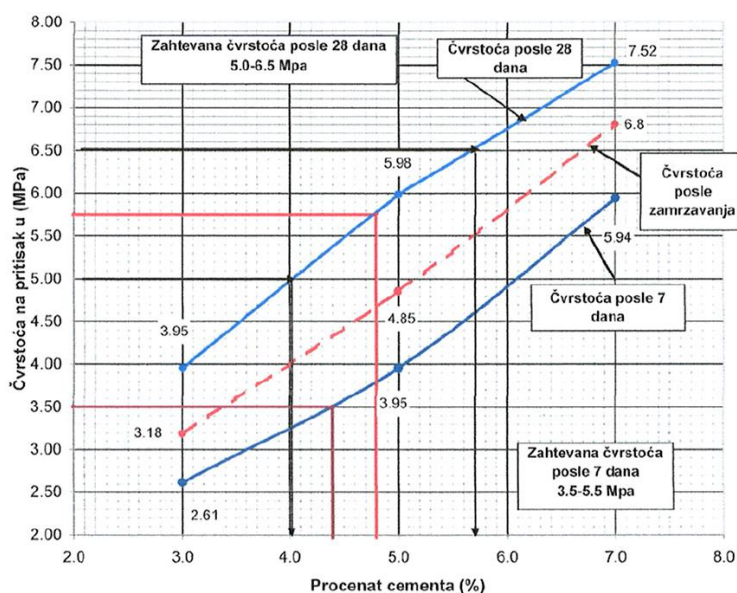
Графикон 9.9. – Гранулометријске криве агрегата са обилазнице око Смедерева

Као везиво коришћен је цемент *PC32,5R-BeoSol* (произвођача *Lafarge*, Беочин) у количинама 3, 5 и 7%*mas*. Хемијски додаток *NovoCrete* (произвођача *OPiS AG* из Швајцарске) примјењен је био у количини 2%*mas* (у односу на масу цемента), а коришћен је за повећање носивости и еластичности стабилизованог слоја коловозне конструкције. На цилиндричним калупима запремине 2125cm^3 ($\varnothing 15,0\text{cm}$ и $h=12,0\text{cm}$)

модификованим Proctor-овим опитом (стандард SRPS U.B1.038:1997 [C14]) одређена је оптимална влажност (6,4%) и максимална сува запреминска маса узорака (2020kg/m^3). Поред чврстоће при притиску и индиректне затезне чврстоће експерименталним истраживањем одређене су и чврстоће при притиску након дејства мраза и вриједности динамичког модула еластичности (стандард ASTM D3467-79(2003) [C51]). Испитивања узорака су рађена након 7 и 28 дана његе. Захтјеване чврстоће при притиску после 28 дана његе износе су 5,0-6,5MPa, а после 7 дана његе 3,5-5,5MPa (графикони 9.10. и 9.11.). Испитивањем чврстоће при притиску, на узорцима који су претходно излагани дејству мраза (14 циклуса), установљено је да вриједности чврстоћа при притиску нису смањене за више од 20% и као такве стабилизацијске мјешавине су сматране отпорним на дејство мраза.



Графикон 9.10. – Захтјеване и остварене вриједности чврстоћа за обилазницу око Смедерева

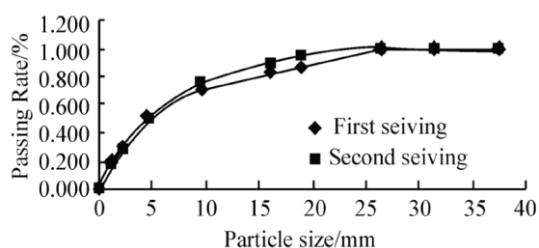


Графикон 9.11. – Захтјеване и остварене вриједности чврстоћа за државни пут IV реда, бр.15

На основу графикана 9.10. и 9.11. усвојене су оптималне количине додатка цемента и оне су износиле: на обилазници око Смедерева – 5,4%*mas*, а на државном путу IV реда, број 15 – 4,8%*mas*. Испитивање динамичког модула еластичности (E_{din}) је

урађено на узорцима са додатком 5% цемента, са и без додатка NovoCrete-a. Резултати су показали да је средња вриједност E_{din} за мјешавине без додатка адитива износила 11.052MPa, а са додатком 2% NovoCrete-a 8.501MPa, што је било позитивно са становишта анализе еластичних својстава цементних стабилизација. Чврстоће при притиску са и без додатка адитива се нису битно разликовале.

Могућности примјене RAP-а за побољшање карактеристика природног тла (*red clay*), уз додаток цемента, истраживали су аутори: MA Baoguo, WANG Haifeng, WEI Dingbang [59]. Наведени аутори су анализирали различита учешћа RAP-а (A) и природног тла (S), и то у односима: A/S=1/5; A/S=2/5; A/S=3/5; A/S=5/5 и S=0. Цемент који је коришћен у истраживању имао је ознаку PO42,5, а дозиран је у количинама: 2, 4 и 6%*mas*. Просијавање струганог асфалта је рађено два пута, а разлике у проласцима кроз номинална сита дате су на графикону 9.12., на основу кога се може примијетити да не постоје битна одступања у гранулацијама након првог и другог просијавања RAP-а.



Графикон 9.12. – Гранулометријске криве за два просијавања RAP-а

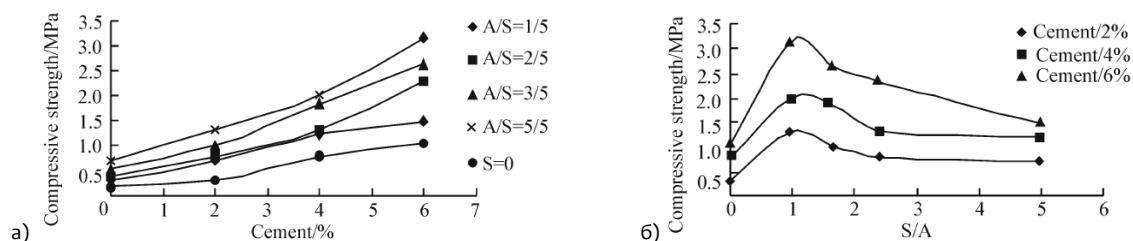
Оптималан садржај воде у мјешавинама је износио је од 6,5 до 10,0%, а максимална сува запреминска маса је од 1,85 до 2,05g/cm³ (табела 9.7.). Максимална сува запреминска маса измјерена је у мјешавини са истим учешћем рециклираног асфалта и природног тла (A/S=5/5) и износила је $\gamma_{max}=2,05g/cm^3$ (уз додаток 4%*mas* цемента). Најниже вриједности оптималне количине влажности ($w_{opt}=6,5\%$) су измјерене у мјешавинама у којима је као агрегат коришћен само RAP (S=0). Приликом одређивања оптималне влажности вода је дозирана у количинама од 5, 6, 7, 8 и 9%.

Табела 9.7. – Оптималне влажности и максималне суве запреминске масе за различита учешћа агрегата

Asphalt/soil	Cement/%	Optimum water content/%	Maximum dry density/(g/cm ³)
1/5	2	9.0	1.93
	4	10.0	1.85
	6	9.0	1.96
2/5	2	8.0	1.91
	4	7.5	1.97
	6	9.5	2.00
3/5	2	6.0	2.00
	4	8.5	2.10
	6	6.5	2.01
5/5	2	9.0	1.98
	4	9.0	2.05
	6	9.9	2.03
s=0	2	6.5	2.02
	4	6.5	1.99
	6	7.0	2.03

Поред оптималне влажности и максималне суве запреминске масе узорака, одређене су чврстоће при притиску и динамички модули еластичности. Максимална чврстоћа при притиску је износила 3,17MPa (за 6% додатка цемента), при чему је био

исти однос учешћа рециклираног асфалта и природног агрегата ($A/S=5/5$). Занимљиво је да су најмање вриједности чврстоћа при притиску измјерене за мјешавине само са рециклираним агрегатом (графикон 9.13.).



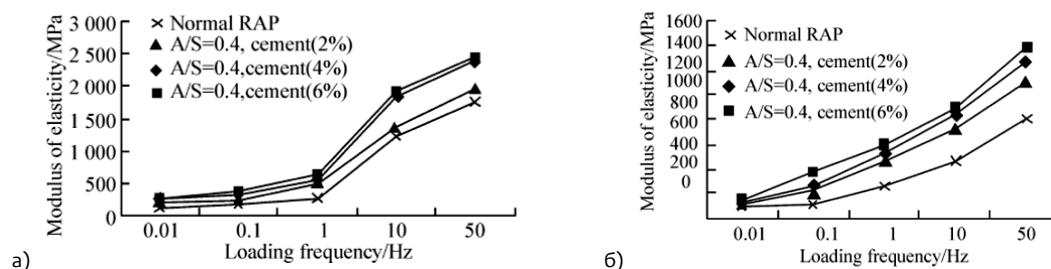
Графикон 9.13. – Зависност чврстоћа при притиску од: а) количине цемента и б) врсте агрегата

Чврстоће при притиску су одређене на узорцима коју су његовани 7 дана. Постојаност на дејство воде (*water stability*) је одређена на узорцима који су након стандардне његе од 7 дана потопљени у воду, у којој су били 24h. У зависности од резултата испитивања чврстоћа при притиску дефинисана је и отпорност узорака на дејство воде (табела 9.8.) За мјешавине које су садржале само рециклирани стругани асфалт чврстоће при притиску су износиле од 0,18 до 1,07MPa, у зависности од количине додатка цемента (2-6%*mas*).

Табела 9.8. – Вриједности чврстоћа при притиску са и без дејства воде

Asphalt/Soil	Cement/%	Compressive strength/MPa	Compressive strength under water for 24h/MPa
1/5	2	0.70	0.66
	4	1.22	0.75
	6	1.48	1.18
2/5	2	0.80	0.76
	4	1.31	0.63
	6	2.28	1.92
3/5	2	1.00	0.85
	4	1.85	1.82
	6	2.28	2.37
5/5	2	1.30	0.92
	4	2.07	1.67
	6	3.17	2.98

Динамички модули еластичности (графикон 9.14.) имали су веће вриједности са повећањем фреквенције осциловања, а смањивали су се за при повећању температуре (са 45 на 55°C). Анализа је рађена за различите количине додатка цемента, при чему је однос A/S био константан и износио је 0,4 (2/5).



Графикон 9.14. – Зависност модула еластичности од фреквенције осциловања и температуре за: а) 45°C и б) 55°C

Аутори F.F.Samargo, T.B.Edil, S.H.Venson [60] бавили су се испитивањима стабилизација рециклираног асфалтног коловоза (RPM^{20}) и природног агрегата

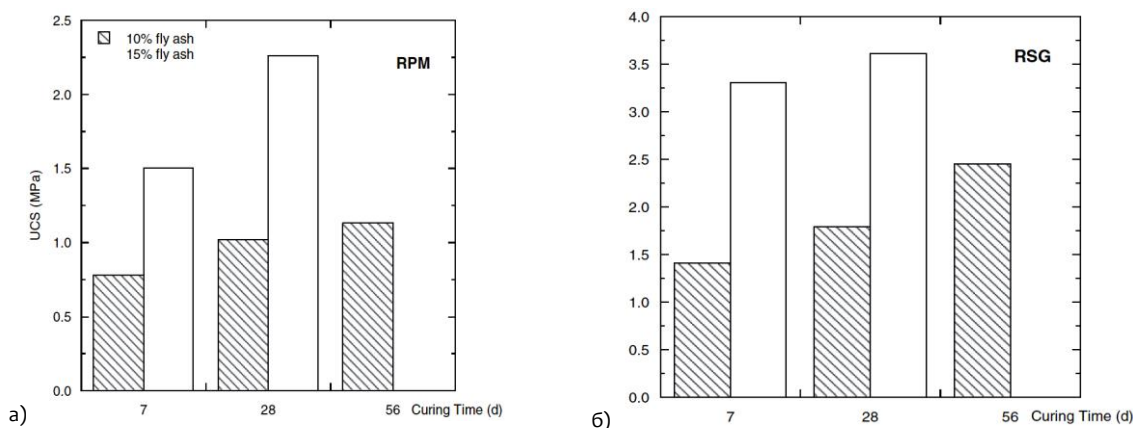
²⁰ RPM – Recycled Pavement Material

шљунка (RSG²¹) са летећим пепелом (FA), при чему се наведени агрегати нису међусобно комбиновали. Поријекло компонентних материјала је било из америчке савезне државе Висконсин. Летећи пепео је био из термоелектране *Columbia* (град *Portage*) и његове карактеристике су одговарале референтном пепелу ознаке *Minnesota class 5*. Испитивање летећег пепела је рађено по америчком стандарду *ASTM C618-17* [C16], а класификација материјала по стандарду *ASTM D2487-17* [C51]. Испитивање агрегата је рађено на основу стандарда *AASHTO M147-65(2004)* [C52]. Учешће летећег пепела у мјешавинама је износило 10 и 15% мас. Оптимална влажност је била у зависности од врсте агрегата који је стабилизован пепелом и директно је била пропорционална количини додатка пепела. Највеће вриједности су измјерене за мјешавине са 15% цемента ($w_{opt,max}=9,5\%$ за RPM и $w_{opt,max}=7,5\%$ за RSG). Занимљиво је да су аутори модификованим Proctor-овим опитом одређивали максималну суву запреминску тежину (а не масу, као у већини осталих истраживања) и она се кретала од 20,1 до 21,4 kN/m³ (табела 9.9.).

Табела 9.9. – Резултати Proctor-овог опита у зависности од учешћа компонентних материјала

Material	Fly ash content (%)	Optimum water content (%)	Max. dry unit weight (kN/m ³)
Class 5 base	0	5.0	20.9
RPM	0	7.5	21.2
	10	8.5	20.4
	15	9.5	20.1
RSG	0	6.0	21.4
	10	7.0	21.4
	15	7.5	21.2

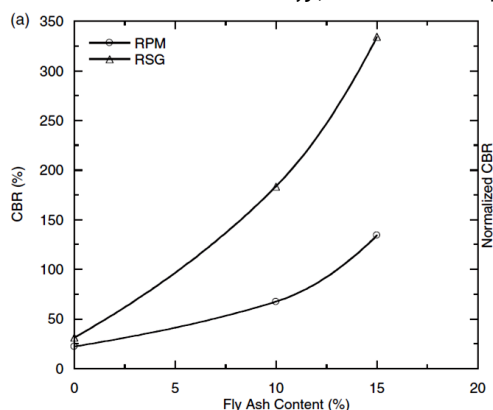
Механичка испитивања у овом истраживању су рађена на цилиндричним узорцима ($\varnothing 152\text{mm}$, $h=305\text{mm}$). Чврстоћа при притиску (UCS) је одређена на основу стандарда *ASTM D5102-04* [C53]. Највећа вриједност чврстоће при притиску (након 28 дана) је забиљежена код мјешавина са RSG и 15% додатка летећег пепела и она је износила 3.600 kPa, док је за RPM максимална вриједност износила 2.300 kPa (за исту количину летећег пепела). Поред испитивања UCS-а након 7 и 28 дана, узорци са 10% додатка летећег пепела су испитивани и након 56 дана њега (дијаграм 9.3.). Амерички AASHTO стандард прописује да минимална 28-дневна чврстоћа при притиску, за хемијски стабилизоване доње слојеве коловозне конструкције (*subbase layer*) износи 1.700 kPa.



Дијаграм 9.3. – Чврстоће при притиску за: а) рециклирани асфалт (RPM) и б) шљунак (RSG)

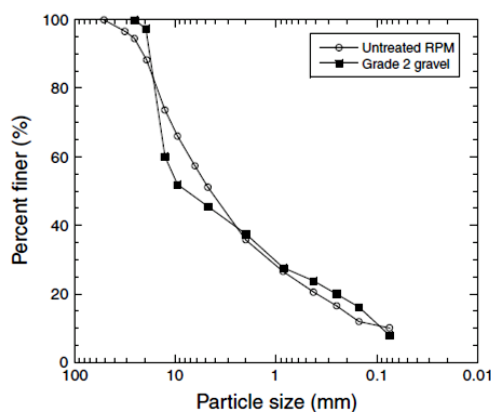
²¹ RSG – Road Surface Gravel

Зависност калифорнијског индекса носивости (CBR^{22}) од врсте агрегата и количине додатка везива приказана је на графikonу 9.15.. Са повећањем садржаја летећег пепела вриједности CBR -а се повећавају, посебно код мјешавина са шљунком.



Графикон 9.15. – Вриједности CBR -а за RPM и RSG у зависности од количине додатка летећег пепела

Једна група аутора [61] је испитивала карактеристике рециклираног асфалтног застора (RPM-а) и дробљеног камена, у првом случају са, а у другом без додатка везива у облику летећег пепела. Дробљени камени агрегат је био доломитског поријекла (*Grade 2*) и класификован као добро гранулисан (графикон 9.16.). Агрегати који су коришћени у истраживању су узорковани на једном ауто-пути (*State Trunk Highway (STH) 60*) у америчкој савезној држави Висконсин. Мјешавине које су испитане имале су само једну врсту агрегата (природни или рециклирани). Хемијском анализом летећег пепела установљено је да је припадао класи C (по ASTM C618-17 [C16]), а поријекло му је било из термоелектране *Xcell Energy* (град *St. Paul*), у америчкој савезној држави Минесота. Летећи пепео у мјешавинама је коришћен у количинама од 10, 14 и 18%*mas*. Након испитивања гранулометријског састава агрегата, одређена је оптимална влажност и запреминска тежина (по ASTM D1557-12 [C54]).

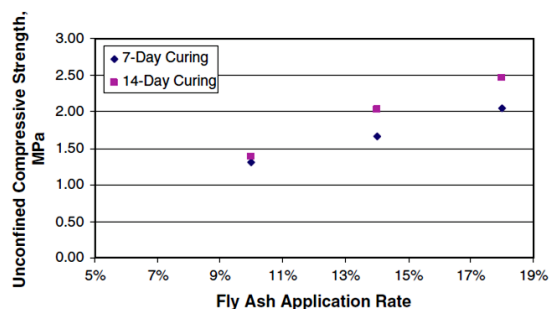


Графикон 9.16. – Гранулометријске криве за нетретирану RPM и природни агрегат (*Grade 2 gravel*)

Оптимална влажност се за мјешавине са RPM-ом, стабилизоване летећим пепелом, кретала од 7,0 до 7,4%, док је за нетретиране мјешавине са RPM-ом оптимална влажност била 5,5%. Запреминска тежина је износила око 21KN/m^3 . Највеће деформације забиљежене су за коловозне конструкције са невезаним RPM-ом, а

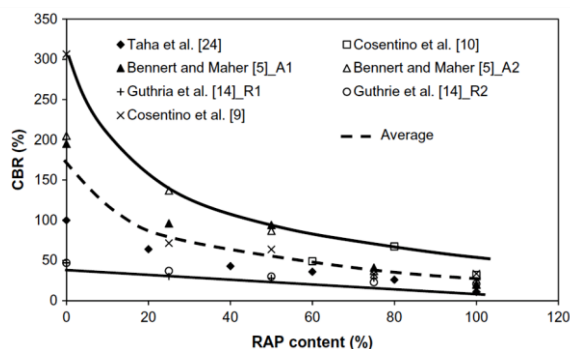
²² CBR – California Bearing Ratio

најмање за стабилизавани RPM са додатком 18% летећег пепела. Чврстоће при притиску (Q_u) испитане су на узорцима старости 7 и 14 дана његе и имале су вриједности од 1,3MPa (за RPM стабилизован са 10% летећег пепела, испитан након 7 дана) до 2,46MPa (за RPM стабилизован са 18% летећег пепела, испитан након 14 дана његе), (графикон 9.17.). Анализом резултата испитивања утврђено је да су много боље механичке карактеристике носећих слојева остварене код мјешавина које су садржале летећи пепео.



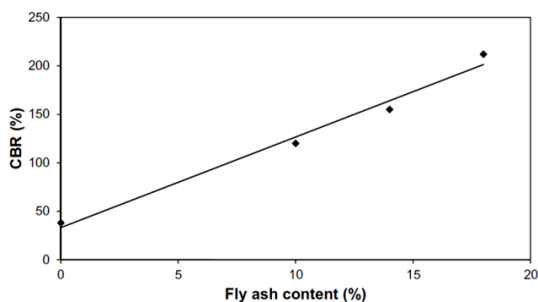
Графикон 9.17. – Чврстоће при притиску у зависности од количине додатка летећег пепела и периода његе

Аутори *J.K.Thakur, J.Han* у свом прегледном раду [62] су објединили збирне резултате испитивања других аутора на тему стабилизација коловозних конструкција од: рециклираног асфалта и/или природног агрегата стабилованих са цементом и/или летећим пепелом (некада у комбинацији и са геомрежама (*geocell*)) и дали њихове упоредне графичке приказе. Од физичких и механичких карактеристика акценат је стављен: на калифонијски индекс носивости, чврстоћу при притиску, кохезију, угао унутрашњег трења и чврстоћу на смицање. У наставку су дате неке од упоредних анализа наведених карактеристика. Анализом резултата испитивања примјећено је да се са повећањем процента рециклираног асфалта (RAP-а) у мјешавинама вриједности CBR-а смањују у свим истраживањима. За мјешавине без додатка RAP-а вриједности CBR-а су у просјеку износиле око 175%, а за мјешавине у којима је само RAP коришћен као агрегат вриједности CBR-а су износиле око 40% (графикон 9.18.). Такође, CBR је имао најниже вриједности за мјешавине са учешћем 100% RAP-а.

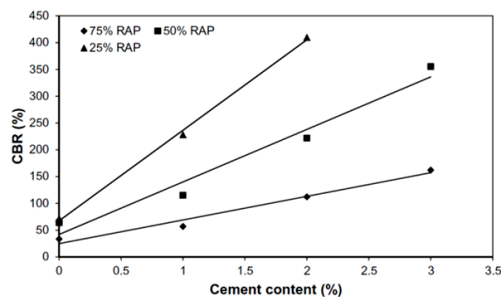


Графикон 9.18. – Збирни приказ вриједности CBR-а у зависности од учешћа RAP-а

Носивост стабиловане коловозне конструкције (самим тим и вриједности CBR-а) се повећавала са повећањем количине додатка везива. На вриједности CBR-а, поред количине додатка везива битно је утицала и врста везива (графикони 9.19. и 9.20.). Као што је и претходно наведено, са повећањем количина RAP-а у мјешавинама вриједности CBR-а су се смањивале (графикон 9.20.). Додатак летећег пепела је износио 10, 15 и 18%*mas*, а цемента 1, 2 и 3%*mas*.

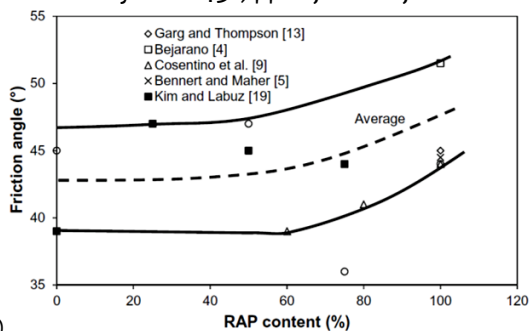


Графикон 9.19. – CBR у зависности од учешћа летећег пепела

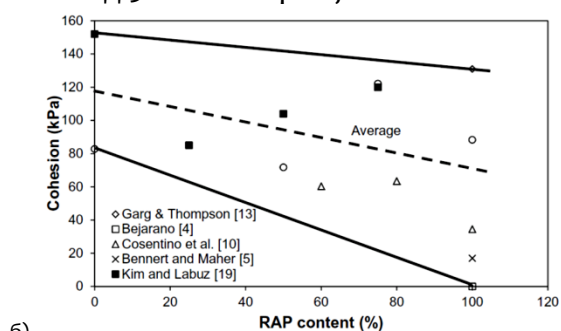


Графикон 9.20. – CBR у зависности од количине цемента и садржаја RAP-а

Угао унутрашњег трења (*Friction Angle* [$^{\circ}$]) и кохезија (*Cohesion* [*kPa*]) су физичке карактеристике материјала које се користе у геомеханичким испитивањима материјала. У овом истраживању угао унутрашњег трења, се повећавао са повећањем количине RAP-а у мјешавини (графикон 9.21.а), док се вриједност кохезије смањивала са повећањем RAP-а (графикон 9.21.б). Просјечне вриједности угла унутрашњег трења, код мјешавина са до 50%RAP-а, биле су приближно исте и износиле су око 43° , док је за мјешавине са више од 50%RAP-а примјеђено повећање.



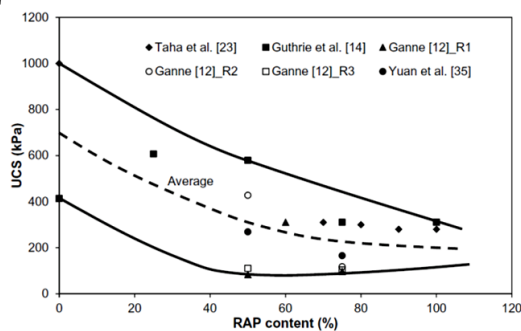
а)



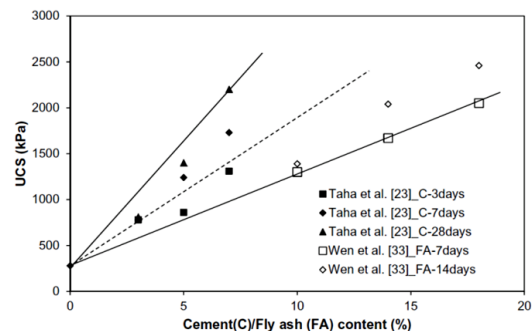
б)

Графикон 9.21. – Утицај количине RAP-а у стабилованим мјешавинама на вриједности: а) угла унутрашњег трења [$^{\circ}$] и б) кохезије [*kPa*]

Чврстоћа при притиску (*UCS*), између осталог, била је зависна и од врсте агрегата. Са повећањем количине RAP-а у мјешавинама чврстоће при притиску су опадале, при чему је тај пад био најизраженији при повећању количине RAP-а од 0 до 60% (графикон 9.22.а). Чврстоћа при притиску је била и у директној зависности од периода њега узорка, као и од типа и количине везива (графикон 9.22.б). Количине цемента у претходно наведеној анализи су износиле 3, 5 и 7%*mas*, а летећег пепела 10, 14 и 18%*mas*. Чврстоћа при притиску је код мјешавина са цементним везивом испитивана након 3, 7 и 28 дана њега, а код мјешавина са летећим пепелом након 7 и 14 дана њега.



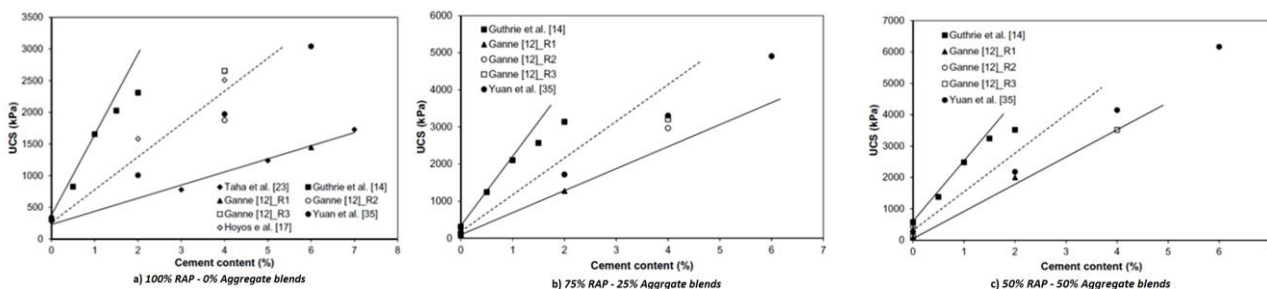
а)



б)

Графикон 9.22. – Зависност чврстоће при притиску од: а) процента додатка RAP-а и б) врсте везива и периода њега узорка

Збирни приказ вриједности чврстоћа при притиску, за три мјешавине са различитим учешћима RAP-а (100, 75 и 50%) и различитим количинама додатка везива, дат је на графикаону 9.23..



Графикон 9.23. – Утицај количине додатка RAP-а и цемента на вриједности чврстоћа при притиску стабилизацијских мјешавина

Могућностима примјене и начинима уградње стабилизација рециклираног асфалта са летећим пепелом бавили су се и аутори *H.Wen, M.P.Tharaniyil, B.Ramte* [63]. Њиховим истраживањем је обухваћена реконструкција једне путне дионице на ауто-пута у округу *Waukesha County* (америчка савезна држава Висконсин), чија је укупна дужина износила 1009m. Постојећа коловозна конструкција је имала просјечну дебљину асфалтаних слојева 127mm, а неvezаних носећи слојева 178mm. На датој дионици рађена је реконструкција у којој су носећи слојеви били од рециклираног асфалта (насталог у поступку хладне рециклаже асфалта (CIR)) стабилизованог са летећим пепелом, у укупној дебљини 305mm. На сликама 9.1-9.3. приказан је поступак извођење стабилизације рециклираног асфалта са летећим пепелом.



Слика 9.1. – Додатак воде рециклираном асфалту



Слика 9.2. – Додатак летећег пепела



Слика 9.3. – Поступак мијешање и збијање стабилизованог слоја

Летећи пепео који је коришћен у наведеном истраживању је на основу свог хемијског састава категорисан у класу С (по ASTM C618-17 [C16]). Испитивањем гранулометријског састава RAP-а утврђено је да се он састојао од: 68% шљунка (остатак на сити No.4 ($\approx 4,76mm$)), 26% пијеска (пролаз кроз сито No.4, а остатак на сити No.200 ($\approx 0,841mm$)) и 6% ситних честица (које су прошле кроз сито No.200). Поред одређивања оптималне влажности и максималне суве запреминске масе одређена је и чврстоћа при притиску стабилизације. Максимална сува запреминска маса ($\gamma_{s,max}$), за оптималну влажност ($w_{opt}=5,5\%$), износила је:

- 2,27g/cm³, за RAP + 0%FA,
- 2,28g/cm³, за RAP + 6%FA и
- 2,29g/cm³, за RAP + 8%FA.

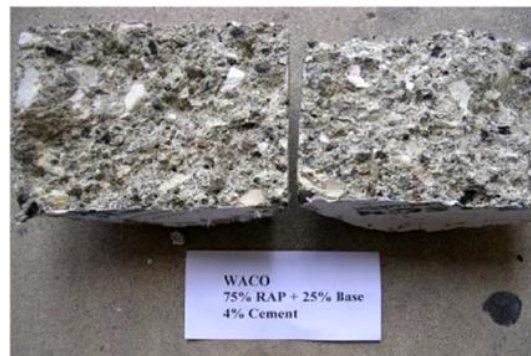
Са повећањем учешћа летећег пепела чврстоћа при притиску се такође повећавала. Приликом справљања узорак, за испитивање наведене механичке

карактеристике, количина додатка воде је била константна и имала је вриједност 5%, а вриједности чврстоћа при притиску су износиле:

- 1,72MPa, за RAP + 6%FA и
- 2,62MPa, за RAP + 8%FA.

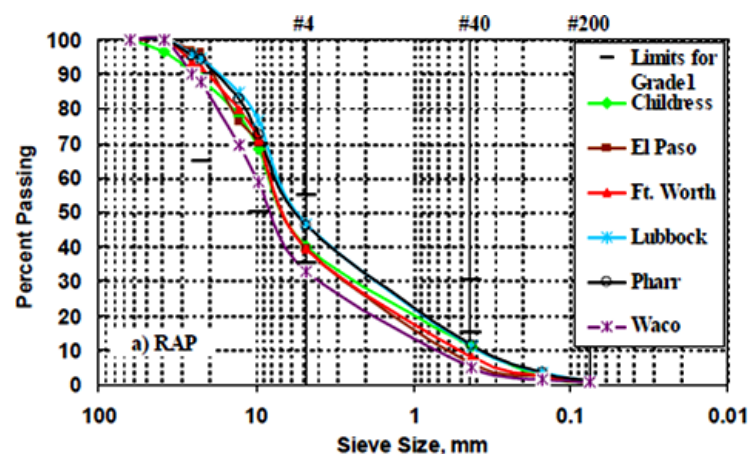
Испитивања су рађена на цилиндричним узорцима $\varnothing 4in$, након 7 дана њега. Послије очвршћавања цементне стабилизације, FWD уређајем (*Falling Weight Deflectometer*) су одређене структурне карактеристике коловозне конструкције са наведеним слојем.

У једном истраживачком пројекту, који су реализован током 2010.године, на два универзитета у Тексасу (*El Paso* и *Arlington*) [64], испитане су могућности пројектовања и извођења основа пута (базних слојева) са рециклираним асфалтним коловозом, који је стабилизован цементом и летећим пепелом. Поред рециклираног асфалта (RAP-а) за справљање узорака на којима су рађена испитивања коришћен је и природни агрегат (слика 9.4.).

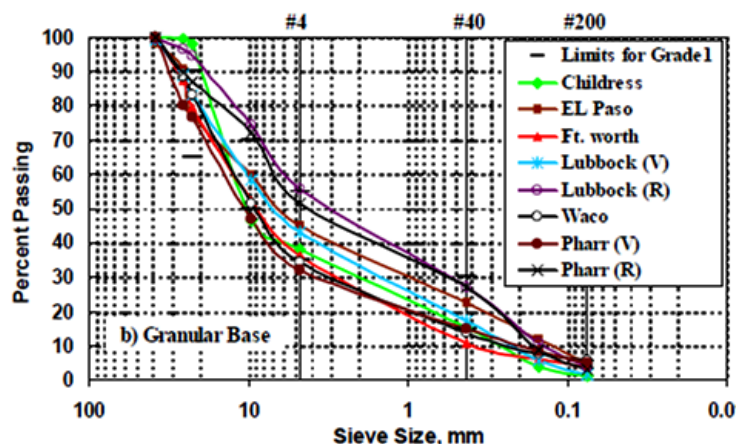


Слика 9.4. – Попречни пресјек узорка са RAP-ом (75%) и природним агрегатом (25%), стабилованим са 4% цемента (локација Waco, америчка савезна држава Тексас)

RAP је у мјешавинама био присутан у количинама од: 100, 75, 60, 50 или 40% мас. Природни и рециклирани агрегати су били са локација: *Lubbock*, *Pharr*, *Waco*, *Fort Worth*, *Childress* и *El Paso* (све у америчкој савезној држави Тексас), а њихове грануларције су приказане на графиконима 9.24. и 9.25..

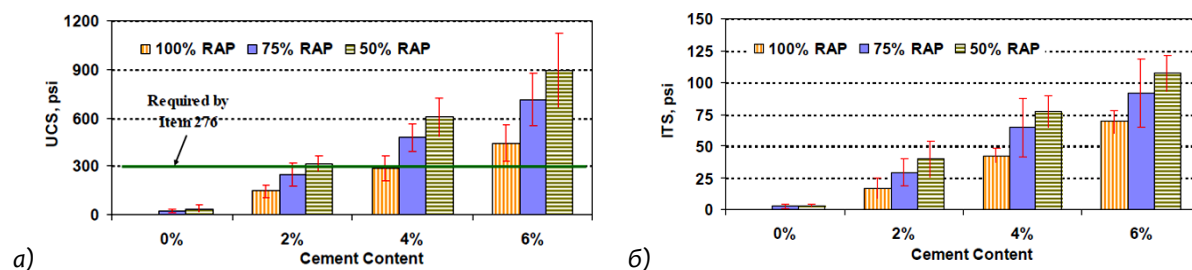


Графикон 9.24. – Упоредне гранулометријске криве за рециклирани асфалтни агрегат (RAP) различитог поријекла



Графикон 9.25. – Упоредне гранулометријске криве за природни агрегат (Granular Base) различитог поријекла

Цемент је у мјешавинама коришћен у количинама: 0, 2, 4, или 6%*mas*, а летећи пепео у количини од 7%*mas*. Садржај битумена у рециклираном асфалту је у просјеку износио од 3 до 5%. Механичке карактеристике (чврстоћа при притиску (UCS) и индиректна затезана чврстоћа (ITS)) су испитиване на узорцима који су справљени са количином воде одређеном на основу оптималне влажности (ОМС) и максималне суве запреминске масе (MDD²³). Чврстоћа при притиску је одређена на цилиндричним узорцима Ø6in и h=8in, а индиректна затезана чврстоћа на цилиндричним узорцима Ø6in и h=4,5in. Вриједности ОМС-а и MDD-а опадале су са повећањем количине RAP-а у мјешавинама, а вриједности ОМС-а су у просјеку износиле 5-7%. За референтну чврстоћу је узета 7-дневна чврстоћа при притиску од 300psi²⁴ (≈2,07MPa). Да би се постигла наведена чврстоћа стабилизационе мјешавине оријентационо је било потребно 4%, 3% и 2%*mas* цемента, за мјешавине са 100%, 75% и 50% RAP-а, редом (дијаграм 9.4.a)). Вриједности индиректне затезне чврстоће су се повећавале са повећањем учешћа везива и са смањењем количине RAP-а (дијаграм 9.4.б)).

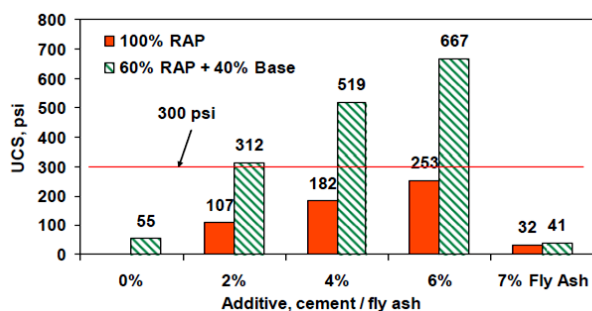


Дијаграм 9.4. – Утицај RAP-а и количине додатка цемента на вриједности: а) UCS-а и б) ITS-а

Предложена је максимална дозвољена количина RAP-а за израду доњих носећих слојева КК, а разликовала се од локације до локације (30-50%). Мјешавине са 7%*mas* додатка летећег пепела имале су незадовољавајуће вриједности чврстоћа при притиску (дијаграм 9.5.), те је стога неопходно било повећати проценат његовог учешћа.

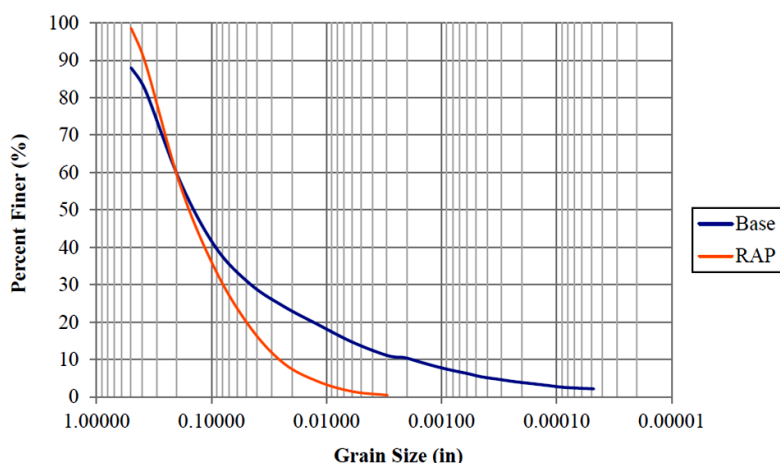
²³ MDD – Maximum Dry Density

²⁴ 1psi ≈ 6.894,76Pa



Дијаграм 9.5. – Вриједности UCS-а у зависности од врсте агрегата и количине додатка цемента, односно летећег пепела

Аутор J.C.Tolbert се у свом истраживању на Brigham Young University Provo (америчка савезна државај Јута) бавио могућностима стабилизације постељице (природног тла) са цемента, уз додатак рециклираног асфалта (RAP-а) [65]. Учешће RAP-а у мјешавинама је варирао од 0 до 100%, у интервалима од по 25%. Природни материјал (агрегат) у постељици (*base material*) се по USCS класификацији сврставао у SP-SM групу материјала (лоше гранулисан пијесак, са примјесима муља и шљунка). Учешће цемента у мјешавинама је износило 3, 5 и 7%*mas*. На основу стандардног Proctor-овог опита одређена је оптимална влажност (ОМС) и максимална сува запреминска маса узорак (MDD). Претходно је RAP осушен на температури од 140F (60°C), а материјал из постељице на температури 230F (110°C). Иситивања су рађена на цилиндричним узорцима $\varnothing 4in$ и $h=4,6in$. Справљање узорак је рађено уз помоћ аутоматског набијача. RAP коришћен у испитивању је добијен поступком рециклаже на пуној висини коловозне конструкције (FDR поступак). Природни агрегат имао је веће учешће ситнијег материјала (зрна мања од 0,2in) у односу на RAP (графикон 9.26.).



Графикон 9.26. – Гранулометријске криве за природни (Base) и рециклирани (RAP) агрегат

Узорци су справљани у металним цилиндричним калупима са наставцима (слика 9.5.). Након справљања, а прије тестирања на горњу и доњу цилиндричну површину узорка нанесен је слој гипса (слика 9.6.). Гипс је стављан да би се обезбиједиле глатке површине, како би налијегање узорак у преси за испитивање чврстоће при притиску било што боље (слика 9.7.).



Слика 9.5. – Метални цилиндрични калуп



Слика 9.6. – Узорак са слојевима гипса на горњој и доњој површини



Слика 9.7. – Преса за испитивање чврстоће при притиску

Цилиндрични узорци су испитивани након 7 дана његе (на температури од 72F ($\approx 22,2^{\circ}\text{C}$)). Чврстоће при притиску су одређене на основу америчког ASTM D1633-17 стандарда [С44]. Веће вриједности оптималних влажности (табела 9.10.) измјерене су на узорцима са мањим учешћем RAP-а ($\text{OMC}_{\text{max}}=8,3\%$). Вриједности MDD^{25} су дате у табели 9.11..

Табела 9.10. – Вриједности OMC-а у зависности од количине RAP-а и цемента

RAP Content (%)	Cement Content (%)		
	3	5	7
	OMC (%)		
0	8.3	8.2	8.1
25	8.3	8.3	8.1
50	8.3	8.3	8.1
75	7.1	7.3	7.8
100	6.8	6.6	6.9

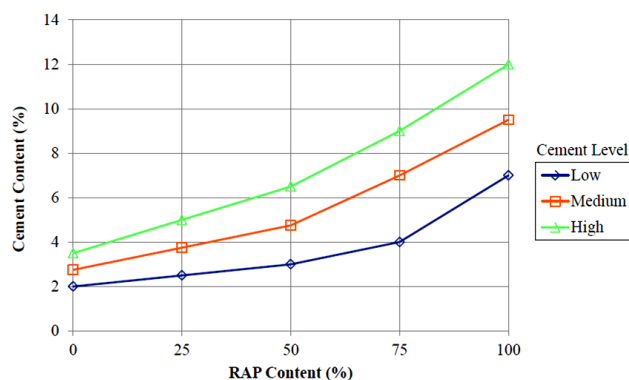
Табела 9.11. – Вриједности MDD-а у зависности од количине RAP-а и цемента

RAP Content (%)	Cement Content (%)		
	3	5	7
	MDD (pcf)		
0	137.8	138.6	138.6
25	133.8	134.6	135.5
50	129.7	130.6	132.4
75	120.6	123.6	125.6
100	114.2	115.9	118.6

Чврстоћа при притиску је имала најмање вриједности за мјешавине са 100%RAP-а и 3%*mas* цемента, а највећу за 0%RAP-а и 7%*mas* цемента (табела 9.12.). Аутор је дао и потребне количине цемента, у зависности од количине RAP-а у мјешавинама, а дефинисане су преко термина: низак, средњи и висок садржај везива (графикон 9.27.).

Табела 9.12. – Вриједности UCS-а у зависности од учешћа RAP-а и цемента

RAP Content (%)	Cement Content (%)		
	3	5	7
	UCS (psi)		
0	517	1062	1775
25	323	564	1058
50	194	427	694
75	69	287	410
100	59	152	234



Графикон 9.27. – Потребни садржај цемента у зависности од количине RAP-а у мјешавинама

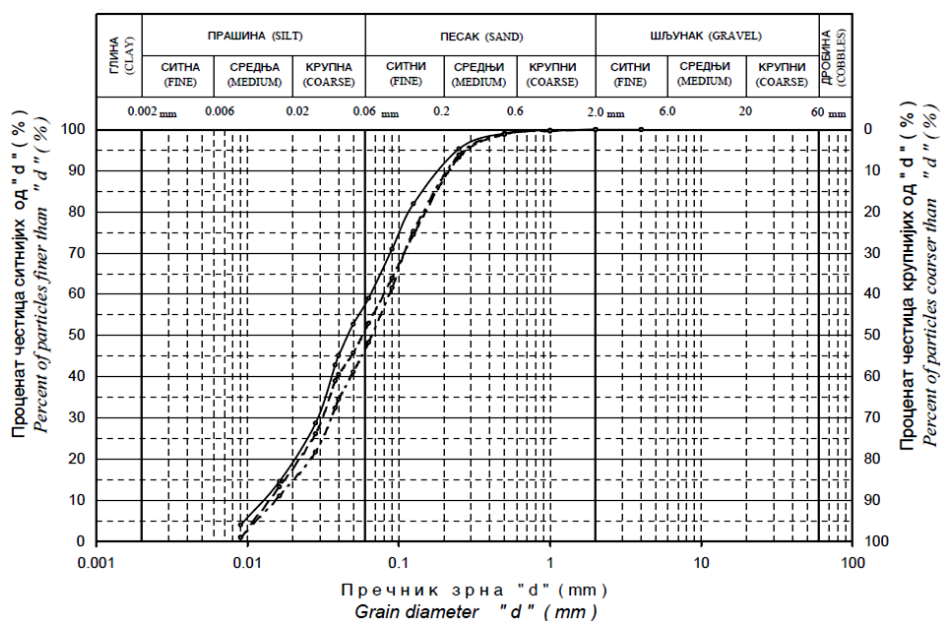
Поред чврстоће при притиску испитиване су и деформације које настају у слоју цементне стабилизације уграђене са наведеним материјалима. Утврђено је да се са повећањем количине RAP-а у мјешавинама деформације смањују, а резилијентни модули повећавају.

²⁵ Запреминаска маса (MDD) изражена у pcf јединицама ($1\text{kg}/\text{m}^3=0,062428\text{lb}/\text{ft}^3$, $1\text{lb}/\text{ft}^3=1\text{pcf}$)

Истраживачко-развојни пројекат о могућностима коришћења летећег пепела и шљаке произведених у термоелектранама Никола Тесла А и Б (ТЕНТ) и термоелектранама Костолац А и Б (ТЕКО), за потребе путоградње, урадио је Институт за путеве (Републике Србије) 2008.године [11]. У том детаљном и свеобухватном истраживању указано је да летећи пепео, као највећи индустријски отпадни материјал у Републици Србији, може да нађе своју значајну примјену у градњи путева. Наведене термоелектране су највећи електро-енергетски ресурси у Србији. Испитивања летећег пепела су рађена у сарадњи са чешким стручњацима из ове области, а за испитивања су углавном коришћени европски (EN) и чешки (ČSN) стандарди. Поред летећег пепела у истраживању су као стабилизатори коришћени цемент и креч. Цемент је био из цементаре Lafarge, у Беочину (PC 35M (S-L) 32,5R), а креч из каменолома Јелен До, код Пожеге. Летећи пепео је у наведеном испитивању посматран као агрегат. За справљање узорака цемент и креч су коришћени у количинама 2, 4 и 6% (одвојено), у односу на масу летећег пепела, док су одређене серије узорака прављене и без додатака цемента односно креча. На самом почетку истраживања урађена је хемијска анализа и гранулометријски састав летећег пепела, из свих термоелектрана. Ту је, између осталог, испитан и састав летећег пепела из термоелектране, из које је коришћен и пепео у експерименталном дијелу овог истраживања (из ТЕНТ-а Б). Хемијски састав пепела из ТЕНТ-а Б, испитаног током 2007.године, дат је у табели 9.13., а гранулометријски састав на графикону 9.28..

Табела 9.13. – Резултати хемијских анализа летећег пепела и шљаке из ТЕНТ-а Б

Садржај оксида	ТЕНТ Б			
	узорци пепела		шљака	пепео средња вредност 1996/2004 год.
	мај 2007 г.	јун 2007 г.		
	(%)			
Губитак жарењем на 1000°C	2,58	2,11	10,50	-
SiO ₂	55,38	51,88	52,12	59,06
Al ₂ O ₃	22,57	22,49	20,97	21,71
Fe ₂ O ₃	5,46	6,61	6,30	5,93
CaO	8,30	10,44	5,51	5,17
MgO	2,87	3,28	2,30	2,02
SO ₃	0,45	0,66	0,16	1,75
S	0,18	0,26	0,06	0,70
Na ₂ O	0,45	0,58	0,51	0,44
K ₂ O	1,12	1,23	1,02	0,89
модул R = SiO ₂ + Al ₂ O ₃ / CaO+ MgO+ Fe ₂ O ₃	4,68	3,65	5,18	6,15
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	2,45	2,30	2,48	2,72



Графикон 9.28. – Гранулометријски састав летећег пепела из ТЕНТ-а Б

Од механичких карактеристика одређени су: једнооксијална чврстоћа при притиску (q_u), индиректна затезна чврстоћа (ITS), модул еластичности и динамички модул крутости. Поред наведених карактеристика одређени су и кохезија и угао унутрашњег трења.

За одређивање механичких карактеристика коришћени су цилиндрични узорци следећих димензија:

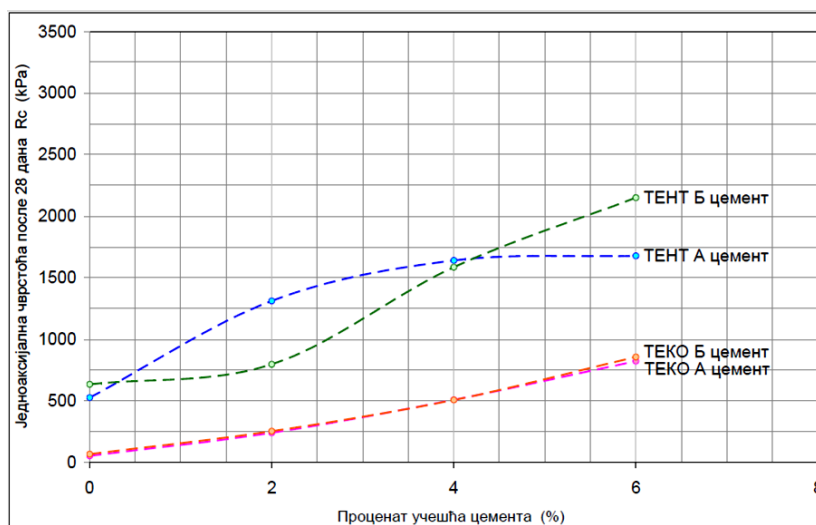
- $\varnothing 100\text{mm}$ и $h=200\text{mm}$ – за чврстоћу при притиску;
- $\varnothing 102\text{mm}$ и $h=116\text{mm}$ – за индиректну затезну чврстоћу и
- $\varnothing 100\text{mm}$ и $h=50\text{mm}$ – за динамички модул.

Испитане су физичке и механичке карактеристике за све 4 врсте летећег пепела. Испитивања су рађена након 7 и 28 дана њега. Оптимална влажност и максимална сува запреминска маса су одређени Proctor-овим опитом. За пепео из ТЕНТ-а А оне су износиле: $w_{opt}=50,05\%$ и $\gamma_{max}=0,846\text{g/cm}^3$. Максимална вриједност чврстоће при притиску ($q_{u,28}$) је измјерена за пепео из ТЕНТ-а Б (са додатком 6% цемента) и износила је 2.150kPa , док је са додатком 6% креча $q_{u,28}$ износила чак 3.372kPa . Вриједности чврстоћа при притиску, узорака без стабилизације цементом или кречом, дати су у табели 9.14..

Табела 9.14. – Вриједности једнооксијалних чврстоћа после 7 и 28 дана

Локација	Време неге (дан)	Стабилизован пепео без додатка везива	
		бочна деформација \mathcal{E} (%)	једнооксијална чврстоћа R_c (kPa)
ТЕНТ А	7	0.87	408
	28	0.74	528
ТЕНТ Б	7	0.74	334
	28	0.67	636
ТЕКО А	7	0.74	38
	28	0.88	55
ТЕКО Б	7	1.10	50
	28	1.14	69

Збирни приказ чврстоћа при притиску, које дефинишу утицај цемента у летећем пепелу, дат је на графикану 9.29..



Графикон 9.29. – Чврстоће при притиску узорака мјешавина са летећим пепелом и цементом, након 28 дана њега

Максимална вриједност ITS -а измјерена је на узорцима летећег пепела из ТЕНТ-а Б. Са 6% додатка цемента ITS је износила 191kPa , а са 6% креча 375kPa (табела 9.15.).

Табела 9.15. – Резултати ITS-а за пепео, са додатком цемента и креча, после 28 дана њега узорака

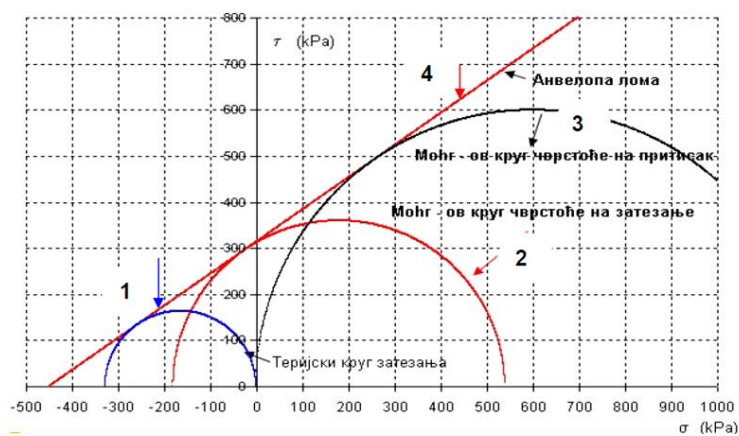
Порекло узорка	без везива	са цементом као везивом			са кречом као везивом		
		2%	4%	6%	2%	4%	6%
ТЕНТ А	41	76	110	185	81	286	355
ТЕНТ Б	63	90	132	191	125	321	375
ТЕКО А	5	34	67	78	50	98	178
ТЕКО Б	7	38	74	93	71	119	165

Модул еластичности је имао максималне вриједности за летећи пепео из ТЕНТ-а Б и износио је 157MPa (анализирани су узорци без додатка везива). Вриједности модула еластичности су биле веће за пепео из ТЕНТ-а него из ТЕКО (табела 9.16.).

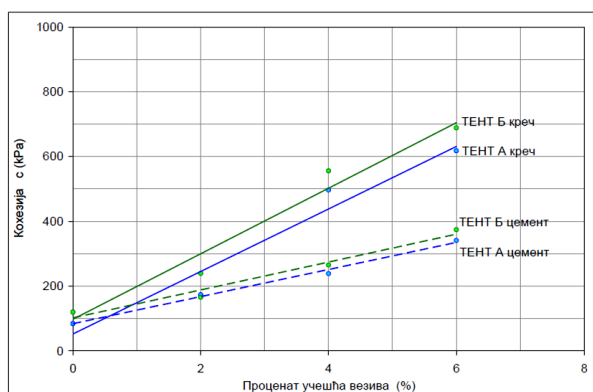
Табела 9.16. – Вриједности модула еластичности (E) за летећи пепео

Локација	Модул еластичности (MPa) електрофилтерски пепео без везива
ТЕНТ А	156
ТЕНТ Б	157
ТЕКО А	18
ТЕКО Б	22

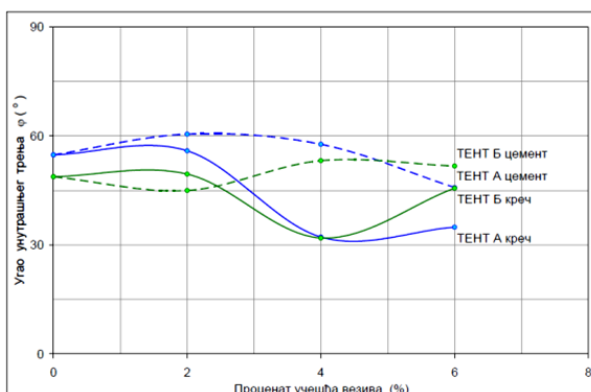
Вриједности модула крутости за пепео из ТЕКО су износиле од 1.782 до 4.018MPa (анализа узорака са додатком 6% креча). Параметри чврстоће на смицање (кохезија и угао унутрашњег трења) одређени су преко Mohr-ових кругова напона, тј. притисне и индиректне затезне чврстоће, на основу нагиба и одсјечка анvelopа на круг чврстоће на затезање (графикон 9.30.). Збирне вриједности за два наведена параметра су дате на графиконима 9.31.а) и б).



Графикон 9.30. – Одређивање кохезије и угла унутрашњег трења



Графикон 9.31.а) – Кохезија у зависности од количине додатка везива



Графикон 9.31.б) – Угао унутрашњег трења у зависности од количине додатка везива

Генерално посматрано, механичке карактеристике су углавном биле боље за летећи пепео из ТЕНТ-а А и Б, него из ТЕКО А и Б. Узимајући у обзир да су карактеристике летећег пепела варијабилне и да су у директној зависности од начина сагоријевања и квалитета угља, добијени резултати у овом истраживању не могу се сматрати репрезентативним за садашњу примјену летећег пепела из датих термоелектрана (нпр.хемијски састав пепела из ТЕНТ-а Б је различит за узорке који су испитани током реализације овог пројекта и током експерименталног истраживања у овој докторској дисертацији).

Прегледно истраживање на тему испитивања физичко-механичких карактеристика цементом стабилизованог агрегата дала је и група аутора са универзитета из Холандије (*Delft University of Technology*) и Кине (*Wuhan University of Technology*) [66]. Током овог истраживања анализирани су агрегати различитог поријекла (кречњаци, гранити, дијабази, лискуни и остали) и утврђено је да не постоји јединствен критеријум за одређивање квалитета цементном стабилизованог материјала за коловозне конструкције (СТАМ²⁶). Као главни индикатор за одређивање квалитета цементне стабилизације узета је чврстоћа при притиску узорака (UCS). Фактори који утичу на квалитет цементне стабилизације су: степен збијености, садржај цемента, вријеме његе, температура његе и други. Утврђено је да су модули еластичности и затезне чврстоће увијек у корелацији са чврстоћом при притиску. У датом истраживању је учешће агрегата у мјешавинама износило >80% укупне масе мјешавине. Дати су захтјеви потребне збијености и препоручене вриједности за чврстоће при притиску (UCS₇) за различите државе (табела 9.17.), као и захтјеви препоручене количине додатка цемента, у зависности од врсте агрегата који се њиме стабилизује (табела 9.18.).

Табела 9.17. – Захтјеви потребне збијености и 7-дневне чврстоће при притиску за различите државе

Country	Compaction	Unconfined compressive strength at 7 days (MPa)	
South Africa	100% Modified AASHTO compaction	C1 6–12	C2 3–6
	97% Modified AASHTO compaction	4–8	2–4
United Kingdom	97% Modified AASHTO compaction	CBM1 2.5–4.5	CBM2 4.5–7.5
	97% Modified AASHTO compaction	Base >4	Subbase >2

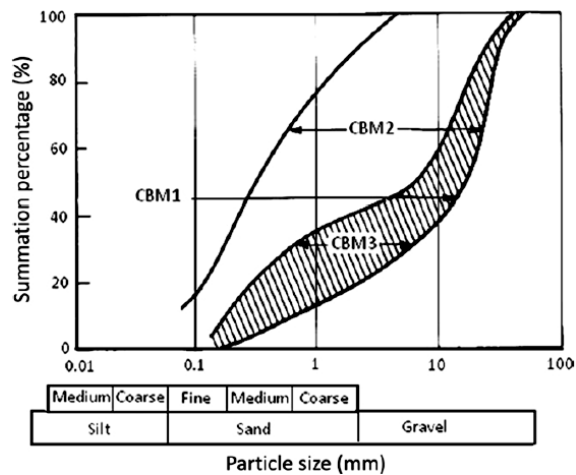
Табела 9.18. – Захтјеване количине цемента за стабилизације различитих агрегата (AASHTO стандард)

AASHTO soil group ^a	A-1-a	A-1-b	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7
Amount of cement by mass (%)	3–5	5–8	5–9	7–11	7–12	8–13	9–15	10–16
Amount of cement by volume (%)	5–7	7–9	7–10	8–12	8–13	8–13	10–14	10–14

^a AASHTO soil group is developed by the Association of American State Highway and Transportation officials.

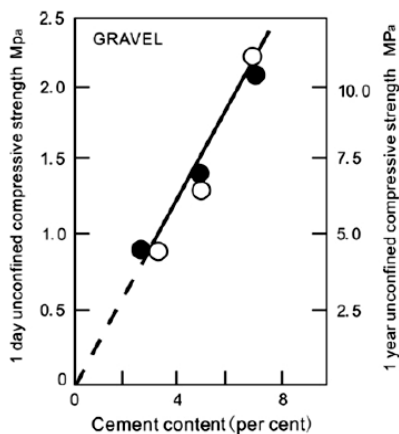
За одређивање оптималне влажности (ОМС) и максималне суве запреминске масе (МДД) коришћен је модификовани Proctor-ов опит. Пречник номиналног зрна агрегата је износио 26,5mm. На графикону 9.32. су дате 3 референтне гранулометријске криве различитих врста агрегата који су коришћени у цементној стабилизацији, као и појас гранулације који поменути агрегати обухватају.

²⁶ СТАМ – Cement-Treated Aggregate Material

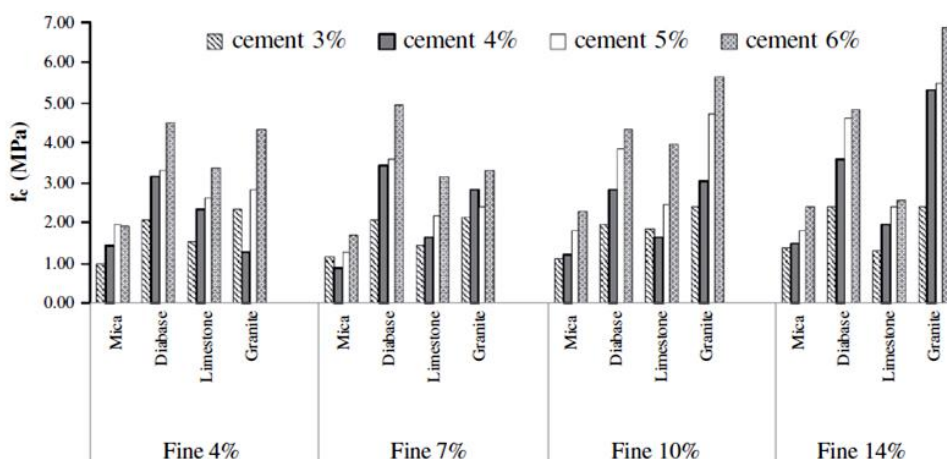


Графикон 9.32. – Гранулометријски састав за различите врсте агрегата²⁷

Утицаји количине додатка цемента, периода његе и врсте агрегата на физичке и механичке карактеристике стабилизација, као и њихова међусобна зависност приказани су на графиконима 9.33., 9.34., 9.35., 9.36., 9.37. и дијаграму 9.6..

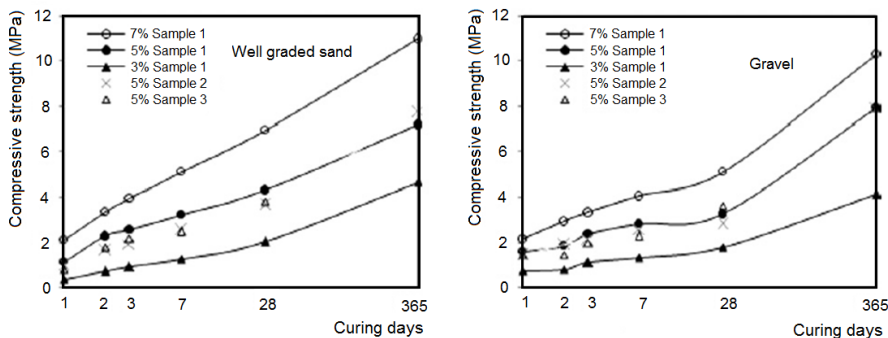


Графикон 9.33. – Утицај додатка цемента на 1-дневне и 1-годишње чврстоће при притиску цементних стабилизација са шљунком

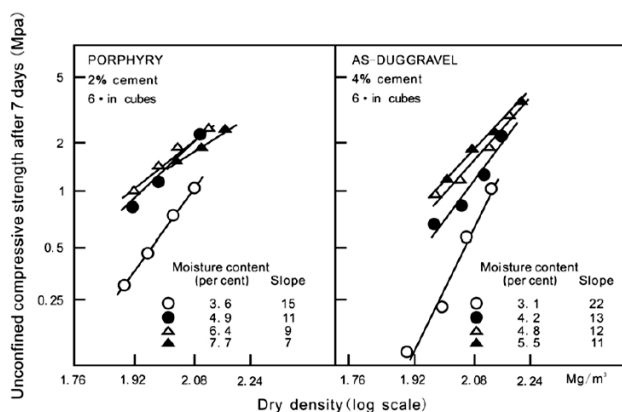


Дијаграм 9.6. – Зависност 7-дневних чврстоћа при притиску од врсте агрегата и количине додатка цемента

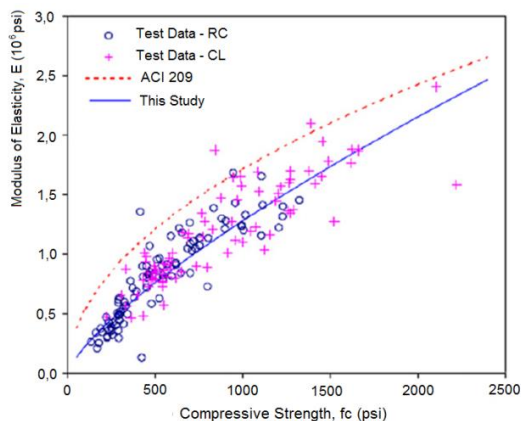
²⁷ CBM - Cement Bound Material



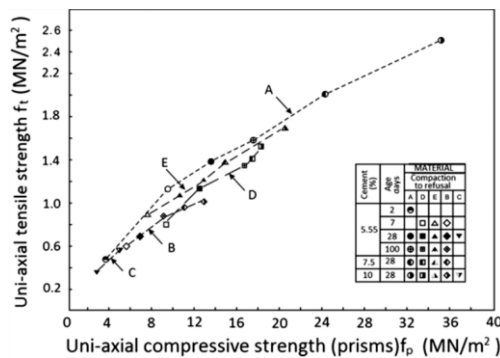
Графикон 9.34. – Утицај периода њега узорка и количине цемента на чврстоћу при притиску добро гранулисаног пијеска и шљунка



Графикон 9.35. – Утицај суве запреминске масе и додатка воде и цемента на 7-дневне чврстоће при притиску цементних стабилизација, са порфиром и шљунком

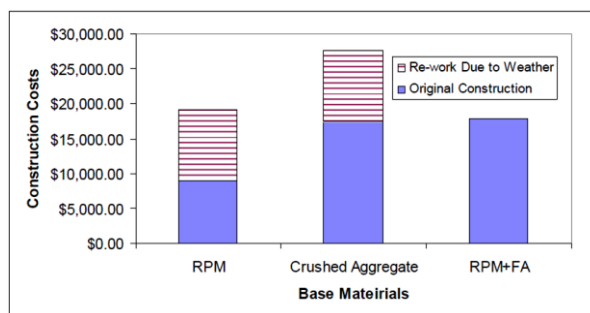


Графикон 9.36. – Зависност чврстоћа при притиску (f_c) и модула еластичности (E)



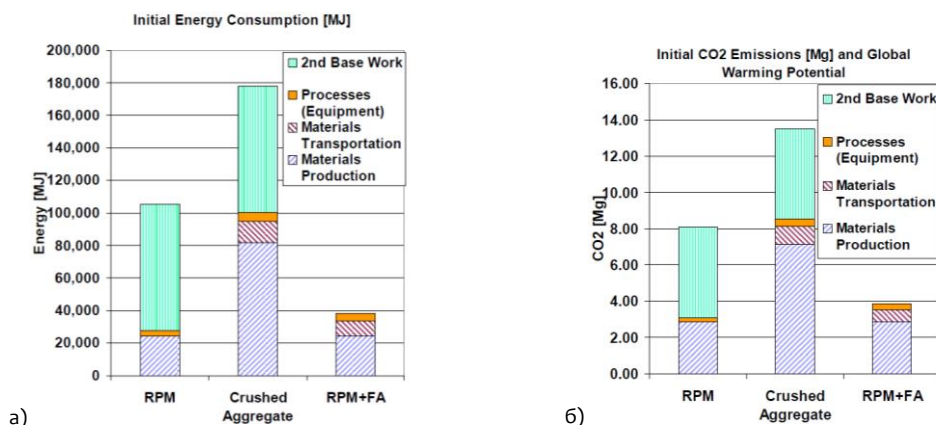
Графикон 9.37. – Зависност затезних и једноосијалних чврстоћа при притиску од врсте материјала и количине додатка цемента

Упоредном анализом механичких карактеристика неvezаног природног каменог агрегата и агрегата насталог у поступку хладне рециклаже асфалта, и стабилизацијом наведених материјала са летећим пепелом бавили су се аутори *H.Wen, T.V.Edil* [67]. Рециклирани асфалтни материјал (RPM) садржао је 50% рециклираног асфалта и 50% дробљеног камена, који је искоришћен из постојеће коловозне конструкције. Номинално зрно агрегата је износило 25mm. Природни агрегат је категорисан у класу 6 (зрне величине 0-19mm). Летећи пепео (*high-carbon fly ash – FA*) који је коришћен у истраживању био је поријеклом из термоелектране *Riverside, Minneapolis* (америчка савезна држава Минесота) и садржао је 22,4% CaO, док је његово учешће у мјешавинама износило 14%, у односу на тежину суве мјешавине. Поменути аутори су једни од ријетких који су се бавили анализом цијена израде цементних стабилизација изведених у поступцима реконструкције или градње нових саобраћајница. У тој анализи се може примијетити да је укупна цијена израде неvezаних носећих слојева са дробљеним каменом агрегатом била приближно иста као и цијена израде стабилизација са рециклираним асфалтним застором и летећим пепелом, при чему су слојеви са наведеним отпадним материјалима имали много боље физичке и механичке карактеристике. Трошкови одржавања (током периода експлоатације пута) за цементне стабилизације са летећим пепелом су били занемарљиви (дијаграм 9.7.).



Дијаграм 9.7. – Компаративна анализа цијена коштања нових и реконструкције постојећих коловозних конструкција употребом различитих материјала

Поред економске анализе, аутори су се бавили и анализом утрошка енергије и емитовања CO₂ током уградње ових типова стабилизација коловозних конструкција (дијаграм 9.8.). Анализом резултата истраживања може се закључити да су утрошак енергије и емисија CO₂ у атмосферу најмањи у поступку градње стабилизација са рециклираним асфалтним коловозом и летећим пепелом.



Дијаграм 9.8. – а) Приказ потрошне енергије и б) Емисија CO₂ у поступку израде стабилизација коловозних конструкција

Чврстоће при притиску (UCS) су одређене по стандарду $ASTM D5102-04 [C53]$, на узорцима старости 7 и 28 дана. Резултати испитивања чврстоћа при притиску показали су да су резултати испитивања теренских мјерења доста мањи од мјерења у лабораторијским условима, на основу чега се може извести закључак да се приликом уградње стабилизација на градилишту праве одређене грешке, или у смислу непостизања одговарајуће збијености мјешавине, или у смислу неадекватне употребе одређених количина компонентних материјала. Стога је посебну пажњу потребно обратити на поступак уградње слојева цементних стабилизација. У овом истраживању је доказано да је понашање рециклираног асфалтног агрегата у слојевима стабилизација било нелинеарно. Стабилизације са рециклираним асфалтом и летећим пепелом значајно су повећале вриједности CBR -а и резилијентне могуле (M_r), док су се вриједности пластичних деформација смањивале.

Аутор *H.E. Vofinger [68]* је испитивао утицај додатка цемента природном тлу (у постелици коловозне конструкције) на побољшање физичко-механичких карактеристика. Природно тло (*Soil*) садржало је: 7% пијеска (*sand*), 28% глине (*clay*), 65% муља (*silt*). Садржај цемента у мјешавинама је износио 6, 8 и 10%*mas*. Три дана прије справљана узорак природно тло је навлажено (са 14% воде). Узорци су справљани поступком збијања материјала преко металне плоче, у три једнака слоја, са притиском од 1.560kN/m^2 (уз помоћ тега масе $2,5\text{kg}$). Након справљана, узорци су његовани 14 дана (на температури 20°C), после чега се приступило испитивању њихових физичко-механичких карактеристика. При одређивању механичких карактеристика акценат је стављен на еластична својства мјешавина, а то су: модул еластичности, индиректна и директна затезна чврстоћа. Модули еластичности, мјерени при притиску (E_c), су одређени на узорцима облика призми (димензија $304,8 \times 76,2 \times 76,2\text{mm}$) и њихове вриједности су биле веће од модула еластичности мјерених при затезању (E_t). Индиректна затезна чврстоћа (ITS) је одређена на узорцима облика цилиндара ($\varnothing 101,6\text{cm}$ и $h=50,80\text{cm}$). Испитивање директних и индиректних затезних чврстоћа (ITS) је рађено са 15 и 17% влажности (табела 9.19.). Модули еластичности (E_c) имали су вриједности од 993MPa (за 6%*mas* цемента и 17% влажности) до 2.310MPa (за 10%*mas* цемента и 15% влажности).

Cement content percent	Moisture content percent	Direct tensile strength		Indirect tensile strength	
		Briquettes kN/m^2	Blocks kN/m^2	With packing kN/m^2	Without packing kN/m^2
6	15	269	245	–	–
8	15	358	360	–	–
10	15	418	428	–	–
6	17	373	332	304	271
8	17	398	418	367	303
10	17	480	400	405	366

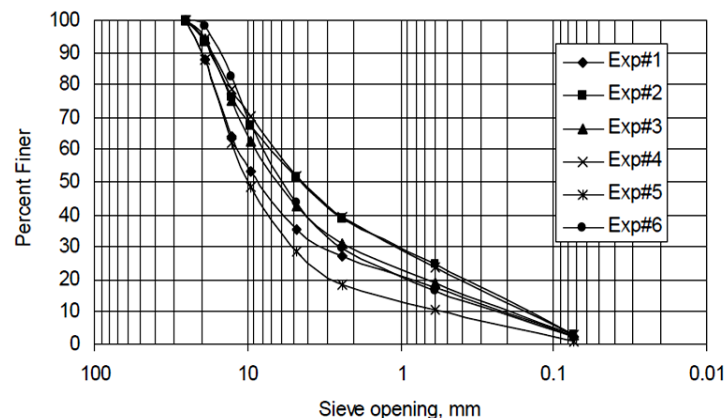
Табела 9.19. – Вриједности директне и индиректне затезне чврстоће у зависности од састава мјешавине

Стабилизацијом дробљеног бетонског агрегата различитим везивима бавили су се аутори *K.Sobhan, M.Mashnad [69]*. Поред цемента и летећег пепела аутори су у мјешавинама користили и рециклирана пластична влакна (*Recycled plastic fibers*). Поријекло агрегата је било из града *El Paso* (америчка савезна држава Тексас).

Портланд цемент који је коришћен у истраживању имао је ознаку *Type I*. Летећи пепео (FA) је припадао класи C (на основу стандарда ASTM C618-17 [C16]), а поријекло му је било из америчке савезне државе Илионис. Дужина пластичних трака влакана је износила 19, 50,8 и 76,2mm (0,75, 2,0 и 3,0in). Дефинисана је укупно 21 мјешавина, при чему су прве три биле без додатака пластичних влакана и садржале су сљедеће количине везива:

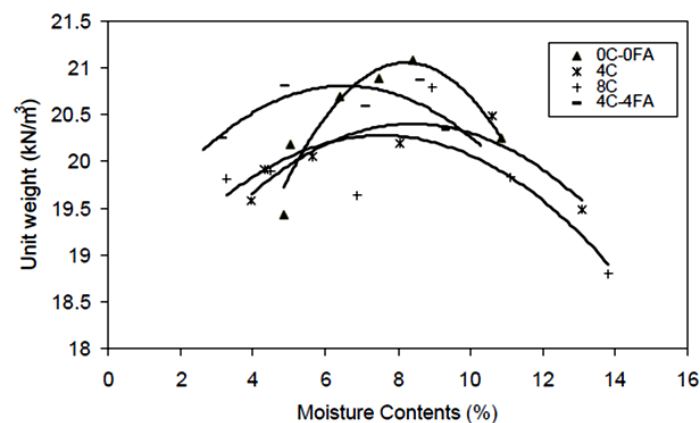
- *Mix 1* – 8%*mas* цемента (C),
- *Mix 2* – 4%*mas* цемента (C) и 4%*mas* летећег пепела (FA) и
- *Mix 3* – 8%*mas* цемента (C) и 8%*mas* летећег пепела (FA).

Номинално зрно у мјешавинама је износило 25mm, а гранулометријске криве агрегата (за 6 случајно одабраних узорака) су приказане на графикаону 9.38..



Графикон 9.38. – Гранулометријски састав агрегата стабилизацијских мјешавина

Модификованим Proctor-овим опитом (по ASTM D1557-12 [C54]) одређене су оптималне влажности и максималне суве запреминске масе, као и њихова зависност од учешћа везива у мјешавинама (графикон 9.39.).



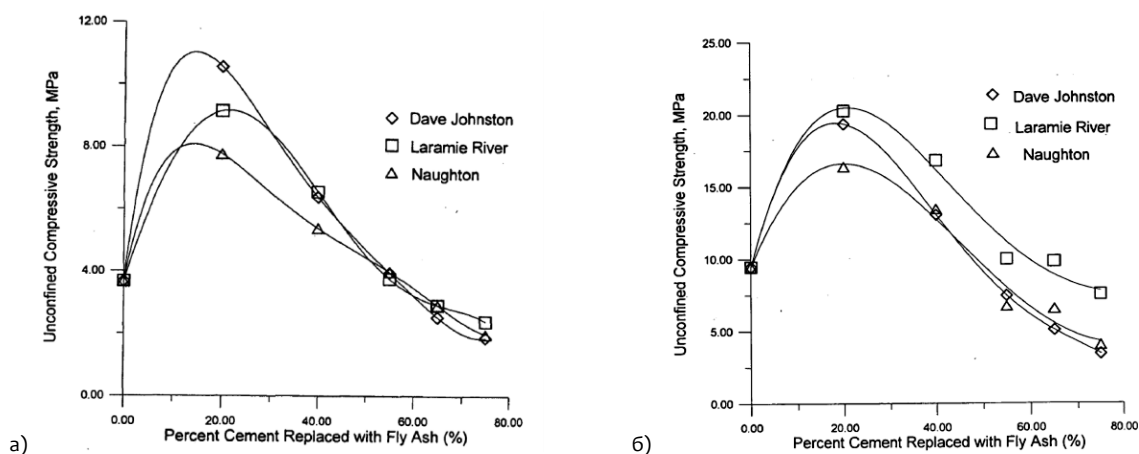
Графикон 9.39. – Резултати модификованог Proctor-ов опита за различите количине додатка везива

Поред 28-дневне чврстоће при притиску (одређене на цилиндричним узорцима димензија 152,4x304,8mm (6,0x12,0in)) на призматичним узорцима димензија 76,2x15,24x15,25mm (3,0x6,0x6,0in) одређена је и 28-дневна затезна чврстоћа (табела 9.20.). Највеће вриједности чврстоћа су измјерене на узорцима са 8%*mas* цемента и 8%*mas* летећег пепела (13,63MPa, односно 1,56MPa).

Табела 9.20. – Вриједности чврстоћа при притиску и затезних чврстоћа (након 28 дана њега изорака)

Mixes	Mix Design	Compressive Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)
Mix-1	8% Cement	6.22	0.65
Mix-2	4% Cement + 4% Fly Ash	5.05	0.77
Mix-3	8% Cement + 8% Fly Ash	13.63	1.56
Mix-4	8% Cement + 0.25%, 50.8 mm Fibers	4.73	0.84
Mix-5	4% Cement + 4% Fly Ash + 0.25%, 50.8 mm Fibers	4.01	1.12
Mix-6	8% Cement + 8% Fly Ash + 0.25%, 50.8 mm Fibers	9.28	1.70
Mix-7	8% Cement + 0.50%, 50.8 mm Fibers	4.73	0.98
Mix-8	4% Cement + 4% Fly Ash + 0.50%, 50.8 mm Fibers	3.29	0.96
Mix-9	8% Cement + 8% Fly Ash + 0.50%, 50.8 mm Fibers	10.72	1.51
Mix-10	8% Cement + 0.25%, 76.2 mm Fibers	4.01	0.56
Mix-11	4% Cement + 4% Fly Ash + 0.25%, 76.2 mm Fibers	2.69	0.77
Mix-12	8% Cement + 8% Fly Ash + 0.25%, 76.2 mm Fibers	7.36	0.92
Mix-13	8% Cement + 0.50%, 76.2 mm Fibers	2.90	0.65
Mix-14	4% Cement + 4% Fly Ash + 0.50%, 76.2 mm Fibers	2.90	0.66
Mix-15	8% Cement + 8% Fly Ash + 0.50%, 76.2 mm Fibers	7.72	1.25
Mix-16	8% Cement + 0.25%, 19 mm Fibers	3.90	0.77
Mix-17	4% Cement + 4% Fly Ash + 0.25%, 19 mm Fibers	3.65	0.66
Mix-18	8% Cement + 8% Fly Ash + 0.25%, 19 mm Fibers	6.40	1.18
Mix-19	8% Cement + 0.50%, 19 mm Fibers	2.92	0.79
Mix-20	4% Cement + 4% Fly Ash + 0.50%, 19 mm Fibers	2.68	0.47
Mix-21	8% Cement + 8% Fly Ash + 0.50%, 19 mm Fibers	4.87	0.45

Аутори K.Ksaibati, T.Conklin [70] бавили су се анализом резултата експерименталних истраживања стабилизација природног тла са цементом и летећим пепелом (*cement-treated bases* - СТВ). Дата везива су природном тлу додавана у количини од 8%*mas*, а додатак воде у мјешавинама је износила 16,5%. Цемент који је коришћен у мјешавинама имао је ознаку *Type II*, умјерене сулфатне отпорности (произведен у цементари *Mountain Cement Company*, у граду *Laramie*, (америчка савезна држава Вајоминг)). Летећи пепео класе *C* је у истраживању додаван у количинама: 0, 20, 40, 55, 65 и 75%*mas*, у односу на количину цемента. Као разлог за почетак примјене летећег пепела у стабилизацијама коловозних конструкција аутори наводе податак да је 70-их година прошлог вијека дошло до драстичног повећања цијене цемента, па се тражило алтернативно рјешење за смањење његове примјене. У прилог већој примјени летећег пепела у наведене сврхе иде и податак аутора да је у току посљедње деценије XX-ог вијека чак 86% од укупне количине летећег пепела било неискоришћено. У овом истраживању приказани су резултати испитивања стабилизацијских узорка са летећим пепелом након 7 и 28 дана њега узорака. Аутори су дали упоредну анализу чврстоћа при притиску за 3 различите врсте летећег пепела (у зависности од количине његовог додатка мјешавинама). Највеће чврстоће су остварене на узорцима код којих је 20% цемента замијењено летећим пепелом, док су чврстоће за узорке са 0 и 55% замјене биле приближно исте. Максималне 7-дневне чврстоће при притиску су остварене на мјешавинама са летећим пепелом поријеклом из термоелектране *Dave Johnston*, а максималне 28-дневне чврстоће на мјешавинама са пепелом из термоелектране *Laramie River* (графикон 9.40.).



Графикон 9.40. – Утицај додатка летећег пепела различитог поријекла на вриједности чврстоћа при притиску након: а) 7 дана и б) 28 дана њега узорака

Анализом графика 9.40. може се закључити да се летећи пепео одређеним процентима може успјешно примијенити као замјена за цемент у цементним стабилизацијама. Наравно, тај проценат замјене зависи од карактеристика летећег пепела условљених његовим поријеклом. У САД-у је у склопу овог истраживања укупно било обухваћено 29 путних дионица, дужине по 0,322km (0,2mi), при чему су дебљине слојева цементне стабилизације варирале од 12,7 до 33cm (5-13in).

Стабилизацију ријечног шљунка (са $D_{50}=6mm$) са цементом анализирао је и аутор А.Ишаеги [71]. Цемент ознаке CEM II/B-M (P-S) 32,5R у мјешавинама је дозиран у количинама од 2 и 4% мас. Гранулометријски састав агрегата је био у скаладу са граничним условима датим у стандарду HRN U.E9.024/80 [C41]. На основу стандарда EN 13286-2:2010 [C55] урађен је Proctor-ов опит. Током збијања, у поступку Proctor-ог опита, јављао се и губитак воде. Садржај воде у мјешавинама прије и након поступка збијања је дат у табели 9.21., а почетне количине воде су биле дефинисане масено (а не процентуално) и износиле су 50, 100 и 150g. Максимална сува запреминска маса, за узорке са 2% мас цемента износила је $2,11g/cm^3$, а за узорке са 4% мас цемента $2,17g/cm^3$.

Удио цемента [%]	Садржај воде прије збијања w_{0i} [%]	Садржај воде након збијања w_{Fi} [%]	Разлика између почетне и коначне влажности [%]	Сува просторна маса [g/cm^3]
2	2,99	2,87	0,12	2,05
	5,39	4,69	0,69	2,10
	5,19	5,88	-0,66	2,11
4	2,50	2,37	0,13	2,07
	3,68	3,60	0,09	2,12
	6,27	5,45	0,82	2,14
	14,98	6,56	8,42	2,17

Табела 9.21. – Губитак воде током поступка збијања и вриједности максималних сувих запреминских маса

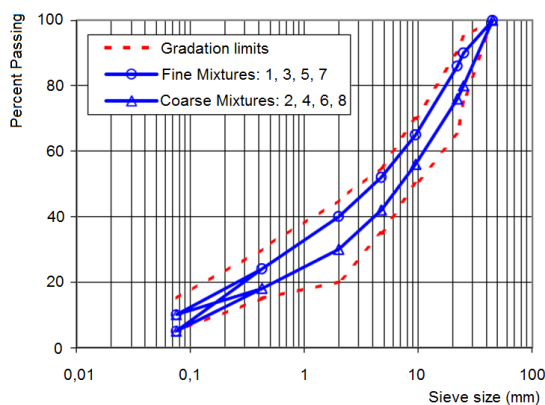
Оптимална количина влажности је одређивања на основу вриједности губитака воде током поступка збијања, јер су се наведене стабилизацијске мјешавине дефинисале као самодренајуће (Annex D – Proctor test for self-draining mixtures, EN 13286-2:2010 [C55]). Узорци су справљени уз помоћ аутоматског набијача, а након уградње хидраулички су вађени из калупа. Након вађења из калупа, узорци су до испитивања његовани на температури $20^\circ C$, при влажности од 90%. Испитивање чврстоћа при притиску (R_c) рађено је након 28 дана њега на цилиндричним узорцима димензија $\varnothing 10,0cm$ и $h=12,0cm$ (по EN 13286-41:2003 [C56]), а добијене вриједности су

дате у табели 9.22.. Као што је и очекивано, са повећањем количине цемента у мјешавинама вриједности чврстоћа при притиску су се повећавале.

Табела 9.22. – Вриједности 28-дневних чврстоћа при притику стабилизацијских узорака

Мјешавина	Максимална сила F [N]	Површина [mm ²]	Тлачна чврстоћа узорака Rc [MPa]	Тлачна чврстоћа мјешавина након 28 дана Rc [MPa]
2 % cement	8814.29	7.69769x10 ³	1.15	1.29
	11003.5	7.69769x10 ³	1.43	
	11987.7	7.69769x10 ³	1.56	
4 % cement	23099.8	7.69769x10 ³	3.00	2.99
	21419.5	7.69769x10 ³	2.78	
	24610.4	7.69769x10 ³	3.20	

Мјешавине рециклираног бетона (RC)²⁸, дробљеног камена (CL)²⁹ и цемента испитивали су аутори S.Lim и D.G.Zollinger [72]. Портланд цемент је мјешавинама додаван у количинама 4 и 8% мас. Гранулометријске криве агрегата (заједно са граничним кривим) су дате на графкону 9.41., на којем се види да су мјешавине 1, 3, 5 и 7 имале већа учешћа ситнијих фракција (Fine Mixtures) од мјешавина 2, 4, 6 и 8 (Coarse Mixtures).



Графикон 9.41. – Гранулометријске криве стабилизацијских мјешавина

Оптимална влажност (ОМС) и максимална сува запреминска маса (МДД) одређени су на основу Proctor-овог опита. Оптимална влажност је због веће апсорпције воде узорака са рециклираним бетоном (RC), имала веће вриједности на узорцима са RC (10,7-11,3%) него на узорцима са CL (6,4-7,3%). Вриједности оптималних влажности и сувих запреминских маса, за различите стабилизацијске мјешавине, дате су у табелама 9.23. и 9.24..

Табела 9.23. – Зависности ОМС-а и МДД-а од врсте мјешавине

Mix ID	Recycled Concrete (RC)			Crushed Limestone (CL)		
	ОМС (%)	γ _{s,max} (g/cm ³)	γ _{s,max} (lb/ft ³)	ОМС (%)	γ _{s,max} (g/cm ³)	γ _{s,max} (lb/ft ³)
1	10.7	2.151	134.3	7.2	2.330	145.5
2	11.2	2.142	133.7	6.4	2.319	144.8
3	10.7	2.151	134.3	7.1	2.321	144.9
4	11.1	2.138	133.5	6.7	2.318	144.7
5	10.8	2.153	134.4	7.3	2.328	145.3
6	11.1	2.145	133.9	6.7	2.316	144.6
7	10.8	2.147	134.0	7.3	2.320	144.8
8	11.3	2.141	133.7	6.8	2.316	144.6

Табела 9.24. – Зависности ОМС-а и МДД-а од врсте агрегата (RC и CL) и гранулације агрегата

Aggregate Type	Mixture Group	ОМС (%)		Max. Dry Density (lb/ft ³)		Molding Moisture Content (%)
		Mean	SD ^(a)	Mean	SD	
Recycled Concrete (RC)	Fine Mixes (Mix 1,3,5,7)	10.75	0.058	121.5	0.418	10.5
	Coarse Mixes (Mix 2,4,6,8)	11.18	0.096	121.3	0.479	11.0
Crushed Limestone (CL)	Fine Mixes (Mix 1,3,5,7)	7.23	0.096	134.8	0.312	7.0
	Coarse Mixes (Mix 2,4,6,8)	6.65	0.173	133.7	0.417	6.5

(a) Standard Deviation

²⁸ RC – Recycled Concrete

²⁹ CL - Crushed Limestone

Чврстоћа при притиску (UCS) и модул еластичности (E) испитани су на цилиндричним узорцима димензија $\varnothing 10,24\text{cm}$ и $h=20,48\text{cm}$ (4x8in) – табеле 9.25. и 9.26.. Након справљања узорци су његовани у коморама са константним условима – температура $t=25^{\circ}\text{C}$ (77F) и влажност од 100%. Испитивање узорака је рађено након 1, 3, 7 и 28 дана њега.

Табела 9.25. – Чврстоћа при притиску за различите стабилизацијске мјешавине и периоде њега узорака

Aggregate	Mix ID	Compressive Strength (psi)			
		1 day	3 days	7 days	28 days
Recycled Concrete (RC)	1	257.8	243.8	397.4	603.7 ⁽⁵⁾
	2	195.0	282.2	455.0	646.6 ⁽⁵⁾
	3	257.7	286.3	454.5	550.8 ⁽⁵⁾
	4	208.2	400.2 ⁽²⁾	398.8	527.4 ⁽⁶⁾
	5	290.3	534.6	759.8 ⁽⁴⁾	1070.3
	6	345.1	647.3	886.6	1220.5
	7	289.1	–	797.0	963.0
	8	395.9	676.5 ⁽³⁾	819.6	908.6
Crushed Limestone (CL)	1	378.9	524.3	630.6	1012.1
	2	318.1	490.0	519.7	556.9
	3	474.2 ⁽¹⁾	598.7	508.3	908.5 ⁽⁷⁾
	4	278.7	543.8 ⁽³⁾	461.4	734.2 ⁽⁸⁾
	5	630.7	1083.8	1221.1	1709.5
	6	606.8	988.4	1224.0	1319.3
	7	648.0	1224.3	1501.7 ⁽⁴⁾	1556.5
	8	550.5	921.7 ⁽³⁾	1190.4	1292.8

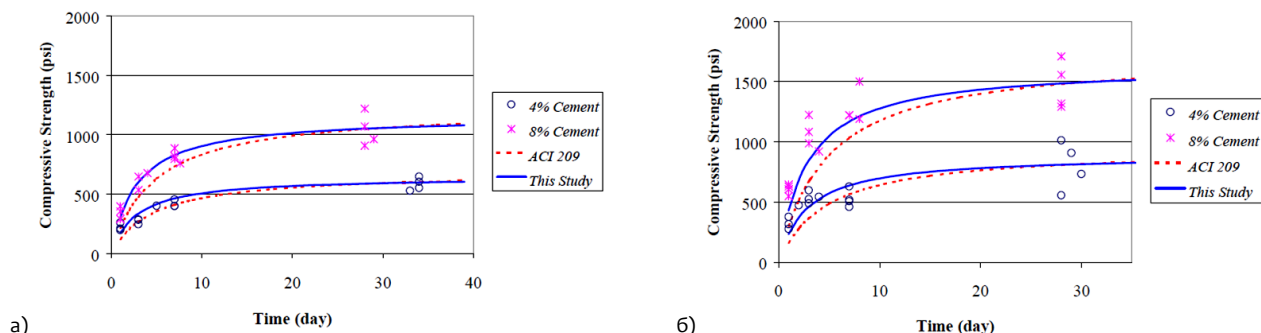
(1) Tested at 2 days; (2) Tested at 5 days; (3) Tested at 4 days; (4) Tested at 8 days
(5) Tested at 34 days; (6) Tested at 33 days; (7) Tested at 29 days; (8) Tested at 30 days

Табела 9.26. – Модули еластичности за различите стабилизацијске мјешавине и периоде њега узорака

Aggregate	Mix ID	Modulus of Elasticity ($\times 10^6$ psi)			
		1 day	3 days	7 days	28 days
Recycled Concrete (RC)	1	0.464	0.377	0.628	0.847 ⁽¹⁾
	2	0.289	0.391	0.807	0.858 ⁽¹⁾
	3	0.380	0.515	0.864	0.996 ⁽¹⁾
	4	0.322	0.727 ⁽²⁾	0.804	0.944 ⁽³⁾
	5	0.475	0.861	1.057 ⁽⁴⁾	1.426
	6	0.584	0.945	1.298	1.312
	7	0.551	–	1.111	1.243
	8	0.727	1.110 ⁽⁵⁾	1.200	1.276
Crushed Limestone (CL)	1	0.561	0.657	0.872	1.050
	2	0.760	0.823	0.842	0.878
	3	0.764 ⁽⁶⁾	0.837	0.843	1.198 ⁽⁷⁾
	4	0.516	0.905 ⁽⁵⁾	0.917	1.200 ⁽⁸⁾
	5	1.039	1.466	1.744	1.780
	6	1.038	1.454	1.614	1.545
	7	0.840	1.405	1.786 ⁽⁴⁾	1.910
	8	1.080	1.463 ⁽⁵⁾	1.446	1.678

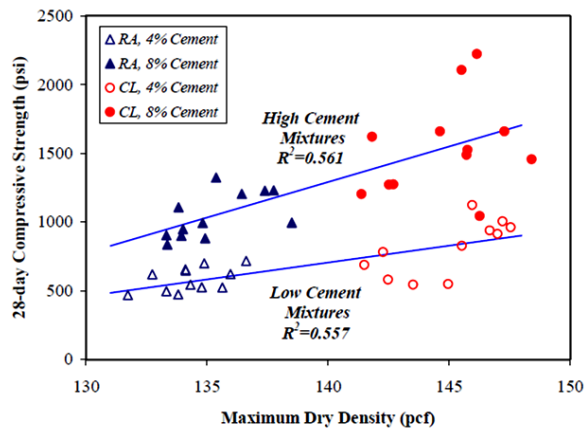
(1) Tested at 34 days; (2) Tested at 5 days; (3) Tested at 33 days; (4) Tested at 8 days
(5) Tested at 4 days; (6) Tested at 2 days; (7) Tested at 29 days; (8) Tested at 30 days

Рециклирани агрегат (RC), при истим условима испитивања, имао је за око 30% нижу чврстоћу при притиску од дробљеног каменог агрегата (CL). Већина захтјева који се односе на минималне чврстоће при притиску (за СТАВ) су да њихове вриједности износе 350-500psi ($\approx 2,4\text{-}3,4\text{MPa}$), након 7 дана њега. Мјешавине, које су испитане у овом истраживању испуниле су тај услов. На графикон 9.42. приказана је зависност чврстоћа при притиску од периода њега узорака.

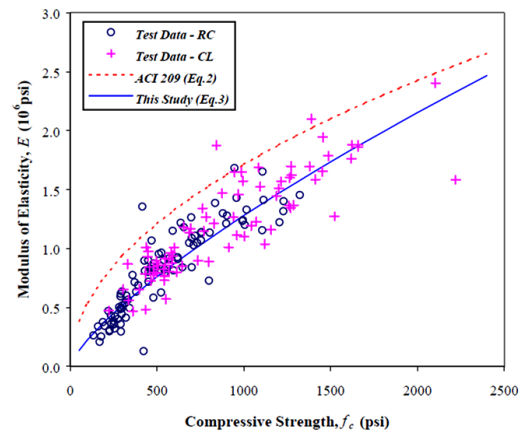


Графикон 9.42. – Зависност чврстоћа при притиску од периода њега узорака, за мјешавине са: а) рециклираним бетоном (RC) и б) дробљеним каменом агрегатом (CL)

Зависност 28-дневних чврстоћа при притиску од вриједности максималних сувих запреминских маса дата су на графикону 9.43.. Са повећањем запремиске масе и количине цемента, чврстоће при притиску се повећавају за оба типа агрегата. Анализом графикона 9.44., (који приказује везу модула еластичности и чврстоћа при притиску), може се закључити да су наведене механичке карактеристике стабилизације у директној пропорцији.



Графикон 9.43. – Зависност чврстоћа при притиску од максималних сувих запреминских маса



Графикон 9.44. – Веза модула еластичности и чврстоћа при притиску

Модули еластичности су за 20-30% имали ниже вриједности код мјешавина са рециклираним, него код мјешавина са дробљеним каменим агрегатом. Укупно је испитано 8 различитих мјешавина, гдје су варијабилне компоненте биле: врста и количина агрегата и додаток везива. Модули еластичности (E) су се кретали од око 5,8GPa до око 13,0GPa (након 28 дана њега узорака). Зависност чврстоће при притиску (за t дана њега), у односу на 28-дневну чврстоћу при притиску дата је у формули 9.1..

$$f_c(t) = f_c(28) \cdot \frac{t}{a+b \cdot t} \dots \dots \dots (9.1.)$$

гдје је:

$f_c(t)$ – чврстоћа при притиску за период од (t) дана њега;

$f_c(28)$ – чврстоћа при притиску након 28 дана њега;

a, b – коефицијенти који зависе од стабилизацијске мјешавине (у овом случају $a=2,5$ и $b=0,9$)

Зависност модула еластичности од чврстоће при притиску дата је у формулати 9.2. и 9.3..

$$E(t) = 33 \cdot w^{1,5} \cdot f_c(t)^{0,5} \dots \dots \dots (9.2.)$$

$$E(t) = 4,38 \cdot w^{1,5} \cdot f_c(t)^{0,75} \dots \dots \dots (9.3.)$$

Гдје су:

$E(t)$ – модули еластичности [psi] за период (t) дана њега,

w – сува запреминска маса [pcf],

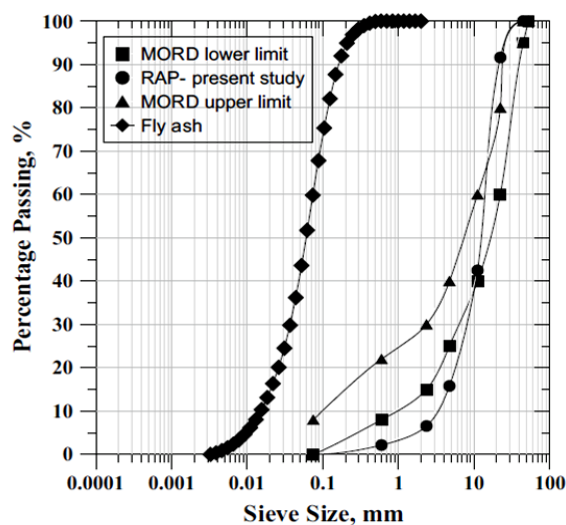
$f_c(t)$ – чврстоћа при притиску [psi] за период (t) дана њега.

Стандарди који су коришћени у наведеном истраживању су били:

- ASTM D558-11 – за одређивање оптималне влажности (ОМС) и максималне запреминске масе (MDD) [C57],
- ASTM C39/C39M-18 – за одређивање чврстоћа при притиску (UCS) [C58] и
- ASTM C469/C469M-14 – за одређивање модула еластичности (E) [C59].

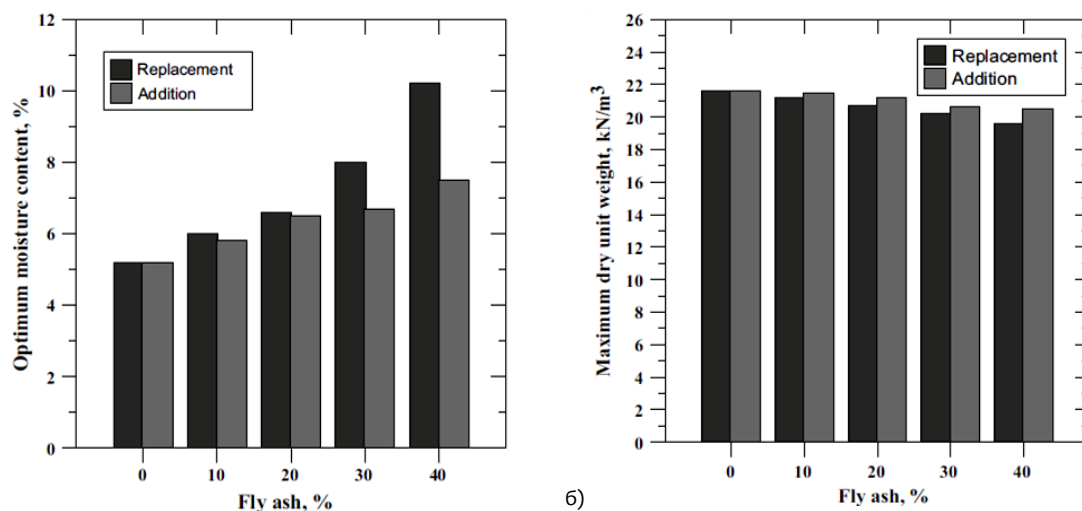
Група аутора (S.Saride, D.Avirneni, S.C.P.Javvadi, A.J.Puppala, L.R.Hoyos) анализира је утицај додатка летећег пепела (FA) на стабилизације са рециклираним асфалтом (RAP-ом) и природним агрегатом (VA) [73]. RAP који је коришћен у овом

експерименталном истраживању био је са државног пута бр. 5 (NH5), у Индији. Рециклирани асфалт и природни агрегат су коришћени у два различита односа. Учешће рециклираног асфата у првом случају је износило 100%*mas*, а у другом 80%*mas*. Летећи пепео коришћен у експерименту је био класе С (садржај CaO је износио 11,9%), а поријекло му је било из термоелектране *Neaveli Lignite Corporation (NLC)*, у индијској савезној држави Тамил Наду. Његово учешће је варирало у мјешавинама и износило је: 10, 20, 30 и 40%*mas*. Одређивање максималне збијености (на основу оптималне влажности (ОМС) и суве запреминске масе (MDD)) рађено је на цилиндричним узорцима $\varnothing 150\text{mm}$ ($V=2250\text{cm}^3$), док је одређивање чврстоће при притиску (UCS) рађено на цилиндричним узорцима димензија $\varnothing 100\text{mm}$ и $h=200\text{mm}$. Испитивање механичких карактеристика је рађено на узорцима старости: 1, 7 и 28 дана. Гранулометријске криве летећег пепела и RAP-а дате су на графикаону 9.45..



Графикон 9.45. – Граничне гранулометријске криве и гранулометријске криве за летећи пепео (Fly ash) и RAP

У датом експерименталном истраживању су коришћени индијски стандарди: IS 2386-1(1963) [C60] и IS 2720-10(1991) [C61]. На основу обраде резултата експерименталног истраживања закључено је да се RAP не може самостано користити за израду доњих носећих слој нове коловозне конструкције, јер има ниске вриједности чврстоћа при притиску (као и вриједности CBR-а и M_r -а). Из тог разлога је неопходно додавање природног агрегата (VA) и везива за побољшање физичко-механичких карактеристика, као што су: цемент, летећи пепео, креч или слична везивна средства. Вриједност оптималне количине додатка воде (ОМС) за RAP износила је 5,0%, а за летећи пепео 26,0%. Максимална сува запреминска тежина за RAP је износила $21,7\text{kN/m}^3$, а за летећи пепео $13,7\text{kN/m}^3$. Зависности оптималне влажности и суве запреминске тежине од учешћа везива и начина употребе у мјешавинама (као заједно или додаток) дате су на дијаграму 9.9..

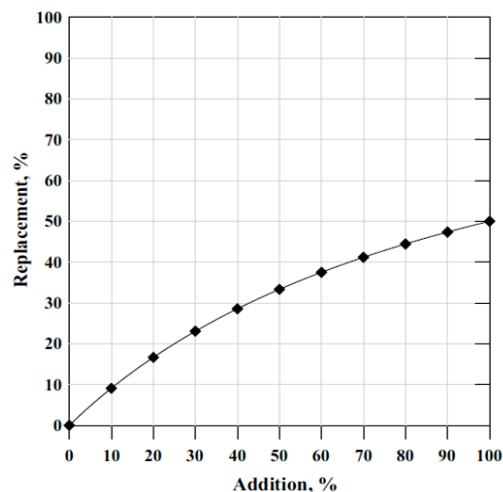


а) Дијаграм 9.9. – Утицај додатка (замјене) летећег пепела код стабилизација RAP-а на вриједности: а) оптималне влажности и б) максималне суве запреминске тежине

Минимална 28-дневна вриједност потребне чврстоће при притиску цементних стабилизација у Индији је ограничена на 4,5MPa. Испитивања механичких карактеристика стабилизација коловозних конструкција су рађена триаксијалним опитом (слика 9.8.), који се сматра за најбољи поступак одређивања карактеристика цементних стабилизација. Дате су зависности оптималних влажности, максималних сувих запреминских тежина и чврстоћа при притиску, од учешћа летећег пепела у мјешавинама. Пепео је у мјешавине дозиран као замјена (*replacement*) и као додаток везиву (*addition*), при чему је њихова међусобна корелација дата на графикону 9.46..

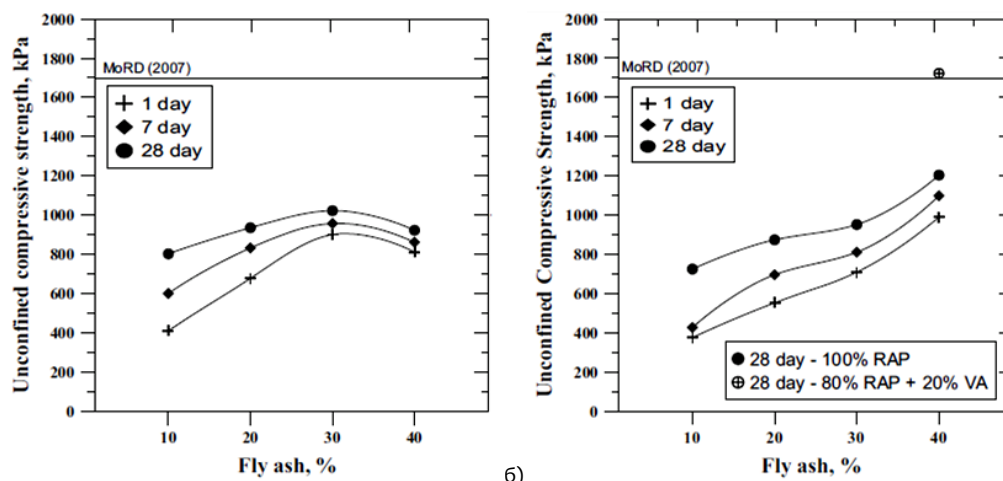


Слика 9.8. – Опрема за испитивање механичких карактеристика цементних стабилизација триаксијалним опитом



Графикон 9.46. – Међусобна корелација између количине додатка и замјене летећег пепела у стабилизацијским мјешавинама

Вриједности чврстоћа при притиску за различите периоде неге, учешћа летећег пепела и агрегата дате су на графикону 9.47.. Са повећањем учешћа летећег пепела у мјешавинама повећавале су се и чврстоће при притиску, осим у случају када се летећи пепео у мјешавинама користио као замјена у количини од 40%*mas*.



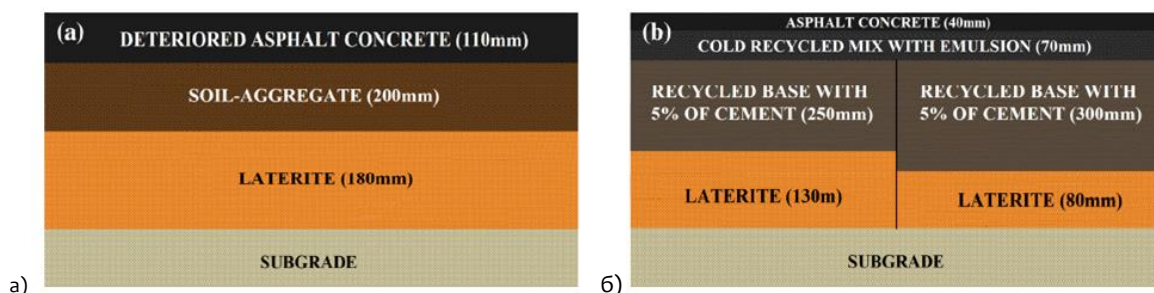
а)

б)

Графикон 9.47. – Вриједности чврстоћа при притиску за различита учешћа летећег пепела употребљеног као: а) замјена, или б) додатак

Приликом одређивања чврстоће при притиску узорци су његовани на собној температури, при влажности од 95%. На крају је закључено је да се у доњим носећим слојевима коловозних конструкција (који садрже 2% мас цемента) редукују дефлексије и хоризонтални напони који се јављају у случају када се примјена цемента изостави.

Аутори *I.S.Bessa, A.L.Aranha, K.L.Vasconcelos, A.H.M.Silva, L.L.B.Bernucci* [74] бавили су се анализом могућности примјене цементне стабилизације рециклираног агрегата (из носећих слојева коловозне конструкције), у току поступка рехабилитације путева. Цемент је у истраживању коришћен у количинама 5 и 6% мас. Количина додатка воде је одређена на основу водоцементног фактора (а не на основу Proctor-овог опита, што је уобичајна пракса код оваквих конструкција), који је за мјешавине са 5% додатка цемента износио 1,3, а за мјешавине са 6% цемента 1,08. Оптимална влажност је одређена индиректно и износила је од 6,5 до 7,5%. У овом раду је приказана упоредна анализа карактеристика рециклираних слојева коловозних конструкција, дебљина 250mm и 300mm. Попречни пресјек коловозне конструкције прије и након поступка рехабилитације приказан је на слици 9.9..

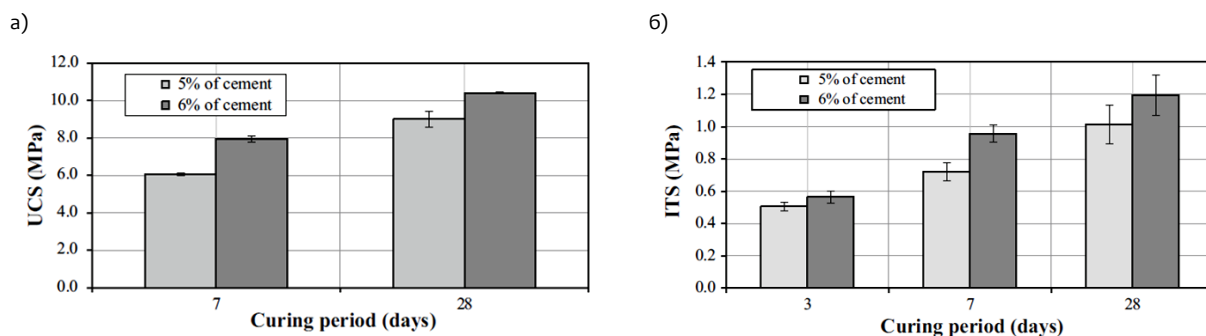


а)

б)

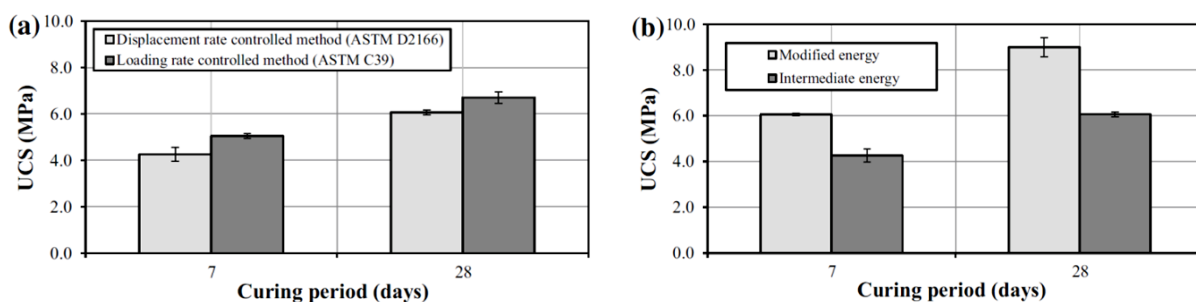
Слика 9.9. – Попречни пресјек коловозне конструкције: а) прије и б) након поступка рехабилитације, за двије различите дебљине стабилизованог слоја

Оптимална влажност (w_{opt}) и максимална сува запреминска маса ($\gamma_{s,max}$) су одређени на основу модификованог Proctor-овог опита (по ASTM D1557-12 [C54]). Поред одређивања чврстоће при притиску - UCS (рађене по ASTM C39/C39M-12 [C58]) након 7 и 28 дана њега, одређена је и индиректна затезна чврстоћа и ITS) након 3, 7 и 28 дана, за различите количине додатка везива (дијаграм 9.10.).



Дијаграм 9.10. – Вриједности: а) чврстоће при притиску (UCS) и б) индиректне затезне чврстоће (ITS), за различите периоде његе и учешћа цемента

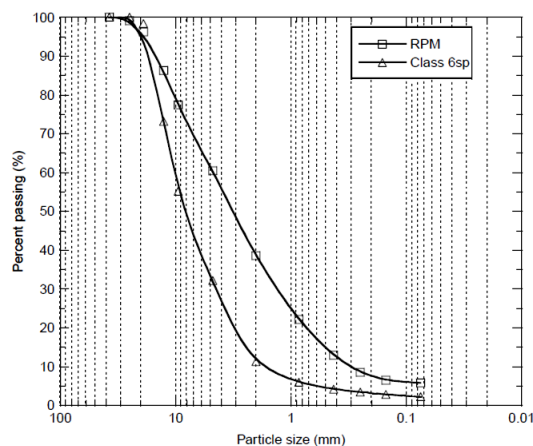
Очување ресурса природних материјала је значајно усљед веће примјене рециклираних материјала у поступку реконструкције постојећих и градње нових путева, а примјена оваквих материјала је у посљедње вријеме све популарнија. У овом истраживању је спроведена и упоредна анализа за различите поступке испитивања вриједности чврстоћа при притиску након 7 и 28 дана његе. Варирајући елементи су били: а) стандарди за испитивање (ASTM D2166-16 [C48] и ASTM C39/C39M-12 [C58]) и б) енергије збијања. Резултати испитивања су показали да су вриједности 28-дневних чврстоћа при притиску за око 30% биле веће у односу на 7-дневне чврстоће, за исте поступке испитивања (дијаграм 9.11.).



Дијаграм 9.11. – Упоредни приказ чврстоћа при притиску (UCS) на основу: а) различитих стандарда испитивања и б) различите енергије збијања

Вриједности модула еластичности (E) су се кретале од 15.788MPa (за стабилизације дебљине 250mm) до 15.885MPa (за стабилизације дебљине 300mm).

Рециклажом асфалтних коловозних конструкције бавили су се и аутори F.Camargo, H.Wen, T.Edil, Y.H.Son [75]. Наведени аутори су анализирали поступак рециклаже на пуној дебљини коловозне конструкције, при чему је агрегат стабилизован летећим пепелом у количини од 14%mas. Поријекло летећег пепела је било из термоелектране Xcel Energy, St.Paul (америчка савезна држава Минесота). Коришћени летећи пепео је садржао значајне количине CaO (22,37%), па је на основу стандарда ASTM C618-17 [C16] класификован као пепео класе C. Агрегат који је коришћен у истраживању се дијелио у двије групе: рециклирани асфалтни коловоз (RPM), настао рециклажом постојећих асфалтних слојева коловозне конструкције (на дебљини 100mm) и дробљени гранитни камени агрегат (класе 6). Анализом гранулометријских кривих агрегата који су коришћени у испитивању (датих на графикону 9.48.), закључује се да је у рециклираном агрегату било веће учешће ситнијих фракција.



Графикон 9.48. – Грануломтријске криве природног (Class 6) и рециклираног (RPM) агрегата коришћених у стабилизацијама

Модификованим Proctor-овим опитом одређена је оптимална влажност и максимална сува запреминска маса узорка. Поред чврстоћа при притиску (UCS) одређена је и чврстоћа на савијање (на призматичним узорцима димензија 76x102x406mm). Чврстоће при притиску (након 7 и 28 дана његе) су одређене на основу стандарда ASTM D5102-04[C53]. Аутори су истраживали 3 различите употребе материјала у изради носећих слојева коловозних конструкција: рециклирани асфалтни коловоз (RPM), дробљени камени агрегат класе 6 (CA)³⁰ и рециклирани асфалтни коловоз и летећи пепео (RPM+FA). Утврђено је да су пластичне деформације веће код коловозних конструкција које у носећим слојевима садрже рециклирани асфалт (услед присуства битумена). Успостављена је релација између вриједности чврстоћа при притиску и модула еластичности за овакве стабилизације и она је дефинисана формулом 9.4.:

$$E = 1200 \cdot UCS \dots \dots \dots (9.4.)$$

гдје су:

E – модул еластичности [MPa];

UCS – чврстоћа при притиску [MPa].

Аутори наведеног истраживања су дали и упоредну анализу вриједности чврстоћа при притиску мјерених у лабораторији и на мјесту уградње, гдје се примјећује велика разлика у добијеним резултатима (табела 9.27.). Вриједности чврстоћа при притиску стабилизација рађених на узорцима у лабораторијским условима су скоро 4 пута веће од вриједности чврстоћа при притиску мјерених у теренским условима. Поред чврстоћа при притиску и на савијање одређене су и вриједности калифорнијског индрекса носивости (CBR-а) и резилијентног модула (Mr), за различите услове испитивања (табела 9.27.).

Табела 9.27. – Утицај локације испитивања на механичке карактеристике стабилизације

Material	Curing time (days)	CBR (%)	Summary resilient modulus (MPa)	Flexural strength (kPa)	UCS (kPa)
Laboratory-mixed SRPM	7	129	2984	150	1160
	28	176	4334	320	1380
Field-mixed SRPM	7	62	–	–	350
	28	94	–	–	480

³⁰ CA – Crushed Aggregates

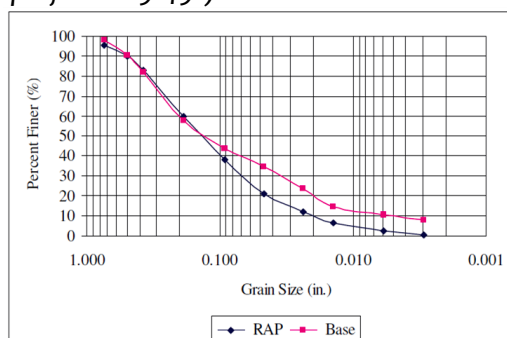
Вриједности оптималних влажности и максималних сувих запреминских маса дате су у табели 9.28. Највећа вриједност оптималне влажности је била за мјешавину која је имала 14% летећег пепела. Максимална сува запреминска маса је забиљежена код мјешавине само са дробљеним каменим агрегатом.

Табела 9.28. – Вриједности оптималних влажности и максималних сувих запреминских маса за различите агрегате и учешће летећег пепела

Material	Fly ash content (%)	Optimum water content (%)	Max. dry density (kg/m ³)	Classification	
				AASHTO	USCS
Class 6	0	5.2	2220	A-1-a	GW
RPM	0	4.9	2044	A-1-a	SW-SM
SRPM	14	6.5	2111	–	–

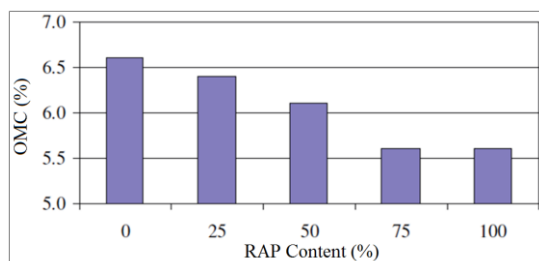
* In accordance with the ASTM D1557, 'Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort'.

У свом раду аутор A.V.Brown [76] се бавио истраживањем стабилизација природног материјала (из носећих слојева постојеће коловозне констукције) и рециклираног асфалтног материјала (RAP-а), са цементом. RAP се користио у количинама: 0; 25; 50; 75 и 100%*mas*, а поријекло му је било са ауто-пута I-84, близу града Morgan (америчка савезна држава Јута). Реконструкција наведеног путног правца рађена је поступком рециклаже. Учешће портланд цемента (Type I/II) у мјешавинама је варирало и износило је од 0 до 2,0%*mas*, у корацима од по 0,5%. Гранулометријски састав агрегата је испитан на основу стандарда ASTM D422-63(2007) [C62] и закључено је да је рециклирани асфалт имао мање учешће ситнијих честица од природног агрегата (графикон 9.49.).

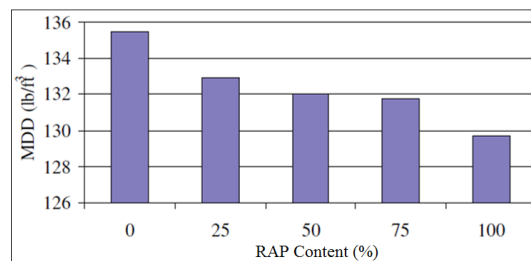


Графикон 9.49. – Гранулометријски састав природног (Base) и рециклираног (RAP) агрегата

Оптимална влажност (ОМС) и максимална сува запреминска маса (MDD) су одређене на основу модификованог Proctor-овог опита (по ASTM D1557-12[C54]). Узорци на којима су рађена испитивања су били цилиндричног облика са димензијама $\varnothing 4,0\text{in}$ и $h=4,5\text{in}$. Оптимална влажност је имала вриједности од 5,6 до 6,6%, а максимална сува запреминска маса од 129,7 до 135,5 lb/ft³ (тј. од око 2079 до око 2172 kg/m³). Са повећањем количине RAP-а у мјешавинама вриједности ОМС-а и MDD-а су опадале (дијаграми 9.12. и 9.13.).

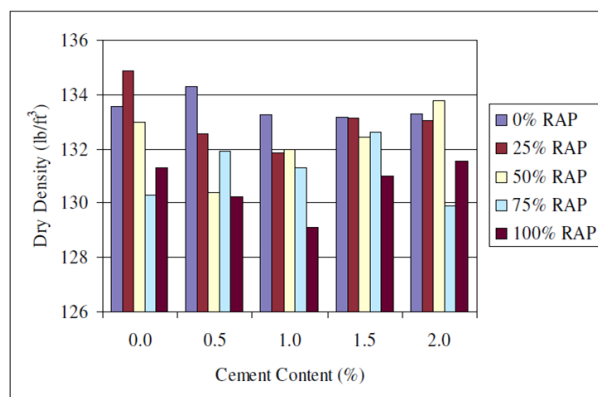


Дијаграм 9.12. – Вриједности ОМС-а у зависности од количине RAP-а у мјешавинама



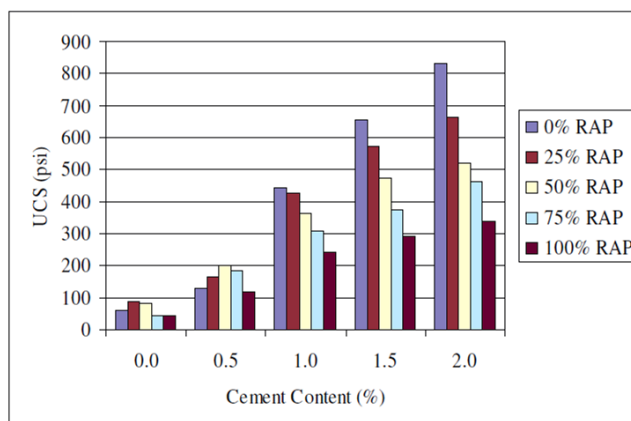
Дијаграм 9.13. – Вриједности MDD-а у зависности од количине RAP-а у мјешавинама

Зависност суве запреминске масе од количине додатка цемента и RAP-а је приказана на збирном дијаграму 9.14., на основу кога се може закључити да су најмање вриједности сувих запреминских маса биле за највећа учешћа RAP-а (за 75 и 100% учешћа).



Дијаграм 9.14. – Зависност суве запреминске масе (Dry Density) од количине додатка цемента и RAP-а у мјешавинама

Чврстоћа при притиску (UCS) је испитана по ASTM D1633-17 [C44], на узорцима старости 7 дана (који су прво његовани при 100% влажности, након чега су сушени 72h на температури 140F (60°C)). По три узорка стабилизација су прављена за једну серију испитивања. Вриједности UCS-а су биле у зависности од учешћа RAP-а и цементног везива у мјешавинама, а збирни резултати испитивања су дати на дијаграму 9.15.. Са повећањем садржаја RAP-а у стабилизацијама са већим учешћем цемента пад чврстоћа је био израженији.

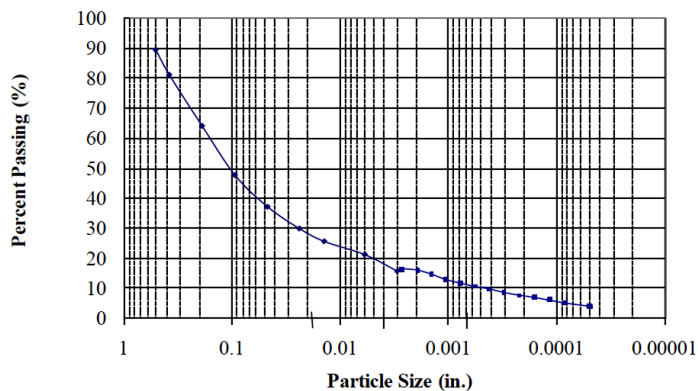


Дијаграм 9.15. – Зависност чврстоћа при притиску од учешћа цемента и RAP-а у стабилизацијама

У поменутом раду је наведено да је рециклажа на пуној дебљини путног профила (FDR поступак) од 25 до 50% јефтинији поступак рехабилитације коловозних конструкција, у односу на комплетну замјену постојећих камених агрегата (у неvezаним носећим слојевима) новим. Аутор такође наводи и податак да је америчка организација за цемент (Portland Cement Association - PCA) предложила да се вриједности 7-дневних чврстоћа при притиску цементних стабилизација крећу од 300 до 400psi ($\approx 2,0 \div 2,7 \text{MPa}$), а количина примјене RAP-а ограничи на 75% мас. Напоменуто је и да је избор количине цемента веома битан - мале количине цемента нису добре, јер стабилизације не постижу захтјеване механичке карактеристике, а велике

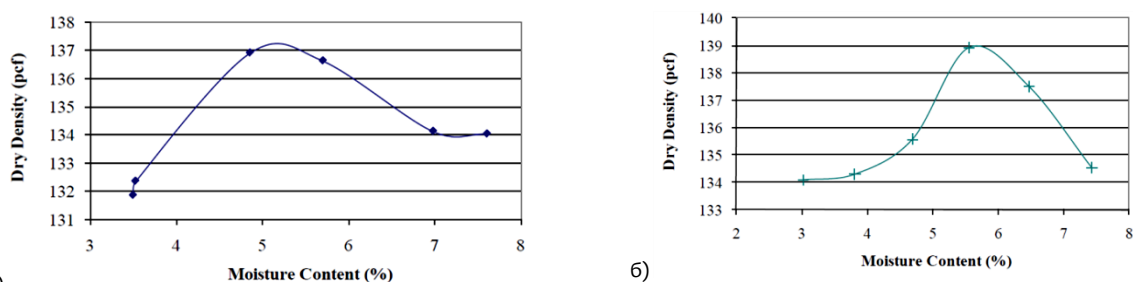
количине примјене доводе до појаве пукотина у изведеном слоју, па је при избору количине цемента битно одредити оптималне вриједности његовог додатка.

Утицајне параметре код одређивања чврстоћа при притиску цементних стабилизација (са рециклираним асфалтном и цементом) анализирао је и аутор P.A.Dixon, у свом раду [77]. Дато истраживање је рађено на основу пројекта реконструкције једне улице у граду Salt Lake City (америчка савезна држава Јута), током 2008.године. У анализи је, између осталог, приказан и начин додавања цемента у мјешавине, гдје је акценат стављен на поступке додатка цемента у облику муља (*cement slurry* – слика 7.5.) и у облику праха (*dry cement* – слика 7.6.). Количине додатка цемента су износиле 2 и 6%*mas*. Модификовани Proctor-ов опит (за одређивање оптималних влажности (ОМС) и максималних сувих запреминских маса (MDD)) рађен је на цилиндричним узорцима димензија $\varnothing 4,0\text{in}$ и $h=4,5\text{in}$. Агрегат, чија је гранулација дата на графикону 9.50. је прије испитивања сушен у сушници на температури 140F (60°C).



Графикон 9.50. – Гранулометријска крива агрегата који је коришћен за израду цементних стабилизација

Приказ зависности оптималне влажности (ОМС) и максималне суве запреминске масе (MDD), од количне додатка цемента у мјешавинама приказан је на графикону 9.51..

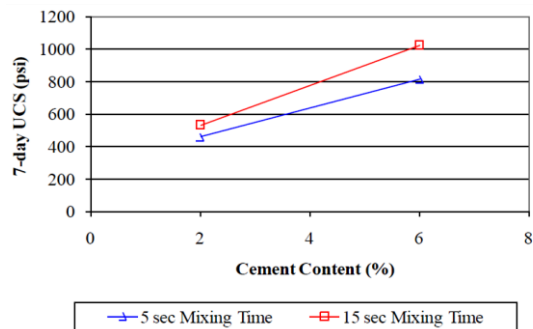


а)

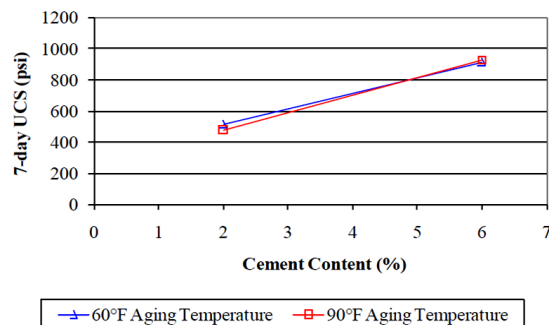
б)

Графикон 9.51. – Вриједности оптималних влажности (Moisture Content) и максималних сувих запреминских маса (Dry Density) за: а) 2%*mas* додатка цемента и б) 6%*mas* додатка цемента

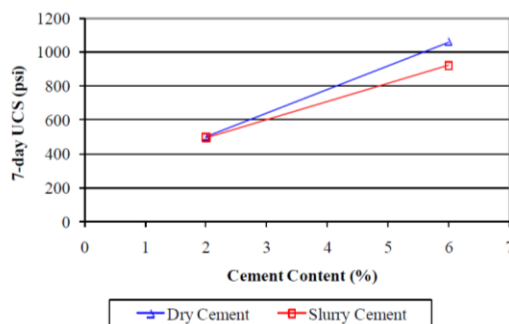
Чврстоће при притиску су одређене на узорцима његованим 7 дана, на собним температурама. Анализом резултата испитивања доказано је да су чврстоће при притиску (UCS) директно пропорционалне времену мијешања компонентних материјала (графикон 9.52.). Такође, у датом истраживању је анализиран утицај температуре њега узорака (графикон 9.53.) и начина додатка цементног везива (графикону 9.54.) на вриједности 7-дневних чврстоћа при притиску.



Графикон 9.52. – Зависност 7-дневних чврстоћа при притиску од количине додатка цемента и времена мијешања компонентних материјала

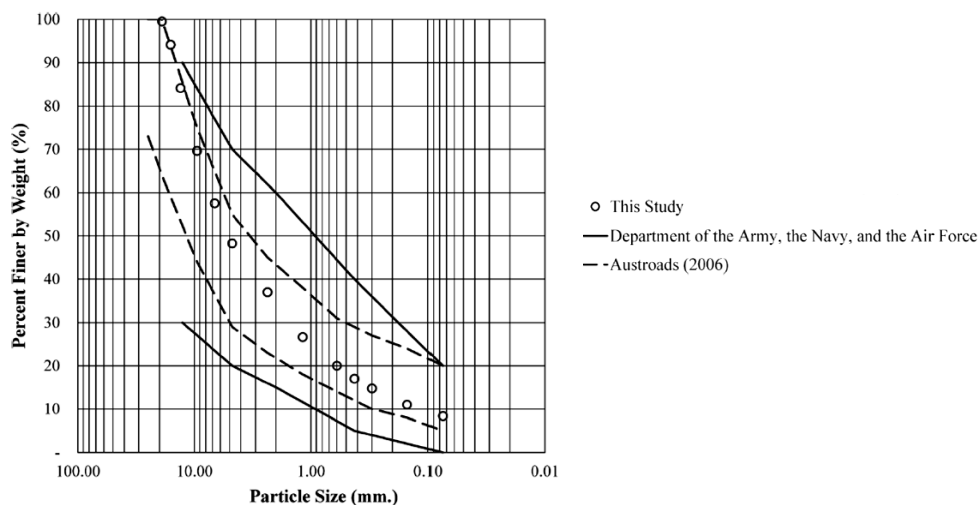


Графикон 9.53. – Зависност 7-дневних чврстоћа при притиску од количине додатка цемента и температура њега узорка



Графикон 9.54. – Зависност чврстоћа при притиску од начина дозирања и количине додатка цемента у стабилизацијским мјешавинама

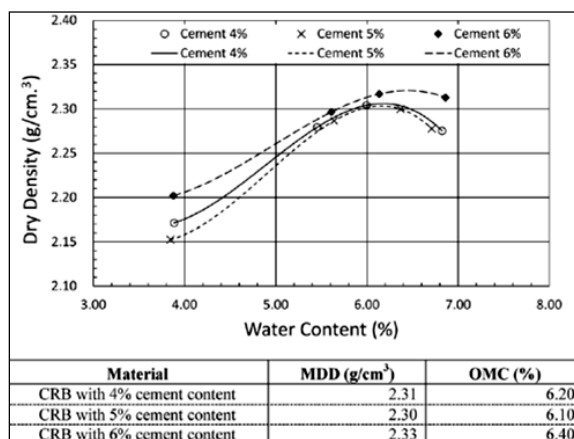
Аутори *K.Nusit, P.Jitsangia, J.Kodikara, H.H.Bui, G.L.M Leung* су у свом раду [78] анализирали утицај додатка цемента дробљеном каменом агрегату (CRB)³¹, код израде цементних стабилизација коловозних конструкција. Дробљени камени агрегат коришћен у истраживању је био поријеклом из каменолома *Gosnells* (Аустралија). Током истраживања портланд цемент је коришћен у количинама од 4, 5 и 6%*mas*. Номинално зрно агрегата је износило 20mm, док је гранулометријска крива мјешавине била унутар граничних кривих које су прописали: *Austrroads* и *Departments of Army, the Navy, and the Air Force* – графикон 9.55..



Графикон 9.55. – Граничне гранулометријске криве и крива агрегата коришћеног у истраживању

³¹ CRB – Crush Rock Base

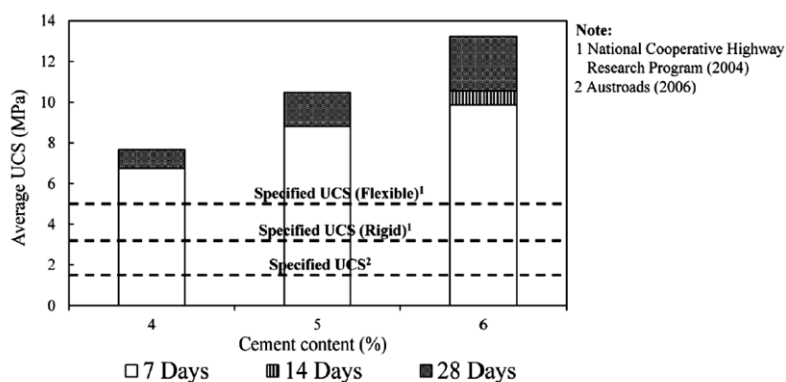
Испитивања физичких и механичких карактеристика стабилизација рађена су по аустралијским нормама (AS), па је тако за испитивање цемента коришћен стандард: AS 3972-2010 [С63], а за испитивање чврстоће при притиску (UCS) стандард: AS 5101.2-2008 [С64]. На основу дефинисане оптималне влажности (ОМС) и максималне суве запреминске масе (МДД) – графикон 9.56., усвојена је референтна збијеност мјешавине од 98%, која се користила за прављење и испитивање стабилизацијских узорака.



Графикон 9.56. – Одређивање максималних сувих запреминских маса (МДД) и оптималних влажности (ОМС), за различите количине додатка цемента

Анализом графикона 9.56. се може примети да количина цемента много мање утиче на вриједности максималних сувих запреминских маса од количине додатка воде. Занимљиво је да су количине воде, које су додаване у мјешавине, усвајане за 1% веће у односу на прорачунате оптималне вриједности, да би се осигурале довољна влажност у мјешавини цемента и агрегата и да би се указало на могући губитак воде током процеса уградње слоја цементне стабилизације на траси.

Узорци за испитивање механичких карактеристика су били цилиндричног облика димензија $\varnothing 100\text{mm}$ и $h=115\text{mm}$, а збијање узорака је рађено у 5 слојева. Испитивања чврстоћа при притиску су рађена након 7 и 28 дана његе узорака, а за 6% додатка цемента и након 14 дана његе (дијаграму 9.16.). На поменутом дијаграму су дате и захтјеване вриједности чврстоћа при притиску стабилизација за флексибилне и круте коловозне конструкције.



Дијаграм 9.16. – Просјечне вриједности чврстоћа при притиску (UCS) за различите количине додатка цемента и периоде његе узорака

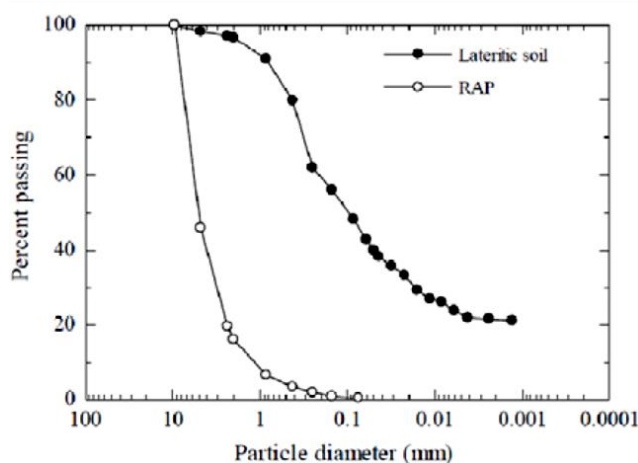
Поред чврстоћа при притиску, у току истраживања су одређени и динамички модули еластичности. Упоредне вриједности чврстоћа при притиску и динамичких

модула еластичности, у зависности од периода њега узорака и количине додатка цемента, дате су у табели 9.29..

Табела 9.29. – Вриједности чврстоћа при притиску и динамичких модула еластичности стабилизација, за различите периоде њега и садржаје цемента

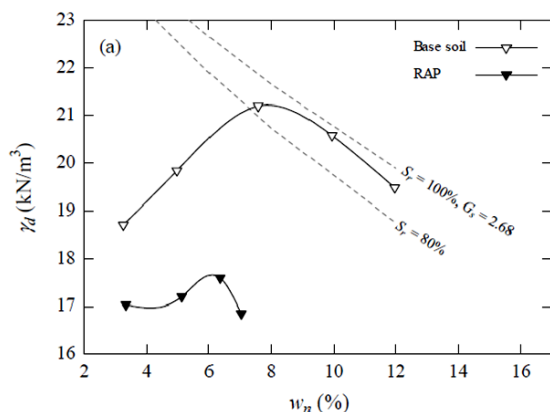
Curing Time (Days)	Cement Content (%)	UCS (MPa)	Dynamic Modulus (MPa)
7	6	10.37	17 106–19 192
14	6	10.56	14 550–17 252
28	6	12.54	21 327–24 540
28	6	12.54	20 898–24 153
28	5	10.49	16 301–19 689
28	4	7.67	15 026–16 883

Аутори *J.Suebsuk, A.Suksan, S.Horpibulsuk* [79] су испитивали могућности стабилизације природног тла (*Soil*) и рециклираног асфалтног материјала (*RAP-a*) са цемента. Ово експериментално истраживање спроведено је на Тајланду. Природно тло (латеритног поријекла) је било са локације *Nakhon-Ratchsima*, док је поријекло рециклираног асфалта било из провинције *Lopburi*. Анализом граничних кривих, датих на графикону 9.57., закључује се да је природно тло имало веће учешће ситнозрног агрегата од *RAP-a*. Природно тло се састојало од: 2% шљунка, 53% пијеска, 25% муља и 20% глине. Номинално зрно (и природног тла и рециклираног асфалта) у мјешавинама је било пречника 10mm (графикон 9.57.).

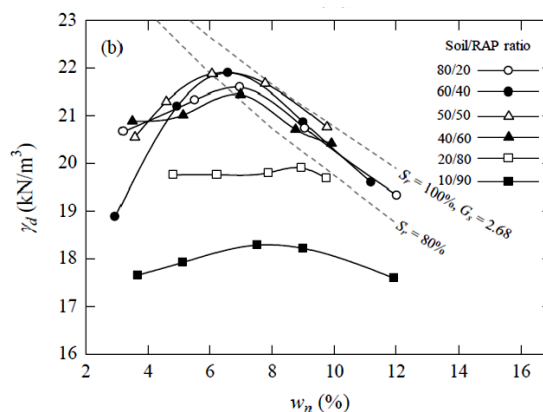


Графикон 9.57. – Гранулометријски састав агрегата природног тла (*Lateritic soil*) и рециклираног асфалтног коловоза (*RAP-a*)

Учешћа природног тла и рециклираног асфалта (*S/RAP*) у мјешавинама су варирали и имали су сљедеће односе: 80/20, 60/40, 50/50, 40/60 и 20/80. Цемент који је коришћен у мјешавинама био је цемент *Type I* и додаван је у количинама: 1, 2, 3 и 5% мас. *Proctor*-овим опитом (по *ASTM D1557-12 [C54]*) одређена је оптимална влажност (*ОМС*) и максимална сува запремиска тежина ($\gamma_{d,max}$) на цилиндрима $\varnothing 100\text{mm}$, а резултати испитивања су дати на графиконима 9.58. и 9.59.. Оптималан однос учешћа *RAP-a* и природног тла у мјешавинама износио је 1:1, за *ОМС*=6,4% и $\gamma_{d,max}$ =21,9kN/m³. Примјећено је да са повећањем *RAP-a* (учешћа $\geq 50\%$) у мјешавинама вриједности $\gamma_{d,max}$ опадају (графикон 9.59.).

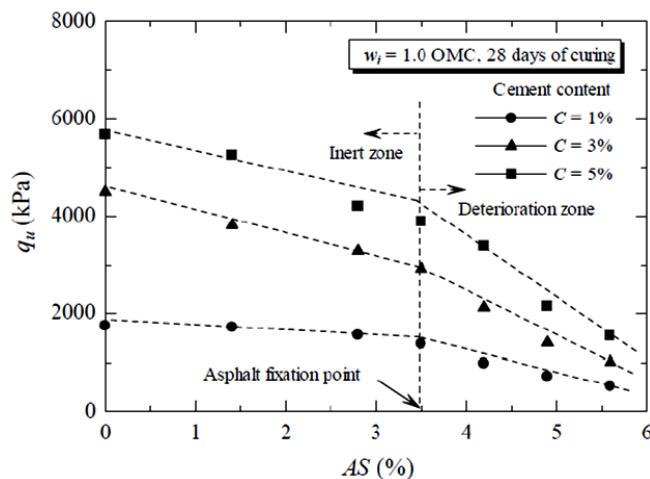


Графикон 9.58. – Максимална сува запреминска тежина и оптимална влажности за природно латеритно тло и рециклирани асфалт



Графикон 9.59. – Максимална сува запреминска тежина и оптимална влажности за различита учешћа агрегата у стабилизацијским мјешавинама

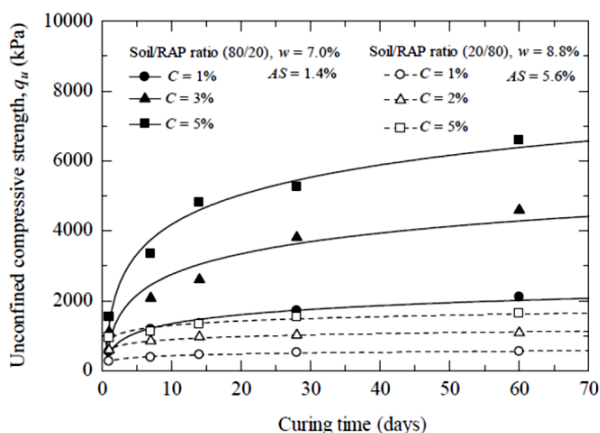
Чврстоће при притиску су одређене након: 1, 7, 14, 28 и 60 дана његе узорака, на температурама од $25 \pm 2^\circ\text{C}$ и оне су износиле до 6MPa (након 60 дана његе), а добијале су се на узорцима са 5% додатка цемента. У раду је анализирана зависност чврстоћа при притиску стабилизацијских мјешавина од количине старог битумена (AS)³² у RAP-у и примјеђено је да се чврстоће при притиску смањују са повећањем количине битумена (графикон 9.60.). Аутор су увели и термин тзв. фиксна тачка (fixation point) за садржај асфалтног везива - битумена, која је износила 3,5%. Присуство битумена изнад те вриједности (у рециклираном асфалту) се сматрало неповољним и избјегавало се, јер је утицало на смањење чврстоћа при притиску. На графикону 9.60. је такође дата и зависност чврстоће при притиску од количине додатка цемента.



Графикон 9.60. – Зависност чврстоћа при притиску (q_u) од количина додатка цемента (Cement Content) и садржаја битумена (AS) у RAP-у

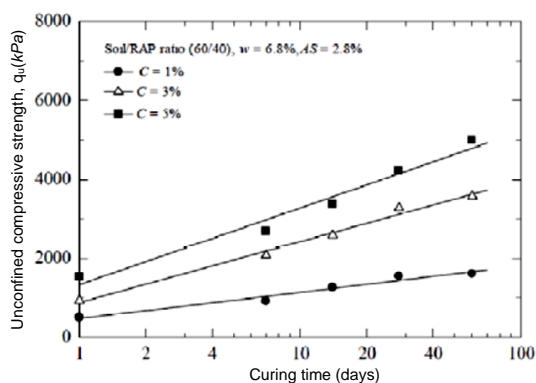
Са повећањем количине RAP-а у стабилизацијским мјешавинама (са 20 на 80%) вриједности чврстоћа при притиску опадају, а на графикону 9.61. су дате вриједности за мјешавине са односима $S/RAP=80/20$ и $S/RAP=20/80$.

³² AS – Asphalt Content

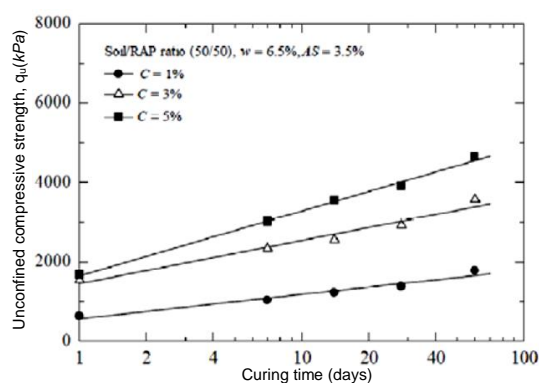


Графикон 9.61. – Вриједности чврстоћа при притиску у односу на састав мјешавине и периоде њега узорака

Вриједности чврстоћа при притиску за мјешавине са односима $S/RAP=60/40$ и $S/RAP=50/50$ дате су на графиконима 9.62. и 9.63..



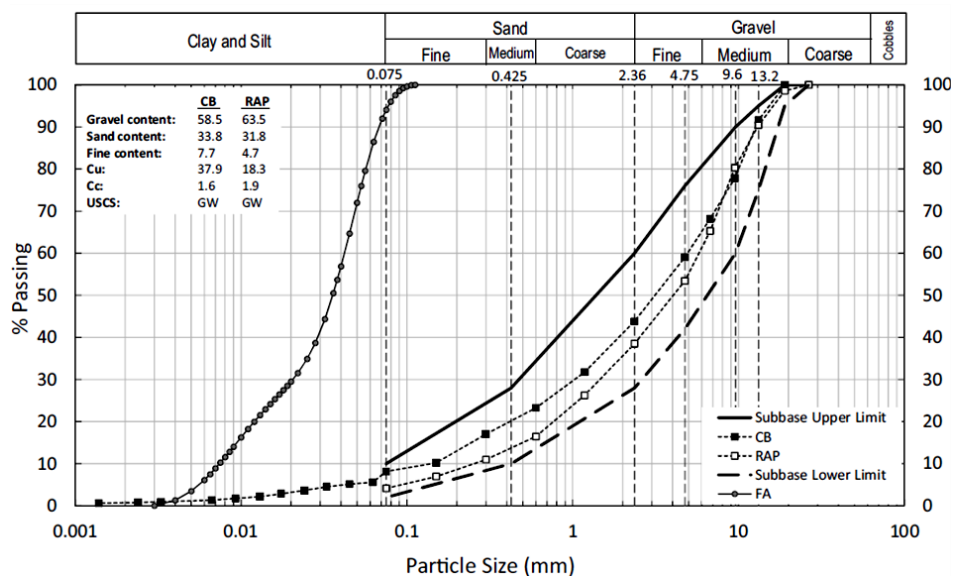
Графикон 9.62. – Вриједности чврстоћа при притиску (q_u) за различите периоде њега и саставе мјешавина ($S/RAP=60/40$)



Графикон 9.63. – Вриједности чврстоћа при притиску (q_u) за различите периоде њега и саставе мјешавина ($S/RAP=50/50$)

Могућност употребе отпадних материја у носећим слојевима коловозних конструкција истраживали су аутори *A.Mohammadinia*, *A.Arulraja*, *S.Horribulsuk*, *A.Chinkulkijniwat* [80]. У свом експерименталном истраживању поменути аутори су користили рециклирани асфалт (RAP), дробљену опеку (CB)³³ и летећи пепео (FA), као везивни материјал. Обје врсте рециклираног агрегата су биле поријеклом из Мелбурна (Аустралија), док је летећи пепео (class F) био из аустралијске термоелектране Queensland. Количине летећег пепела у мјешавинама су варилале и износиле су: 5, 10, 15, 20, 25 и 30%*mas*. Гранулометријски састав компонентних материјала одређен према AS 1289.3.6.3-2003 [С65]) и граничне криве стабилизације дате су на графикону 9.64..

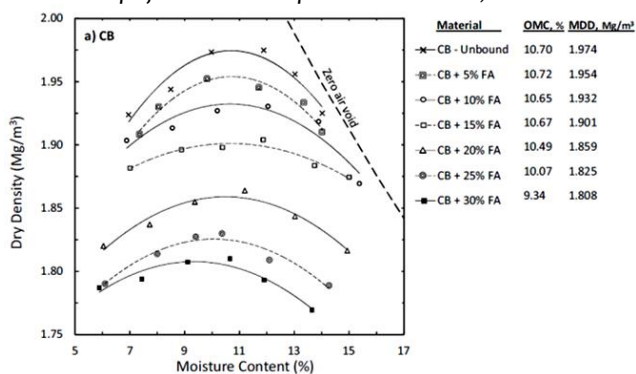
³³ CB – Crushed Brick



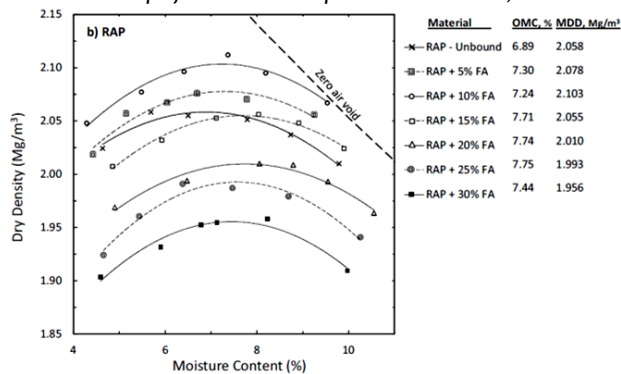
Графикон 9.64. – Граничне и гранулометријске криве компонентних материјала стабилизације

Оптимална влажност (ОМС) и максимална сува запреминска маса (МДД) одређене су на основу Proctor-овог опита. Добијени резултати су упоређени са резултатима испитивања у којима су наведени материјали коришћени у изради невезаних слојева коловозних конструкција (графикони 9.65. и 9.66.). Вриједности ОМС-а су биле мање за RAP него за CB, док је обрнут случај био код одређивања МДД-а. На поменутих графиконима приказане су и зависности ОМС-а и МДД-а од учешћа летећег пепела у мјешавинама. Мјешавине су справљане на начин што је прво справљена мјешавина агрегата и воде, па је након 2h датој мјешавини додат летећи пепео.

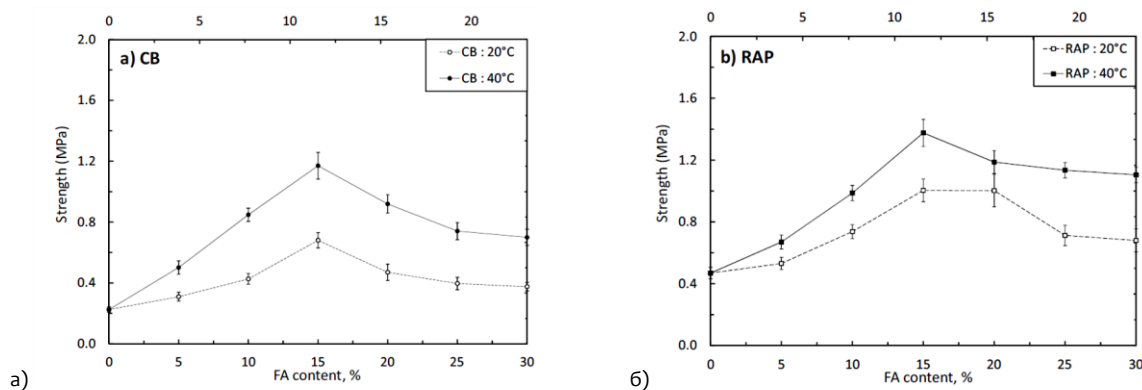
Графикон 9.65. – Утицај додатка воде и летећег пепела на вриједности запреминских маса, за CB



Графикон 9.66. – Утицај додатка воде и летећег пепела на вриједности запреминских маса, за RAP



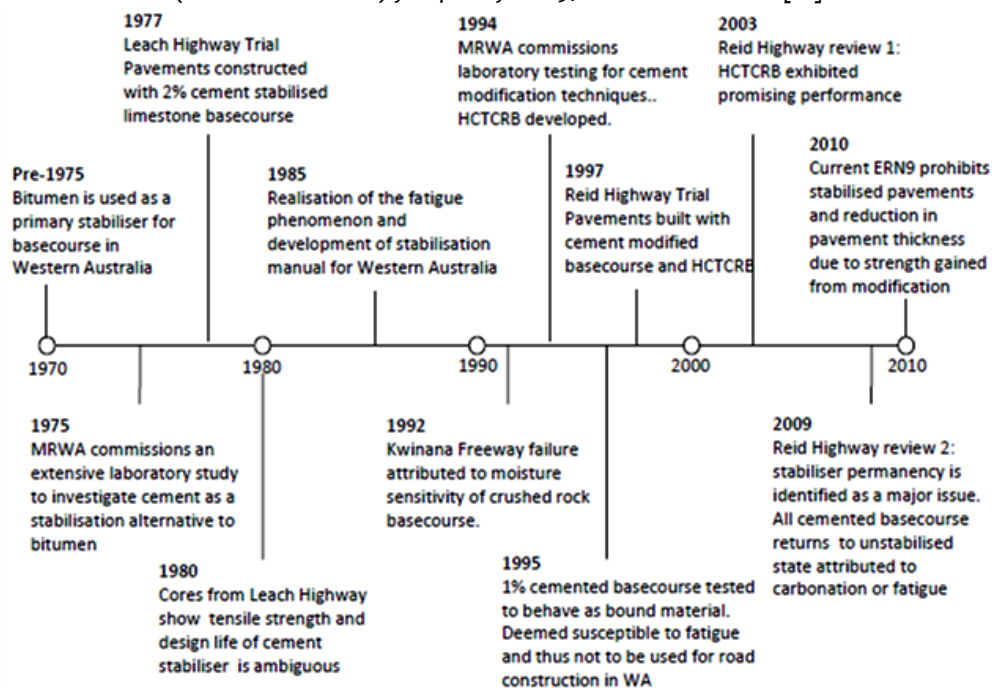
Испитивања чврстоћа при притиску су рађена на цилиндричним узорцима димензија $\varnothing 100 \pm 1 \text{ mm}$ и $h = 200 \pm 1 \text{ mm}$, након 7 дана његе, при температури 20 и 40°C (графикон 9.67.). За обје врсте агрегата чврстоће су имале максималне вриједности за 15% додатка летећег пепела и при температури од 40°C.



Графикон 9.67. – Вриједности чврстоћа при притиску у зависности од додатка летећег пепела и температуре њега узорака за: а) дробљену опеку (CB) и б) рециклирани асфалт (RAP)

У својој докторској дисертацији Y.S.Yeo [81] анализирао је могућности стабилизације доњих носећих слојева коловозних конструкција од дробљеног камена (*Crushed Rock*) са хидрауличним везивом - цементом. Дато експериментално истраживање је спроведено у Аустралији. Аутор је дао прегледан хронолошки приказ развоја технологије израде цементних стабилизација у Западној Аустралији, током претходних 50-ак година (шема 9.1.).

Шема 9.1. – Хронолошки развој примјене цементних стабилизација у Западној Аустралији (*Western Australia*) у периоду од 1970. до 2010.године [81]



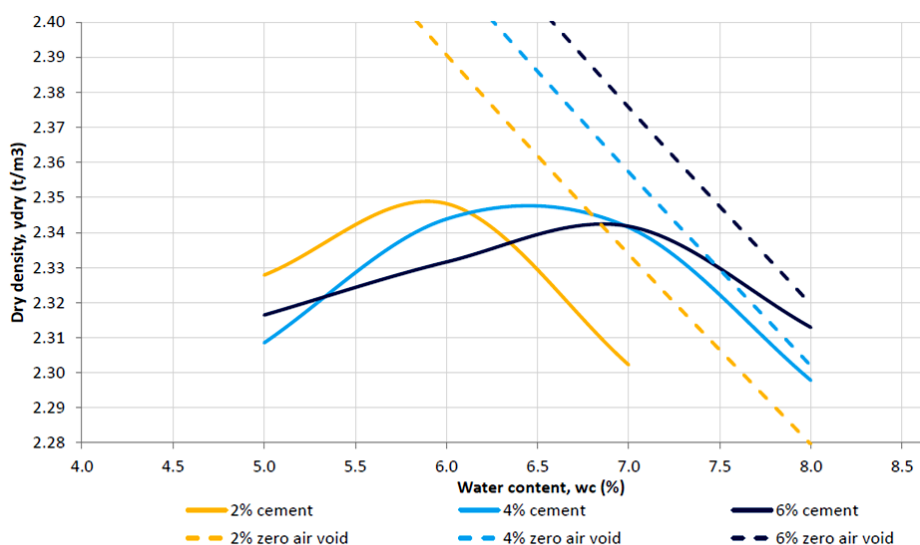
Поријекло дробљеног каменог агрегата, који је коришћен у експерименту, је било из каменолома *Holcim Quarries, Gosnells* (Западна Аустралија), а поријекло цемента је било из једне аустралијске цементаре *Sockburn Cement*. Количина додатка цементног везива у мјешавинама је износила: 1, 2, 3, 4, 5 и 6%*mas*. Оптимална влажност (ОМС) и максимална сува запреминска маса (ММДД)³⁴ су одређене на основу модификованог Proctor-овог опита, а њихове вриједности су дате у табели 9.30. и на графику 9.68.. Водоцементни фактор (*w/c ratio*) одређен је на основу

³⁴ ММДД – Maximum Modified Dried Density

оптималне влажности и количине додатка цемента и кретао се од 1,17 (за 6%*mas* додатка цемента) до 5,75 (за 1%*mas* додатка цемента) – табела 9.30.. Ово је један од ријетких доступних радова гдје је детаљније анализиран водоцементни фактор.

Табела 9.30. – Вриједности максималне суве запреминске масе, оптималне влажности и водоцементног фактора, за различита учешћа цемента у мјешавинама

Cement Content	1%	2%	3%	4%	5%	6%
MMDD (g/cm ³)	2.348	2.347	2.346	2.345	2.344	2.343
OMC (%)	5.75	6.00	6.25	6.50	6.75	7.00
w/c ratio	5.75	3.00	2.08	1.63	1.35	1.17



Графикон 9.68. – Зависност максималне суве запреминске масе (t/m³) од количине додатка воде (%), за различита учешћа (3) цементног везива у мјешавинама

Чврстоће при притиску (UCS) и модификовани Proctor-ов опит су одређени на цилиндричним узорцима $\varnothing 105\text{mm}$ и $h=115\text{mm}$. Индиректне затезне чврстоће (ITS) су испитане на узорцима $\varnothing 105\text{mm}$ и $h=75\text{mm}$. Номинално зрно агрегата је износило 19mm, а процентуални пролази на појединачним ситима (као и граничне вриједности по аустралијским стандардима за главне путеве (Main Roads Western Australia 2011)) дати су у табели 9.31..

Табела 9.31. – Процентуални пролази агрегата на појединим ситима и њихове граничне вриједности

Sieve Size	Target	Min	Max
26.5			100
19.0	100	95	100
13.2	82	70	90
9.5	70	60	80
4.75	50	40	60
2.36	38	30	45
1.18	25	20	35
0.600	19	13	27
0.425	17	11	23
0.300	13	8	20
0.150	10	5	14
0.075	8	5	11

Испитивање механичких карактеристика је рађено на узорцима при 100% збијености. Вриједности UCS-а су испитивана након 28 дана, а ITS-а након 7 дана њега стабилизацијских узорака. Списак аустралијских стандарда који су коришћени у датом експерименталном истраживању дат је у табели 9.32..

Табела 9.32. – Аустралијски стандарди који су коришћени у истраживању

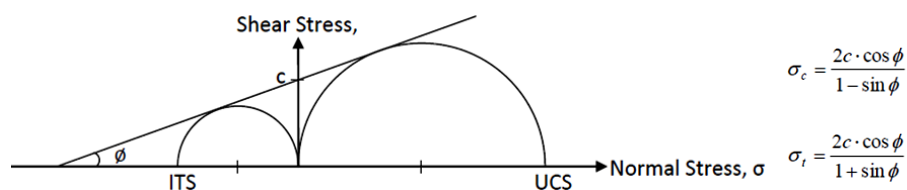
Назив стандарда	Врста испитивања
AS 3972-2010 [C63]	Карактеристике цемента
AS 1028.5.2.1-2003 [C66]	Модификовани Proctor-ов опит
AS5101.4.-2008 [C67]	Чврстоћа при притиску – UCS
AS1012.10 -2000[C68]	Индиректна затезна чврстоћа – ITS

Захтјеване вриједности за UCS након 28 дана њега су биле у зависности од саобраћаног опретећења и по аустралијским прописима (Austroads 2006) имале су сљедеће вриједности:

- 0,7-1,5MPa (за лако саобраћајно оптерећење),
- 1,5-3,0MPa (за средње саобраћајно оптерећење) и
- >3MPa (за тешко саобраћајно оптерећење).

Количина додатка воде у мјешавинама била је у зависности од количине цемента, а оптимална влажност се повећавала за 0,25%, са повећањем количине цемента за 1%. Раније је напоменуто да не постоји униформан критеријум за мјеру квалитета цемента стабилација, а аутор овог истраживања је навео да је у самој Аустралији постојало чак 5 различитих захтјева квалитета за дати слој коловозне конструкције. У датом истраживању акценат је стављен и на анализу утицаја подземних вода на цементне стабилације (слика 8.15.), па се и на тај аспект треба обратити пажња приликом пројектовања и извођења оваквих слојева коловозних конструкција.

Кохезија и угао унутрашњег трења су одређени на основу вриједности чврстоћа при притиску, индиректних затезних чврстоћа и Mohr-ових кругова напона (по принципу датом на графикону 9.69.), а резултати те анализе и остали параметри смицања, за мјешавине са различитим учешћима цемента, дати су у табели 9.33..

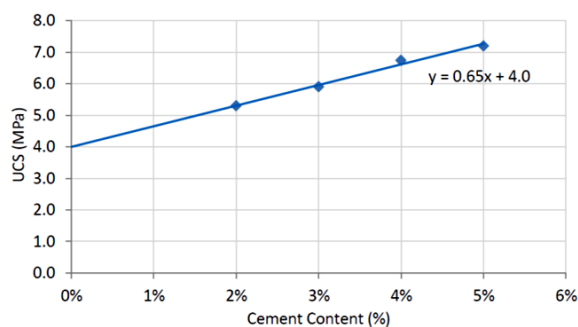
Графикон 9.69. – Зависност угла унутрашњег трења (ϕ) и кохезије (c) од вриједности чврстоће при притиску (UCS) и индиректне затезне чврстоће (ITS)

Табела 9.33. – Параметри смицања цементне стабилације, за различита учешћа цемента

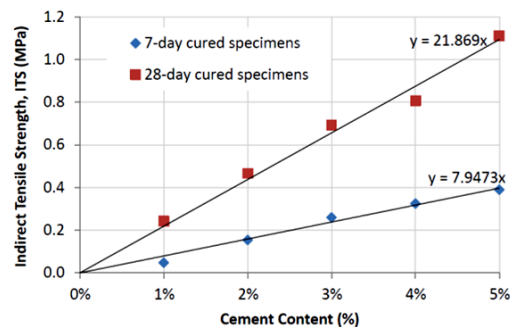
Cement Content	1%	2%	3%	4%	5%
ϕ (°)	58.9*	56.1	53.2	51.9	47.3
c (MPa)	0.62*	0.82	1.03	1.16	1.43
$\sigma_c \tan \phi$	7.7	7.9	7.9	8.6	7.8
τ	8.3	8.7	8.9	9.8	9.2
%c	7%	9%	12%	12%	15%

*result extrapolated from data set – sample not available

Зависности чврстоћа (UCS и ITS) од количина додатка везива су биле линеарне и дате су на графикаонима 9.70. и 9.71..

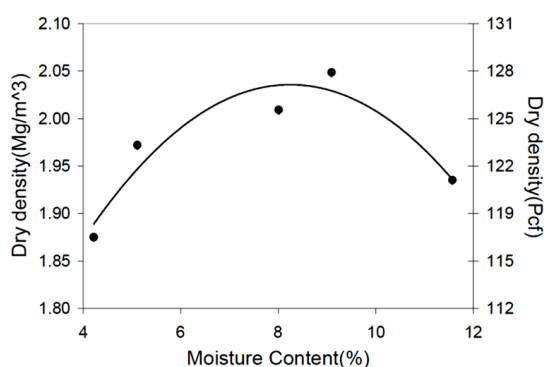


Графикон 9.70. – Утицај количине додатка цемента на вриједности чврстоћа при притиску (UCS)



Графикон 9.71. – Вриједности индиректних затезних чврстоћа (ITS) за различите количине додатка цемента и периоде његе узорака

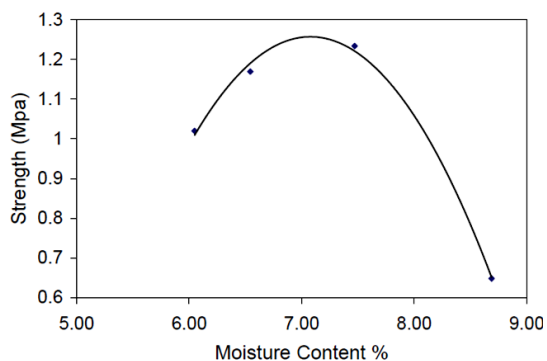
Анализом стабилизација рециклираних носећих слојева асфалтних коловозних конструкција - (RAB)³⁵ са летећим пепелом (FA) бавили су се и аутори A.Mista, S.Upadhyaya, F.Gustin, A.Roohanirad, J.Stokes [82] на универзитету University of Missouri, Kansas City (америчка савезна држава Мисури). У оквиру реконструкције једне саобраћајнице RAB је добијен поступком рециклаже на лицу мјеста (Cold in-place) и имао је мало учешће рециклираног асфалта у укупној запремини. Рециклажа је рађена на пуној дебљини коловозне конструкције (Full depth). Количина летећег пепела у мјешавинама је износила 15%*mas*, а оптималан однос летећег пепела и количине додатка воде (FA/w) је износио од 0,30 до 0,35. Оптимална влажност (Moisture Content) и максимална сува запреминска маса (Dry density) су одређени на основу стандардног Proctor-овог опита (по ASTM D698-12 [C47]), чији резултати су дати на графикону 9.72.. Сува запреминска маса имала је највећу вриједност за 9% влажности и износила је 2,05Mg/m³ ($\approx 128Pcf$) – графикон 9.72..



Графикон 9.72. – Резултати стандардног Proctor-овог опита

У мјешавинама су коришћене четири фракције агрегата: 0/4; 4/8; 8/16 и 16/31,5mm, а гранулометријско испитивање је рађено по америчком стандарду ASTM C136/C136M-14 [C69]. Испитивања чврстоћа при притиску су рађена након 7 дана његе узорака (графикон 9.73.), на цилиндричним узорцима димензија $\varnothing 2,8in$ и $h=5,6in$. Максимална вриједност чврстоће при притиску је износила око 1,24MPa (18psi), уз додаток 7,25% воде. Аутори наводе да стабилизације са летећим пепелом не треба да се изводе на температурама нижим од 40F ($\approx 4,4^{\circ}C$) и при атмосферским падавинама.

³⁵ RAB - Reclaimed Asphalt Base



Графикон 9.73. – Вриједности чврстоћа при притиску у зависности од садржаја воде у мјешавинама

Аутори *H.Taherkhani, F.Farkhi* [83] су своје истраживање на тему стабилизација рециклираног асфалта (RAC)³⁶ и рециклираног бетона (RCC)³⁷ спровели у Ирану (на грађевинском факултету у граду *Zanjan*). Као стабилизатор у мјешавинама је коришћен цемент (*Type II*) из иранске цементаре *Hamadan*. Поред цемента, због повећања еластичности у мјешавинама су коришћена и челична влакна - *steel fibers* (из иранске фабрике *Zanjan Wire Industry*). Укупно је справљено пет мјешавина, са различитим учешћима RAC-а (A) и RCC-а (C), а те мјешавине су, у зависности од количине појединих агрегата, имале сљедеће ознаке: C100, C80-A20, C50-A50, C20-A80 и A100. Учешће цемента је варирало у количинама од: 3, 5, 7, 9 и 11%*mas*. Додатак челичних влакана је износио: 0,5, 1,0 и 1,5%*mas*. Гранулометријски састав појединачних рециклираних материјала који су коришћени у истраживању и граничне вриједности пролаза за поједина сита су дати у *табели 9.34.*

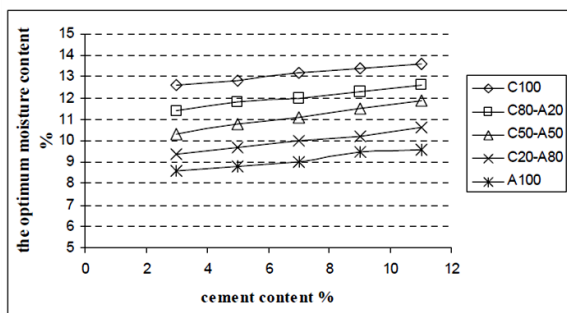
Табела 9.34. – Процентуални пролази рециклираних агрегата мјешавине кроз номинална сита и граничне вриједности

Sieve size (mm)	Percentage passing %				
	Lower limit of Specification	Upper limit of specification	Gradation of the mixtures	Gradation of the recycled cement concrete	Gradation of the recycled asphalt concrete
37.5	100	100	100	100	100
19	70	100	90	70	93
4.75	45	70	50	62	73
0.475	10	40	20	35	30
0.075	0	20	5	7	12

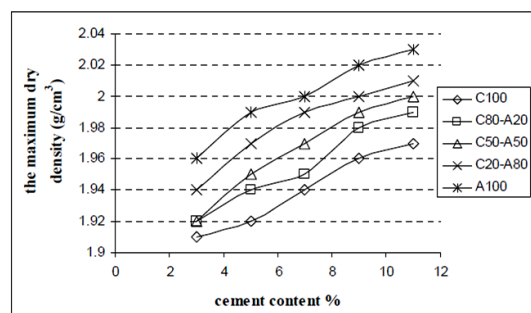
Вриједности оптималних влажности и максималних сувих запреминских маса приказане су на *графиконима 9.74. и 9.75.* У истраживању је анализирано и упијање воде агрегата, за различите рециклиране материјале. Упијање воде за рециклирани асфалт је било 1,28%, што је за више од 5 пута мања вриједност у односу на упијање рециклираног бетона (6,86%). Са повећањем количине цемента могло се запазити и повећавање оптималних влажности и максималних сувих запреминских маса. Узорци са већим процентима рециклираног бетона имали су веће вриједности оптималних влажности, док су се максималне суве запреминске масе повећавале са већим учешћем рециклираног асфалта у мјешавинама (A).

³⁶ RAC – Recycled Asphalt Concrete

³⁷ RCC – Recycled Cement Concrete

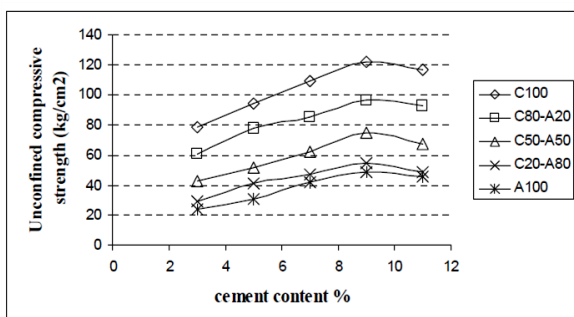


Графикон 9.74. – Оптималне влажности у зависности од додатка цемента и састава мјешавине

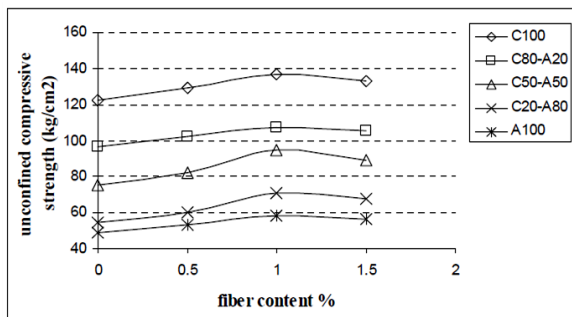


Графикон 9.75. – Максималне суве запреминске масе у зависности од додатка цемента и састава мјешавине

Чврстоће при притиску (UCS) су одређене на цилиндричним узорцима димензија $\varnothing 10,0\text{cm}$ и $h=11,7\text{cm}$ (графикон 9.76. и 9.77.), док су чврстоће на савијање одређене на призматичним узорцима димензија $50 \times 10 \times 10\text{cm}$.

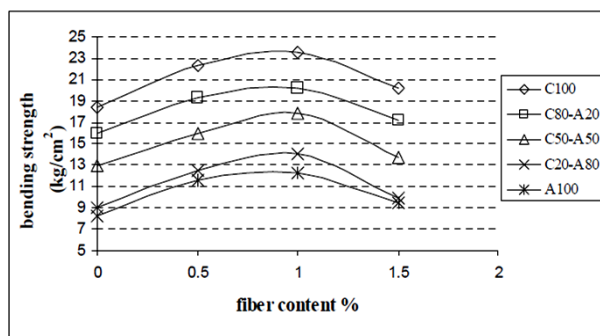


Графикон 9.76. – Зависност чврстоће при притиску од врсте агрегата и учешћа цемента



Графикон 9.77. – Зависност чврстоће при притиску од врсте агрегата и учешћа челичних влакана

Лабораторијска испитивања су рађена на узорцима старости 28 дана. Анализом датих резултата може се закључити да се чврстоће при притиску повећавају са повећањем додатка цемента, до количине од 9%*mas* (графикон 9.76.). Један од коначних закључака овог истраживања је да је овакав тип израде стабилизација много економичнији од традиционалних типова стабилизација са природним материјалима. Највећа вриједност UCS-а је била за мјешавину са 100% RCC-а (и 9%*mas* додатка цемента), а најмања за мјешавину са 100% RAC-а (и 3%*mas* додатка цемента). Највеће вриједности чврстоћа при притиску су забиљежене за 1% додатка челичних влакана и 100% учешћа RCC-а (графикон 9.77.). Максимална чврстоћа на савијање остварена је за мјешавину са додатком 1% челичних влакана и 100% учешћа RCC-а (графикон 9.78.).



Графикон 9.78. – Вриједности савојних чврстоћа у зависности од врсте агрегата и количине додатка челичних влакана

Аутор *A.Habal* је на институту *Indian Institute of Technology Bombay* (Индија) анализирао физичке и механичке карактеристике цементом стабилованих носећих слојева коловозних конструкција са RAP-ом и природним агрегатом [84]. Гранулација природног агрегата је била 0-12,5mm, а RAP-а 0-19mm (табела 9.35.). Поред наведених компонентних материјала, ради повећања обрадивости мјешавине накнадно је додата и ситна фракција агрегата (гранулација 0-4,7mm).

Табела 9.35. – Пролази агрегата кроз номинална сита и граничне вриједности за иста

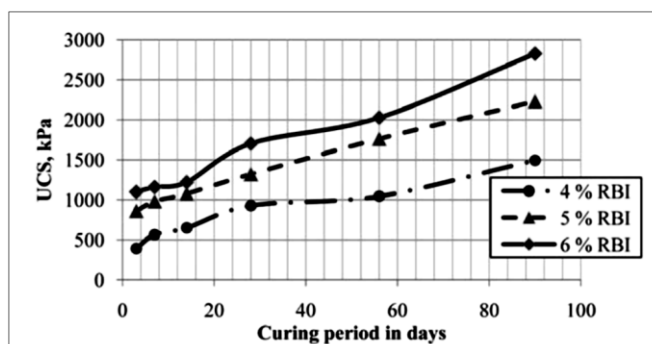
Sieve Size, mm	Gradation				MoRT&H Limits (Stabilized Base, Table 400-4)	
	% Passing				Lower Limit (LL)	Upper Limit (UL)
	RAP	12.5 mm down	Dust	Desired Grading (DG)		
37.5	100	100	100	100	95	100
19.0	98.00	100	100	99	45	100
9.50	66.98	66.7	100	77	35	100
4.75	33.06	1.10	99.6	45	25	100
0.60	6.50	0.25	47	17	8	65
0.30	3.86	0.20	34	12	5	40
0.075	0.81	0.20	11	4	0	10

Учешће RAP-а у мјешавинама је износило 45%, природног агрегата 0/12,5mm 25%, а 0/4,7mm 30%. Цемент је у мјешавинама био заступљен у количинама: 0, 4, 5 и 6%*mas*. Вриједности оптималних влажности (ОМС) и максималних сувих запреминских маса (MDD) одређене су на основу модификованог Proctor-овог опита, по IS 2720-8(1983) [C70] (табела 9.36.).

Табела 9.36. – Вриједности ОМС-а и MDD-а³⁸ за различита учешћа цемента

Stabilizer Dosage in %	OMC in %	MDD in g/cc
0	8.60	2.177
4	8.40	2.150
5	8.60	2.170
6	9.20	2.163

У раду је дата и зависност вриједности чврстоћа при притиску од периода његе узорака и количине додатка везива у мјешавинама (графикон 9.79.) Дата испитивања су рађена на цилиндричним узорцима димензија Ø100mm и h=200mm, након: 3, 7, 14, 28, 56 и 90 дана његе.



Графикон 9.79. – Утицај периода његе и количине додатка цемента на вриједности UCS-а

³⁸ 1g/cc=1g/cm³

Зависност чврстоће при притиску од периода његе и количине додатка цемента дефинисана је формулом 9.5.:

$$UCS = -1347,73 + 429,9 \cdot (\beta_1) + 14,93 \cdot (\beta_2) \dots \dots \dots (9.5.)$$

гдје су:

UCS – чврстоћа при притиску [kPa],

β_1 – количина додатка цемента [%],

β_2 – период његе узорка [дани].

Динамички (Young-ов) модул еластичности је зависан од: брзине проласка ултразвука, Poisson-овог коефицијента и запреминске масе узорка (формула 9.6.). Усвојена вриједност Poisson-овог коефицијента у овом истраживању је износила 0,25.

$$E = \frac{\rho \cdot (1+\mu) \cdot (1-2 \cdot \mu)}{1-\mu} \cdot V^2 \dots \dots \dots (9.6.)$$

гдје су:

E – динамички (Young-ов) модул еластичности [MPa],

μ – Poisson-овог коефицијент,

ρ – запреминска маса узорка [kg/m³],

V – брзина проласка ултразвука [km/s].

Са повећањем количине цемента у мјешавинама брзина проласка ултразвука и динамички модули еластичности су се повећавали (табела 9.37.).

Табела 9.37. – Брзине проласка ултразвука и модули еластичности у зависности од количине додатка цемента

Stabilizer Dosage in %	Pulse Velocity (m/s)	Dynamic Young's Modulus, E in MPa
4	1069	2047
5	1740	5477
6	2248	9106

Група аутора (F.Agrela, A.Ramirez, A.Barbudo, A.P.Galvín, J.R.Jimenez) је испитивала цементне стабилизације са рециклираним агрегатом (MRA)³⁹ који је био поријеклом из Шпаније (Málaga) [85]. Рециклирани материјал се састојао од рециклираног бетона (Crushed concrete) и рециклиране зидарске опеке (Crushed masonry). Од наведених материјала, приказаних на слици 9.10., поступком дробљења су направљене двије групе агрегата (MRA1 и MRA2).



Слика 9.10. – Отпадни бетон и зидарска опека, коришћени као дробљени рециклирани агрегат (MRA1 и MRA2) у стабилизацијама

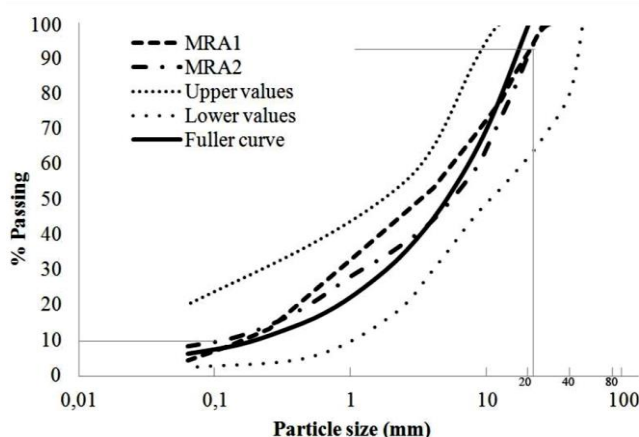
³⁹ MVA - Mixed Recycled Aggregates

Мјешавина са ознаком *MRA1* се састојала од 50% дробљеног бетона и 50% дробљене опеке, а мјешавина *MRA2* од 34% дробљеног бетона и 66% дробљене опеке. Учешће појединих (компонентних) материјала у дробљеном бетону и дробљеној опеци дато је у табели 9.38.

Табела 9.38. – Учешће појединих компонентних материјала у рециклираним материјалима

Constituents of CDW	Crushed Concrete (% by weight)	Crushed Masonry (% by weight)
Concrete (Natural aggregate mixed with mortar)	98.25	34.28
Masonry (ceramic mixed with mortar)	1.13	63.42
Gypsum	0.31	0.76
Others	0.49	1.54

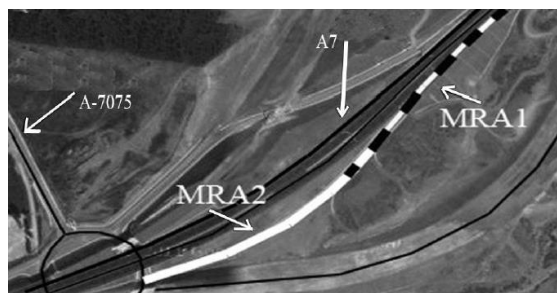
Цемент коришћен у експерименту имао је ознаку *CEM II/B V/32,5* (са садржајем летећег пепела (V) у количини од 20%) и у мјешавинама се користио у количини од 3% мас. Агрегат је испитан на основу стандарда *EN 933-1:2012* [C71]). Гранулометријске криве, граничне криве и Fuller-ова крива дате су на графикону 9.80.



Графикон 9.80. – Гранулометријски састав агрегата (*MRA1* и *MRA2*), Fuller-ова крива и граничне криве

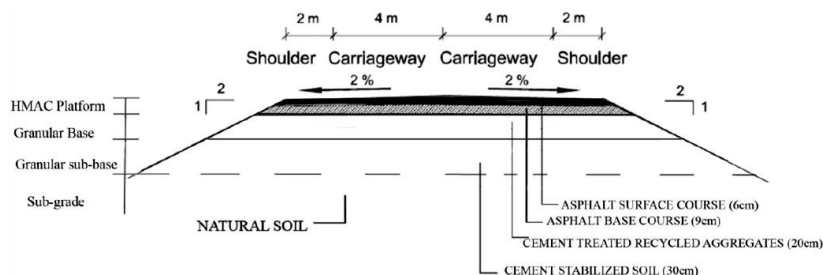
Максимална сува запреминска маса и оптимална влажност су одређене на основу модификованог Proctor-овог опита (по *UNE 103501:1994* [C72]), на цилиндрима димензија $\varnothing 152\text{mm}$ и $h=178\text{mm}$. Максимална сува запреминска маса за *MRA1* је износила $1,99\text{g/cm}^3$, а за *MRA2* $1,96\text{g/cm}^3$, док су вриједности оптималних влажности износиле 11,53% (за *MRA1*) и 12,45% (за *MRA2*).

У раду је анализирана стабилизација коловозне конструкције на двије дионице пута који спаја пут *A-7075* и медитерански ауто-пут *A7* (поред шпанског града *Málaga*). На једној дионици пута је рађена стабилизација *MRA1* материјала, а на другој дионици стабилизација *MRA2* материјала (слика 9.11.). Дужина обје дионице пута је износила по 300m.



Слика 9.11. – Приказ путних дионица на којима су испитане цементне стабилизације

На попречном пресеку коловозне конструкције (слика 9.12.) може се примијетити да је дата дионица био двотрачни пут, који је испод асфалтних слојева имао слој цементне стабилизације са рециклираним агрегатима, у дебљини од 20см. Испод тога слоја био је слој цементне стабилизације тла (дебљине 30см). Из претходно наведеног може се претпоставити да је природно тло испод коловозне конструкције било слабије носивости па је због тога рађено његово побољшање.



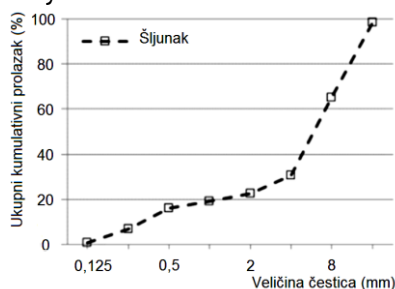
Слика 9.12. – Попречни пресјек коловозне конструкције са слојем цементне стабилизације

Вријеме обрадивости мјешавина (*workability time*) било је око 150min, за оба типа стабилизацијских мјешавина. Шпански стандарди прописују да 7-дневне чврстоће при притиску оваквих стабилизација износе између 2,5 и 4,5MPa. Чврстоћа при притиску је у лабораторијским условима одређивана на основу шпанског стандарда NLT-305/90 [С73], након 3, 7, 28, и 90 дана њега, а чврстоћа при притиску која је одређена поступком *in situ* (након 28 дана) рађена је по стандарду EN 13791:2007 [С74]. Вриједности чврстоћа при притиску и сувих запреминских маса дате су у табели 9.39..

Табела 9.39. – Чврстоће при притиску и суве запреминске масе за различите мјешавине, периоде њега и поступке испитивања цементних стабилизација

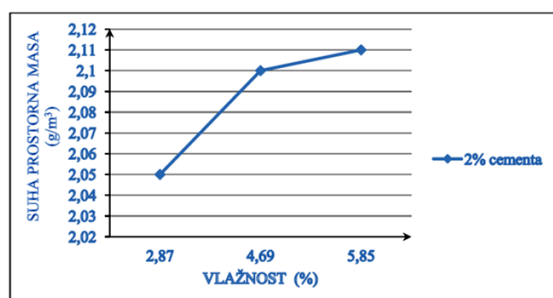
	Ages	MRA1		MRA2	
		Density (kg·10 ³ /m ³)	Compressive strength (N/mm ²)	Density (kg·10 ³ /m ³)	Compressive strength (N/mm ²)
Specimens compacted in laboratory	3 d	1.93	2.52	1.91	3.18
	7 d	1.99	3.17	1.93	3.41
	28 d	1.93	3.88	1.87	3.99
	90 d	1.98	4.28	1.90	5.05
Cores "in situ"	28 d	2.04	4.51	2.05	4.25

Испитивањем отпорности цементних стабилизација коловозних конструкција на штетно дејство мрза бавила се ауторка М.Петковић [86]. У експерименталном истраживању, које је спроведено на *Грађевинском факултету Осиек* (Хрватска), коришћени су ријечни шљунак и портланд цемент (CEM II B/M (P-S) 32,5R). Цемент је у мјешавинама коришћен у количинама 2 и 4%мас. Номинално зрно агрегата у мјешавинама износило је D=16mm (графикон 9.81.). На основу тог податка усвојен је цилиндар димензија Ø100mm и h=120mm за справљање узорака на којима су испитане чврстоће при притиску.

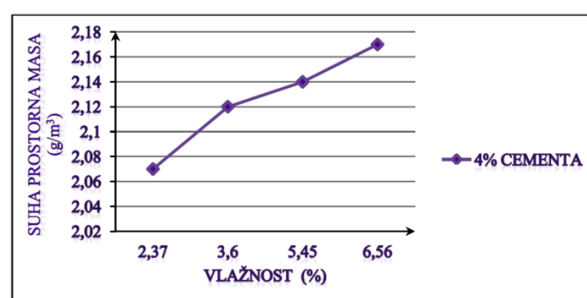


Графикон 9.81. – Гранулометријски састав стабилизацијске мјешавине

Суве запреминске масе мјешавина су, у зависности од количине додатка воде и цемента, одређене Proctor-овим опитом. Губитак влажности прије и након поступка збијања је био основни критеријум приликом одређивања оптималне влажности мјешавине по EN 13286-2:2010 (Annex D) [C55]. За мјешавине са 2%mas додатка цемента, приликом одређивања Proctor-овог опита, стабилизацијским мјешавинама додаване су 3 различите количине воде (50g воде (одговара учешћу од 2,87%mas), 100g воде (4,69%mas) и 150g воде (5,85%mas)), а за 4%mas додатка цемента додаване су 4 количине воде (50g воде (одговара учешћу од 2,37%mas), 100g воде (3,6%mas), 150g воде (5,45%mas), 200g воде (6,56%mas)). Резултати Proctor-овог опита дати су на графиконима 12.82. и 12.83.. Током опита одређене су разлике у количини воде прије и након поступка збијања.



Графикон 9.82. – Суве запреминске масе за 2%mas додатка цемента и различите влажности



Графикон 9.83. – Суве запреминске масе за 4%mas додатка цемента и различите влажности

Мјешавине су, у складу са стандардом EN 13286-2:2010 (Annex D) [C55] третиране као самодренајуће (*self-draining mixture*), а количина додатка воде за справљање узорка је усвојена на основу губитка воде прије (w_{oi}) и након поступка збијања (w_{fi}) и дефинисана је формулом 9.7.:

$$0,3\% < w_{oi} - w_{fi} \leq 0,5\% \dots \dots (9.7.)$$

Приликом справљање узорка коришћен је стандард EN 13286-50:2004 [C75], а стандард EN 13286-41:2003 [C56] је коришћен за испитивање чврстоћа при притиску узорка старости 28 дана (табела 9.40.).

Табела 9.40. – Вриједности 28-дневних чврстоћа при притиску узорка са 2 и 4%mas додатка цемента

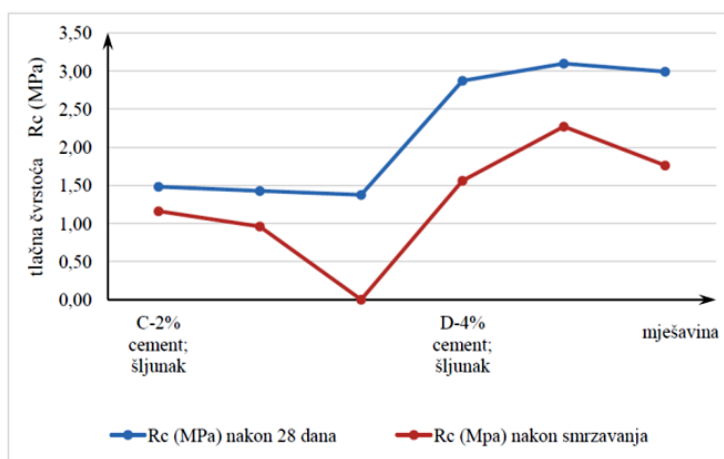
Мјешавина	Максимална сила F [N]	Површина [mm²]	Тлачна чврстоћа узорка Rc [MPa]	Тлачна чврстоћа мјешавина након 28 дана Rc [MPa]
2 % cement	8814,29	7,69769x10³	1,15	1,29
	11003,5	7,69769x10³	1,43	
	11987,7	7,69769x10³	1,56	
4 % cement	23099,8	7,69769x10³	3,00	2,99
	21419,5	7,69769x10³	2,78	
	24610,4	7,69769x10³	3,20	

Хрватски стандард HRN U.B1.050 [C76] прописује максималну дозвољену разлику у чврстоћама при притиску прије и након дејства мраза и она износи 20%. У овом истраживању наведени критеријум задовољавале су мјешавине са 2% додатка цемента, док мјешавине са 4% додатка цемента тај критеријум нису испуниле. Губитак чврстоће након дејства мраза у том случају износио је скоро 54% (табела 9.41.).

Табела 9.41. – Чврстоће при притиску прије и након дејства мраза (HRN U.B1.050)

Удио цемента	Тлачна чврстоћа након 28 дана P_1 [MPa]	Тлачна чврстоћа након смрзавања и одмрзавања P [MPa]	Отпорност на смрзавање према HRN U.B1.050 R (%)
2%	1,29	1,11	86,05
4%	2,99	1,37	45,82

Поред одређивања отпорности цементних стабилизација на штетно дејство мраза по HRN U.B1.050 [С76], у датом истраживању су приказани и резултати истраживања дате механичке карактеристике на основу европског стандарда EN 13286-54:2016 [С94]. Након одређивања чврстоћа при притиску одређен је тзв. индекс осјетљивости на смрзавање (R), при чему је он представљао однос 28-дневних чврстоћа при притиску узорак у сувом стању и чврстоћа одређених након излагања узорак дејству мраза (14 наизмјеничних циклуса смрзавања и одмрзавања). Вриједности чврстоћа при притиску испитаних узорак су дате на графикону 9.84. и у табели 9.42., на основу које се може примјетити да мјешавине са 2 и 4% додатка цемента имају R индекс мањи од 80% (што по EN 13286-54:2016 [С94] није дозвољено), па се може извести закључак да дате мјешавине нису отпорне на дејство мраза.



Графикон 9.84. – Вриједности 28-дневних чврстоћа при притиску узорак у сувом стању и након дејства мраза

Табела 9.42. – Отпорност на мраз цементних стабилизација дефинисана преко чврстоћа при притиску (по EN 13286-54:2016)

Удио цемента	M_A [MPa]	M_B [MPa]	Отпорност на смрзавање према EN 13286-54. R (%)
2%	1,06	1,43	74,13
4%	1,86	2,99	62,21

Могућности поновне употребе старог асфалта у градњи коловозних конструкција истраживао је и аутор В.Нраст [17]. Аутор је у свом истраживању рециклирани асфалтни агрегат користио у комбинацији са дробљеним каменом агрегатом (из постојеће коловозне конструкције), за стабилизацију доњих носећих слојева коловозних конструкција. Истраживање је спроведено у Словенији, и то: на Грађевинском факултету у Љубљани (*Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani*), у фирми *Primorje (Ajdoščina)*, као и у Институту за грађевинске материјале (*Inštitut za gradbene materiale - Igmat, Ljubljana*). Дато истраживање је спроведено у

циљу реконструкције постојеће коловозне конструкције, на локалном путу *Idrija - Idrijska Bela* (Словенија), која је била у изузетно лошем стању (слике 9.13. и 9.14.).



Слика 9.13. – Оштећења банкина и појаве мрежастих пукотина на путу *Idrija - Idrijska Bela*



Слика 9.14. – Мрежасте пукотине и појава ударних рупа на путу *Idrija - Idrijska Bela*

Агрегат коришћен у датом истраживању добијен је поступком хладне рециклаже наведене коловозне конструкције, поступком *in situ*. Цементно везиво је додавано у прашкастом стању (слика 9.15.) након чега се приступило његовој хомогенизацији са агрегатом.

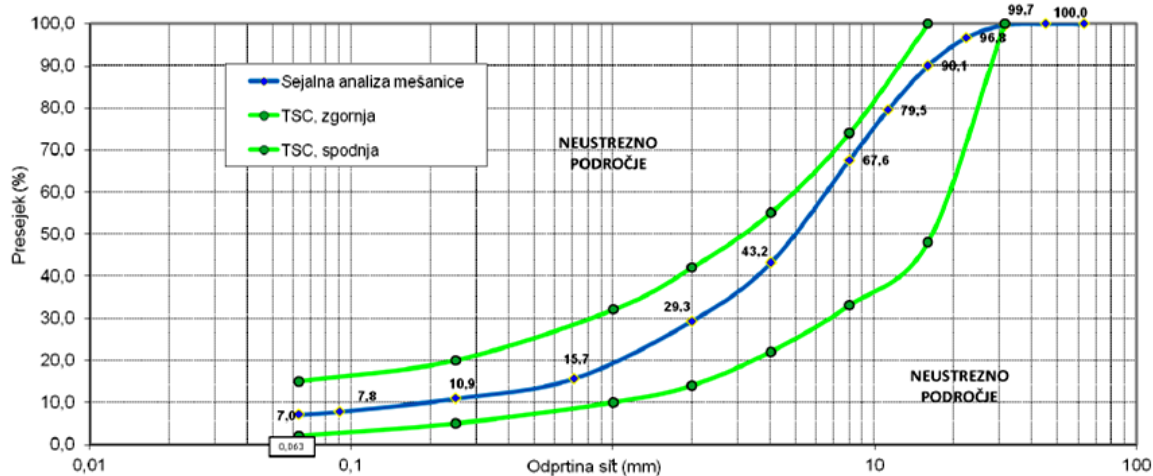


Слика 9.15. – Додатак хидрауличног везива (цемента) у прашкастом облику

Постојећа коловозна конструкција састојала се од асфалтних слојева (дебљине од 10 до 20cm), тампонског слоја од дробљеног каменог агрегата, испод кога је била постељица од пјесковите глине (са *CBR*-ом 5÷7%). Анализом рада се може закључити да је количина везива, поред процентуалних вриједности, изражена и у [kg/m^3] мјешавине, а дати су и упоредни прикази за примјену минималне количине везива у стабилизацијама за Словенију и неке европске земље (дијаграм 6.1.). Словеначки технички услови (*TSC 06.320:2004*) прописују да минимална количина везива за стабилизације треба да износи $50\text{kg}/\text{m}^3$. Поређења ради, минимална количина везива за израду стабилизација у Аустрији је $90\text{kg}/\text{m}^3$. Дато експериментално истраживање је био у складу са словеначким стандардом за израду стабилизација са хидрауличним везивом (*SIST EN 14227-1:2005 [C77]*). Цемент у мјешавинама је коришћен у различитим количинама, при чему су формиране три групе везива и то:

- *Везиво А*: 25, 50, 75, 100, $125\text{kg}/\text{m}^3$,
- *Везиво В*: 50, $117\text{kg}/\text{m}^3$ и
- *Везиво С*: $117\text{kg}/\text{m}^3$.

Гранулометријски састав мјешавине агрегата (са граничним кривим прописаним у словеначким техничким условима TSC 06.320) приказан је на графикону 9.85., чијом анализом се може закључити да је гранулација агрегата била 0/31,5mm.



Графикон 9.85. – Гранулометријска крива стабилизацијске мјешавине и граничне криве дате у техничким условима TSC 06.320

Оптимална влажност и максимална сува запреминска маса износили су редом 6,1% и 2150kg/m^3 , а одређени су на основу модификованог Proctor-овог опита (по EN 13286-2:2010 [C55]). При одређивању димензија калупа (на коме је испитиван модификовани Proctor-ов опит) испоштован је услов дат у формули 9.8.

$$d_1 \geq 4 \cdot D \dots \dots (9.8.)$$

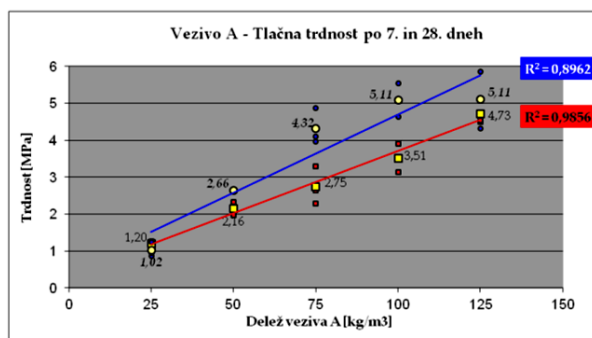
гдје су:

d_1 – пречник калупа цилиндричног облика [mm],

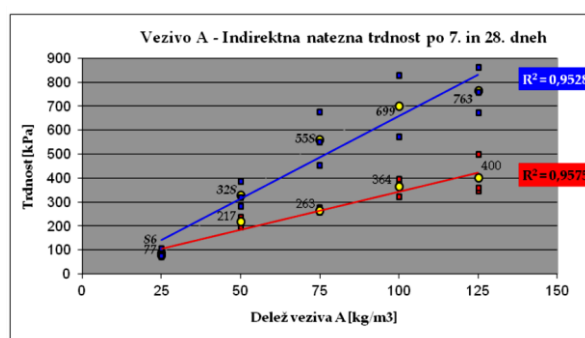
D – пречник максималног зрна агрегата у мјешавини [mm].

Испитивање механичких карактеристика је рађено на цилиндричним калупима димензија $\varnothing 150\text{mm}$ и $h=120\text{mm}$ (калуп типа B). Цилиндрични узорци су након справљања његовани на температури $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и при влажности од 100%. Од механичких карактеристика одређене су: чврстоћа при притиску, индиректна затезна чврстоћа и модул еластичности.

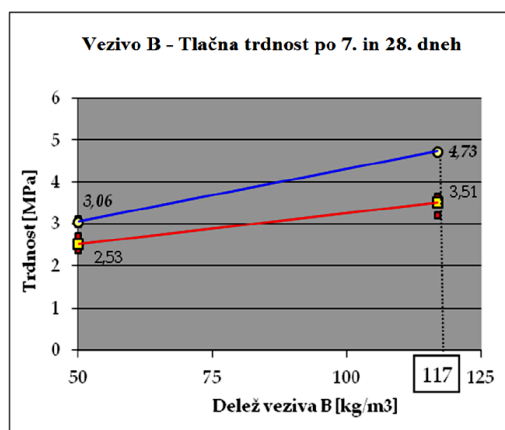
Вриједности чврстоћа при притиску и индиректних затезних чврстоћа (одређених на узорцима старости 7 и 28 дана, за Vezivo A и Vezivo B), дате у графиконима 9.86., 9.87., 9.88. и 9.89..



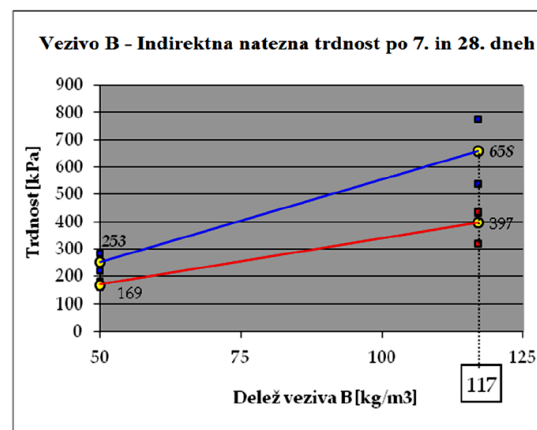
Графикон 9.86. – Чврстоћа при притиску за Vezivo A, након 7 (црвена линија) и 28 (плава линија) дана



Графикон 9.87. – Индиректна затезна чврстоћа за Vezivo A, након 7 (црвена линија) и 28 (плава линија) дана



Графикон 9.88. – Чврстоћа при притиску за Vezivo B, након 7 (црвена линија) и 28 (плава линија) дана



Графикон 9.89. – Индиректна затезна чврстоћа за Vezivo B, након 7 (црвена линија) и 28 (плава линија) дана

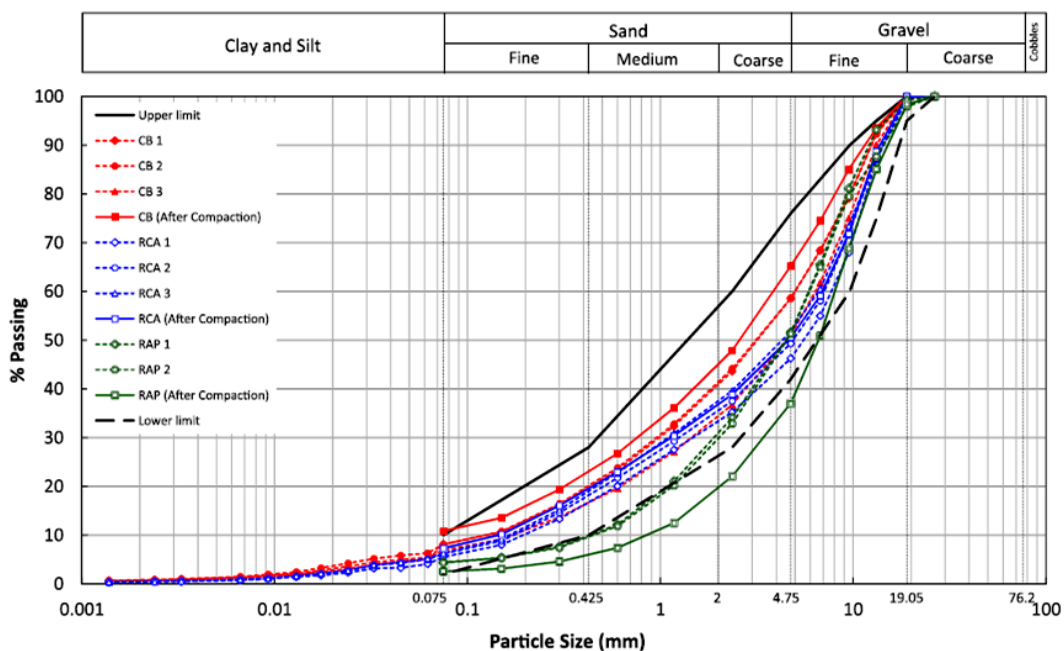
Чврстоћа при притиску за Vezivo C (са количином цемента од 117kg/m^3) износила је $4,11\text{MPa}$ (након 7 дана) и $5,33\text{MPa}$ (након 28 дана). Вриједности модула еластичности за различите мјешавине дате су у табели 9.43..

Табела 9.43. – Вриједности модула еластичности стабилизацијских мјешавина

Vezivo	Количина везива	Модул еластичности (E)
A	50kg	2420MPa
	100kg	3630MPa
B	50kg	3400MPa
	117kg	3000MPa
C	117kg	3300MPa

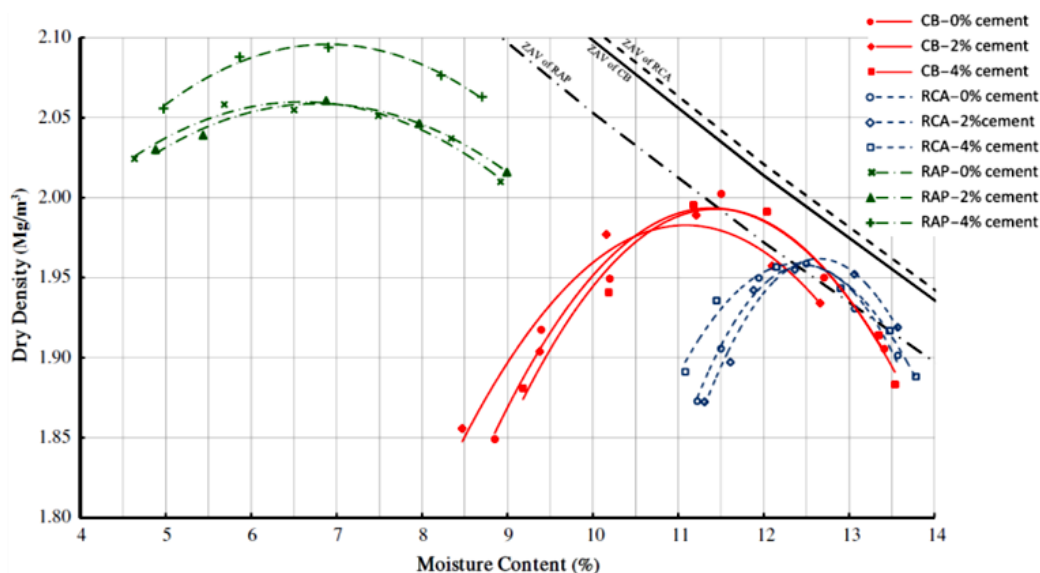
Аутори A.Mohammadinia, A.Arulrajah, J.Sanjayan, M.M.Disfani, M.W.Bo, S.Darmawan [87] су анализирали могућности примјене отпадних материјала стабилованих цементом, у новим и реконструисаним коловозним конструкцијама. Испитивања су рађена са следећим отпадним материјалима: рециклираним асфалтним агрегатом (RAP), рециклираним дробљеним бетоном (RCA)⁴⁰ и дробљеном опеком (CB). Аутори су наведене материјале сврстали у групу C&D (Construction and Demolition) отпадних материјала и приказали су податке о њиховим количинама на депонијама у Аустралији. Количине произведених отпадних материјала на годишњем нивоу су износиле: за рециклирани дробљени бетон (RCA) око 8,7 милиона тона, за дробљену опеку (CB) око 1,3 милиона тона и за рециклирани асфалт (RAP) око 1,2 милиона тона. Експериментално истраживање приказано у овом раду је спроведено у Мелбурну (Аустралија). Испитивања физичко-механичких карактеристика су рађена уз помоћ триаксијалног опита. Дато истраживање је рађено са три различита учешћа цемента (0, 2 и 4% мас). Гранулометријски састави мјешавина које су коришћене и граничне криве дате у аустралијским стандардима, приказани су на графикону 9.90.. На њему се може примијетити да је најситнији агрегат био од збијене дробљене опеке (CB - After Compaction), а најкрупнији од рециклираног асфалта (RAP).

⁴⁰ RCA - Recycled Concrete Aggregate



Графикон 9.90. – Гранулометријски састави мјешавина различитих отпадних материјала и граничне криве по аустралијским стандардима

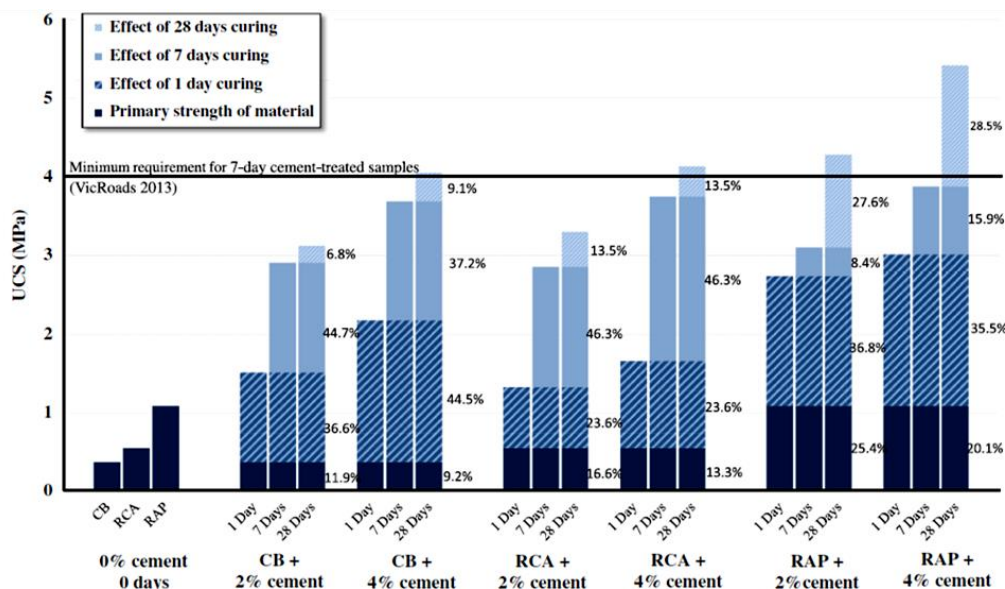
Оптимална влажност (ОМС) и максимална сува запреминска маса (МДД) мјешавина одређене су модификованим Proctor-овим опитом и стандардом AS 1028.5.2.1-2003 [С66], на сплит калупима димензија $\varnothing 100\text{mm}$ и $h=202\text{mm}$ (графикон 9.91.). Анализом графикана 9.91. може се закључити да су највеће вриједности максималних сувих запреминских маса (и најмање вриједности оптималних влажности) биле за мјешавине са рециклираним асфалтом (RAP-ом) и 4% мас додатка цемента, а највеће вриједности оптималних влажности (и најмање вриједности максималних сувих запреминских маса) за мјешавине са рециклираним дробљеним бетоном (RCA-ом).



Графикон 9.91. – Вриједности максималних сувих запреминских маса у зависности од количине додатка воде и састава стабилизацијске мјешавине

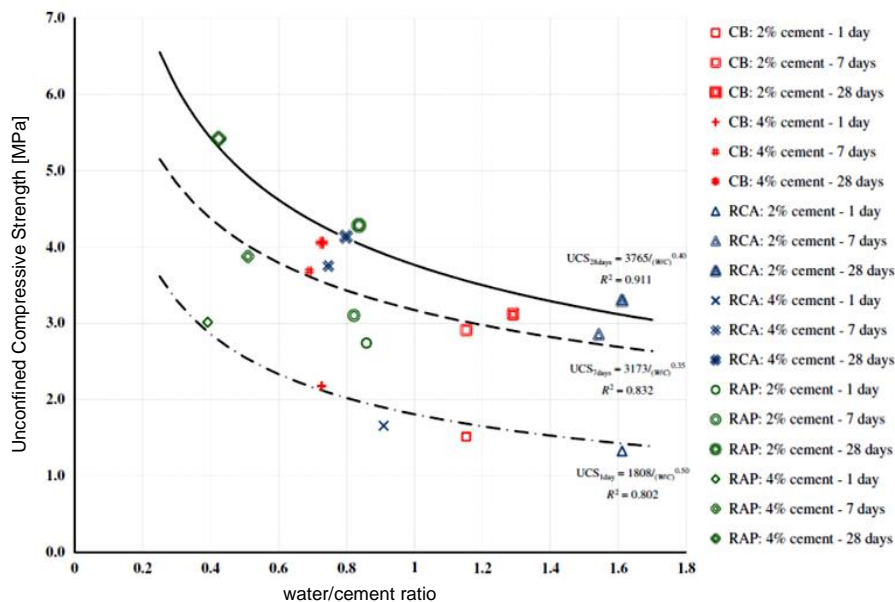
Чврстоће при притиску су одређене након: 1, 7 и 28 дана његе узорака (дијаграм 9.17.), а највеће вриједности су измјерене за мјешавине са рециклираним

асфалтом (и 4% мас додатка цемента), док су за мјешавине са рециклираним дробљеним бетоном и дробљеном опеком вриједности чврстоћа биле приближно исте. На дијаграму 9.17. се види и да је минимална захтјевана чврстоћа при притиску, након 7 дана њега, по аустралијском пропису (VicRoads 2013) износила 4MPa, што је у односу на српски стандард SRPS U.Еg.024:1980 [C2] значајно већа вриједност.



Дијаграм 9.17. – Вриједности чврстоћа при притиску (UCS) у зависности од периода њега узорка и састава мјешавина

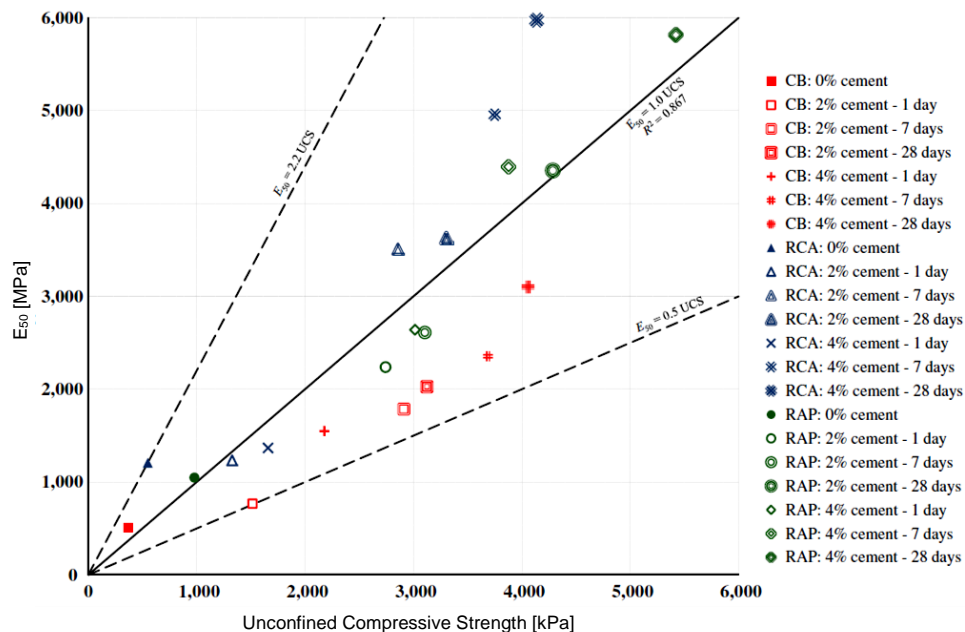
Аутори су у датом раду истраживали и утицаја водоцементног фактора (*water/cement ratio*) на вриједности чврстоћа при притиску (UCS). Са повећањем вриједности водоцементног фактора вриједности чврстоћа при притиску су опадале, за све типове мјешавина (графикон 9.92.).



Графикон 9.92. – Утицај водоцементног фактора (*water/cement ratio*), састава мјешавине и периода њега узорка на вриједности чврстоћа при притиску

Вриједности модула еластичности биле су у зависности од врсте агрегата, количине додатка цемента и периода њега узорка. Анализом графикана 9.93.

запажа се линеарна зависност између вриједности модула еластичности и чврстоћа при притиску цементних стабилизација.

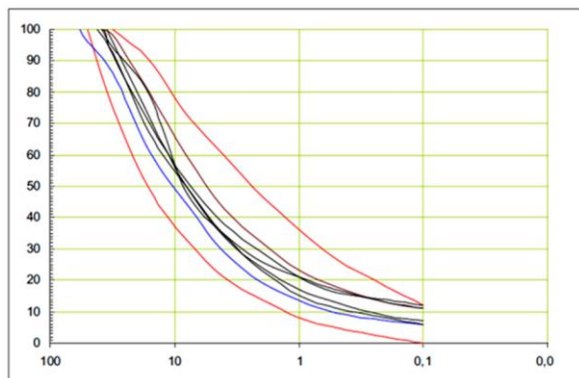


Графикон 9.93. – Зависности чврстоћа при притиску и модула еластичности

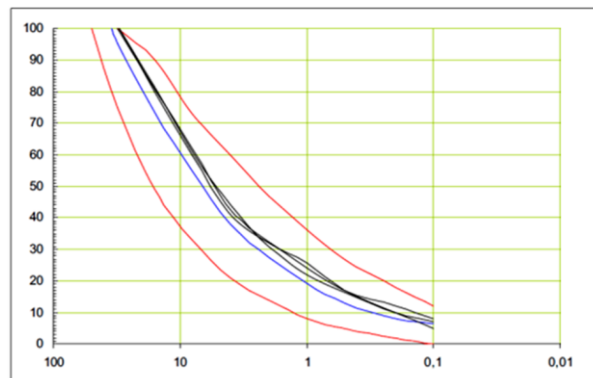
Дато истраживање спроведено је у циљу промоције одрживе градње и могућности веће примјене отпадних материјала у грађевинарству, што је сада свакако тренд у грађевинарству широм свијета. Аутори су нагласили да је примјена наведених материјала будућност у грађењу путева, између осталог и због смањене емисије угљен-диоксида током процеса градње.

Аутори *T.Šolić, S.Rajić* [88] истраживали су могућности примјене различитих поступака справљања цементних стабилизација са дробљеним каменим агрегатом. Анализом су биле обухваћене двије путне дионице у Хрватској: *Krapina-Macelj* и *Vrbovec-Gradec*. Дионица *Krapina-Macelj* (на ауто-путу *Zagreb-Krapina-Macelj*), сврстана је у групу саобраћајница са врло тешким саобраћајним оптерећењем. Цементна стабилизација на наведеној дионици ауто-пута изведена је поступком *Mix in plant*. Дионица *Vrbovec-Gradec* (на државном путу *D41*) припадала је групи саобраћајница са тешким саобраћајним оптерећењем и при изради слоја цементне стабилизације (на наведеној саобраћајници) примјењен је поступак рециклаже *Mix in place*. Дробљени камени агрегат коришћен у истраживању је био са двије локације, тј. из два каменолома у Хрватској: *Špica (Ljubešćica)* и *Straža (Đurmanec)*. За справљање стабилизацијских узорака коришћене су двије врсте цементног везива (такође произведене у Хрватској) и то: за дионицу *Vrbovec-Gradec* портланд цемент *CEM II/B-M (V-LL) 32,5R*, из фабрике *Holcim*, а за дионицу *Krapina-Macelj* портланд цемент *CEM II/A-M (S-V) 42,5N* произведен у фабрици *Našicesement Nexa*.

Гранулометријске криве агрегата коришћеног у истраживању биле су унутар граничних кривих прописаних у правилнику *Opći tehnički uvjeti za radove na cestama u Republici Hrvatskoj* (графикони 9.94. и 9.95.). Избор гранулације агрегата за израду стабилизација зависио је од врсте саобраћајног оптерећења и на дионици *Krapina-Macelj* имао је гранулацију $0/63\text{mm}$, а на дионици *Vrbovec-Gradec* $0/31,5\text{mm}$.



Графикон 9.94. – Граничне и гранулометријске криве агрегата коришћеног за стабилизацију дионице Крапина-Маселј



Графикон 9.95. – Граничне и гранулометријске криве агрегата коришћеног за стабилизацију дионице Врбовец-Градец

Модификовани Proctor-ов опит за наведене дробљене камене агрегате рађен је са 2% маса додака цемента. Вриједност оптималне влажности за мјешавине са агрегатом из каменолома *Špica* износила је 5,3%, а максимална сува запреминска маса 2312kg/m^3 , док је оптимална влажност за мјешавине са агрегатом из каменолома *Straža* износила је 3,0%, а максимална сува запреминска маса 2310kg/m^3 . Чврстоће при притиску стабилизација и њихове међусобне зависности су одређене на узорцима старости 7 и 28 дана. Вриједности чврстоћа при притиску, као и отпорност цементних стабилизација на штетно дејство мраза (за обје путне дионице) дате су у табели 9.44..

Табела 9.44. – Чврстоће при притиску и отпорности коловозне конструкције на штетно дејство мраза

GRADILIŠTE - (Projekтирано прометно оптерећење)	OTU 2001. g., тоčka 5-021.4			RECEPTURE					
	Тлачна чврстоћа (MN/m^2) (HRN.UB1.030)		Отпорност на мраз (%) (HRN.UB 1.050)	Дробљени камени материјал	Cement	Voda	Тлачна чврстоћа (MN/m^2) (HRN.UB1.030)		Отпорност на мраз (%) (HRN.UB 1.050)
	7 dana	28 dana					7 dana	28 dana	
Autocestа Zagreb - Krapina – Macelj, dionica: Krapina – Macelj, (autoceste i ceste vrlo teškoga prometnog opterećenja)	2,0 - 5,5	3,0 - 6,0	80	"Straža - Đurmanec" (slika 1.) 100 %	CEM II/A-M (S-V) 42,5N	5,3 %	4,4	4,8	97,9
Državna cesta D41, dionica: Vrbovec - Gradec, (teško i srednje teško prometno opterećenje)	1,5 - 5,5	2,5 - 6,0	80	"Špica - Ljubešćica" (slika 2.) 100 %	CEM II/B-M (V-LL) 32,5R 1,8 %	4,1 %	3,2	5,3	83

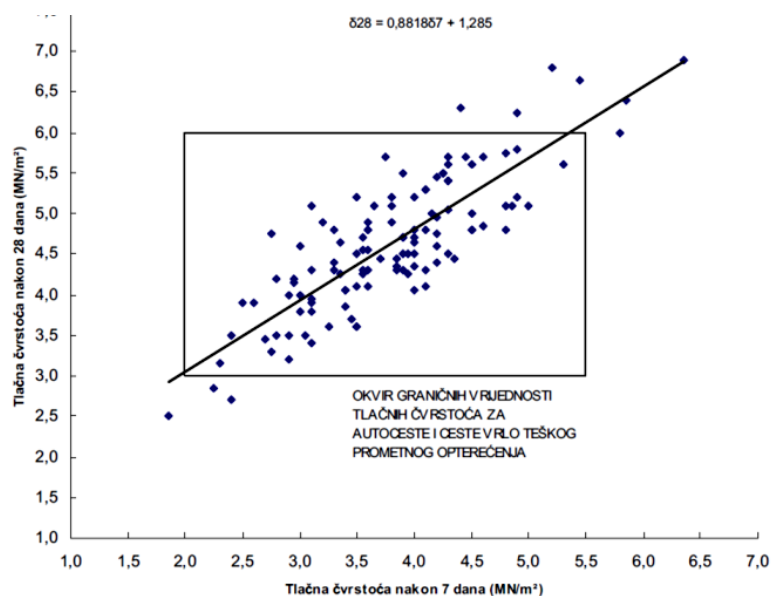
Отпорност на дејство мраза цементних стабилизација одређена је према стандарду HRN.UB1.050 [С76]. На дионици ауто-пута *Krapina-Macelj* чврстоћа при притиску након дејства 14 циклуса мраза износила је 97,9% од вриједности чврстоће одређене на нетретираним узорцима. На дионици *Vrbovec-Gradec* тај однос је износио 83,0%, па се на основу критеријума за отпорност на дејство мраза цементних стабилизација (који дефинише да разлике у чврстоћама при притиску прије и након циклуса смрзавања требају бити мање од 20%), може закључити да се слој цементне стабилизације, за обје пуне дионице, сматра отпорним на штетно дејство мраза у слоју цементне стабилизације. Резултати контролних испитивања (чврстоће при притиску, степена збијености, равности површина и дебљина уграђених слојева) рађених за двије поменуте дионице пута, дати су у табели 9.45..

Табела 9.45. – Резултати контролних испитивања цементних стабилизација

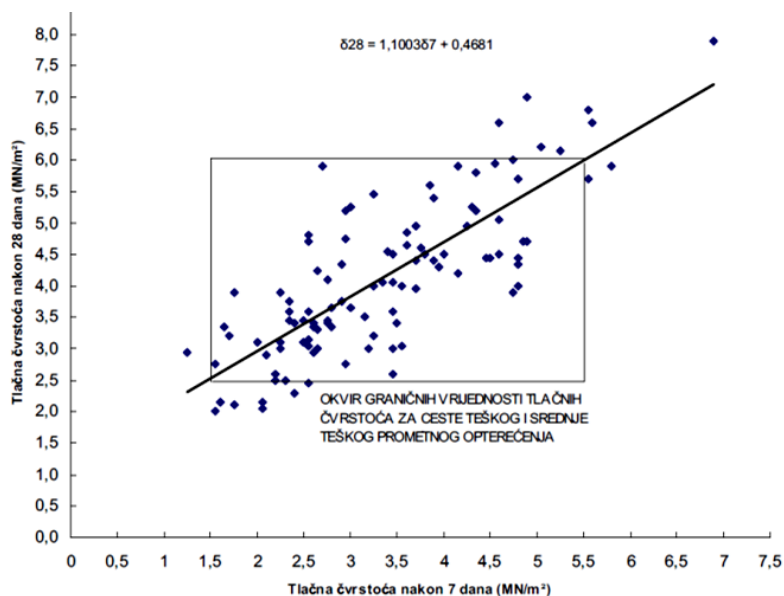
на путним дионицама Кrapина-Macelј и Vrbovec-Gradec

Vrsta ispitivanja i mjerjenja	Kriterij ispitivanja	Rezultati ispitivanja					
		"mix in plant"			"mix in place"		
		min.	maks.	sred.	min.	maks.	sred.
Tlačna čvrstoća 7 dana (MN/m ²)	2,0 - 5,5 (1,5 - 5,5)	2,8	3,5	3,1	2,8	4,2	3,9
Stupanj zbijenosti (%)	≥98	98,8	100,2	99,5	98,1	103,8	99,7
Ravnost površine (mm)	≤15 mm (odstupanje od letve 4-m)	10	10	10	10	16	12
Debljina sloja (cm)	20 cm ± 15 mm	17,7	21,0	19,4	18,8	21,2	20,3

Утицај дејства саобраћајног оптерећења на зависност између 7-дневних и 28-дневних чврстоћа при притиску приказан је на графиконима 9.96. и 9.97. Наведени однос чврстоћа се може сматрати линеарним, за обје анализирани дионице пута.



Графикон 9.96. – Зависност 7-дневних и 28-дневних чврстоћа при притиску стабилизације изведене поступком Mix in plant, за путну дионицу Krapina-Macelј



Графикон 9.97. – Зависност 7-дневних и 28-дневних чврстоћа при притиску стабилизације изведене поступком Mix in place за путну дионицу Vrbovec-Gradec

Збирном анализом контролних испитивања направљена је паралела између поступака израде цементних стабилизација у новије вријеме и најчешће извођених цементних стабилизација током 80-их година прошлог вијека, на путевима у бившој СФРЈ. Закључак је био да су се и тада јављале разлике у вриједностима чврстоћа при притиску стабилизацијских мјешавина рађених поступцима *Mix in plant* и *Mix in place*.

Аутори *M.H.Maher* и *P.N.Balaguru* [89] су у свом истраживању анализирали утицај додатака цемента (C) и летећег пепела (FA) на стабилизације ситнозрног агрегата (пијеска). Летећи пепео је садржао 3% калцијум-оксида (CaO). Експериментална анализа истраживања је спорведена за три различита масена односа цемента и летећег пепела, а они су износили:

- $m_c : m_{FA} = 1:6$,
- $m_c : m_{FA} = 1:8$ и
- $m_c : m_{FA} = 1:10$.

Чврстоће при притиску (f_c) и индиректне затезне чврстоће (ITS) су одређене на цилиндричним узорцима димензија $\varnothing 7,6\text{cm}$ и $h=15,2\text{cm}$, а испитивања су рађена након: 3, 7, 28, 56, 90 и 180 дана њега узорака. Узорци су његовани на собној температури (22°C), при влажности од 100%. Аутори су нагласили да на температурама мањим од 5°C пуцоланска активност престаје, а самим тим и развој чврстоћа, па се уградња цементних стабилизација на нижим температурама не препоручује. За одређивање чврстоћа при притиску и затезних чврстоћа испитана су по два узорка од сваке мјешавине. Са повећањем учешћа летећег пепела у мјешавинама смањивале су се вриједности чврстоћа при притиску. Вриједности чврстоћа при притиску су, код стабилизацијских мјешавина са летећим пепелом, биле директно пропорционалне времену њега узорака, а прирасти чврстоћа су се значајно смањивали послје 90 дана њега. Минималне захтјеване 28-дневне чврстоће при притиску су износиле $3,0\text{MPa}$ (500psi). Примјеђено је да чврстоће при притиску након 180 дана њега достижу вриједности и до $21,0\text{MPa}$ (3000psi). Индиректне затезне чврстоће износиле су око 7,5% од вриједности чврстоћа при притиску, што је на доњој граници очекиваних вриједности за цементне стабилизације.

Аутор *P.Braunović*, у својој књизи *Kolovozne konstrukcije od stabilizovanog lokalnog materijala* [7] детаљно је истражио могућности примјене отпадних индустријских материјала за побољшање носивих (физичких и механичких) карактеристика доњих носећих слојева коловозних конструкција. Теоретски су објашњени механизми дјеловања стабилизација са дробљеним каменом материјалима и везивима као што су: цемент, креч, битумен или катран. Ако се стабилизацијским мјешавинама додају нуспроизводи индустрије (нпр. летећи пепео из термоелектрана или гранулисана згура из високих пећи) добијају се комплексно стабилизовани материјали (КСМ). Посебну пажњу аутор је посветио анализи појединачних везивних материјала и њиховом понашању у стабилизацијама природних материјала. Експерименталним истраживањем и детаљном теоретском анализом, датим у овој књизи, обухваћена је стабилизација дробљеног каменог агрегата са кречом и гранулисаном згуром. Теоретска анализа и низ испитивања физичких и механичких карактеристика дата је за КСМ са: дробљеним кречњачким агрегатом, кречом и згуром. Дробљени камени агрегат који је коришћен у експерименталом истраживању био је из каменолома *Ковиловача* (околина Деспотовца). Поријекло гранулисане згуре је било из *Металуршког комбината*

Смедерево (МКС), а креча из каменолома Јелен До (околина Пожеге). Згура је у мјешавине додавана у количини од 20%*mas*, а креч у количини од 1,5%*mas*. Оптимална влажност и максимална збијеност мјешавина су одређене модификованим Proctor-овим опитом. За одређивање чврстоћа при притиску коришћени су цилиндрични узорци Ø15,0cm, а за одређивање индиректних затезних чврстоћа узорци димензија Ø10,0cm и $h=5cm$. Наведене механичке карактеристике одређене су на узорцима старости: 14, 28, 60 и 90 дана, а испитивање је било у складу са стандардом о цементним стабилизацијама (JUS U.Е9.024 [С1]). Након справљања, узорци су његовани у влажним коморама, а послје назначених термина њега вађени су и остављани у просторијама за просушивање од 24 до 72h, на собној температури (20°C). У истраживању су коришћене двије гранулометријске криве – крива А (гранулација зрна агрегата 0/20mm) и крива В (гранулација зрна агрегата 0/31,5mm). Вриједности оптималних влажности, максималних сувих запреминских маса и чврстоћа при притиску дате су у табели 9.46., вриједности индиректних затезних чврстоћа у табели 9.47., а вриједности модула еластичности и Poisson-ових коефицијената стабилизацијских мјешавина у табели 9.48..

Табела 9.46. – Резултати Proctor-овог опита и чврстоће при притиску КСМ-а

Репрезентативно рјешење - серије КСМ ^Р		Влажност - збијеност		Притисна чврстоћа [МПа]			
		W _{opt} [%]	Y _{max} [kg/m ³]	14 дана	28 дана	60 дана	120 дана
СС ⁴¹	A-2	8,0	2105	1,25	1,66	2,05	2,97
	B-2	7,2	2105	1,83	2,18	2,78	2,96
МС ⁴²	A'-2	6,4	2158	7,26	7,58	8,95	-
	B'-2	6,1	2162	0,95	6,95	7,39	-

Табела 9.47. – Вриједности индиректних затезних чврстоћа КСМ-а

Репрезентативно рјешење - серије КСМ ^Р		Затезна чврстоћа [МПа]			
		14-дан	28-дан	60/75-дан	120-дан
СС	A-2	-	0,02	0,08	0,13
	B-2	-	0,05	0,10	0,08
МС	A'-2	0,25	0,44	0,81	-
	B'-2	0,30	0,54	0,94	-

Табела 9.48. – Вриједности Poisson-их коефицијената и модула еластичности КСМ-а

Репрезентативно рјешење - серије КСМ ^Р		Poisson-ов коефицијент				Модул еластичности [МПа]			
		14-дан	28-дан	60/75-дан	120-дан	14-дан	28-дан	60/75-дан	120-дан
СС	A-2	-	0,06	0,05	0,15	-	12	75	991
	B-2	-	0,03	0,04	0,24	-	51	109	145
МС	A'-2	0,13	0,12	0,25	-	1420	2510	4280	-
	B'-2	0,16	0,14	0,15	-	1440	2610	4680	-

Током експерименталог истраживања коришћене су тзв. стандардна серија и модификована серија. У стандардној серији користила се згура која је одлежала (6 мјесеци) на депонији Пут и која је била изложена атмосферским утицајима. Модификована серија је обухватала примјену стандардне згуре, која је претходно била уситњена (тј. самљевена). Аутор је навео да су лабораторијска испитивања на КСМ заснована на истим или скоро истим принципима за све типове стабилизација

⁴¹ Стандардна серија⁴² Модификована серија

(без обзира на врсту хидрауличног везива), па се истраживања из ове књиге могу успјешно примијенити и за испитивање стабилизација са летећим пепелом и цементом.

Аутор К.Šarić [90] је у свом истраживању рађеном на грађевинском факултету у Марибору (*Fakulteta za gradbeništvo*) анализирао утицај додатка цемента и хемијског адитива дробљеном каменом агрегату и рециклираном асфалту, који су коришћени за израду доњих носивих слојева коловозних конструкција. Цемент који је коришћен у истраживању је био *CEM II, 32,5R*, а адитив је био *NovoCrete*. Укупна примјена везива је износила 30kg/m^3 . Ово истраживање је било конципирано на испитивању карактеристика постојећег, реконструисаног државног пута *D212, Zmajevac-Batina* (Хрватска). Реконструкција наведеног пута је, као што је наведено, рађена уз примјену рециклираног асфалтног агрегата који је стабилизован са цементом и минералним адитивом, а испитивање механичких карактеристика стабилизација је рађено на керновима ($\varnothing 100\text{mm}$), који су вађени из изведене конструкције. Керновањем су одређене дебљине стабилизованог слоја. Минимална дебљина је износила 28cm , а максимална 34cm . У пројекту су, модификованим *Proctor*-овим опитом, одређене оптималне влажности (које су износиле од 3,4 до 6,9%) и максималне суве запреминске масе (од 2122 до 2204kg/m^3). Резултат примјене хемијског адитива (*NovoCrete-a*), између осталог, је био и тај да је изведени стабилизирани слој постао баријера за пролаз воде, киселина и соли, што се свакако позитивно одразило на продужетак животног вијека комплетне коловозне конструкције. Дато истраживање је спроведено у складу са хрватским правилником *Opći tehnički uvjeti za radove na cestama u R.Hrvatskoj*, у дијелу везаном за цементне стабилизације, а структурна анализа коловозне конструкције је рађена у програму *EverStress*. Прорачуном је показано да су измјерене вриједности (*CBR-a*) биле и до 10 пута веће код стабилизација које имају хемијски додаток, у односу на класичне цементне стабилизације. У истраживању су дате и максималне вриједности пречника зрна агрегата у зависности од дебљине рециклираних слојева (табела 9.49.).

Табела 9.49. – Максималне величине зрна агрегата у зависности од дебљине стабилизацијског слоја

Максималан пречник зрна агрегата у мјешавини [mm]	Минимална дебљина рециклираног слоја [mm]
22	100
32	150
45	200

Испитивања чврстоћа при притиску и индиректних затезних чврстоћа су рађена на 4 дионице наведеног државног пута, а у табели 9.50. су приказани распони добијених резултата испитивања, у зависности од периода њега узорака.

Табела 9.50. – Вриједности механичких карактеристика цементне стабилизације у зависности од периода њега узорака

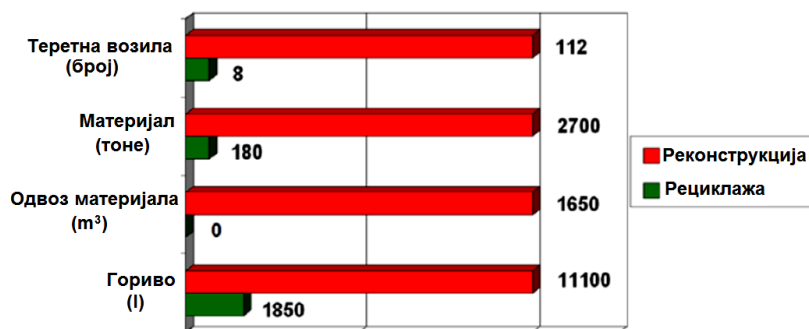
Период њега узорака	Чврстоћа при притиску [MPa]	Индиректна затезна чврстоћа [MPa]
16h	1,8-3,0	-
24h	2,4-3,6	-
7 дана	4,8-5,8	-
28 дана	5,7-7,3	0,79-0,92

Резултати комплетног испитивања на раскрсници пута D212 и улица V.Nazora и Košut Lajoša (која је представљала почетак наведеног путног правца), дати су у табели 9.51..

Табела 9.51. – Лабораторијско испитивање чврстоћа стабилизацијских узорака на кероновима из КК

Ознака узорка	Датум узорковања	Дебљина слоја [cm]	28-дневна чврстоћа при притиску [MN/m ²]	28-дневна затезна чврстоћа [MN/m ²]	Локација
2012/3530	31.10.2012.	34	6,5	0,86	Крак 1
2012/3531	31.10.2012.	31	7,8	0,97	Крак 2
2012/3532	31.10.2012.	28	6,2	0,81	Крак 2
2012/3533	31.10.2012.	30	5,8	0,76	Крак 6
Најмања вриједност		28	5,8	0,76	
Највећа вриједност		34	7,8	0,97	
Прописано (Пројекат)		30	5,5-7,0	0,75-1,2	
Средња вриједност		31	6,6	0,85	

На предметној путној саобраћајници, приликом одабира типа реконструкције, проблем је представљала удаљеност најближег каменолома (најближи каменолом Našice је био удаљен око 100km), па је и то био један од разлога зашто је одлучено да се реконструкција изводи технологијом хладне рециклажа асфалтних слојева, поступком *in situ*. Пројектом је урађена и економска (*cost-benefit*) анализа и закључено је да се примјеном наведеног типа реконструкције дате саобраћајнице остварила укупна економска уштеда у износу од 25÷40%, у односу на традиционалне типове реконструкције. Неки од економских фактора, који су посматрани у анализи цијена рециклаже и стандардних типова реконструкције коловозних конструкција, дати су на дијаграму 9.18., а подаци који су наведени у датом дијаграму су везани за дужину саобраћајнице од 1km, са двије саобраћајне траке укупне ширине 7,10m, дебљине асфалтног слоја 5cm и дебљине носећих слојева од 15cm.



Дијаграм 9.18. – Упоредни приказ карактеристичних трошкова код традиционалних поступака реконструкције и рециклаже *in situ*

Аутор наводи да након извођења стабилизације коловозних конструкција датим поступком рециклаже њега површине (одржавањем влажности) треба да траје 72h, а могућност отварања саобраћајнице за саобраћај је 16h након уградње. У току једног дана могуће је цементом стабилизovati и до 1500m² површине. Након уградње слоја цементне стабилизације, а прије изградње наредног слоја, површину стабилизованог слоја је потребно заштитити битуменском емулзијом.

Аутори T.Ćulibrk, L.Matijević, D.Pocrnja [91] анализирали су могућности стабилизације макадамског коловозног застора (невезаног површинског слоја) са цементом и хемијским адитивом. Макадамски коловозни застор од дробљеног каменог агрегата рециклиран је поступком *in situ* и на тај начин искоришћен као

агрегат у стабилизованом слоју коловозне конструкције. Цемент ознаке CEMII 32,5N је додаван мјешавини у количини од $175\text{kg}/\text{m}^3$, што одговара количини од $35\text{kg}/\text{m}^2$ (за дебљину слоја од 20cm). Пракса је да се у оваким видовима стабилизација цемент најчешће додаје у количинама $100\text{--}200\text{kg}/\text{m}^3$. Хемијски додатак (NovoCrete) додавао се у количини од 2% у односу на масу цемента и његова примјена је износила око $0,70\text{kg}/\text{m}^2$. Модификованим Proctor-овим опитом су одређене оптималне влажности за постизање збијености стабилизације у износу од 98%. Испитивање чврстоћа при притиску је рађено на узорцима старости 1, 7 и 28 дана, а испитивања ITS-а на узорцима старости 28 дана. У овом истраживању, као и у претходном [90], наведено је да њега стабилизованог слоја треба да траје минимум 72h након уградње, са просјечном употребом воде од око $10\text{l}/\text{m}^2$. Аутори рада су дали однос цијене битумена и цемента (у тренутку израде пројекта реконструкције) и он је био 4:1. Тај податак је представљао један од основних разлога примјене технологије цементне стабилизације у изради реконструкције коловозне конструкције. Технологија цементних стабилизација, уз примјену хемијских додатака, се користи већ дуги низ година у многим земљама свијета (Њемачка, Швајцарска, Пољска, Бразил, Малезија, САД), а у Хрватској је та примјена почела 2007.године примјеном управо адитива NovoCrete. Употребом наведеног адитива смањују се могућности настанка пукотина у слоју цементне стабилизације и омогућава извођење исте на температурама и до -6°C , што истовремено условљава продужетак грађевинске сезоне. На пробној дионици пута \mathcal{ZC} 5182, у националном парку Velebit (Хрватска) извршена је рециклажа макадамског застора на дебљини од 25cm , а потом и стабилизација цементом и хемијским адитивом, на дебљини од 20cm , чиме је добијена коловозна конструкција са полукрутим коловозним застором. Дата коловозна конструкција је имала боље физичке и механичке карактеристике од претходног макадамског застора. Збијање цементне стабилизације је вршено са динамичким (вибрационим) и статичким ваљцима. Оптимална количина воде у мјешавинама је износила $6\div 7\%$. Послије уградње хабајућег слоја цементне стабилизације, урађена је заштита слоја геотекстилом, а њега је одржавана поливањем површине стабилизације водом из цистерне (слика 9.16.).



Слика 9.16. – Заштита стабилизованог слоја геотекстилом и поливање водом током периода његе

Вриједност чврстоће при притиску, након 28 дана његе, је износила $6,90\text{MPa}$, а ITS-а $0,76\text{MPa}$, док су вриједности чврстоћа при притиску након 1 и 7 дана његе износиле редом $3,1$ и $5,1\text{MPa}$.

10. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ

За справљање узорак стабилизацијских мјешавина, на којима су спроведена експериментална истраживања, коришћени су сљедећи компонентни материјали:

- Природни агрегат – шљунак (G – Gravel),
- Рециклирани асфалтни агрегат (RAP – Recycled Asphalt Pavement),
- Портланд композитни цемент (C – Cement),
- Електрофилтерски летећи пепео (FA – Fly Ash) и
- Вода.

Испитивања компонентних материјала, Proctor-ов опит, справљање узорак и испитивање физичко-механичких карактеристика цементних стабилизација, које су истражене у склопу ове докторске дисертације, спроведени су у *Лабораторији за испитивање грађевинских материјала, на Департману за грађевинарство и геодезију (Факултета техничких наука, у Новом Саду)*.

10.1. Физичко-механичка испитивања компонентних материјала

10.1.1. Испитивање цемента

Током експерименталног истраживања физичких и механичких карактеристика цементних стабилизација коловозних конструкција коришћен је портланд композитни цемент (C) из београдске фабрике *Lafarge*, са ознаком PC 35M (V-L) 32,5R (CEM II/B-M (V-L) 32,5R (класификација по SRPS EN 197-1:2010 [C12])), чије су карактеристике приказане у *табели 10.1.*

Табела 10.1. – Резултати испитивања физичких и механичких карактеристика цемента

Физичка и механичка својства цемента		Стандард за испитивање	Резултати испитивања	
			Захтјевани	Остварени
Финоћа млива (остатак на сити) [%]		SRPS EN 196-6:2011 [C78]	≤ 10 [92]	2,0
Стандардна конзистенција [%]		SRPS EN 196-3:2017 [C79]	≤ 31 [92]	30,6
Запреминска маса у растреситом стању [kg/m^3]		SRPS B.C8.023:1997 [C80]	-	1105
Запреминска маса у збијеном стању [kg/m^3]		SRPS B.C8.023:1997 [C80]	-	1375
Вријеме везивања [min]	- почетак послуже	SRPS EN 196-3:2017 [C79]	≥ 60 [92]	210
	- крај послуже		≤ 600 [92]	255
Сталност запремине на <i>Le Chatelier</i> -овим прстеновима [mm]		SRPS EN 196-3:2017 [C79]	≤ 10	1,0
Чврстоћа при притиску [MPa]	- након 2 дана	SRPS EN 196-1:2008 [C81]	≥ 10	16,20
	- након 28 дана		32,5 – 52,5	42,14
Савојна чврстоћа [MPa]	- након 2 дана	SRPS EN 196-1:2008 [C81]	-	4,15
	- након 28 дана		-	8,21

10.1.2. Испитивање природног агрегата

Природни агрегат коришћен у овом истраживању је био фракционисани ријечни шљунак (С) тзв. Дунавац, узоркован на депонији фирме Карин Комерц, из Ветерника (слика 10.1.). Током поступка узимања узорака агрегата за лабораторијска испитивања примјењена су упутства о узимању репрезентативног узорка дате у стандарду SRPS B.Bo.001:1984 [C82]. Природни агрегат на депонији је био у сепарисаном облику и влажном стању, па је прије лабораторијских испитивања агрегата и стабилизацијских мјешавина спроведено сушење три потребне фракције агрегата (0/4, 4/8 и 8/16mm), до константне масе. Резултати испитивања природног агрегата дати су у табели 10.2..

Табела 10.2. – Резултати испитивања физичких карактеристика природног агрегата

Карактеристика агрегата		Стандард за испитивање	Услов квалитета	Резултат испитивања
Запреминска маса у растреситом стању [kg/m ³]	фракција 0/4mm	SRPS B.B8.030:1986 [C83]	-	1721
	фракција 4/8mm			1569
	фракција 8/16mm			1364
	мјешавина агрегата 0/16mm			1770
Запреминска маса у збијеном стању [kg/m ³]	фракција 0/4mm	SRPS B.B8.030:1986 [C83]	-	1851
	фракција 4/8mm			1649
	фракција 8/16mm			1464
	мјешавина агрегата 0/16mm			1868
Упијање воде [%]	фракција 0/4mm	SRPS EN 1097- 6:2016 [C84]	≤ 1,6 [C2][95]	0,8
	фракција 4/8mm			1,4
	фракција 8/16mm			0,9
	мјешавина агрегата 0/16mm			1,0
Привидна запреминска маса зрна агрегата - ρ _a [kg/m ³]	фракција 0/4mm	SRPS EN 1097- 6:2016 [C84]	-	2498
	фракција 4/8mm			2582
	фракција 8/16mm			2659
	мјешавина агрегата 0/16mm			2567
Стварна запреминска маса зрна агрегата након сушења - ρ _{rd} [kg/m ³]	фракција 0/4mm	SRPS EN 1097- 6:2016 [C84]	-	2405
	фракција 4/8mm			2494
	фракција 8/16mm			2602
	мјешавина агрегата 0/16mm			2487
Стварна запреминска маса засићеног и површински сувог зрна агрегата - ρ _{ssd} [kg/m ³]	фракција 0/4mm	SRPS EN 1097- 6:2016 [C84]	-	2431
	фракција 4/8mm			2528
	фракција 8/16mm			2624
	мјешавина агрегата 0/16mm			2513
Садржај лаких честица [%]	SRPS B.B8.034:1986 [C85]	≤ 3,0 [25]	0,00	
Садржај слабих зрна [%]	SRPS B.B8.037:1986 [C86]	≤ 7,0 [C2][95]	0,00	
Садржај грудви глине [%]	SRPS B.B8.038:1982 [C87]	≤ 5,0 [25]	0,00	
Садржај органских материја [%]	SRPS U.B1.024:1968 [C88]	≤ 3,0 [25]	0,00	
Облик зрна (3:1) – Индекс облика зрна [%]	SRPS EN 933- 4:2010 [C89]	≤ 50,0 [C2], ≤ 40,0 [95]	9,90	
Atterberg-ове границе – Индекс пластичности [%]	SRPS U.B1.020:1980 [C90]	-	0,00	

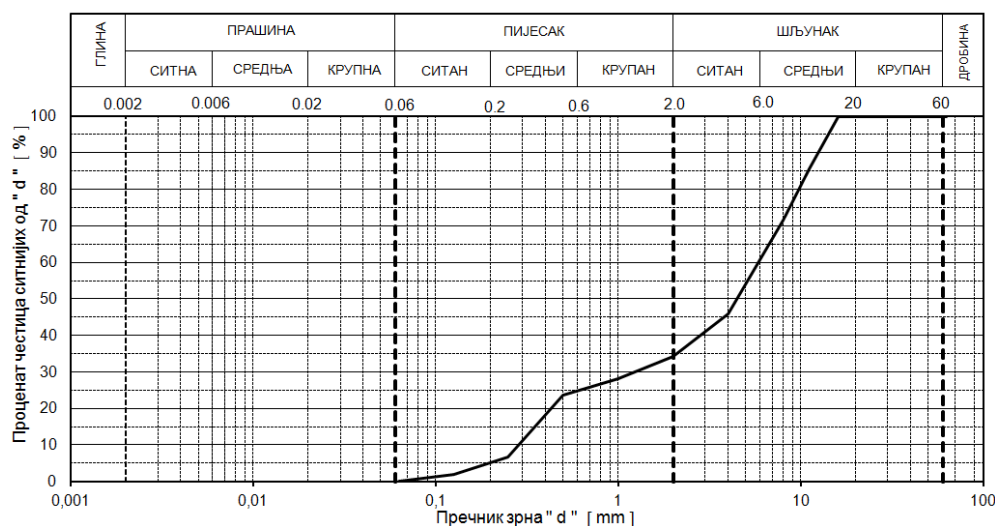


Слика 10.1. – Фракције (3) природног агрегата шљунка – G (0/4, 4/8 и 8/16mm)

Гранулометријски састав природног агрегата шљунка одређен је методом сувог просијавања, на основу стандарда SRPS U.B1.018:2005 [C42] (табела 10.3. и графикони 10.1. и 10.3.).

Табела 10.3. – Процентуални пролази природног агрегата шљунка

Отвор сита [mm]	0,063	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	11,2	16,0
Пролази [%]	0,1	1,8	6,7	23,6	28,1	34,2	45,0	70,0	84,6	100,0



Графикон 10.1. – Гранулометријска крива природног агрегата шљунка

10.1.3. Испитивање рециклираног агрегата

Поред природног агрегата у експерименталном истраживању је коришћен и рециклирани асфалт (RAP), који је настао стругањем оштећеног асфалтног коловоза на локацији Иришки венац, на државном путу IB реда (број 21), Нови Сад – Рума (слика 10.2.).

Процедура за узимање и припрему узорка за испитивање рециклираног асфалта је била иста као и код природног агрегата, али је било неопходно извршити просијавање датог материјала (кроз 3 сита са номиналним отворима: 4, 8 и 16mm) јер је агрегат са депоније, за разлику од природног, допремљен у несепарисаном облику. Напомене ради, учешће зрна већих од 16mm (одређено након просијавања RAP-a) је износило је око 10% од укупне количине рециклираног агрегата, што значи да је приликом стругања и дробљења старог асфалта постојећи уситњен у великој мјери. Резултати лабораторијског испитивања рециклираног асфалтног агрегата (RAP-a) дати су у табели 10.4..

Табела 10.4. – Резултати испитивања физичких карактеристика RAP-а

Карактеристика агрегата		Стандард за испитивње	Услов квалитета	Резултат испитивања
Запреминска маса у растреситом стању [kg/m^3]	фракција 0/4mm	SRPS B.B8.030:1986 [C83]	-	1401
	фракција 4/8mm			1309
	фракција 8/16mm			1238
	мјешавина агрегата 0/16mm			1436
Запреминска маса у збијеном стању [kg/m^3]	фракција 0/4mm	SRPS B.B8.030:1986 [C83]	-	1554
	фракција 4/8mm			1451
	фракција 8/16mm			1357
	мјешавина агрегата 0/16mm			1539
Упијање воде [%]	фракција 0/4mm	SRPS EN 1097-6:2016 [C84]	$\leq 1,6$ [C2][95]	0,71
	фракција 4/8mm			0,77
	фракција 8/16mm			0,84
	мјешавина агрегата 0/16mm			0,77
Привидна запреминска маса зрна агрегата - ρ_a [kg/m^3]	фракција 0/4mm	SRPS EN 1097-6:2016 [C84]	-	2341
	фракција 4/8mm			2422
	фракција 8/16mm			2503
	мјешавина агрегата 0/16mm			2410
Стварна запреминска маса зрна агрегата након сушења - ρ_{rd} [kg/m^3]	фракција 0/4mm	SRPS EN 1097-6:2016 [C84]	-	2292
	фракција 4/8mm			2378
	фракција 8/16mm			2452
	мјешавина агрегата 0/16mm			2362
Стварна запреминска маса засићеног и површински сувог зрна агрегата - ρ_{ssd} [kg/m^3]	фракција 0/4mm	SRPS EN 1097-6:2016 [C84]	-	2311
	фракција 4/8mm			2396
	фракција 8/16mm			2472
	мјешавина агрегата 0/16mm			2381
Садржај лаких честица [%]		SRPS B.B8.034:1986 [C85]	$\leq 3,0$ [25]	0,3
Садржај слабих зрна [%]		SRPS B.B8.037:1986 [C86]	$\leq 7,0$ [C2][95]	0,62
Садржај грудви глине [%]		SRPS B.B8.038:1982 [C87]	$\leq 5,0$ [25]	0,00
Садржај органских материја [%]		SRPS U.B1.024:1968 [C88]	$\leq 3,0$ [25]	0,00
Облик зрна (3:1) – Индекс облика зрна [%]		SRPS EN 933-4:2010 [C89]	$\leq 50,0$ [C2], $\leq 40,0$ [95]	10,3
Садржај битумена [%]		SRPS U.M8.105:1984 [C91]	-	3,80
Atterberg-ове границе – Индекс пластичности [%]		SRPS U.B1.020:1980 [C90]	-	0,00

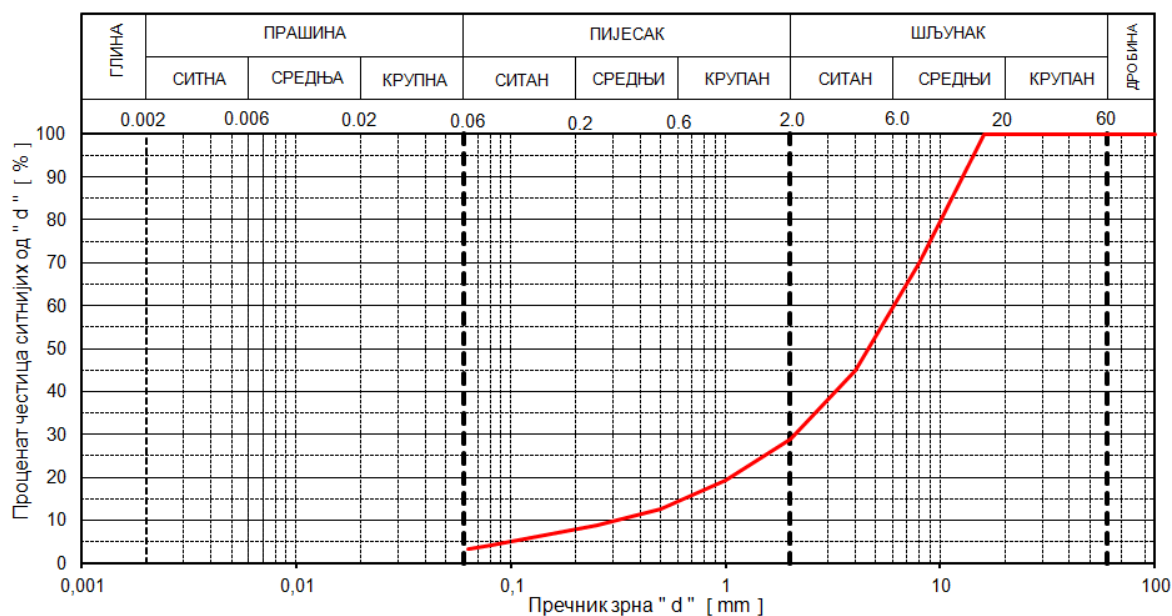


Слика 10.2. – Фракције (3) рециклираног асфалтног агрегата (RAP-а) коришћеног у истраживању (0/4, 4/8 и 8/16mm)

Гранулометријски састав рециклираног асфалта је, као и код природног агрегата, одређен методом сувог просијавања (на основу стандарда SRPS U.B1.018:2005 [C42]), а приказан је у табели 10.5. и на графикону 10.2., док су упоредни прикази гранулометријских састава двије врсте агрегата и граничне криве [22] дати на графикону 10.3..

Табела 10.5. – Процентуални пролази рециклираног асфалтног асфалта (RAP-a)

Отвор сита [mm]	0,063	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	11,2	16,0
Пролази [%]	3,2	6,1	8,9	12,5	19,2	28,9	45,0	70,0	84,4	100,0



Графикон 10.2. – Гранулометријска крива рециклираног асфалтног агрегата (RAP-a)



Графикон 10.3. – Упоредни приказ гранулометријских састава двије врсте агрегата и граничне криве (за стабилизацију агрегата гранулације 0/32mm) [22]

10.1.4. Електрофилтерски летећи пепео

Као замјена за дио цементног везива, током овом експерименталног истраживања, у одређеним процентуалним учешћима је коришћен и индустријски нуспроизвод – електрофилтерски летећи пепео (FA), из термоелектране Никола Тесла Б. Прије справљања узорака летећи пепео је самљевен и просијан кроз сито 0,125mm. Поред испитивања хемијског састава летећег пепела (датог у табели 10.6.) испитане су његове физичке карактеристике и пуцоланска својства.

Табела 10.6. – Хемијски састав летећег пепела коришћеног у експерименталном истраживању

Хемијски елемент	Учешће [%]		
	1.узорка	2.узорак	3.узорак
SiO ₂	50,07	50,00	50,17
Al ₂ O ₃	18,58	18,53	18,55
Fe ₂ O ₃	6,27	6,25	5,00
TiO ₂	0,51	0,50	0,52
CaO	11,16	11,20	11,50
MgO	1,40	1,39	1,24
Na ₂ O	0,62	0,82	0,78
K ₂ O	1,76	1,84	1,78
SO ₃	2,86	2,54	2,50
MnO	0,03	0,01	0,01
Губитак жарењем на 950°C	6,66	6,88	7,94

Анализом резултата испитивања датих у табели 10.6., дати летећи пепео се, на основу америчког стандарда ASTM C618-17 [C16] може сврстати у пепео класе F (табела 8.2.), док се на основу стандарда EN 14227-4:2013 [C20] може сврстати у групу кречњачких пепела. Одређивање пуцоланских слојстава летећег пепела је дефинисано на основу стандарда SRPS B.C1.018:2015 [C15]. Наведени стандард пуцоланске материјале дијели на природне или вјештачке и дефинише их као: силикатне, силико-алуминатне, силико-карбонатне супстанце или њихове међусобне комбинације.

Резултати испитивања чврстоћа летећег пепела коришћеног у овом истраживању дати су у табели 10.7..

Табела 10.7. – Резултати испитивања чврстоћа летећег пепела (након 28 дана њега)

Чврстоћа	бр. узорка	Резултати испитивања		
		Сила [kN]	Просјечна сила [kN]	Чврстоћа [MPa]
на затезање при савијању	I	6193	7047	8,72
	II	6178		
	III	5770		
при притиску	I-1	74	73,5	45,94
	I-2	71		
	II-1	72		
	II-2	72		
	III-1	74		
	III-2	78		

Поред претходно наведених испитивања одређене су и физичке карактеристике летећег пепела, а резултати тих испитивања дати су у табели 10.8..

Табела 10.8. – Резултати испитивања физичких карактеристика летећег пепела

Физичка својства летећег пепела		Стандард за испитивње	Резултати испитивања	
			Захтјевани	Остварени
Финоћа млива (остатак на сити) [%]		SRPS EN 451-2:2010 [C92]	≤12 (категија S); ≤40 (категија N)	1,3
Запреминска маса у растреситом стању [kg/m ³]		SRPS B.C8.023:1997 [C80]	-	634
Запреминска маса у збијеном стању [kg/m ³]		SRPS B.C8.023:1997 [C80]	-	821
Вријеме везивања [min]	- почетак послије	SRPS EN 196-3:2017 [C79]	≥ 60	310
	- крај послије		≤ 600	490
Сталност запремине на <i>Le Chatelier</i> -овим прстеновима [mm]		SRPS EN 196-3:2017 [C79]	≤ 10	0,2
Индекс активности [%]	- након 28 дана	SRPS EN 450-1:2014 [C91]	≥ 75	100
	- након 90 дана		≥ 85	85,4

10.1.5. Вода за справљање стабилизацијских мјешавина

Стабилизацијске мјешавине које су истражене у овој докторској дисертацији могу се третирати као бетонске мјешавине специјалне намјене (сличне тзв. мршавим бетонима), па је за справљање узорака овог типа бетона коришћена вода из градског водовода. У случају да се при справљању узорака користи вода која није из водовода она мора да испуњава захтјеве дефинисане стандардом за израду цементних стабилизација: SRPS U.E9.024:1980 [C2] (односно захтјеве из Техничких услова [95]).

10.2. Начин избора стабилизацијских мјешавина и учешћа компонентних материјала

Процентуална учешћа укупне количине везива, замјене цементног везива летећим пепелом и количина замјене природног агрегата шљунка са рециклираним (асфалтом) дефинисани су на основу детаљне анализе резултата претходних истраживања у овој области и искуствених података. Укупан обим истраживања дефинисан је у зависности од броја комбинација различитих процентуалних учешћа компонентних материјала стабилизација.

Испитивања физичко-механичких карактеристика компонентних материјала стабилизације приказана су у поглављу 10.1., а коначан састав мјешавина са различитим учешћима везива (4 и 6%*mas*) и учешћима рециклираног асфалтног агрегата (0 и 30%*mas*) и летећег пепела (0, 20 и 40%*mas*) дат је у табели 10.9.

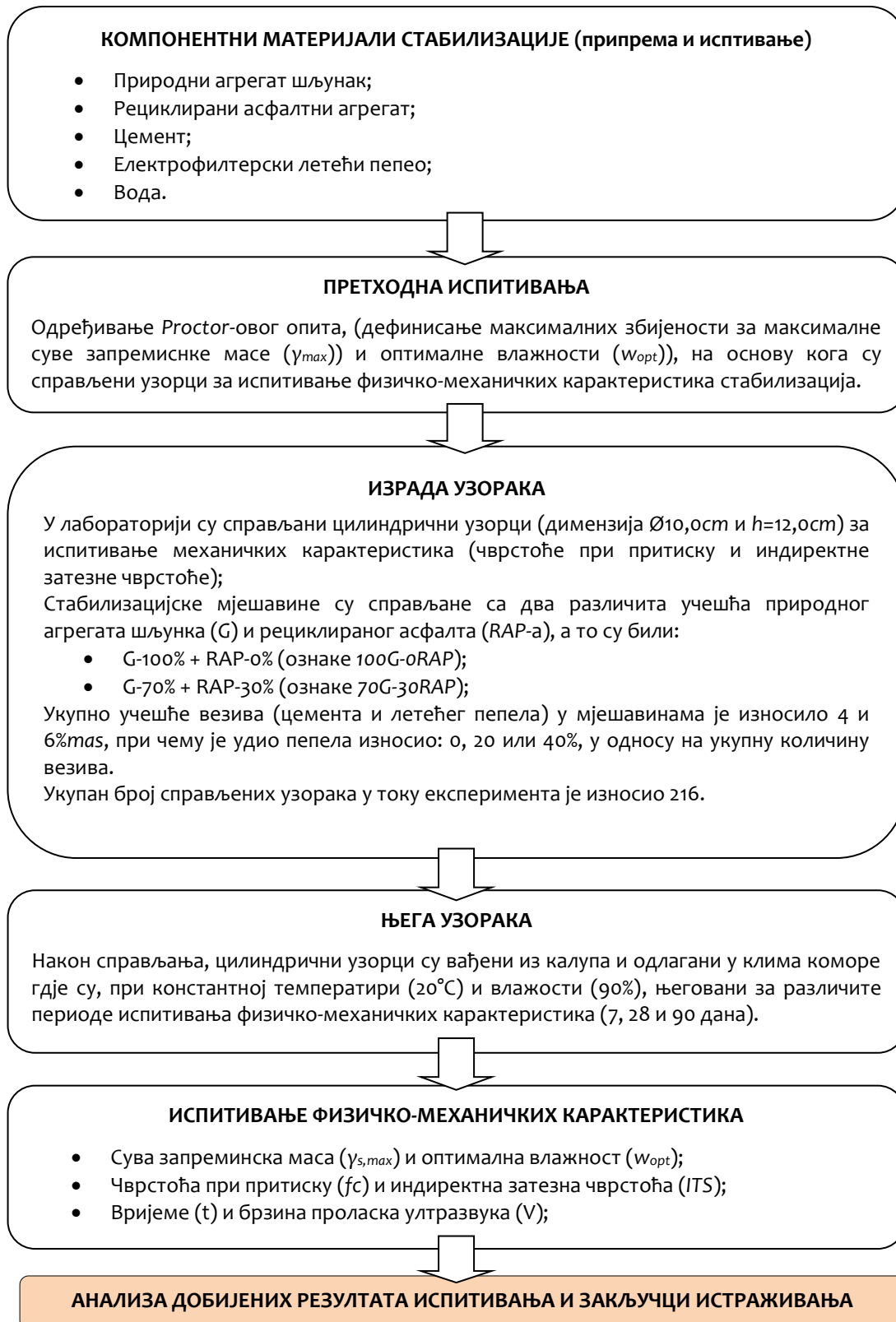
Табела 10.9. – Састави мјешавина цементних стабилизација које су коришћене у експерименталном истраживању

Ознака мјешавине	Учешће шљунка – G [%]	Учешће рециклираног асфалта – RAP [%]	Додатак везива [%]	Учешће цемента (C) у везиву [%]	Учешће летећег пепела (FA) у везиву [%]
M1 100G-0RAP-100C-0FA (4%)	100	0	4	100	0
M2 100G-0RAP-80C-20FA (4%)	100	0	4	80	20
M3 100G-0RAP-60C-40FA (4%)	100	0	4	60	40
M4 70G-30RAP-100C-0FA (4%)	70	30	4	100	0
M5 70G-30RAP-80C-20FA (4%)	70	30	4	80	20
M6 70G-30RAP-60C-40FA (4%)	70	30	4	60	40
M7 100G-0RAP- 100C-0FA (6%)	100	0	6	100	0
M8 100G-0RAP-80C-20FA (6%)	100	0	6	80	20
M9 100G-0RAP-60C-40FA (6%)	100	0	6	60	40
M10 70G-30RAP-100C-0FA (6%)	70	30	6	100	0
M11 70G-30RAP-80C-20FA (6%)	70	30	6	80	20
M12 70G-30RAP-60C-40FA (6%)	70	30	6	60	40

10.3. Реализација експерименталног истраживања

Експериментално истраживање које је рађено у оквиру докторске дисертације реализовано је кроз више фаза приказаних на шеми 10.1..

Шема 10.1. – Програм експерименталног лабораторијског истраживања

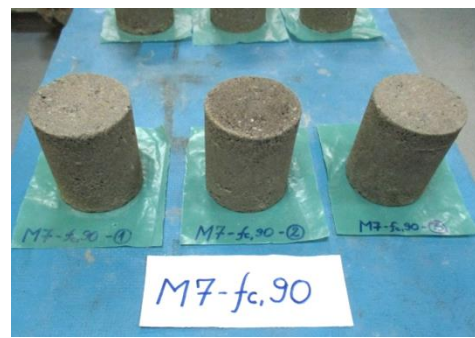


Након одређивања коначног састава цементом стабилованих мјешавина и лабораторијског испитивања компонентних материјала приступило се одређивању оптималне количине воде која се користила приликом справљања узорака (на основу стандардног *Proctor*-овог опита). Прије почетка *Proctor*-овог опита агрегат је осушен. Природни агрегат је сушен 24h на температури 105°C, док је рециклирани асфалтни агрегат сушен дужи од 24h на 50°C. Разлог за нижу температуру сушења рециклираног асфалтног агрегата је због могућности топљења старог битумена на високим температурама.

Затим се приступило справљању узорака и испитивању физичко-механичких карактеристика цементне стабилизације, стандардованим поступцима испитивања, за одређени период и начин њега узорака. На укупно 216 справљених цилиндричних узорака рађена су испитивања физичко-механичких карактеристика цементних стабилизација (слике 10.3. и 10.4.).



Слика 10.3. – Мјерење димензија цилиндричних узорака



Слика 10.4. – Припрема узорака за испитивање чврстоћа при притиску

У току експерименталног истраживања анализирани су:

- Учешће рециклираног асфалтног агрегата у новој стабилизацијској мјешавини;
- Учешће новог и/или постојећег природног агрегата шљунка, из неvezаних носећих слојева коловозне конструкције, у новој стабилизацијској мјешавини;
- Одређивање физичко-механичких карактеристика компонентних материјала стабилизације;
- Хемијски састав летећег пепела;
- Одређивање максималне суве запреминске масе агрегата и оптималне влажности, у оквиру стандардног *Proctor*-овог опита;
- Дефинисање количине додатка везива у стабилизацији;
- Процентуално учешће летећег пепела (као замјене за цемент) у стабилизацијским мјешавинама;
- Запреминска маса стабилизација прије испитивања чврстоћа на узорцима;
- Губитак масе након дефинисаног периода њега узорака;
- Чврстоћа при притиску стабилизације;
- Индиректна затезна чврстоћа стабилизације и
- Брзина и вријеме проласка ултразвука кроз цементне стабилизације.

Основни циљ експерименталног истраживања био је да се, на основу добијених резултата током испитивања физичко-механичких карактеристика, анализира могућности примјене отпадних материјала (летећег пепела и рециклираног асфалтног агрегата), као замјене за компонентне материјале

стабилизацијских мјешавина рађених на традиционалан начин (са цементом и природним агрегатом шљунком).

Послије спроведеног експерименталног испитивања узорака приступило се обради резултата, на основу чега су изведени коначни закључци који представљају базу за даља истраживања у овој области.

10.3.1. Поступак израде узорака и претходна испитивања

Израда узорака за испитивање стабилизацијских мјешавина има бројна ограничења, која даље условљавају ограничења приликом избора поступака испитивања физичко-механичких карактеристика стабилизација. Наиме, начин уградње узорака за испитивање карактеристика стабилизацијских мјешавина је много захтјевнији од поступка уградње узорака за класичне бетонске мјешавине, јер се код цементних стабилизација уграђивање обавља поступком интензивног збијања материјала. Однос учешћа компонентних материјала се, такође, доста разликује код цементних стабилизација у односу на стандардне бетоне, па су тако количине цемента значајно мање код цементних стабилизација (због функције стабилизације у коловозној конструкцији), а количине воде се одређују на основу Proctor-овог опита. Поступак збијања који се обавља металним набијачем (током Proctor-овог опита) најчешће се користи и приликом израде узорака, што је примјењено и у овом експерименталном истраживању. Поред наведеног поступка, приликом уградње стабилизацијских узорака у лабораторији примјењују се и сљедећи поступци:

- статичко збијање под притиском у преси,
- збијање виброчекитом и
- збијање под притиском уз истовремено вибрирање калупа (вибро-компресија) [7].

10.4. Резултати испитивања Proctor-овог опита

Испитивање које је претходило одређивању механичких карактеристика цементних стабилизација био је Proctor-ов опит, током кога су одређене оптималне влажности (w_{opt}) и максималне суве запреминске масе (γ_s), за свих 12 стабилизацијских мјешавина. Величина максималног зрна агрегата условила је избор типа Proctor-овог опита и потребне димензије калупа за израду стабилизацијских узорака, па је на основу податка о величини номиналног зрна агрегата ($D=16mm$), изабран стандардни Proctor-ов опит (рађен по стандарду EN 13286-2:2010 [C55]). Димензије цилиндричног калупа на коме су спроведена испитивања Proctor-овог опита (а касније и одређивање физичких и механичких карактеристика стабилизације) су биле $\varnothing 10,0cm$ и $h=12,0cm$, а енергија збијања је износила $0,6MJ/m^3$ (која је остварена примјеном металног набијача масе $2,5kg$).

Збирни резултати испитивања Proctor-овог опита, са вриједностима оптималних влажности (w_{opt}) и максималних сувих запреминских маса ($\gamma_{s,max}$) дати су у табели 10.10., а појединачни резултати испитивања су дати у табелама 10.11.-10.22. и на графиконима 10.4.-10.15..

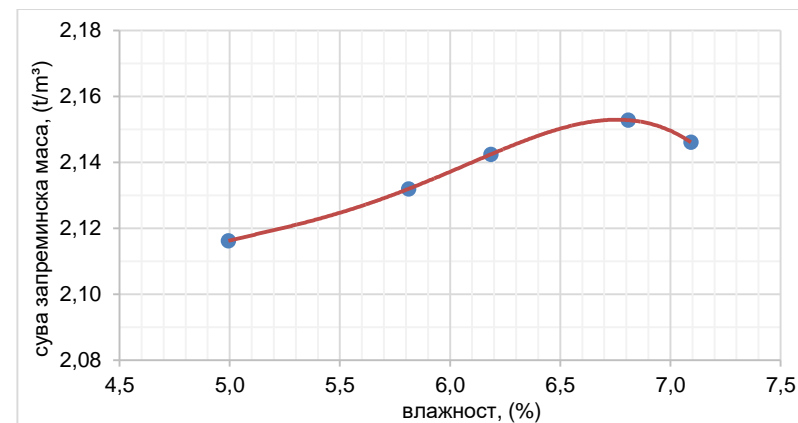
Табела 10.10. – Вриједности максималних сувих запреминских маса ($\gamma_{s,max}$) и оптималних влажности (w_{opt}), за различите саставе стабилизацијских мјешавина

Ознака мјешавине	Оптимална влажност w_{opt} [%] ⁴³	Максимална сува запреминска маса γ_s [g/cm ³]	Ознака мјешавине	Оптимална влажност w_{opt} [%]	Максимална сува запреминска маса γ_s [g/cm ³]
M1 100G-0RAP-100C-0FA (4%)	6,8	2,15	M7 100G-0RAP-100C-0FA (6%)	7,3	2,19
M2 100G-0RAP-80C-20FA (4%)	6,8	2,15	M8 100G-0RAP-80C-20FA (6%)	7,0	2,20
M3 100G-0RAP-60C-40FA (4%)	6,8	2,16	M9 100G-0RAP-60C-40FA (6%)	6,8	2,21
M4 70G-30RAP-100C-0FA (4%)	7,3	2,08	M10 70G-30RAP-100C-0FA (6%)	7,5	2,12
M5 70G-30RAP-80C-20FA (4%)	7,3	2,08	M11 70G-30RAP-80C-20FA (6%)	7,3	2,14
M6 70G-30RAP-60C-40FA (4%)	7,3	2,10	M12 70G-30RAP-60C-40FA (6%)	7,3	2,15

⁴³ За оптималну влажност (w_{opt}) се сматра количина воде која се додаје сувој мешавини

Табела 10.11. – Резултати Proctor-ог опита (за мјешавину M1)

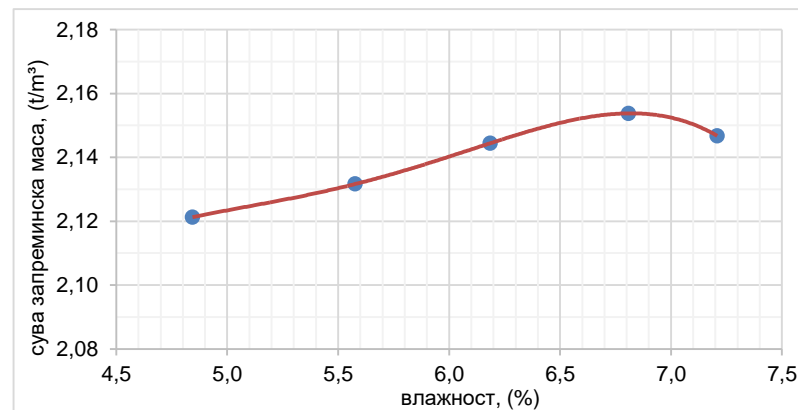
M1					
тачка	1	2	3	4	5
карактеристика					
W [%]	5,0	5,8	6,2	6,8	7,1
γ_s [g/cm ³]	2,12	2,13	2,14	2,15	2,15
W, usvojeno [%]	6,8				
$\gamma_{s,max}$, usvojeno [g/cm ³]	2,15				



Графикон 10.4. – Зависност сувих запреминских маса од количине додатка воде – Proctor-ов опит (за мјешавину M1)

Табела 10.12. – Резултати Proctor-ог опита (за мјешавину M2)

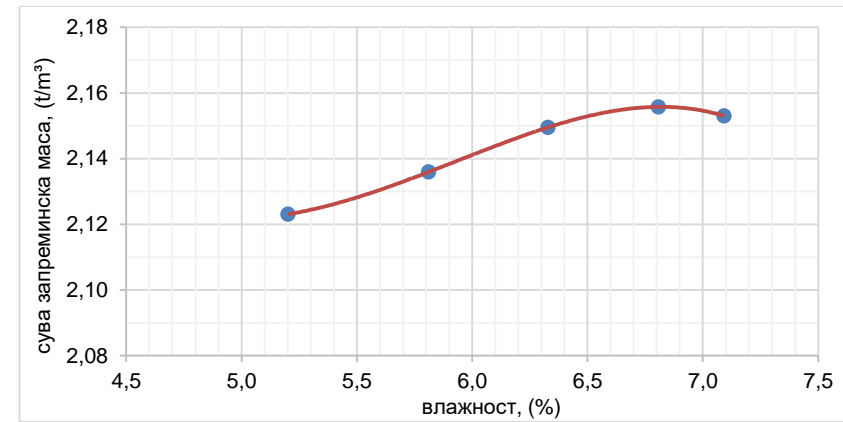
M2					
тачка	1	2	3	4	5
карактеристика					
W [%]	4,8	5,6	6,2	6,8	7,2
γ_s [g/cm ³]	2,12	2,13	2,14	2,15	2,15
W, usvojeno [%]	6,8				
$\gamma_{s,max}$, usvojeno [g/cm ³]	2,15				



Графикон 10.5. – Зависност сувих запреминских маса од количине додатка воде – Proctor-ов опит (за мјешавину M2)

Табела 10.13. – Резултати Proctor-ог опита (за мјешавину М3)

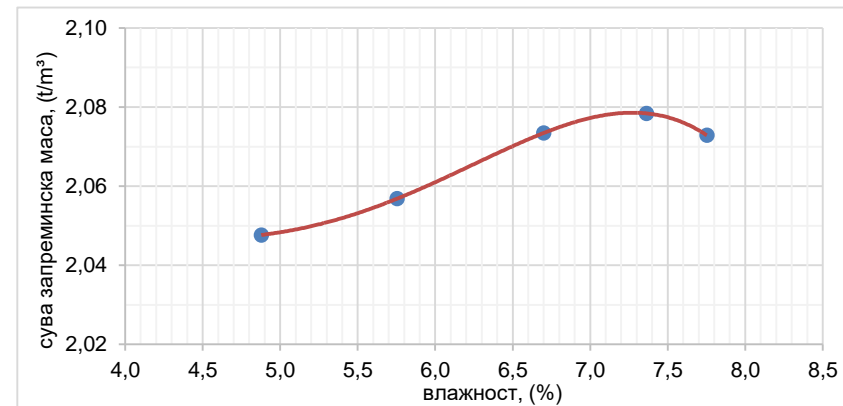
М3					
карактеристика \ тачка	1	2	3	4	5
W [%]	5,2	5,8	6,3	6,8	7,1
γ_s [g/cm ³]	2,12	2,14	2,15	2,16	2,15
W, usvojeno [%]	6,8				
$\gamma_{s,max}$, usvojeno [g/cm ³]	2,16				



Графикон 10.6. – Зависност сувих запреминских маса од количине додатка воде – Proctor-ов опит (за мјешавину М3)

Табела 10.14. – Резултати Proctor-ог опита (за мјешавину М4)

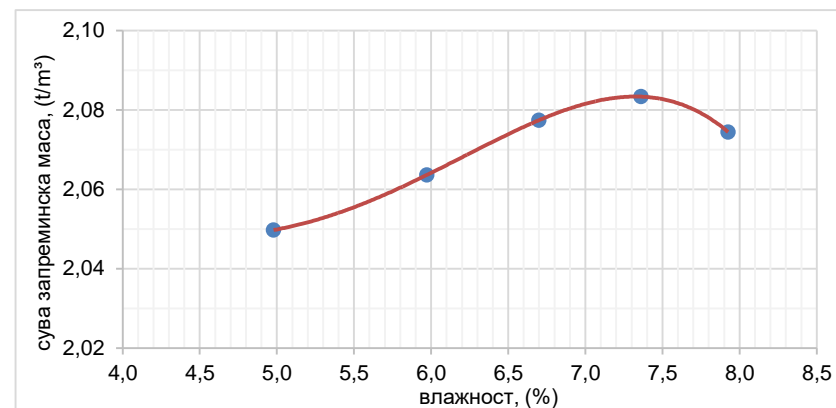
М4					
карактеристика \ тачка	1	2	3	4	5
W [%]	4,9	5,8	6,7	7,4	7,8
γ_s [g/cm ³]	2,05	2,06	2,07	2,08	2,07
W, usvojeno [%]	7,3				
$\gamma_{s,max}$, usvojeno [g/cm ³]	2,08				



Графикон 10.7. – Зависност сувих запреминских маса од количине додатка воде – Proctor-ов опит (за мјешавину М4)

Табела 10.15. – Резултати Простор-ог опита (за мјешавину М5)

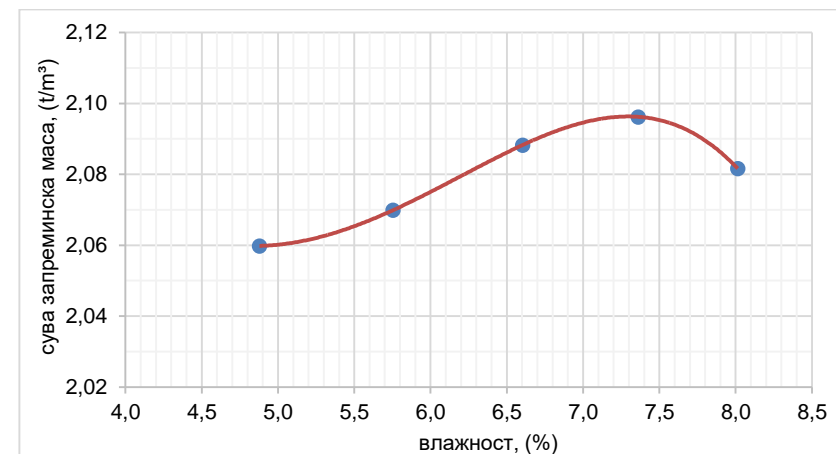
М5					
карактеристика \ тачка	1	2	3	4	5
W [%]	5,0	6,0	6,7	7,4	7,9
γ_s [g/cm ³]	2,05	2,06	2,08	2,08	2,07
W, usvojeno [%]	7,3				
$\gamma_{s,max}$, usvojeno [g/cm ³]	2,08				



Графикон 10.8. – Зависност сувих запреминских маса од количине додатка воде – Простор-ов опит (за мјешавину М5)

Табела 10.16. – Резултати Простор-ог опита (за мјешавину М6)

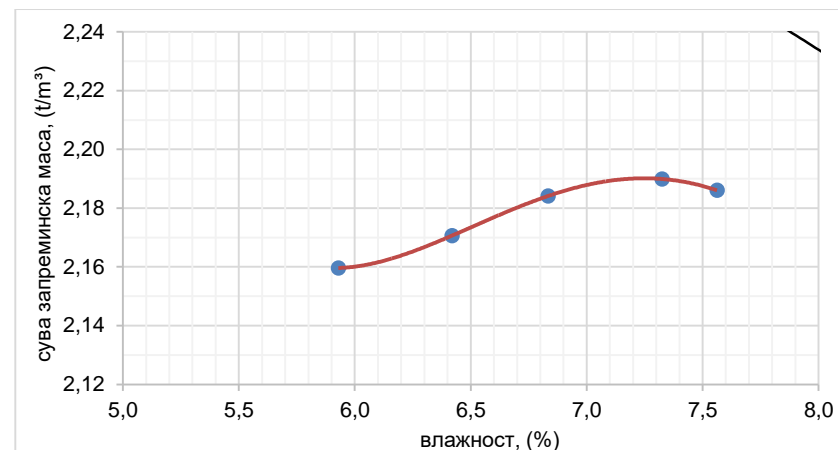
М6					
карактеристика \ тачка	1	2	3	4	5
W [%]	4,9	5,8	6,6	7,4	8,0
γ_s [g/cm ³]	2,06	2,07	2,09	2,10	2,08
W, usvojeno [%]	7,3				
$\gamma_{s,max}$, usvojeno [g/cm ³]	2,10				



Графикон 10.9. – Зависност сувих запреминских маса од количине додатка воде – Простор-ов опит (за мјешавину М6)

Табела 10.17. – Резултати Простор-ог опита (за мјешавину М7)

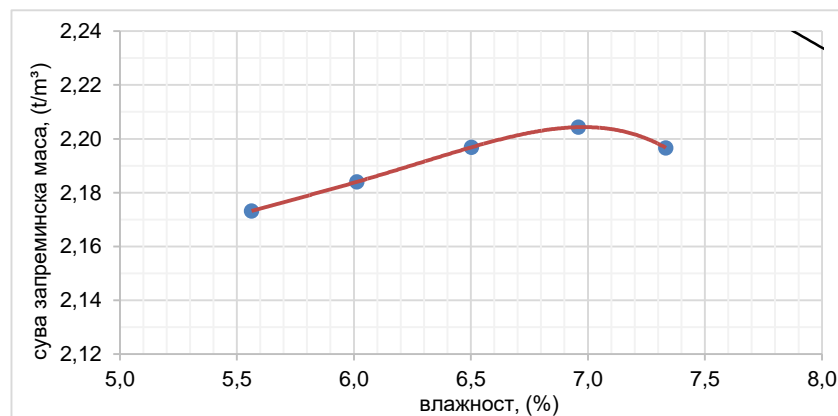
М7					
тачка	1	2	3	4	5
карактеристика					
W [%]	5,9	6,4	6,8	7,3	7,6
γ_s [g/cm ³]	2,16	2,17	2,18	2,19	2,19
W, usvojeno [%]	7,3				
$\gamma_{s,max}$, usvojeno [g/cm ³]	2,19				



Графикон 10.10. – Зависност сувих запреминских маса од количине додатка воде – Простор-ов опит (за мјешавину М7)

Табела 10.18. – Резултати Простор-ог опита (за мјешавину М8)

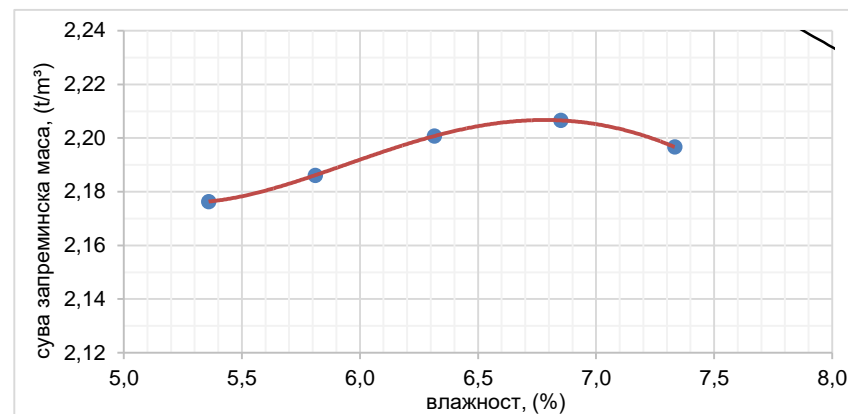
М8					
тачка	1	2	3	4	5
карактеристика					
W [%]	5,6	6,0	6,5	7,0	7,3
γ_s [g/cm ³]	2,17	2,18	2,20	2,20	2,20
W, usvojeno [%]	7,0				
$\gamma_{s,max}$, usvojeno [g/cm ³]	2,20				



Графикон 10.11. – Зависност сувих запреминских маса од количине додатка воде – Простор-ов опит (за мјешавину М8)

Табела 10.19. – Резултати Простор-ог опита (за мјешавину М9)

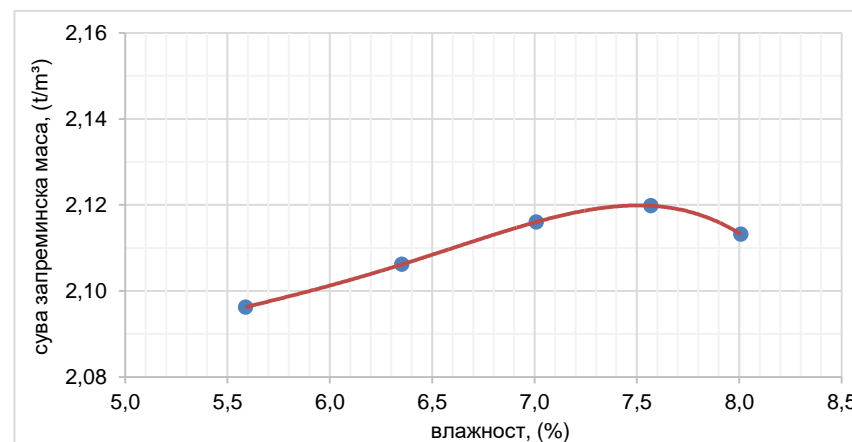
М9					
тачка	1	2	3	4	5
карактеристика					
W [%]	5,4	5,8	6,3	6,9	7,3
γ_s [g/cm ³]	2,18	2,19	2,20	2,21	2,20
W, usvojeno [%]	6,8				
$\gamma_{s,max}$, usvojeno [g/cm ³]	2,21				



Графикон 10.12. – Зависност сувих запреминских маса од количине додатка воде – Простор-ов опит (за мјешавину М9)

Табела 10.20. – Резултати Простор-ог опита (за мјешавину М10)

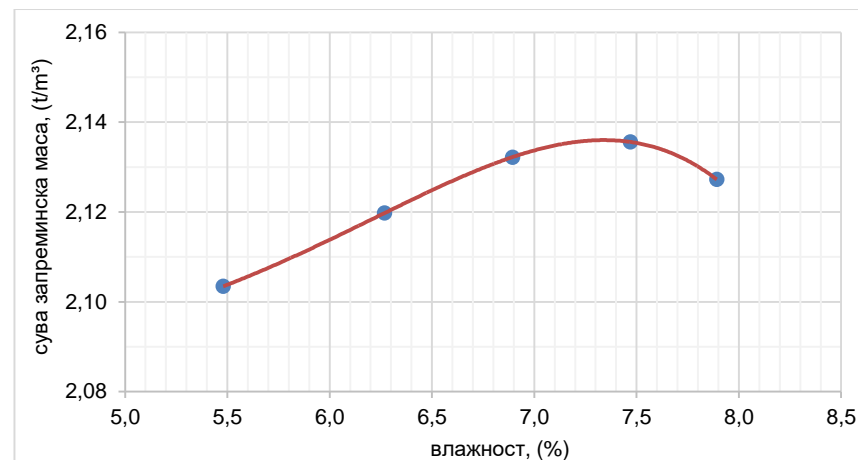
М10					
тачка	1	2	3	4	5
карактеристика					
W [%]	5,6	6,4	7,0	7,6	8,0
γ_s [g/cm ³]	2,10	2,11	2,12	2,12	2,11
W, usvojeno [%]	7,5				
$\gamma_{s,max}$, usvojeno [g/cm ³]	2,12				



Графикон 10.13. – Зависност сувих запреминских маса од количине додатка воде – Простор-ов опит (за мјешавину М10)

Табела 10.21. – Резултати Proctor-ог опита (за мјешавину M11)

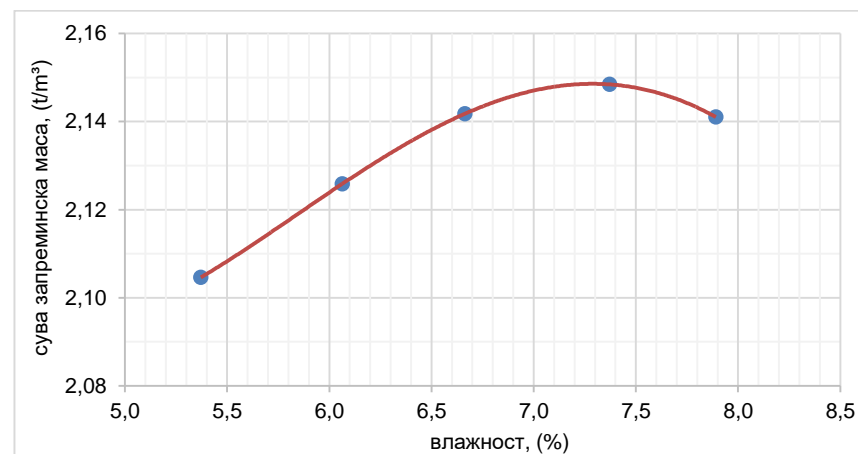
M11					
тачка	1	2	3	4	5
карактеристика					
W [%]	5,5	6,3	6,9	7,5	7,9
γ_s [g/cm ³]	2,10	2,12	2,13	2,14	2,13
W, usvojeno [%]	7,3				
$\gamma_{s,max}$, usvojeno [g/cm³]	2,14				



Графикон 10.14. – Зависност сувих запреминских маса од количине додатка воде – Proctor-ов опит (за мјешавину M11)

Табела 10.22. – Резултати Proctor-ог опита (за мјешавину M12)

M12					
тачка	1	2	3	4	5
карактеристика					
W [%]	5,4	6,1	6,7	7,4	7,9
γ_s [g/cm ³]	2,10	2,13	2,14	2,15	2,14
W, usvojeno [%]	7,3				
$\gamma_{s,max}$, usvojeno [g/cm³]	2,15				



Графикон 10.15. – Зависност сувих запреминских маса од количине додатка воде – Proctor-ов опит (за мјешавину M12)

Вриједности оптималних влажности, за све стабилизацијске мјешавине са 4% мас укупног додатка везива, не зависе од односа садржаја цемента и летећег пепела, већ само од врсте агрегата. За мјешавине које су справљене само са природним агрегатом шљунком (M1, M2 и M3) вриједности оптималних влажности су износиле 6,8%, а за мјешавине са 70% природног агрегата шљунка и 30% рециклираног асфалта (M4, M5 и M6) вриједности оптималних влажности су износиле 7,3%. Раст вриједности оптималних влажности са повећањем учешћа рециклираног асфалта је примјетан и код мјешавина са 6% додатка везива (мјешавине M7-M12). Разлог за повећање оптималних влажности код свих мјешавина са рециклираним агрегатом је то што тај агрегат има већу специфичну површину и веће учешће ситнијих честица од природног агрегата шљунка. Код мјешавина са 6% мас додатка везива вриједности оптималних влажности су се постепено смањивале са повећањем садржаја летећег пепела у мјешавинама и за мјешавине само са природним агрегатом износиле су: $W_{opt(M7)}=7,3\%$, $W_{opt(M8)}=7,0\%$, $W_{opt(M9)}=6,8\%$, док су за мјешавине са додатком рециклираног асфалтног агрегата те вриједности износиле: $W_{opt(M10)}=7,5\%$, $W_{opt(M11)}=7,3\%$, $W_{opt(M12)}=7,3\%$.

Са повећањем количине додатка летећег пепела у мјешавинама суве запреминске масе су, или остале исте, или су се повећале, за исте количине осталих компонентних материјала (табела 10.10.), мада повећање није било значајно (посебно за мјешавине са 4% мас додатка везива). Повећање суве запреминске масе за мјешавине са већим учешћима летећег пепела може се оправдати тиме што летећи пепео има мању запреминску масу у односу на цемент (а укупна маса везива у мјешавинама је константна), па веће запреминско учешће летећег пепела попуњава празан простор који се јавља у мјешавинама након поступка збијања, а и сам летећи пепео захтјева мање количине воде од цемента. Са аспекта анализе сувих запреминских маса у зависности од врсте агрегата може се закључити да цементне стабилизације са већим учешћем рециклираног асфалтног агрегата имају мање вриједности сувих запреминских маса у односу на мјешавине са природним агрегатом шљунком, за исте укупне количине везива. Разлог за то је мања запреминска маса рециклираног агрегата у односу на природни. Повећањем укупне количине везива повећавају се и суве запреминске масе, јер се тиме смањује порозност стабилизацијских мјешавина.

Током Proctor-овог опита, усљед интензивног поступка збијања, код неких узорака је уочено цурење цементне пасте и ситних честица агрегата на споју калупа и металне плоче на дну (Прилог 2., фотографија 8.). Тиме је дошло до губитка финих честица, а тај губитак се појавио прије постизања оптималних влажности мјешавина и износио је <0,3%, што је био разлог да се може наставити са даљом употребом истог набијача и калупа за справљање стабилизацијских узорака (стандард EN 13286-2:2010 [C55]). Све претходно наведено доводи до закључка да је приликом одабира агрегата мјешавине потребно имати довољну количину ситних честица у агрегату због бољег паковања стабилизацијске мјешавине током процеса уградње.

10.5. Резултати испитивања физичко-механичких карактеристика цементних стабилизација

На цилиндричним стабилизацијским узорцима, који су справљени током експерименталног лабораторијског испитивања, одређене су следеће физичко-механичке карактеристике:

- Маса (m), запремина (V) и запреминска маса (γ),
- Вријеме (t) и брзина (V_t) проласка ултразвука и
- Чврстоћа при притиску (f_c) и индиректна затезна чврстоћа (ITS).

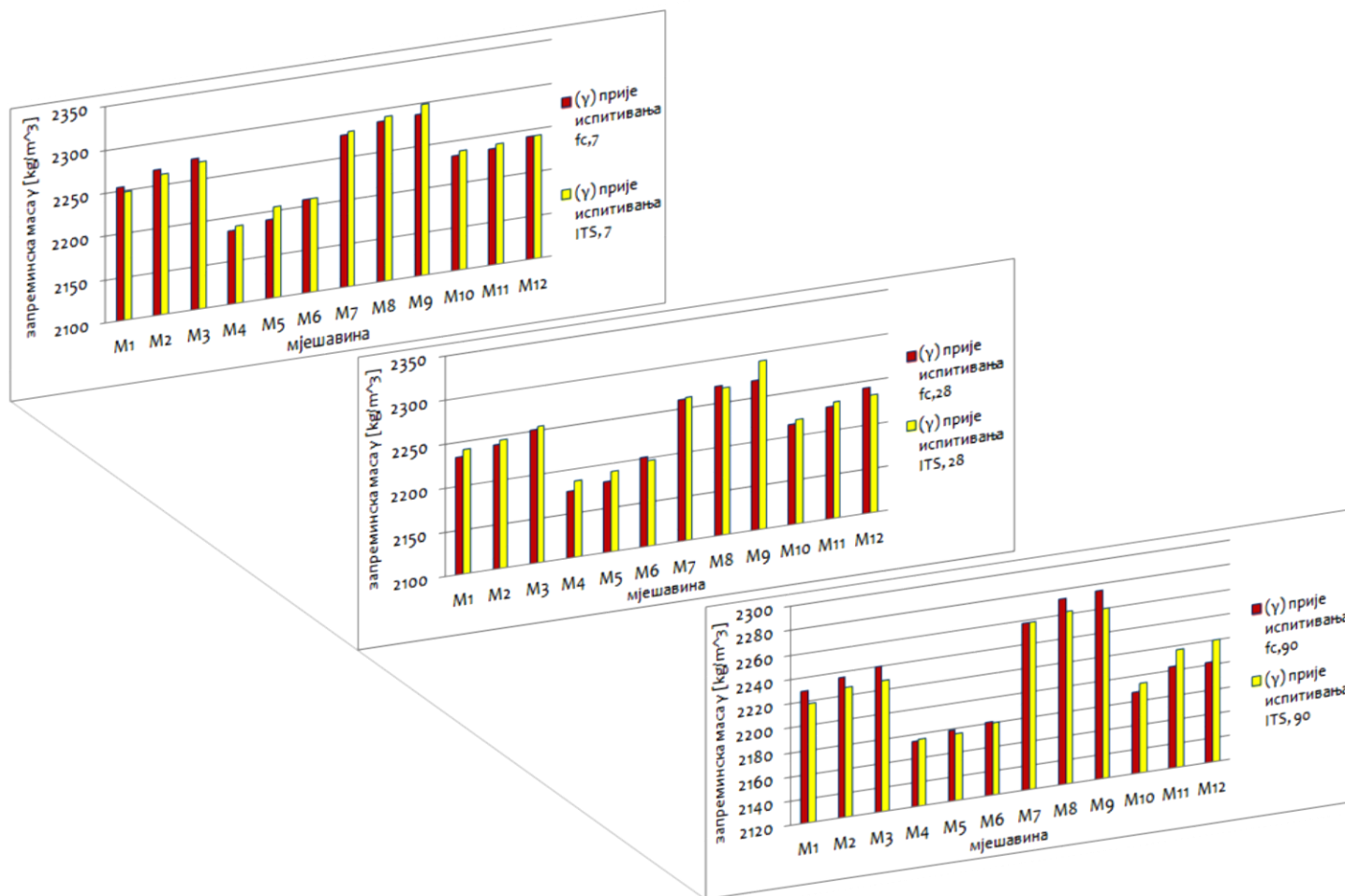
Резултати експерименталног лабораторијског истраживања (за 12 различитих стабилизацијских мјешавина) дати су у наставку.

10.5.1. Запреминска маса

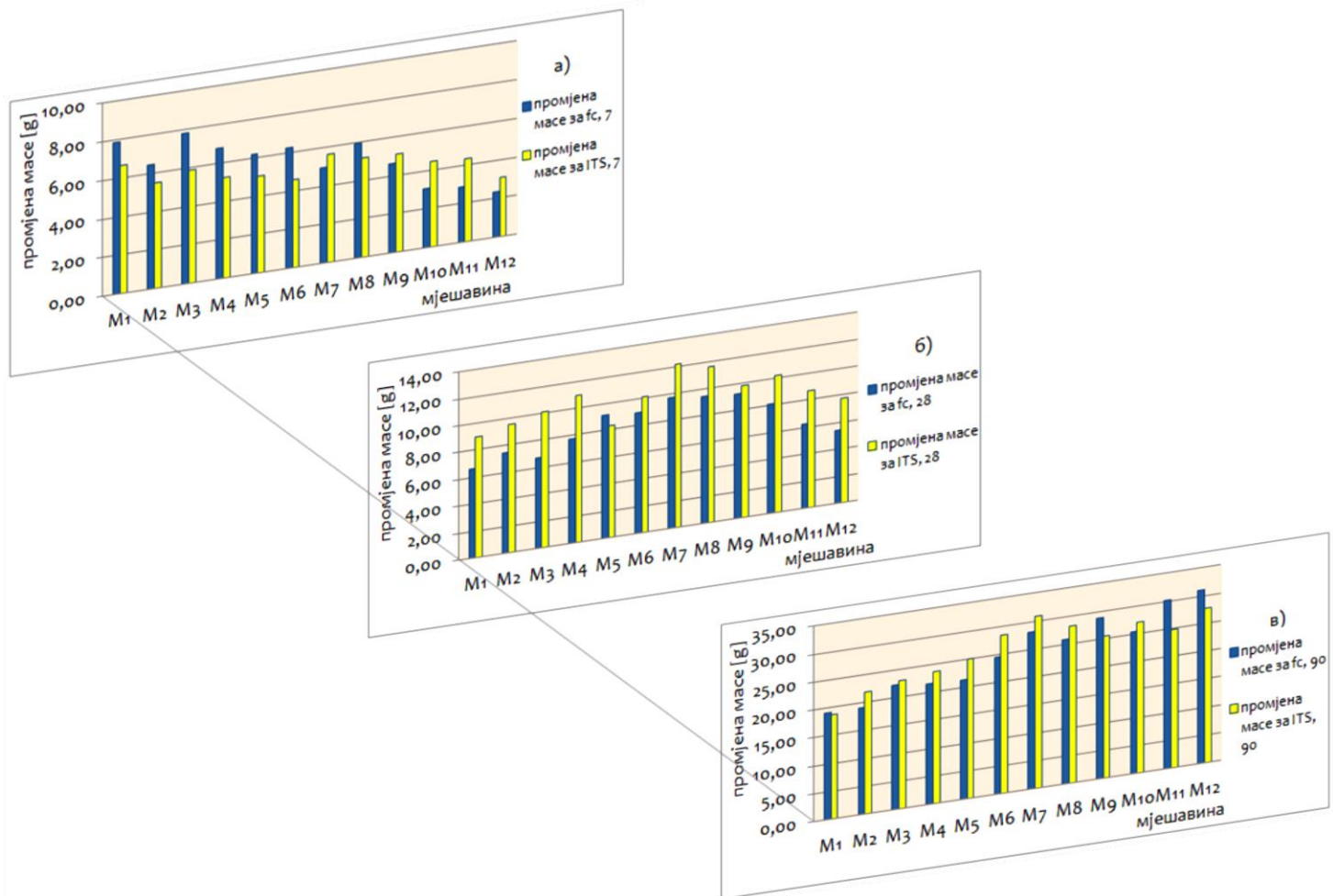
Вриједности запреминских маса (γ) стабилизацијских мјешавина су у зависности од запреминских маса компонентних материјала, а пошто су шљунак и рециклирани асфалт били носиоци запремине стабилизацијских узорака њихове појединачне запреминске масе у многоме су одредиле и укупне запреминске масе свих 12 стабилизацијских мјешавина⁴⁴.

Поред запреминских маса компонентних материјала, запреминске масе стабилизацијских мјешавина зависне су и од степена збијености истих (дефинисаних на основу Proctor-овог опита). Узимајући у обзир чињеницу да је степен збијености у овом истраживању био исти за све узорке и стабилизацијске мјешавине детаљнија анализа запреминских маса са тог аспекта се неће спроводити. Запреминске масе су одређене и анализирани на узорцима прије испитивања њихових механичких карактеристика (хистограм 10.1.). Мјерење масе узорака рађено је након справљања (m_1) и прије испитивања истих (m_2) (резултати дати у Прилогу 1.), а разлика наведених маса ($m_1 - m_2$) приказана је на хистограму 10.2.. Мјерења маса стабилизацијских узорака су рађена за све узорке (216), те се добијени резултати могу посматрати (поред анализе са становишта компонентних материјала) и са аспекта периода њега узорака. Анализом хистограма 10.1. и Прилога 1. може се закључити да су се вриједности запреминских маса смањивале са повећањем периода њега узорака, за исте стабилизацијске мјешавине.

⁴⁴ M1 – 100G-0RAP-100C-0FA (4% везива); M2 – 100G-0RAP-80C-20FA (4% везива); M3 – 100G-0RAP-60C-40FA (4% везива); M4 – 70G-30RAP-100C-0FA (4% везива); M5 – 70G-30RAP-80C-20FA (4% везива); M6 – 70G-30RAP-60C-40FA (4% везива); M7 – 100G-0RAP-100C-0FA (6% везива); M8 – 100G-0RAP-80C-20FA (6% везива); M9 – 100G-0RAP-60C-40FA (6% везива); M10 – 70G-30RAP-100C-0FA (6% везива); M11 – 70G-30RAP-80C-20FA (6% везива); M12 – 70G-30RAP-60C-40FA (6% везива);



Хистограм 10.1. – Средње вриједности запреминских маса прије испитивања чврстоћа при притиску и индиректних затезних чврстоћа за различите стабилизацијске мјешавине (M1 – M12) и периоде њега узорака (7, 28 и 90 дана)



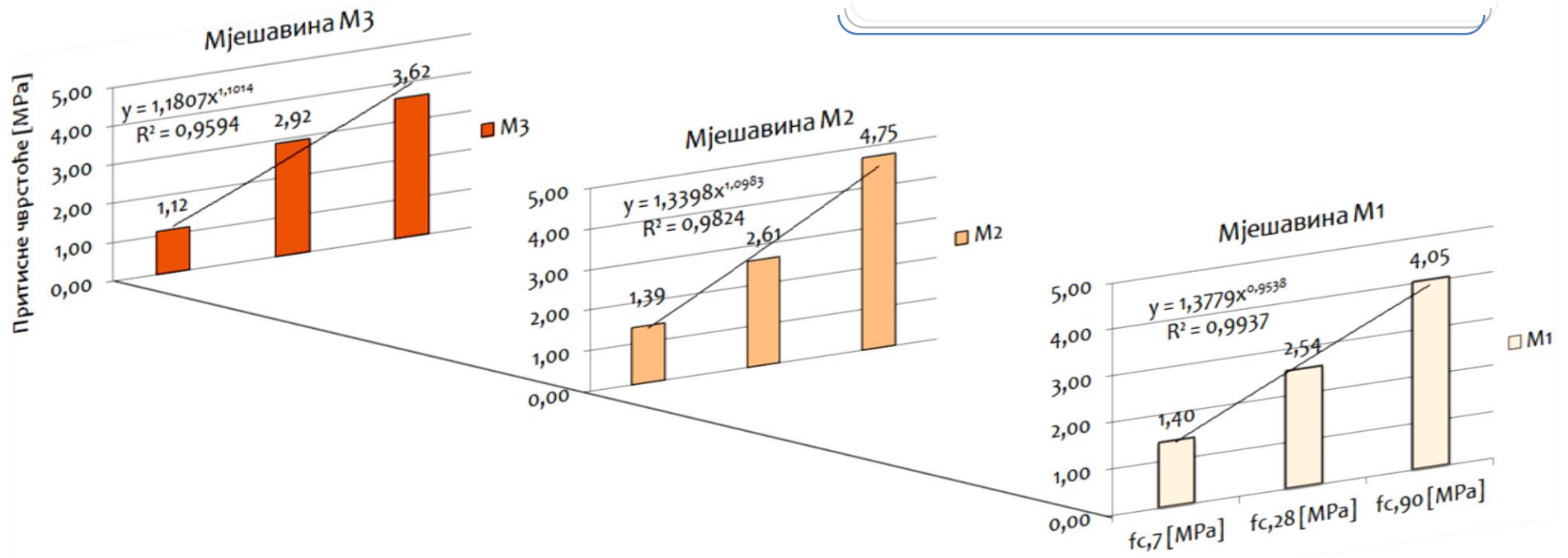
Хистограм 10.2. – Средње вриједности промјене маса (разлика маса мјерених након справљања и прије испитивања) на узорцима различитих стабилизацијских мјешавина (припреманих за различита испитивања чврстоћа (f_c и ITS)) и периода њега (7, 28 и 90 дана)

10.5.2. Чврстоћа при притиску

Чврстоћа при притиску (f_c) стабилизацијских мјешавина анализирана је у поглављу 6.3.4., а резултати испитивања и међусобна зависност чврстоћа од различитих утицајних параметара дати су на хистограмима 10.3.–10.6., као и на дијаграмима 10.1. и 10.2.. Испитивања чврстоћа при притиску (f_c) су рађена на основу стандарда SRPS EN 13286-41:2012 [С3]. Збирни резултати испитивања чврстоћа при притиску, рађених на цилиндричним узорцима, за различите стабилизацијске мјешавине, дати су у табели 10.23., а комплетни резултати појединачних испитивања у Прилогу 1..

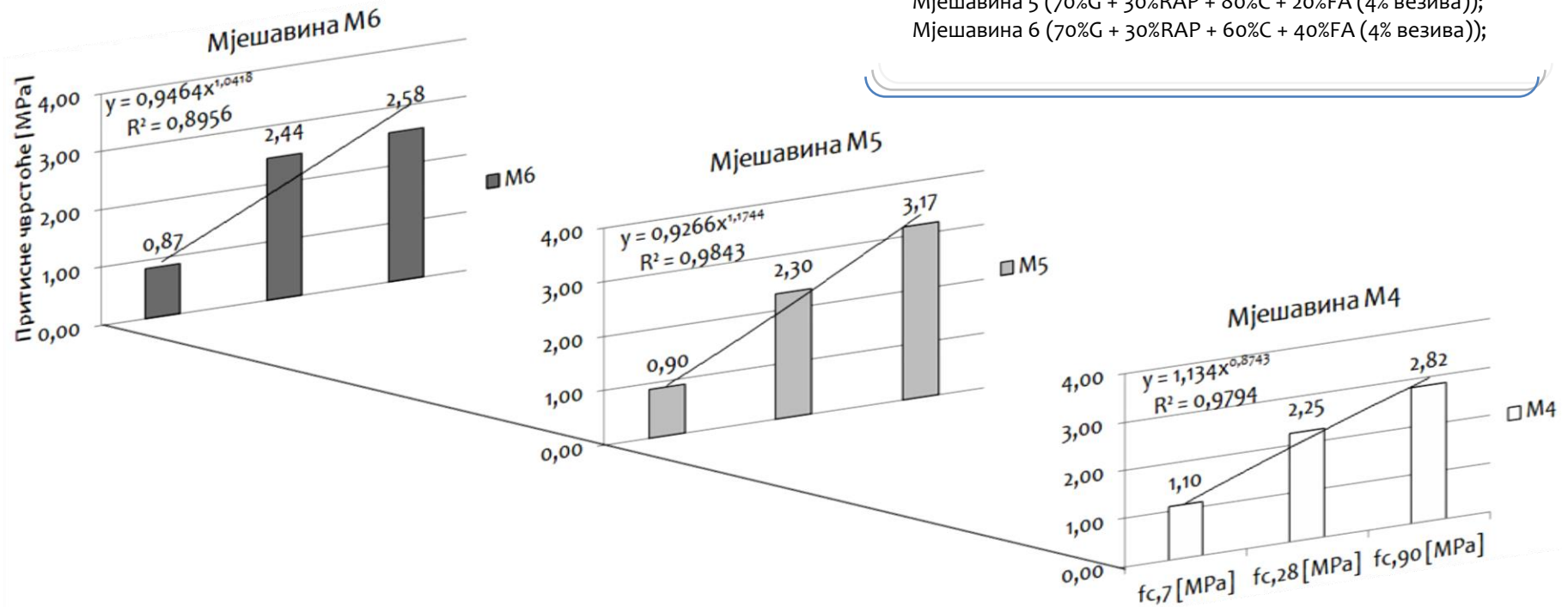
Табела 10.23. – Средње вриједности аксијалних сила лома и чврстоћа при притиску стабилизацијских мјешавина, за различите периоде њега узорака

Мјешавина	Силе лома (P) и чврстоће при притиску (f_c) након 7 дана		Силе лома (P) и чврстоће при притиску (f_c) након 28 дана		Силе лома (P) и чврстоће при притиску (f_c) након 90 дана	
	Сила лома, P,7 [kN]	Чврстоћа при притиску - $f_{c,7}$ [MPa]	Сила лома, P,7 [kN]	Чврстоћа при притиску - $f_{c,28}$ [MPa]	Сила лома, P,7 [kN]	Чврстоћа при притиску - $f_{c,90}$ [MPa]
M1	11,17	1,40	20,10	2,54	32,00	4,05
M2	11,00	1,39	20,73	2,61	37,60	4,75
M3	8,90	1,12	23,20	2,92	28,63	3,62
M4	8,75	1,10	17,87	2,25	22,30	2,82
M5	7,10	0,90	18,20	2,30	25,07	3,17
M6	6,90	0,87	19,33	2,44	20,37	2,58
M7	27,66	3,48	44,87	5,63	65,40	8,26
M8	27,13	3,41	50,30	6,34	79,27	9,99
M9	25,27	3,17	59,97	7,54	72,00	9,09
M10	18,87	2,38	30,97	3,90	38,53	4,87
M11	18,70	2,36	37,40	4,71	52,43	6,62
M12	18,67	2,35	41,93	5,28	45,83	5,79



Мјешавина 1 (100%G + 0%RAP + 100%С + 0%FA (4% везива));
 Мјешавина 2 (100%G + 0%RAP + 80%С + 20%FA (4% везива));
 Мјешавина 3 (100%G + 0%RAP + 60%С + 40%FA (4% везива));

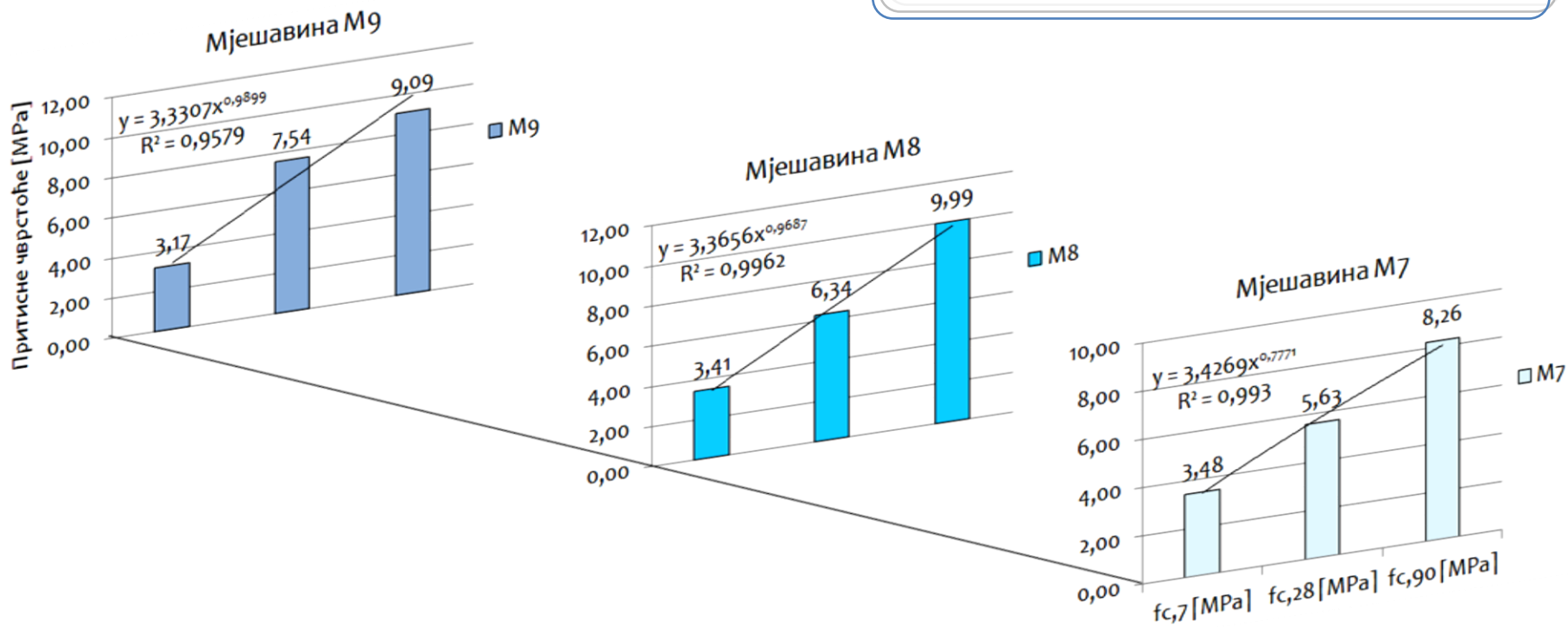
Хистограм 10.3. – Утицај периода његе узорака (7, 28 и 90 дана) на чврстоће при притиску различитих стабилизацијских мјешавина (мјешавине М1, М2, М3)



Мјешавина 4 (70%G + 30%RAP + 100%С + 0%FA (4% везива));
 Мјешавина 5 (70%G + 30%RAP + 80%С + 20%FA (4% везива));
 Мјешавина 6 (70%G + 30%RAP + 60%С + 40%FA (4% везива));

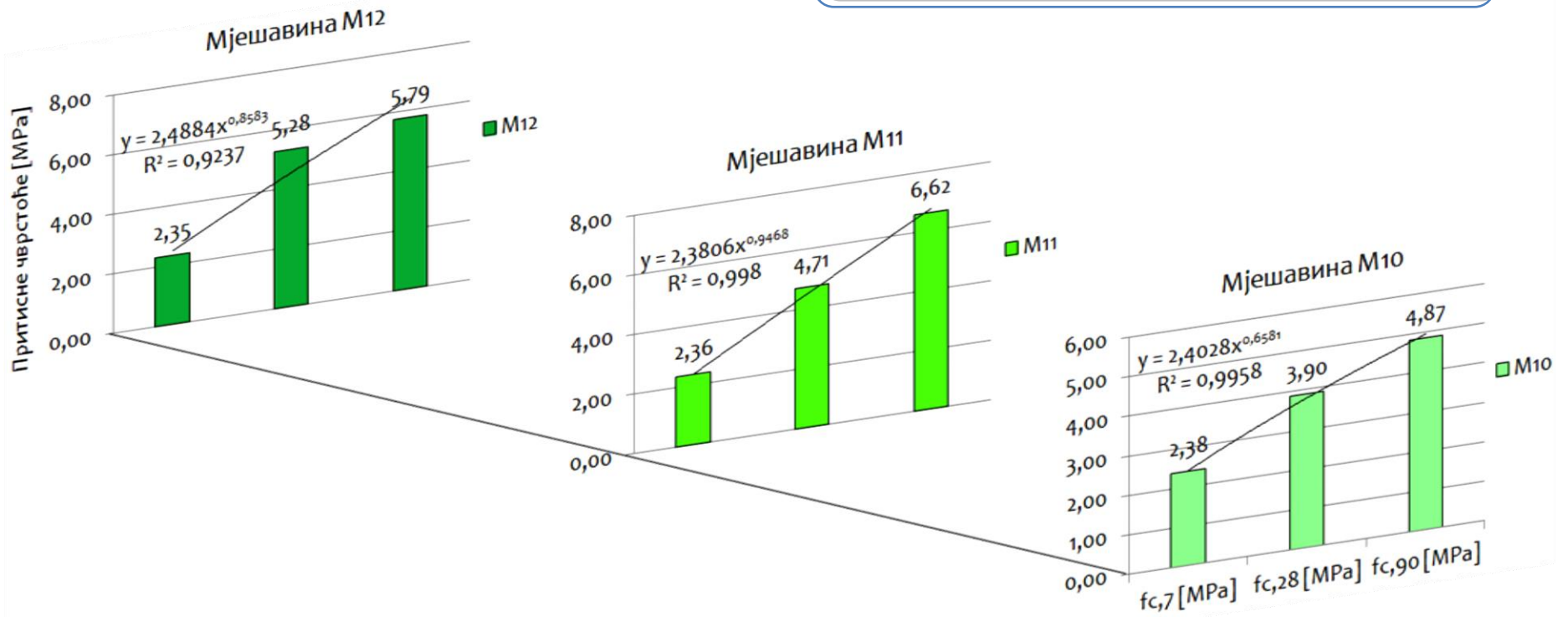
Џистограм 10.4. – Утицај периода његе узорака (7, 28 и 90 дана) на чврстоће при притиску различитих стабилизацијских мјешавина (мјешавине М4, М5, М6)

Мјешавина 7 (100%G + 0%RAP + 100%С + 0%FA (6% везива));
 Мјешавина 8 (100%G + 0%RAP + 80%С + 20%FA (6% везива));
 Мјешавина 9 (100%G + 0%RAP + 60%С + 40%FA (6% везива));

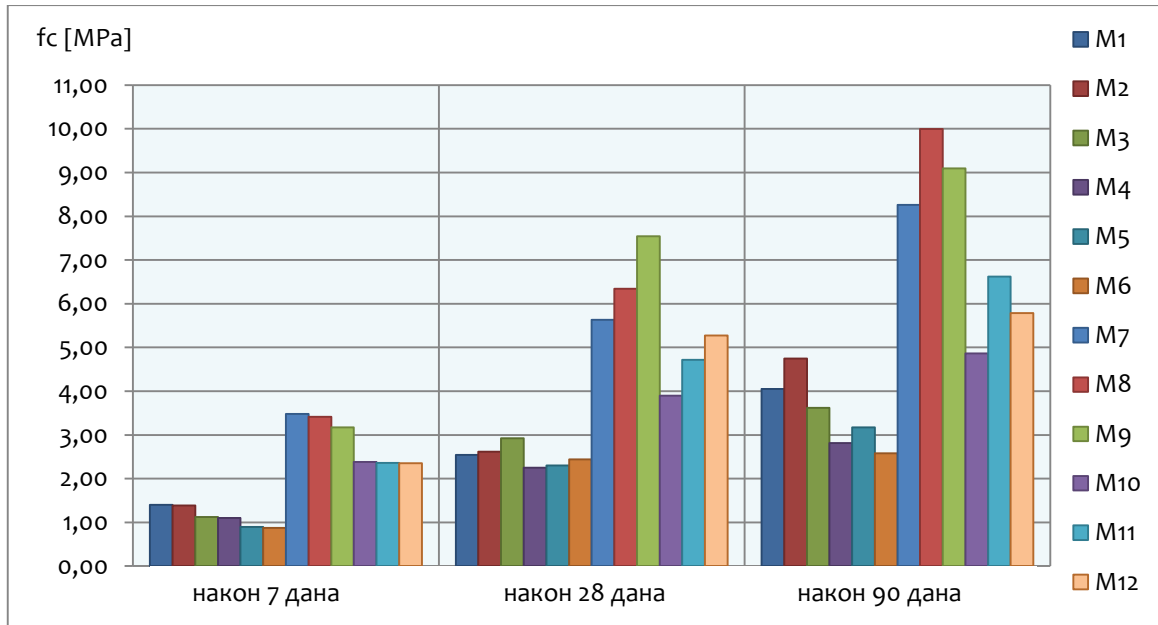


Хистограм 10.5. – Утицај периода њега узорака (7, 28 и 90 дана) на чврстоће при притиску различитих стабилизацијских мјешавина (мјешавине М7, М8, М9)

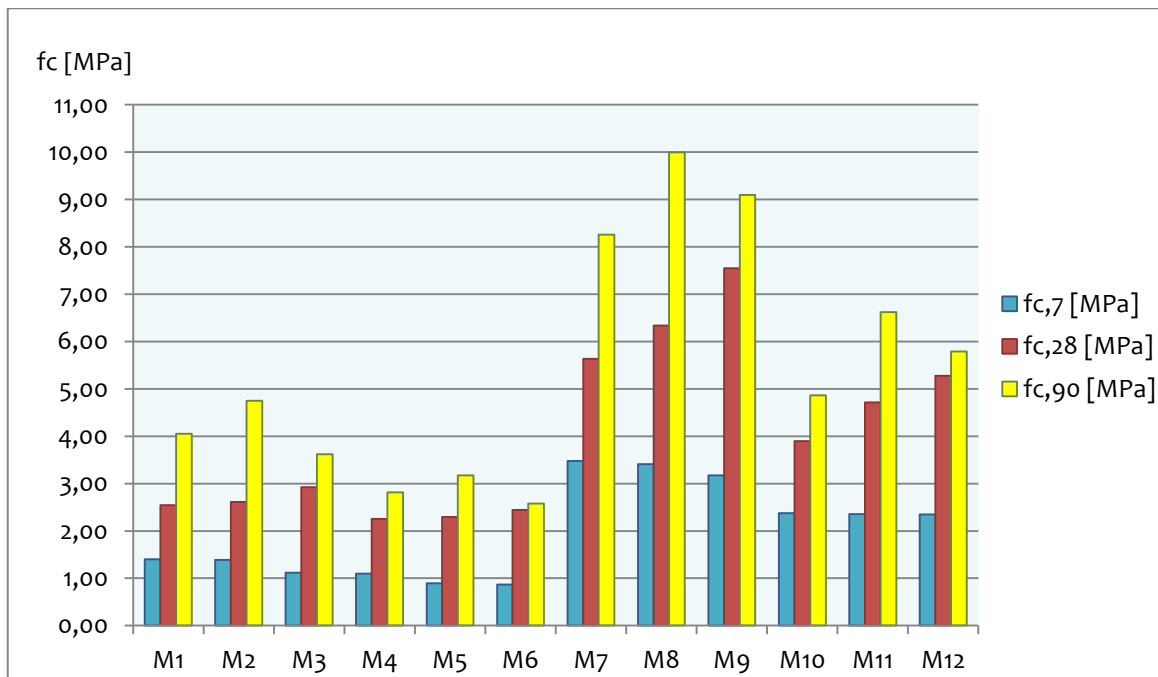
Мјешавина 10 (70%G + 30%RAP + 100%С + 0%FA (6% везива));
 Мјешавина 11 (70%G + 30%RAP + 80%С + 20%FA (6% везива));
 Мјешавина 12 (70%G + 30%RAP + 60%С + 40%FA (6% везива));



Хистограм 10.6. – Утицај периода њега узорака (7, 28 и 90 дана) на чврстоће при притиску различитих стабилизацијских мјешавина (мјешавине М10, М11, М12)



Дијаграм 10.1. – Утицај периода њега узорака на вриједности чврстоћа при притиску (f_c), за различите стабилизацијске мјешавине



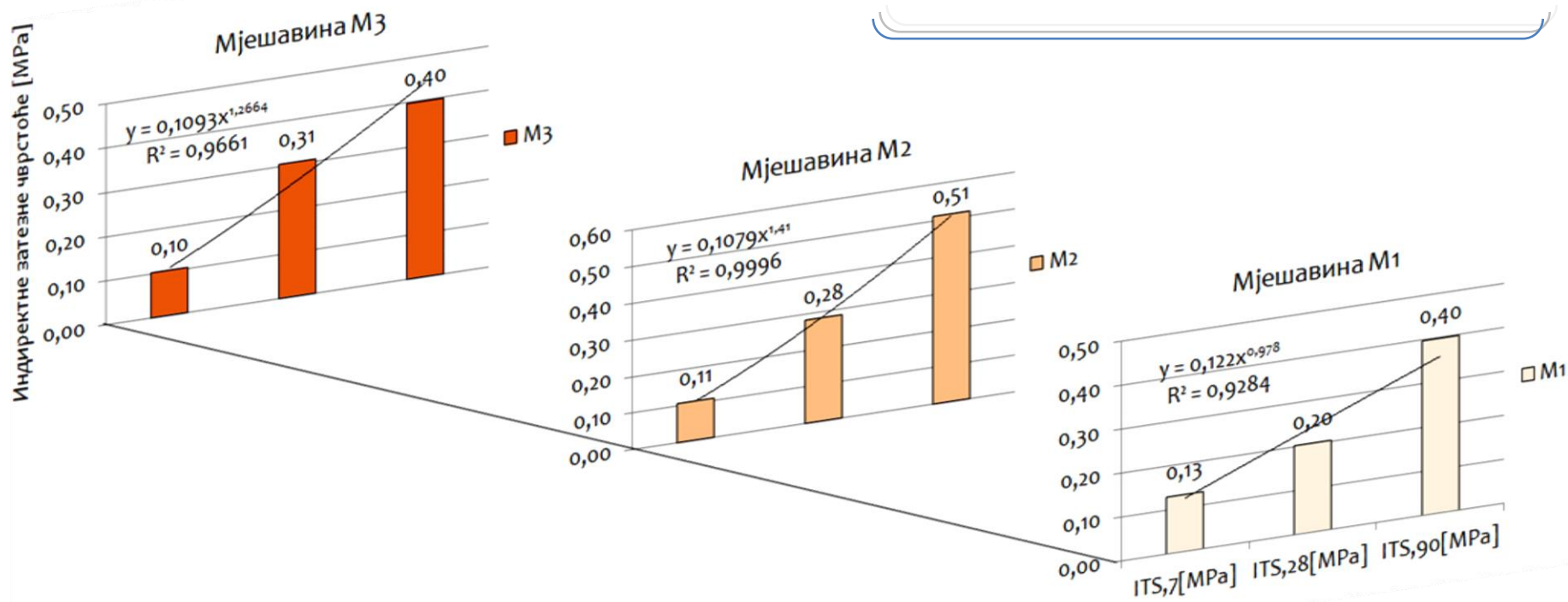
Дијаграм 10.2. – Утицај врсте стабилизацијске мјешавине на вриједности чврстоћа при притиску (f_c), за различите периоде њега узорака

10.5.3. Индиректна затезна чврстоћа и упоредни прикази чврстоћа

Поступак испитивања индиректне затезне чврстоће (ITS) стабилизацијских мјешавина је објашњен у поглављу 6.3.4., а резултати испитивања и међусобна зависност индиректних затезних чврстоћа од различитих утицајних параметара дати су у табели 10.24., на хистограмима 10.7.-10.10. и дијаграмима 10.3. и 10.4. Комплетни резултати појединачних испитивања приказани су у Прилогу 1.. Испитивања индиректних затезних чврстоћа су рађена на основу стандарда SRPS EN 13286-42:2012 [C5].

Табела 10.24. – Средње вриједности сила лома и индиректних затезних чврстоћа стабилизацијских мјешавина, за различите периоде њега узорака

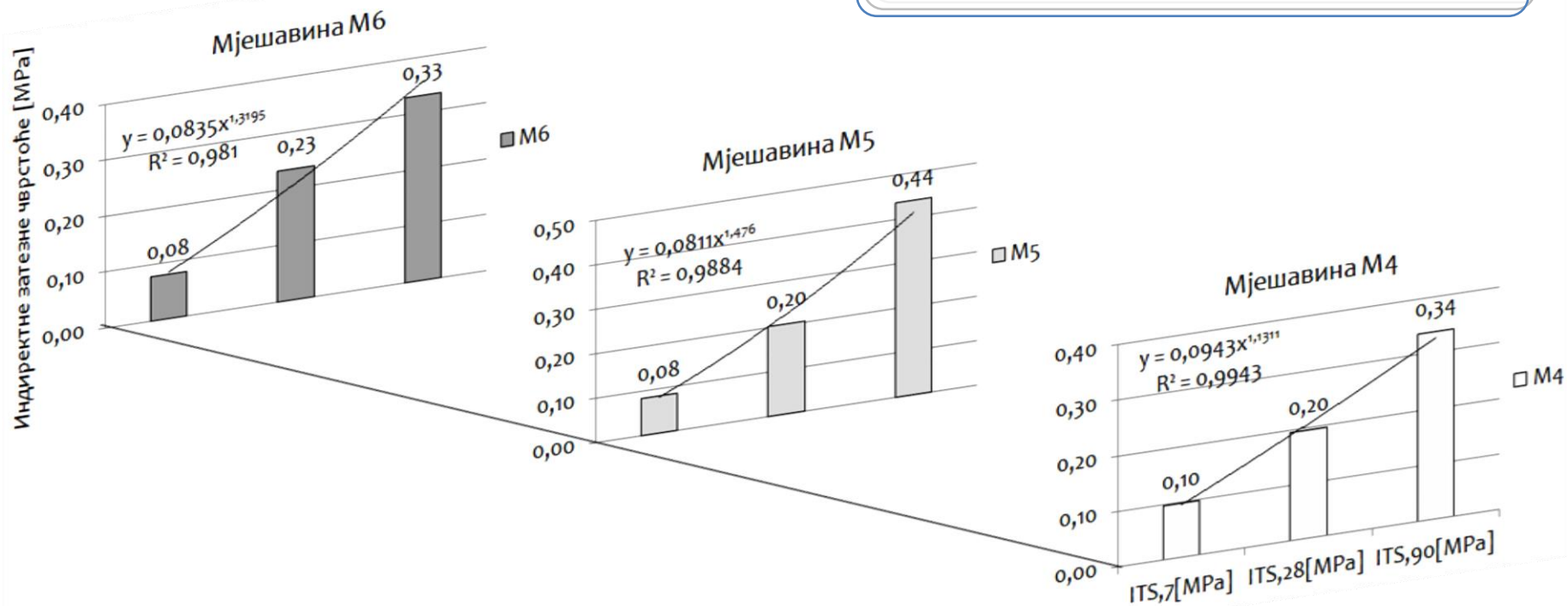
Мјешавина	Силе лома и индиректне затезне чврстоће (ITS) након 7 дана		Силе лома и индиректне затезне чврстоће (ITS) након 28 дана		Силе лома и индиректне затезне чврстоће (ITS) након 90 дана	
	Сила лома, за ITS,7 [kN]	Индиректна затезна чврстоћа - ITS,7 [MPa]	Сила лома, за ITS,7 [kN]	Индиректна затезна чврстоћа - ITS,28 [MPa]	Сила лома, за ITS,7 [kN]	Индиректна затезна чврстоћа - ITS,90 [MPa]
M1	2,50	0,13	3,87	0,20	7,60	0,40
M2	2,07	0,11	5,37	0,28	9,83	0,51
M3	1,97	0,10	5,83	0,31	7,63	0,40
M4	1,83	0,10	3,73	0,20	6,43	0,34
M5	1,63	0,08	3,90	0,20	8,37	0,44
M6	1,50	0,08	4,47	0,23	6,33	0,33
M7	5,57	0,29	9,97	0,52	17,77	0,93
M8	5,57	0,29	10,83	0,57	22,13	1,16
M9	4,57	0,24	13,03	0,69	15,50	0,97
M10	4,77	0,25	8,10	0,42	12,30	0,64
M11	4,67	0,25	9,20	0,48	16,20	0,85
M12	4,27	0,22	9,87	0,52	14,43	0,76



Мјешавина 1 (100%G + 0%RAP + 100%C + 0%FA (4% везива));
 Мјешавина 2 (100%G + 0%RAP + 80%C + 20%FA (4% везива));
 Мјешавина 3 (100%G + 0%RAP + 60%C + 40%FA (4% везива));

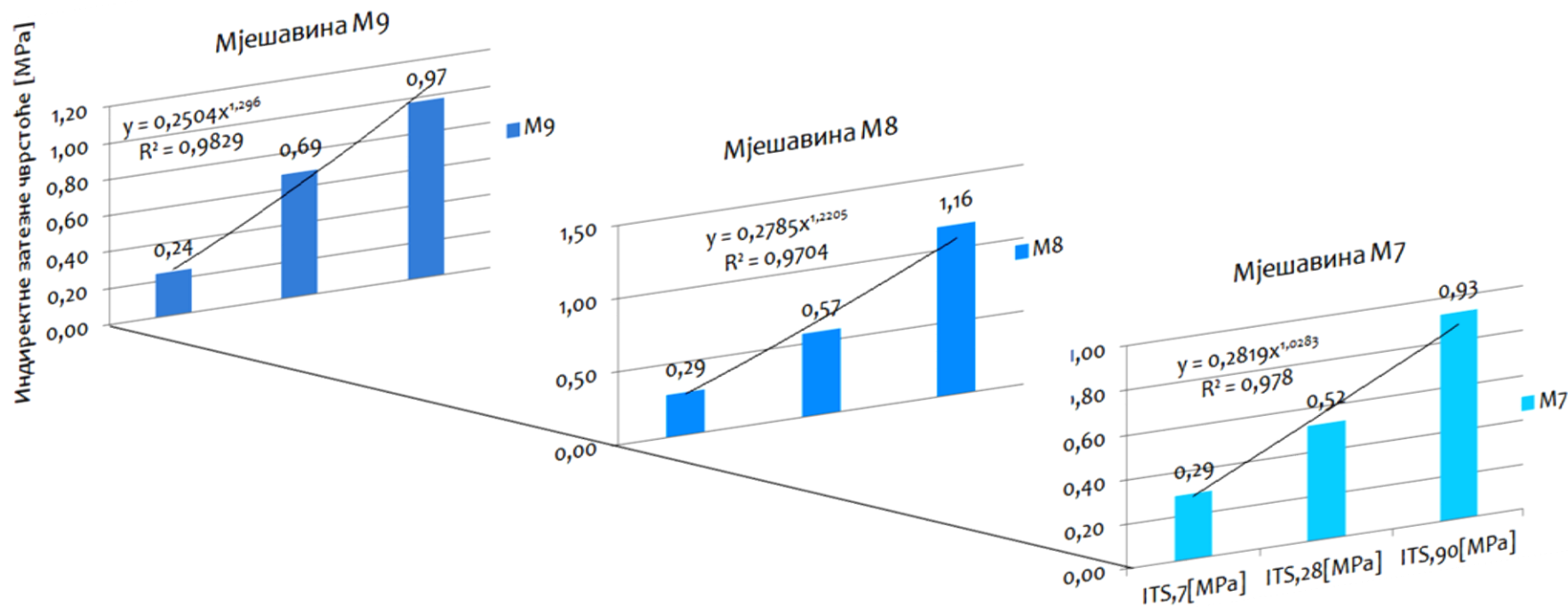
Хистограм 10.7. – Утицај периода његе узорака (7, 28 и 90 дана) на индиректне затезне чврстоће стабилизацијских мјешавина (мјешавине М1, М2, М3)

Мјешавина 4 (70%G + 30%RAP + 100%C + 0%FA (4% везива));
 Мјешавина 5 (70%G + 30%RAP + 80%C + 20%FA (4% везива));
 Мјешавина 6 (70%G + 30%RAP + 60%C + 40%FA (4% везива));



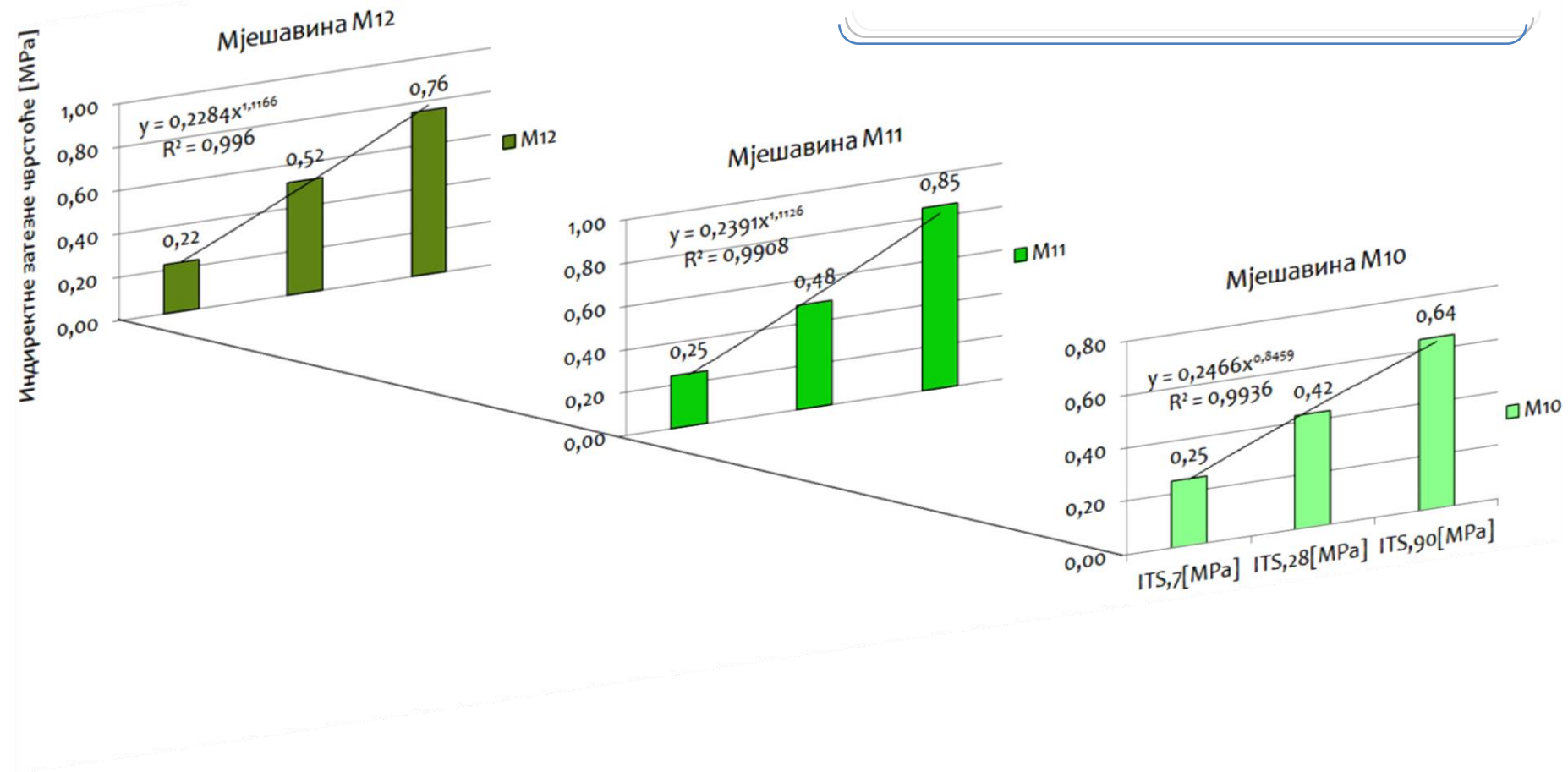
Хистограм 10.8. – Утицај периода њега узорака (7, 28 и 90 дана) на индиректне затезне чврстоће стабилизацијских мјешавина (мјешавине М4, М5, М6)

Мјешавина 7 (100%G + 0%RAP + 100%С + 0%FA (6% везива));
 Мјешавина 8 (100%G + 0%RAP + 80%С + 20%FA (6% везива));
 Мјешавина 9 (100%G + 0%RAP + 60%С + 40%FA (6% везива));

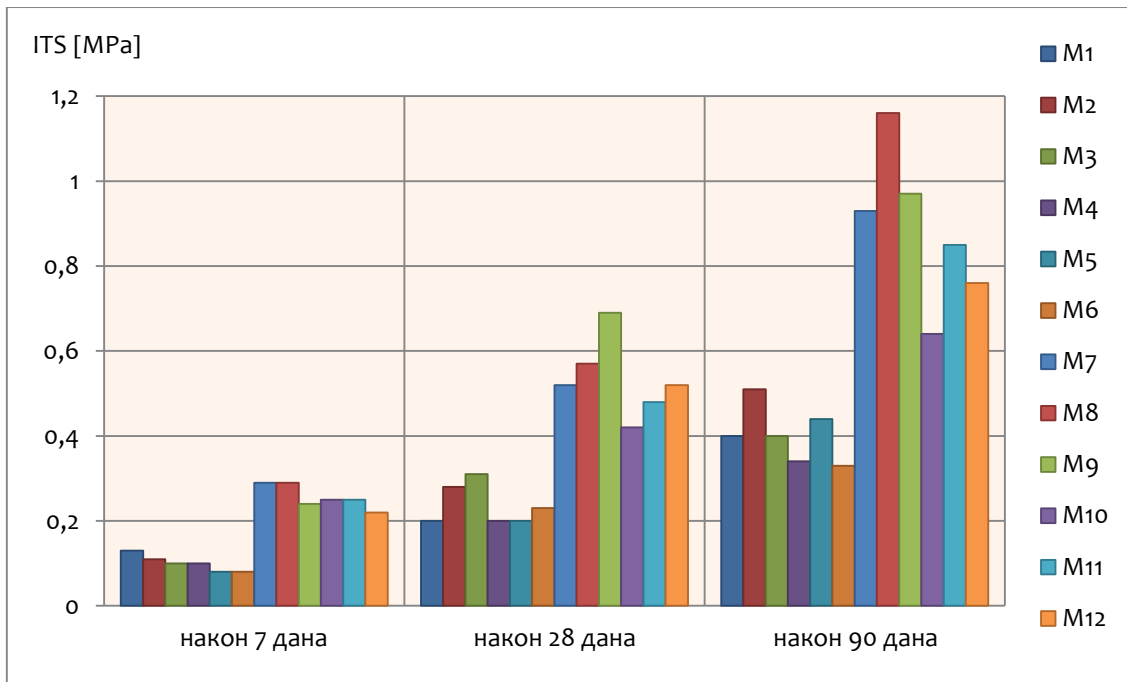


Хистограм 10.9. – Утицај периода њега узорака (7, 28 и 90 дана) на индиректне затезне чврстоће стабилизацијских мјешавина (мјешавине М7, М8, М9)

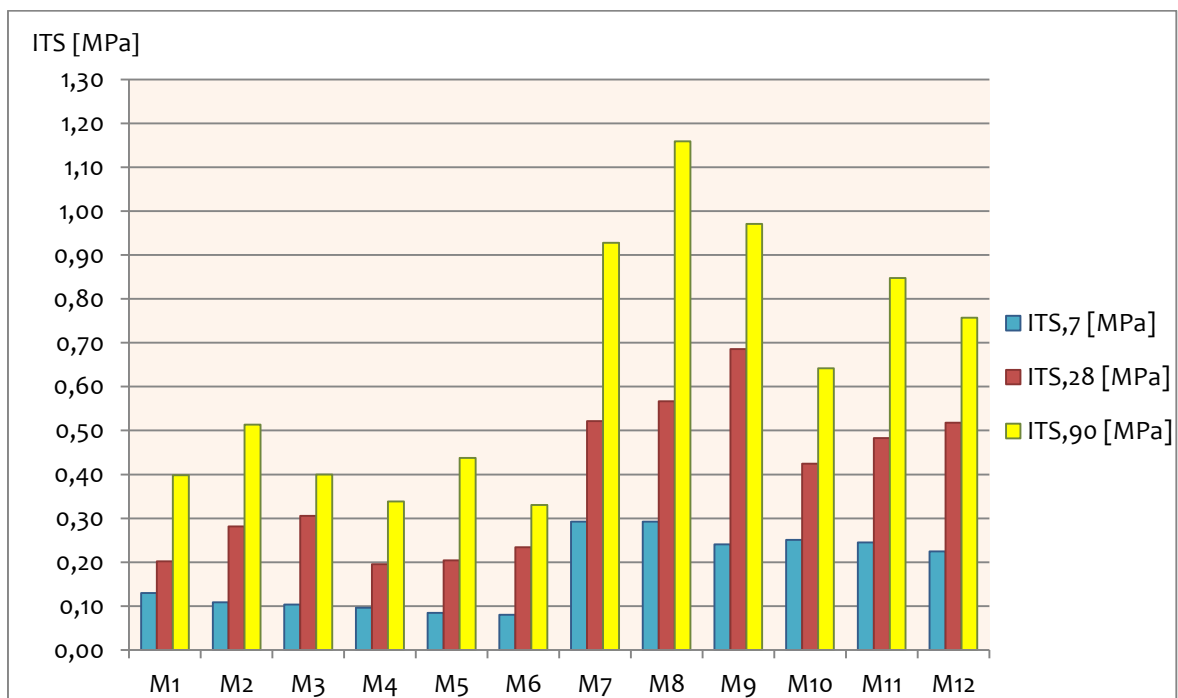
Мјешавина 10 (70%G + 30%RAP + 100%С + 0%FA (6% везива));
 Мјешавина 11 (70%G + 30%RAP + 80%С + 20%FA (6% везива));
 Мјешавина 12 (70%G + 30%RAP + 60%С + 40%FA (6% везива));



Хистограм 10.10. – Утицај периода њега узорака (7, 28 и 90 дана) на индиректне затезне чврстоће стабилизацијских мјешавина (мјешавине М10, М11, М12)



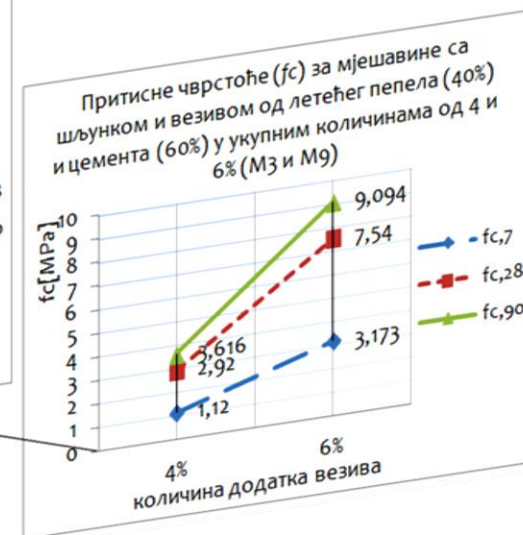
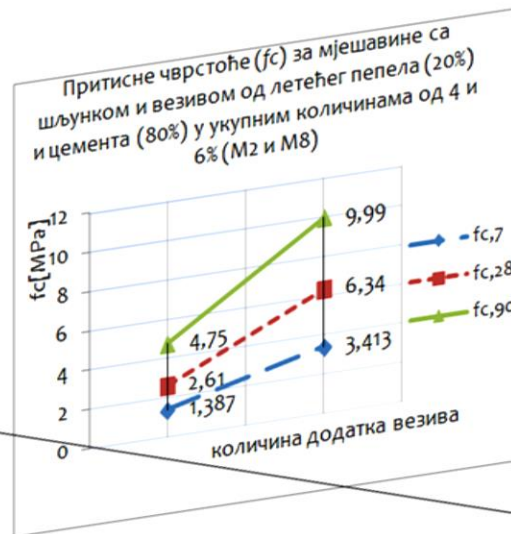
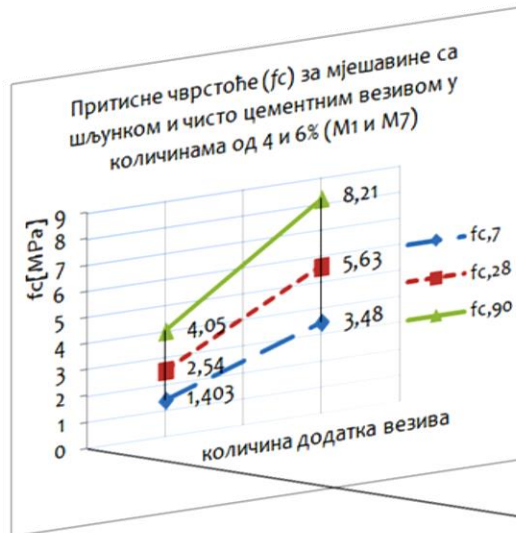
Дијаграм 10.3. – Утицај периода њега узорака на вриједности индиректних затезних чврстоћа (ITS), за различите стабилизацијске мјешавине



Дијаграм 10.4. – Утицај врсте стабилизацијске мјешавине на вриједности индиректних затезних чврстоћа (ITS), за различите периоде њега узорака

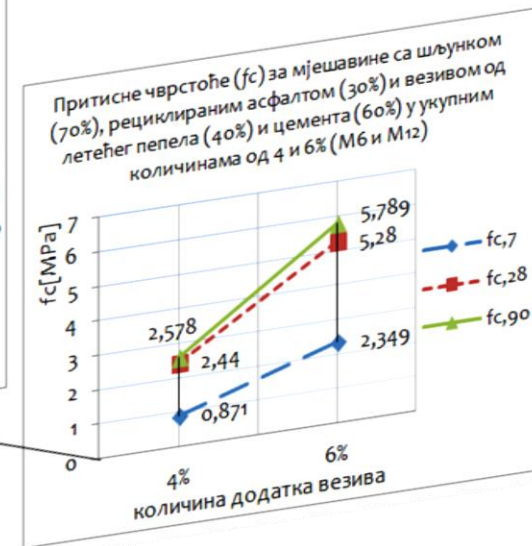
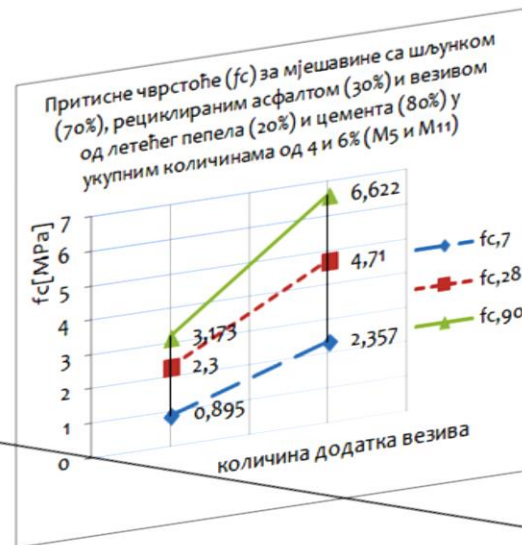
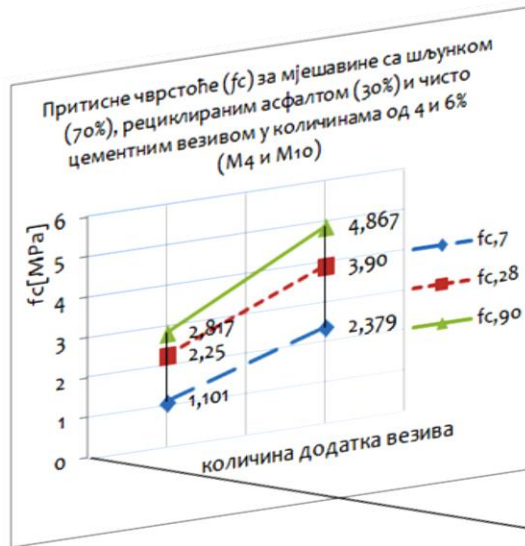
Зависности чврстоћа при притиску и индиректних затезних чврстоћа од укупне количине додатка везива у мјешавинама дате су на хистограмима 10.11.-10.14.. Упоредни приказ наведених чврстоћа, за исте периоде њега узорака, приказан је на дијаграму 10.5., а њихова међусобна зависност на графикону 10.16..

Мјешавина 1 (100%G + 0%RAP + 100%С + 0%FA (4% везива));
 Мјешавина 7 (100%G + 0%RAP + 100%С + 0%FA (6% везива));
 Мјешавина 2 (100%G + 0%RAP + 80%С + 20%FA (4% везива));
 Мјешавина 8 (100%G + 0%RAP + 80%С + 20%FA (6% везива));
 Мјешавина 3 (100%G + 0%RAP + 60%С + 40%FA (4% везива));
 Мјешавина 9 (100%G + 0%RAP + 60%С + 40%FA (6% везива));



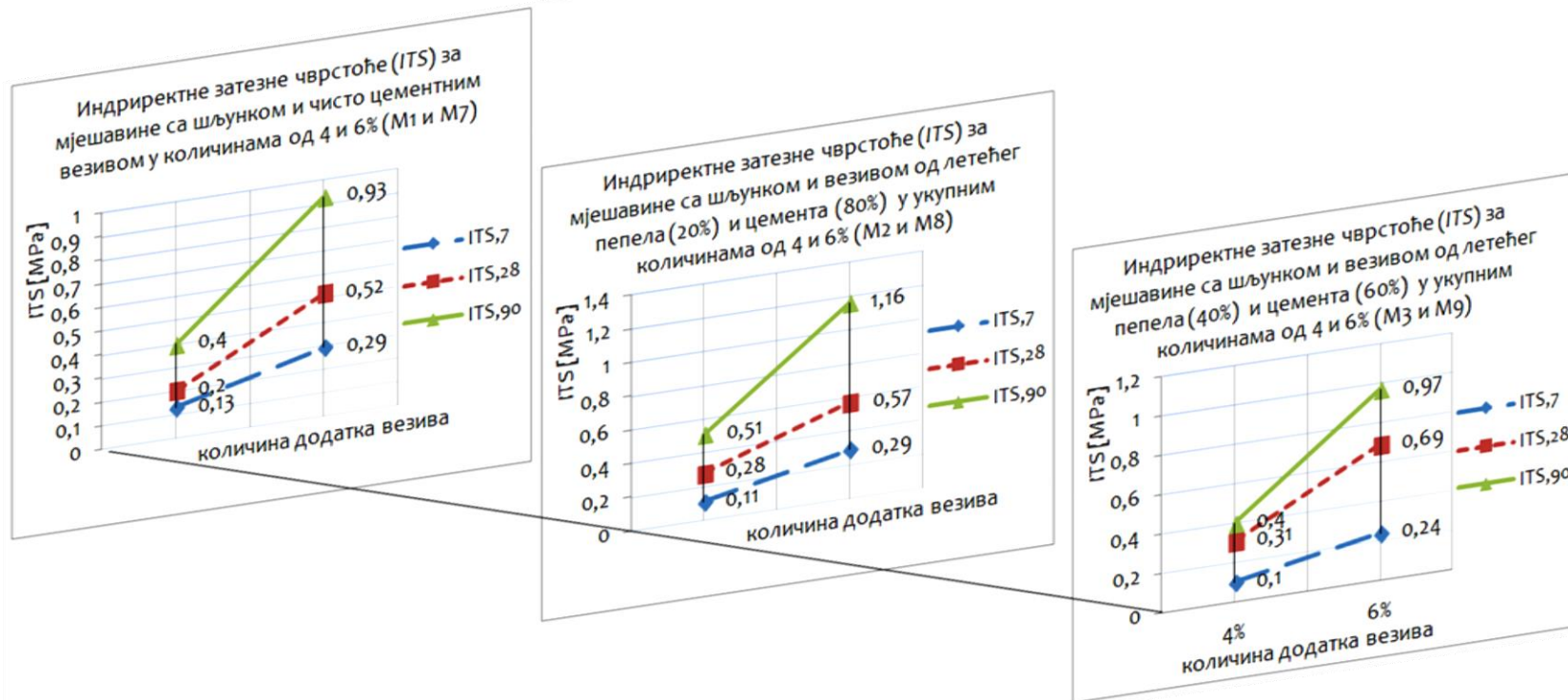
Хистограм 10.11. – Промјена вриједности чврстоћа при притиску (f_c) у зависности од укупне количине везива и периода њега узорака, за стабилизацијске мјешавине од чисто природног агрегата шљунка (100%G)

- Мјешавина 4 (70%G + 30%RAP + 100%C + 0%FA (4% везива));
- Мјешавина 10 (70%G + 30%RAP + 100%C + 0%FA (6% везива));
- Мјешавина 5 (70%G + 30%RAP + 80%C + 20%FA (4% везива));
- Мјешавина 11 (70%G + 30%RAP + 80%C + 20%FA (6% везива));
- Мјешавина 6 (70%G + 30%RAP + 60%C + 40%FA (4% везива));
- Мјешавина 12 (70%G + 30%RAP + 60%C + 40%FA (6% везива));



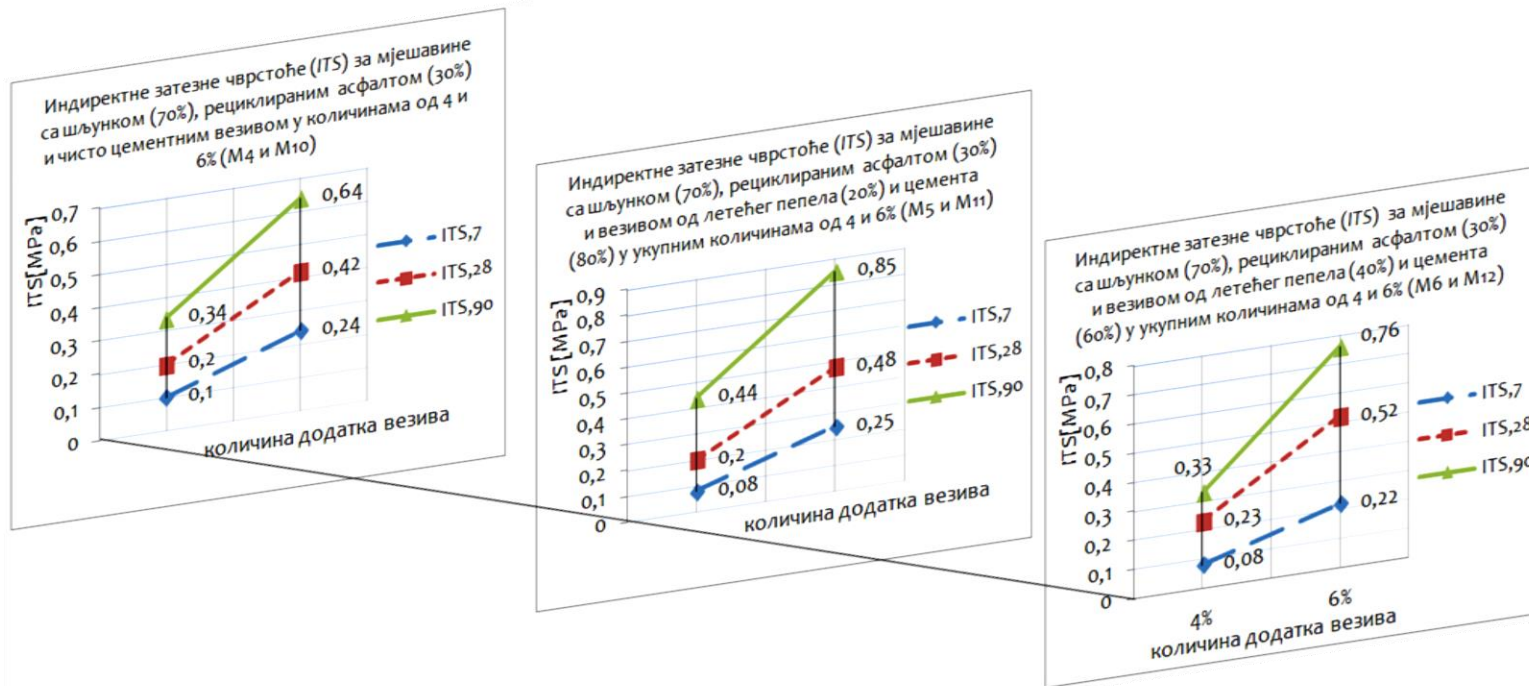
Хистограм 10.12. – Промјена вриједности чврстоћа при притиску (f_c) у зависности од укупне количине везива и периода њега узорака, за стабилизацијске мјешавине од природног агрегата шљунка (70%G) и рециклираног асфалтног застора (30%RAP)

- Мјешавина 1 (100%G + 0%RAP + 100%С + 0%FA (4% везива));
- Мјешавина 7 (100%G + 0%RAP + 100%С + 0%FA (6% везива));
- Мјешавина 2 (100%G + 0%RAP + 80%С + 20%FA (4% везива));
- Мјешавина 8 (100%G + 0%RAP + 80%С + 20%FA (6% везива));
- Мјешавина 3 (100%G + 0%RAP + 60%С + 40%FA (4% везива));
- Мјешавина 9 (100%G + 0%RAP + 60%С + 40%FA (6% везива));

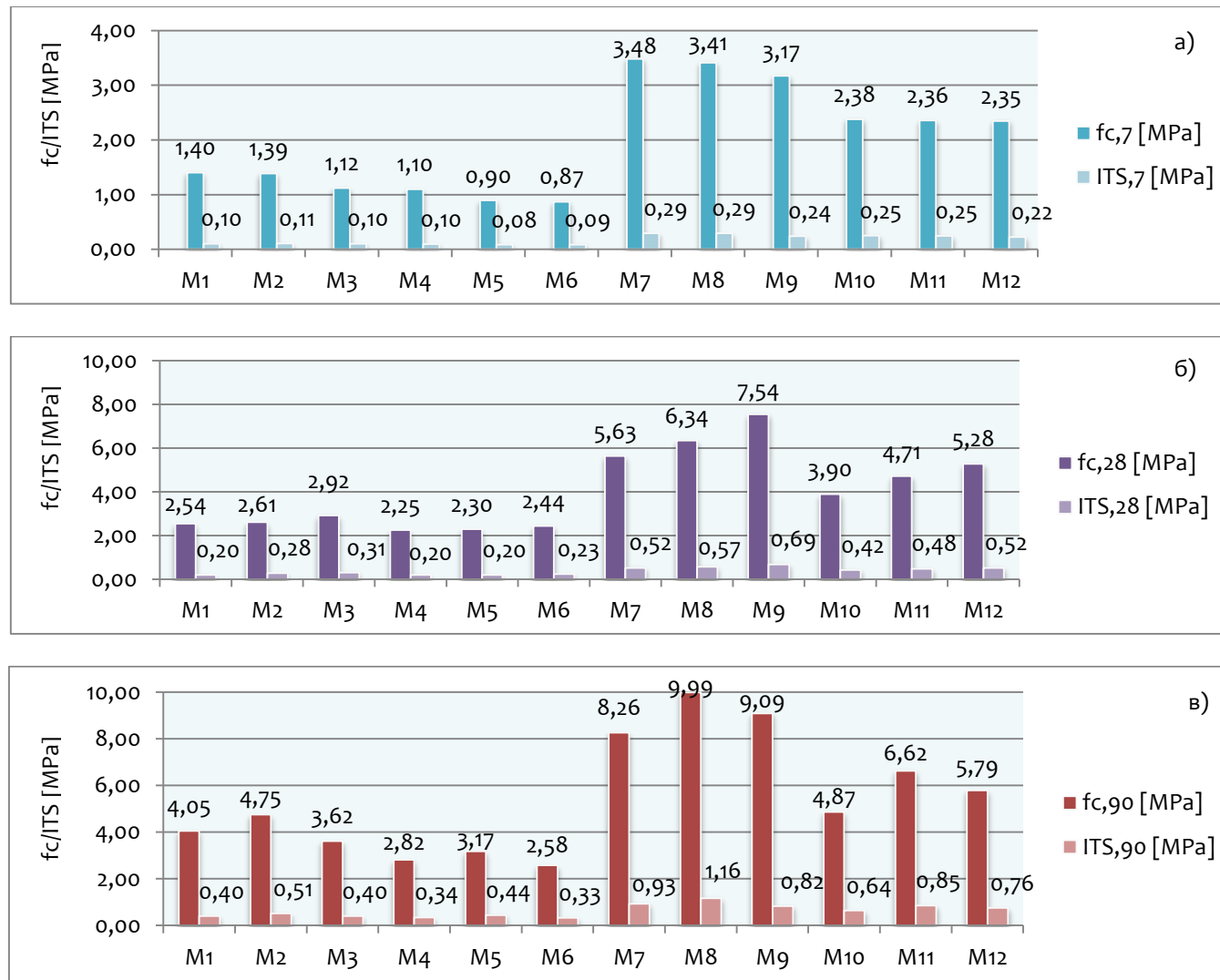


Хистограм 10.13. – Промјена вриједности индиректних затезних чврстоћа (ITS) у зависности од укупне количине везива и периода њега узорака, за стабилизацијске мјешавине од чисто природног агрегата шљунка (100%G)

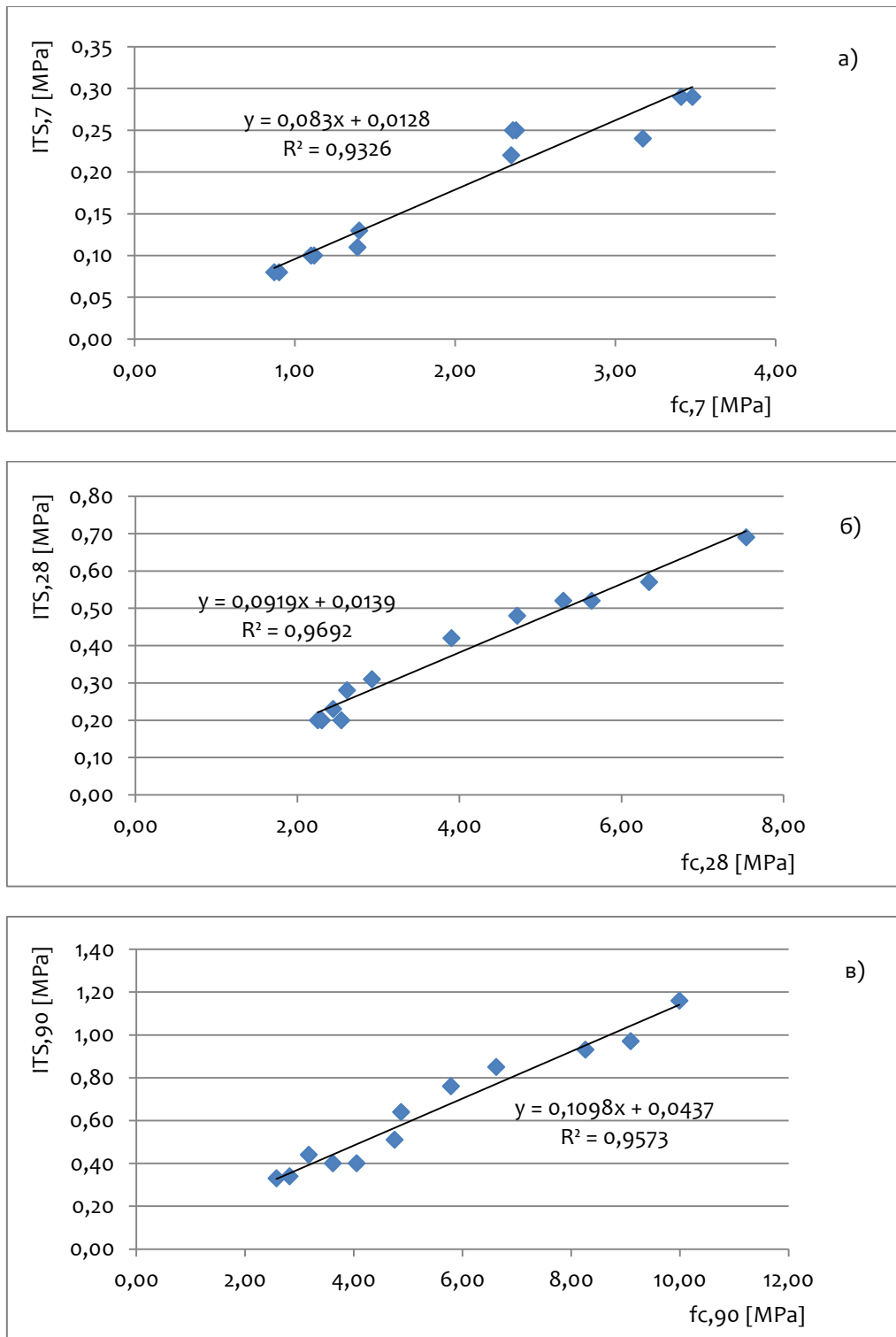
Мјешавина 4 (70%G + 30%RAP + 100%С + 0%FA (4% везива));
 Мјешавина 10 (70%G + 30%RAP + 100%С + 0%FA (6% везива));
 Мјешавина 5 (70%G + 30%RAP + 80%С + 20%FA (4% везива));
 Мјешавина 11 (70%G + 30%RAP + 80%С + 20%FA (6% везива));
 Мјешавина 6 (70%G + 30%RAP + 60%С + 40%FA (4% везива));
 Мјешавина 12 (70%G + 30%RAP + 60%С + 40%FA (6% везива));



Хистограм 10.14. – Промјена вриједности индиректних затезних чврстоћа (ITS) у зависности од укупне количине везива и периода њега узорака, за стабилизацијске мјешавине од природног агрегата шљунка (70%G) и рециклираног асфалтног застора (30%RAP)



Дијаграм 10.5. – Упоредни приказ вриједности чврстоћа при притиску (f_c) и индиректних затезних чврстоћа (ITS): а) након 7 дана, б) након 28 дана, в) након 90 дана њега узорака



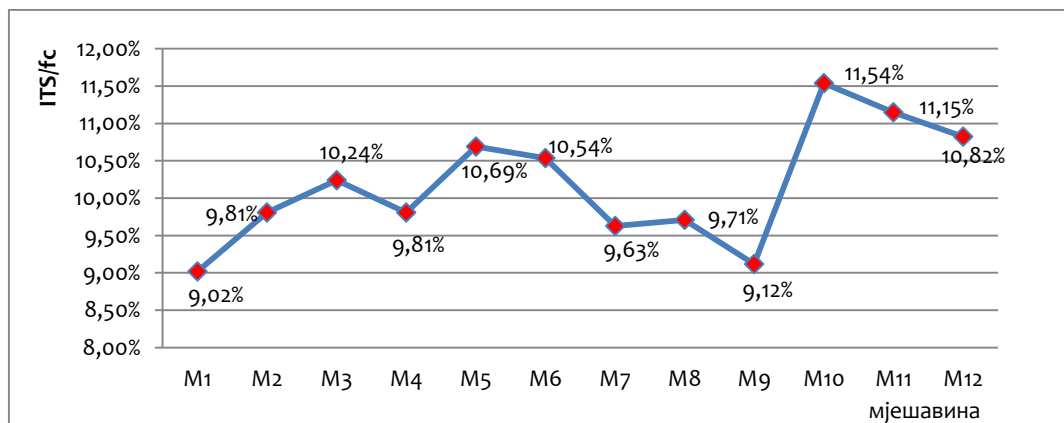
Графикон 10.16. – Међусобна зависност чврстоћа при притиску (f_c) и индиректних затезних чврстоћа (ITS): а) након 7 дана, б) након 28 дана и в) након 90 дана њега узорака

Однос вриједности индиректних затезних чврстоћа (ITS) у поређењу са чврстоћама при притиску цементних стабилизација (f_c) кретале су се у границама карактеристичним за стандардне бетонске мјешавине (табела 10.25.), а те вриједности најчешће су износиле око 10% (по аутору В.Вабичу [10] тај однос је износио 12%). Детаљније анализирано дати односи чврстоћа су се кретали од 9,06% (за узорке његоване 7 дана) до 11,91% (за узорке његоване 90 дана). Односи наведених чврстоћа, у зависности од периода њега узорака и састава стабилизацијских мјешавина, поред графикана 10.16., дати су у табели 10.25..

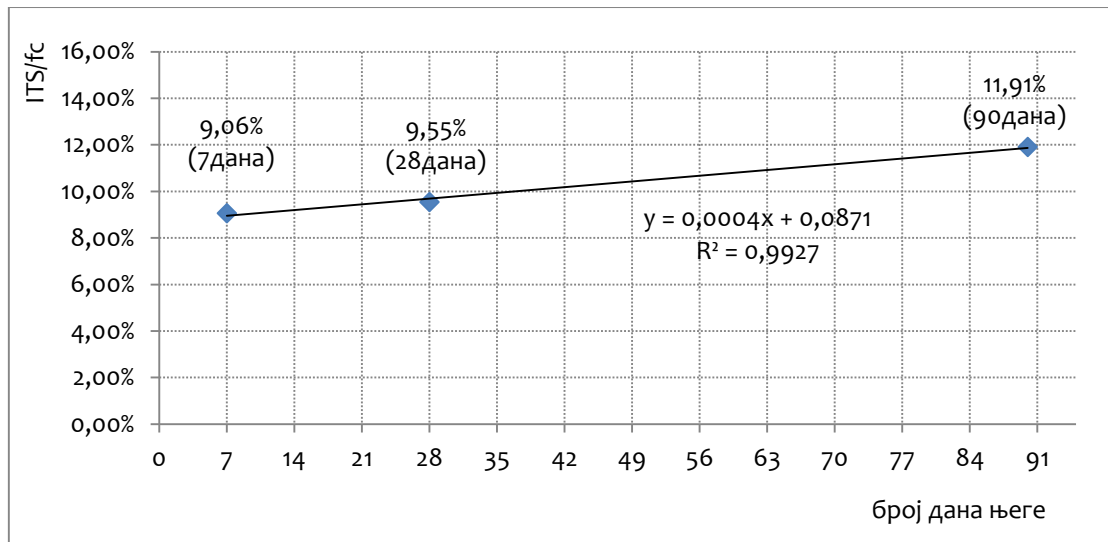
Табела 10.25. – Процентуални однос вриједности индиректних затезних чврстоћа (ITS) и чврстоћа при притиску (f_c), у зависности од врсте стабилизацијске мјешавине и периода њега узорака

Мјешавина	процентуални однос ITS_7/f_{c7} [%]	процентуални однос ITS_{28}/f_{c28} [%]	процентуални однос ITS_{90}/f_{c90} [%]	просјечне вриједности ITS -а у односу на f_c [%]
M1	9,27	7,95	9,83	9,02
M2	7,83	10,77	10,82	9,81
M3	9,23	10,44	11,05	10,24
M4	8,74	8,68	12,00	9,81
M5	9,41	8,87	13,79	10,69
M6	9,19	9,59	12,83	10,54
M7	8,40	9,26	11,23	9,63
M8	8,58	8,94	11,60	9,71
M9	7,58	9,08	10,68	9,12
M10	10,53	10,90	13,19	11,54
M11	10,40	10,24	12,80	11,15
M12	9,57	9,82	13,08	10,82
збирно за све мјешавине, за наведене периоде њега	$(\sum(ITS_7/f_{c7})) / 12$	$(\sum(ITS_{28}/f_{c28})) / 12$	$(\sum(ITS_{90}/f_{c90})) / 12$	$(\sum(ITS_{SR}/f_{CSR})) / 12$
	9,06	9,55	11,91	10,17

Просјечни односи индиректних затезних чврстоћа (ITS) и чврстоћа при притиску (f_c) цементних стабилизација (посматрано за све периоде њега), као и њихова зависност од састава мјешавине дати су на графикану 10.17., док је дата зависност у односу на период њега узорака приказана на графикану 10.18..



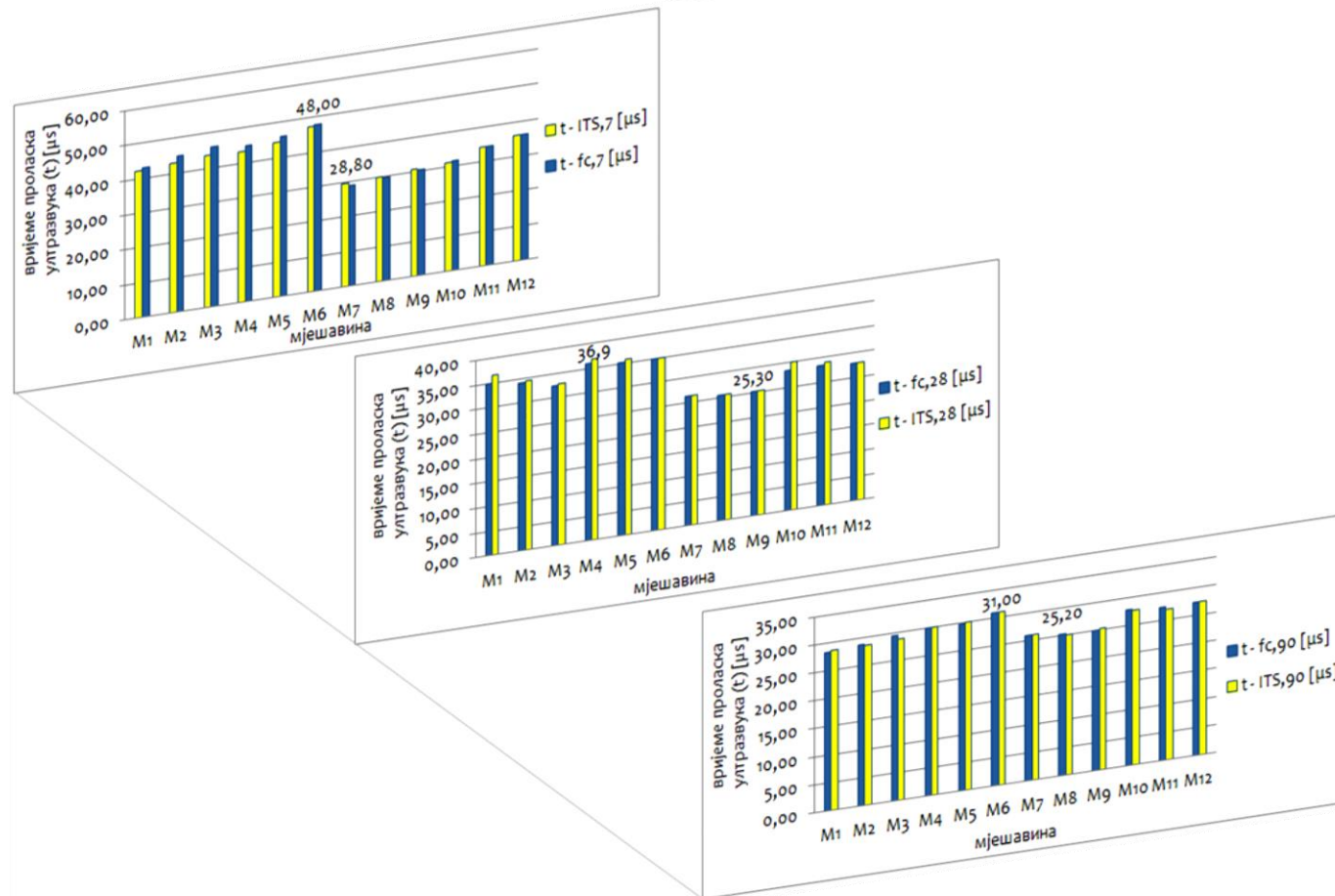
Графикон 10.17. – Зависност просјечног односа чврстоћа (ITS/f_c), за различите стабилизацијске мјешавине



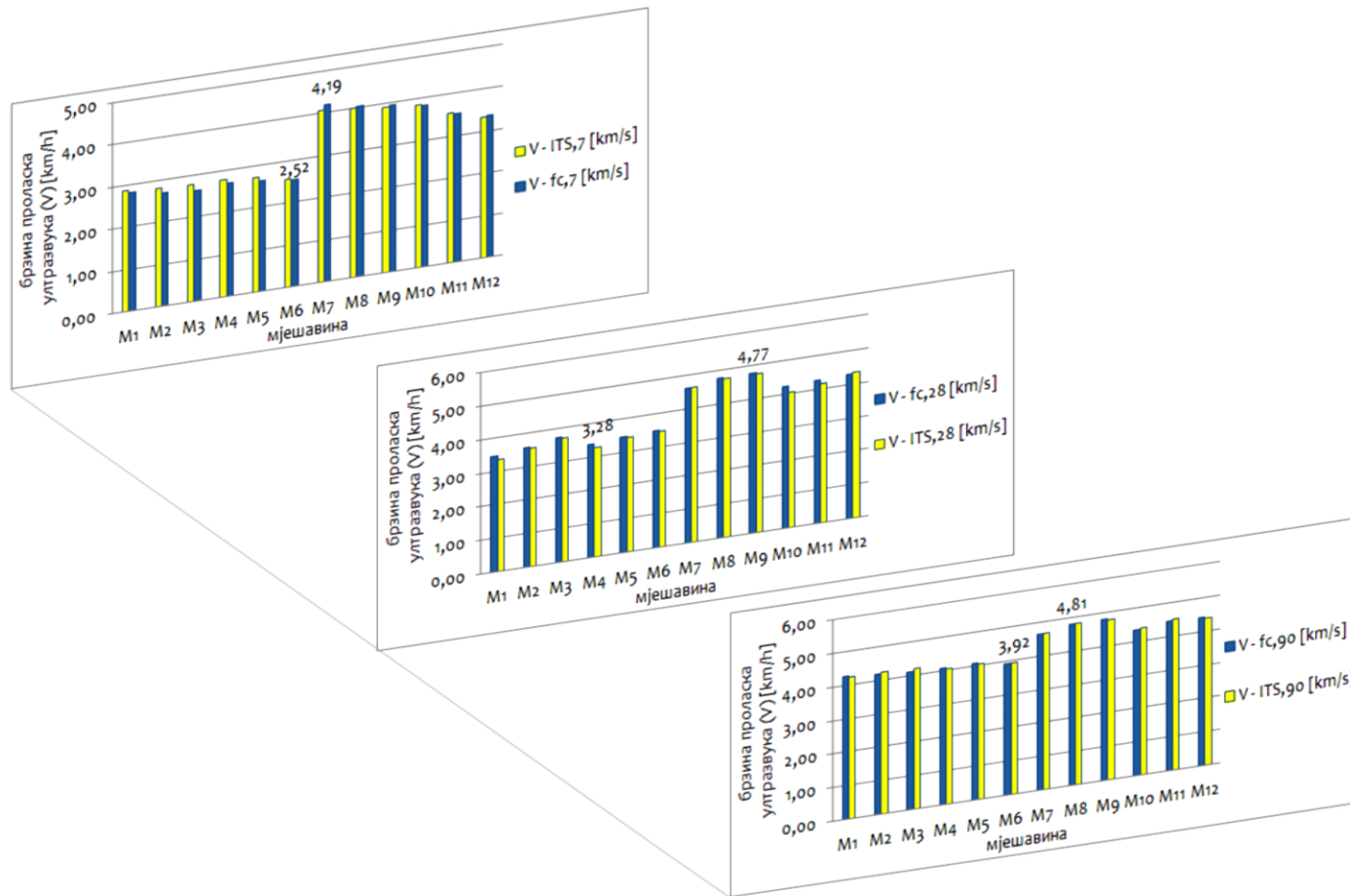
Графикон 10.18. – Зависност просјечног односа чврстоћа (ITS/fc), за различите периоде њега узорка

10.5.4. Вријеме и брзина проласка ултразвука

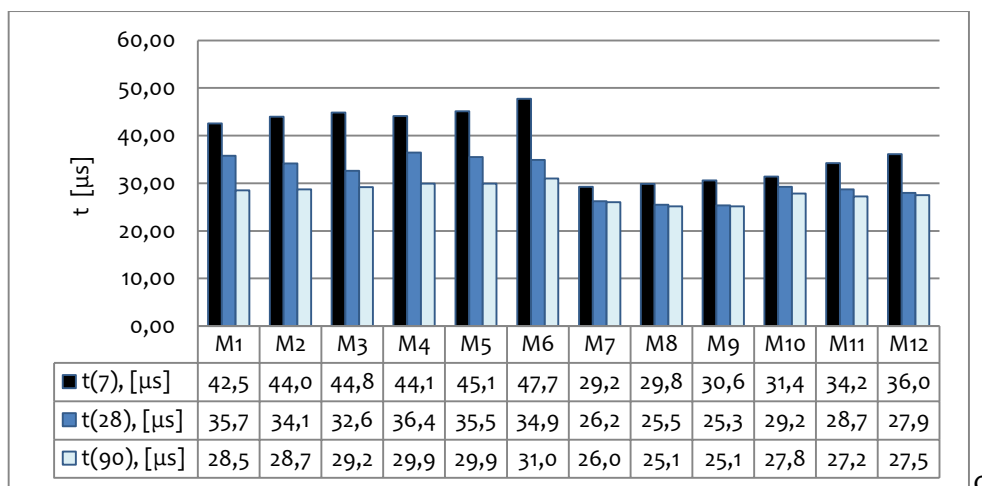
Вријеме (t) и брзина проласка ултразвука (V_t) су физичке карактеристике на основу којих се може анализирати компактност и збијеност узорака датих мјешавина, као и еластичне карактеристике стабилизација. Вријеме проласка ултразвука, у овом експерименталном истраживању, одређено је коришћењем инструмента PUNDIT (слика 6.12.), на цилиндричним узорцима непосредно прије поступка испитивања механичких карактеристика стабилизација. Емитер сигнала је за вријеме проласка ултразвука био постављен на једној кружној основи узорака, а пријемник на другој (слика 6.13.). Након одређивања времена проласка ултразвука (за све справљене стабилизацијске узорке) и на основу податка о висинама узорака (h), израчунате су брзине проласка ултразвука. Брзина и вријеме проласка ултразвучних таласа кроз узорке различитих стабилизацијских мјешавина дати су у Прилогу 1., а упоредни приказ датих резултата је приказан на хистограмима 10.15. и 10.16., као и на дијаграмима 10.6. и 10.7.. Анализом датих резултата може се закључити да се брзина проласка ултразвука повећавала са повећањем периода њега стабилизацијских мјешавина.



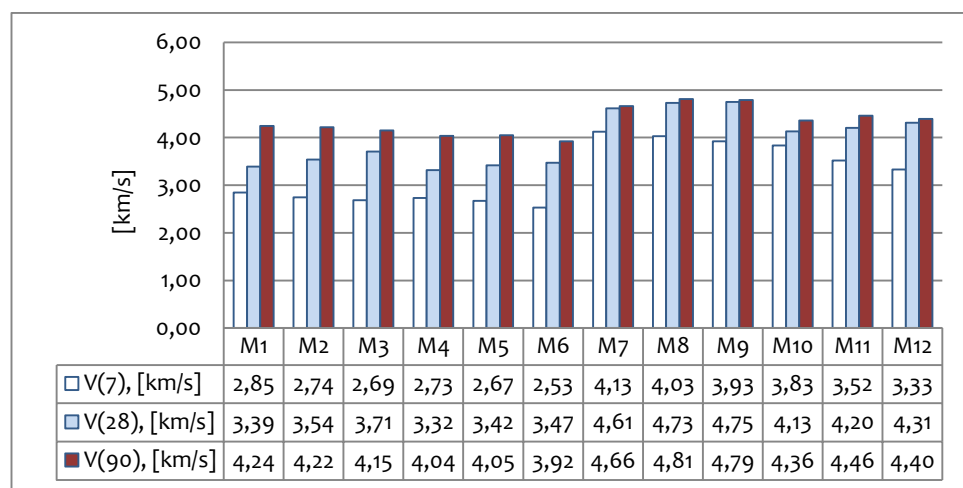
Хистограм 10.15. – Вријеме проласка ултразвука (t) [μs] за различите стабилизацијске мјешавине и различите периоде његе узорака (7, 28 и 90 дана), справљених за испитивање чврстоћа при притиску (fc) и индиректних затезних чврстоћа (ITS)



Хистограм 10.16. – Брзина проласка ултразвука (V_t) [km/s] за различите стабилизацијске мјешавине и различите периоде њега узорака (7, 28 и 90 дана), справљених за испитивање чврстоћа при притиску (f_c) и индиректних затезних чврстоћа (ITS)



Дијаграм 10.6. – Просјечно вријеме проласка ултразвука (t) [μs] за различите стабилизацијске мјешавине и различите периоде њега узорака



Дијаграм 10.7. – Просјечна брзина проласка ултразвука (V_t) [km/s] за различите стабилизацијске мјешавине и различите периоде њега узорака

10.6. Анализа резултата експерименталног истраживања

У овом експерименталном истраживању анализирани су могућности замјене природног агрегата шљунка са рециклираним асфалрним агрегатом (RAP-ом) и цементног везива са електрофилтерским летећим пепелом у изради цементних стабилизација коловозних конструкција. Укупно је справљено 12 стабилизацијских мјешавина са различитим учешћима компонентних материјала. Укупна количина везива је износила 4 и 6% мас у односу на агрегат. Летећи пепео је у мјешавинама третиран као везивни материјал, а његово учешће је износило 0, 20 или 40% мас, у односу на количину цемента. Учешће RAP-а у мјешавинама је износило 0 или 30% мас, у односу на количину природног агрегата шљунка. Наведене количине и процентуална учешћа појединих компонентних материјала су дефинисана на основу детаљне анализе доступне домаће и стране литературе и искуствених препорука. Са већом примјеном рециклираних материјала, од датих количина, не би се могле остварити потребне физичко-механичке карактеристике очврслих цементних

стабилизација коловозних конструкција, што је био лимитирајући фактор у дефинисању учешћа компонентних материјала.

Најбитније механичке карактеристике цементних стабилизација коловозних конструкција су чврстоћа при притиску (f_c) и индиректна затезна чврстоћа (ITS), одређена тзв. *бразилским опитом цијепања*. У лабораторијском истраживању, спроведеном у оквиру израде ове докторске дисертације, од укупно 216 стабилизацијских узорака (за 12 различитих мјешавина), на по 108 стабилизацијских узорака су одређене чврстоће при притиску и индиректне затезне чврстоће. Мјеродавне вриједности чврстоћа одређене мјешавине (за тачно дефинисан период његе узорака) су дефинисане на основу резултата просјечних вриједности чврстоћа одређених на три стабилизацијска узорка. За одређивање наведених чврстоћа цементних стабилизација коришћене су деструктивне методе испитивања, па су из тог разлога испитивања чврстоћа била посљедња метода испитивања у одређивању физичко-механичких карактеристика стабилизација. Прије одређивања чврстоћа одређене су запреминске масе (на основу димензија и маса појединачних узорака), као и времена и брзине проласка улразвучних таласа кроз стабилизацијске узорке. Појединачни резултати испитивања су дати у Прилогу 1., а фотографије које су настале у току лабораторијског истраживања у Прилогу 2..

Појединачне запреминске масе за свих 12 стабилизацијских мјешавина су одређене на свих 216 стабилизацијских узорака (Прилог 1.). Вриједности маса које су коришћене у прорачуну запреминских маса узорака су одређене прије поступка испитивања механичких карактеристика стабилизација. Са повећањем учешћа летећег пепела (од 0 до 40%), у мјешавинама са истим саставом агрегата и укупном количином везива, вриједности запреминских маса биљежиле су благи раст. Већа разлика се уочавала код анализе запреминских маса код мјешавина са додатком рециклираног асфалтног агрегата. Наиме, са повећањем учешћа рециклираног асфалтног агрегата у мјешавинама вриједности запреминских маса су се смањивале, за оба учешћа укупне количине везива (и 4 и 6%*mas*). На *хистограму 10.1.* су приказане појединачне вриједности запреминских маса у зависности од тога да ли су рађене на узорцима који су припремани за одређивање чврстоћа при притиску или индиректних затезних чврстоћа. Очекивано, значајнија разлика у добијеним резултатима испитивања није утврђена.

Мјерењем масе узорака, након поступка справљања и прије поступка испитивања, дефинисана је и промјена масе стабилизацијских узорака која се јавља у току периоду његе. Статистичком обрадом појединачних резултата испитивања утврђено је да је губитак масе на узорцима старости 7 дана у просјеку износио око 5g, на узорцима старости 28 дана око 9g, а на узорцима старости 90 дана разлика у масама је просјечно износила око 25g. Напомене ради, узорци су након справљања његовани на температури од 20°C и при влажности од 90%.

Вријеме и брзина проласка улразвука су такође одређени на свих 216 стабилизацијских узорака, непосредно прије испитивања чврстоћа цементних стабилизација, а збирни резултати испитивања су приказани на *дијаграмима 10.6.* и *10.7.* На основу одређеног времена проласка улразвука и познате висине узорка физичком релацијом су одређене брзине проласка улразвучног таласа, чије вриједности су обрнуто пропорционалне времену његовог проласка. Са повећањем периода његе узорака вријеме проласка улразвучног таласа се смањивало, а то смањење је посебно било изражено код мјешавина са 4%*mas* додатка везива и у

просјеку је износило 33,9% (поређење узорка старости 7 и 90 дана), док је за мјешавине са 6% мас додатка везива смањење у просјеку износило 16,7%. Са повећањем садржаја летећег пепела у мјешавинама (за исто учешће агрегата) запажа се и повећање вриједности времена проласка ултразвука на узорцима старости 7 дана, односно смањење на узорцима старости 28 дана. За узорке старости 90 дана не може се успоставити јединствена зависност времена проласка ултразвука и садржаја летећег пепела у мјешавинама. Највећа вриједност времена проласка ултразвука је забиљежена код мјешавине М6, на узорцима старости 7 дана и она је износила 47,7 μ s, док је најмања измјерена вриједност била за мјешавине М8 и М9 (на узорцима старости 90 дана) и износила је 25,1 μ s, што представља смањење од 47,4%. Узимајући у обзир податак да брзина проласка ултразвука искључиво зависи од времена проласка и димензија узорка (који су за све стабилизацијске мјешавине приближно исти), анализа резултата испитивања брзине проласка ултразвука је базирана на истом принципу као и анализа времена проласка ултразвучног таласа. Обрнуто од времена проласка, најмања вриједност брзине ултразвука је измјерена за мјешавину М6 (на узорцима старости 7 дана) и она је износила 2,53 km/s, а највећа вриједност за мјешавину М8 (на узорцима старости 90 дана) и њена вриједност је била 4,81 km/s, што представља раст од 90,1%.

Вриједности чврстоћа при притиску су биле директно зависне од састава мјешавина и периода њега узорака. Генерално посматрано, са присуством рециклираног асфалтног агрегата у мјешавинама вриједности чврстоћа при притиску се смањују, али то смањење није толико изражено да би се елиминисала могућност коришћења датог отпадног материјала у стабилизацији. Дато смањење чврстоћа се може компензовати повећањем количине укупног везива или додатком летећег пепела стабилизацијским мјешавинама, у износу од 20% или 40%. Наиме, са повећањем садржаја летећег пепела у мјешавинама од 0 до 20% вриједности чврстоћа при притиску биљежиле су константан раст на узорцима старости 28 или 90 дана. Уколико се анализа чврстоћа при притиску посматра са аспекта вриједности 28-дневних чврстоћа (као што је то случај код класичних бетонских мјешавина) посебну оправданост примјене имају мјешавине са 40% додатка летећег пепела, јер је у том случају раст чврстоћа био најзначајнији. Разлике у чврстоћама мјешавина са рециклираним асфалтним агрегатом и без њега могу се надокнадити управо примјеном летећег пепела у количини од 40%. Вриједности чврстоћа при притиску за мјешавине старости 7 дана су се смањивале и за 20 и за 40% додатка летећег пепела. Тај податак је битно познавати приликом уградње слоја цементне стабилизације у реалним условима на терену. Приликом рехабилитације и реконструкције путева, посебно са већим саобраћајним оптерећењима, вријеме уградње нових слојева и динамика радова представља веома битну ставку приликом одабира поступка извођења типа реконструкције и рехабилитације пута. Наиме, након уградње слоја цементне стабилизације потребно је сачекати са уградњом асфалтних слојева, док се у слоју стабилизације не остваре потребне чврстоће [С2], [22], [95]. Имајући у виду чињеницу да мјешавине са додатком летећег пепела имају ниске ране чврстоће (дијаграми 10.1. и 10.3.), због касније пуцоланске реакције летећег пепела, препорука је користити цементе који имају високе ране чврстоће (са ознаком R), што је у овом истраживању и примјењено. Са повећањем периода њега узорака, са 7 на 28 дана, чврстоће стабилизацијских мјешавина са присуством летећег пепела, и истим агрегатним саставом, биљежиле су раст у односу на чисто цементне мјешавине (за

обје врсте агрегата) и биле су директно пропорционалне количини летећег пепела, док су се са повећањем периода његе (са 28 на 90 дана), мјешавине са 40% летећег пепела (М3 и М9, односно М6 и М12) запажала смањења чврстоћа у однос на мјешавине са 20% летећег пепела (М2 и М8, односно М5 и М11). То смањење је било посебно изражено код мјешавина чија је укупна количина везива износила 4%*mas* и у том случају мјешавине са 40% додатка летећег пепела (М3 и М6) имале су мање чврстоће и у односу на чисто цеменете мјешавине (М1 и М4). Смањење 90-дневне чврстоће мјешавине М3, у односу на мјешавину М1, износило је 10,7%, док је смањење чврстоће мјешавине М6, у односу на мјешавину М4, износило 8,6% (дате мјешавине су справљане са природним агрегатом шљунком и са 4%*mas* додатка везива). За мјешавине које су садржале 6%*mas* укупног додатка везива, чврстоће са 40% додатка летећег пепела (М9 и М12) имале су веће вриједности у односу на чисто цементне мјешавине (М7 и М10), а мање у односу на мјешавине са 20% додатка летећег пепела (М8 и М11). Дату зависност чврстоћа најлакше је анализирати на *дијаграму* 10.2.. Смањен прираст 90-дневних чврстоћа код стабилизација са 40% летећег пепела може се сматрати позитивним са аспекта анализе смањења крутости стабилизација (поређење резултата испитивања чврстоћа за мјешавине М1-М6 и М7-М12).

Највеће просјечне вриједности чврстоће при притиску, за мјешавине са 4%*mas* везива измјерене су; на узорцима старости 7 дана за мјешавину М1 (1,4МПа), на узорцима старости 28 дана за мјешавину М3 (2,92МПа) и на узорцима старости 90 дана за мјешавину М2 (4,75МПа). За мјешавине са 6%*mas* везива највеће просјечне вриједности чврстоћа при притиску измјерене су; на узорцима старости 7 дана за мјешавину М7 (3,48МПа), на узорцима старости 28 дана за мјешавину М9 (7,54МПа) и на узорцима старости 90 дана за мјешавину М8 (9,9МПа) – *табела* 10.23. и *дијаграм* 10.1.. Прираст чврстоћа при притиску, поредећи резултате 28-дневне и 90-дневне чврстоће, најизраженији је био за мјешавину М2 (82,0%), док је у поређењу резултата 7-дневне и 28-дневне чврстоће највећи прираст био за мјешавину М6 (180,5%) – *дијаграм* 10.3..

Претходно објашњења анализа зависности чврстоћа при притиску цементних стабилизација, на основу састава стабилизацијских мјешавина и учешћа компонентних материјала, може се успјешно и на исти начин примијенити и код анализе резултата испитивања индиректних затезних чврстоћа, при чему су наведене чврстоће у директној пропорцији. Највеће просјечне вриједности индиректних затезних чврстоћа, за мјешавине са 4%*mas* везива измјерене су; на узорцима старости 7 дана за мјешавину М1 (0,13МПа), на узорцима старости 28 дана за мјешавину М3 (0,31МПа) и на узорцима старости 90 дана за мјешавину М2 (0,51МПа). За мјешавине са 6%*mas* укупног додатка везива максималне, просјечне, измјерене индиректне затезне чврстоће биле су; на узорцима старости 7 дана за мјешавине М7 и М8 (0,29МПа), на узорцима старости 28 дана за мјешавину М9 (0,69МПа) и на узорцима старости 90 дана за мјешавину М8 (1,16МПа) – *табела* 10.24. и *дијаграм* 10.3.. Прираст индиректне затезне чврстоће, поредећи резултате 7-дневне и 28-дневне чврстоће, најизраженији је био за мјешавину М3, док је у поређењу резултата 28-дневних и 90-дневних чврстоћа највећи прираст био за мјешавину М5 – *дијаграм* 10.4.. Максимална просјечна вриједност индиректне затезне чврстоће измјерена је на мјешавини М8 (након 90 дана његе) и износила је 1,16МПа.

Анализом хистограма 10.11.-10.14. закључено је да се са повећањем садржаја везива у мјешавинама вриједности чврстоћа повећавају, за све појединачне односе учешћа агрегата и везива, при истим периодима њега узорака.

Просјечне вриједности процентуалног односа чврстоћа (ITS/f_c) кретале су се од 9,02% (за мјешавину М1), до 11,54% (за мјешавину М10), што је у карактеристичном опсегу кретања резултата за стабилизацијске мјешавине. Појединачни резултати датог односа чврстоћа су дати у табели 10.25..

Упоредном анализом резултата испитивања чврстоћа цементних стабилизација (дијаграми 10.1. и 10.3.) и времена и брзине проласка ултразвука (дијаграми 10.6. и 10.7.) може се успоставити начелна зависност датих физичко-механичких карактеристика цементне стабилизације (истих стабилизацијских мјешавина), која подразумеива да се са смањењем времена проласка ултразвука вриједности брзина проласка ултразвучног таласа и чврстоћа цементне стабилизације повећавају.

10.7. Интерпретација резултата испитивања методом факторијалног експеримента

Експерименталним испитивањем цементних стабилизација справљених са различитим количинама везива, различитим учешћем RAP-а и летећег пепела добијен је велики број података и информација, на основу којих су изведени закључци о појединачном утицају анализираних фактора на чврстоћу при притиску и индиректну затезну чврстоћу испитиваних цементних стабилизација. У овом поглављу су резултати испитивања искоришћени за сагледавање истовременог утицаја одабраних фактора на чврстоћу цементних стабилизација при притиску, као и за утврђивање који од анализираних фактора има највећи утицај на предметно својствено стабилизације. За реализацију наведене вишепараметарске анализе одабрана је метода факторијалног експеримента, која се у основи састоји од одговарајућих математичко-статистичких поступака са циљем да се добије математички модел процеса [96].

Овакав тип анализе омогућава провјеру хипотезе о постојању везе између чврстоће при притиску испитиваних цементних стабилизација и варираних утицајних фактора. Факторијалном анализом може се дефинисати и релативна величина утицаја варираних параметара, а на основу њиховог утицаја на вриједности чврстоће при притиску може се формулисати најједноставнији аналитички облик везе чврстоћа цементне стабилизације при притиску – утицајни параметри.

У циљу реализације факторијалног експеримента, варирани су сљедећи утицајни фактори:

- Фактор Z_1 – количина везива
 - 4%
 - 6%
- Фактор Z_2 – учешће RAP-а у мјешавини агрегата
 - 0%
 - 30%
- Фактор Z_3 – учешће летећег (FA) пепела у везиву
 - 0%
 - 20% (или 40%)

За овако структуриран факторијални експеримент, који омогућава обухватање и истовремену анализу три варирана фактора, полазни подаци су:

$$N = x_i^n = 2^3 = 8 \quad \dots\dots\dots (10.1.)$$

гдје су:

x_i – број нивоа разматрања (горњи и доњи),

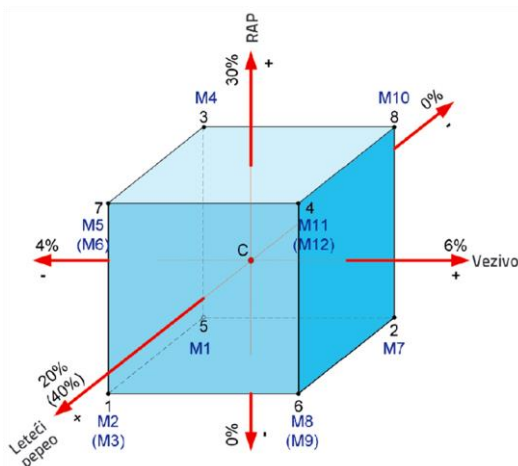
n – број утицајних фактора (Z_1 – везиво, Z_2 – RAP, Z_3 – летећи пепео (FA)).

У табели 10.26. дате су ознаке и суштинско значење варираних фактора и новоа њиховог разматрања.

Табела 10.26. – Описи утицајних фактора и могући ново њиховог разматрања

Утицајни фактори		Ниво разматрања (x_i – кодирана бездимензиона величина)			
		доњи ниво		горњи ниво	
ознака	опис	вриједност	опис параметра	вриједност	опис параметра
Z_1	Количина везива	-1	4%	+1	6%
Z_2	Учешће RAP-а	-1	0%	+1	30%
Z_3	Учешће FA	-1	0%	+1	20% (или 40%)

Графички приказ ових података, као и обим могућих анализа, дат је на замишљеном моделу факторијалног експеримента (слика 10.5.).



Слика 10.5. – Графички модел тро-параметарског факторијалног експеримента [16]

Центар факторијалног експеримента, односно замишљеног модела – коцке, може се физички тумачити као:

- Цементна стабилизација која представља средину између цементних стабилизација справљених са 4% везива и 6% везива (средња количина везива у центру је $(4+6)/2=5\%$);
- Цементна стабилизација која представља средину између цементних стабилизација справљених са 0 и 30% RAP-а (количина RAP-а у центру експеримента је $(0+30)/2=15\%$) и
- Цементна стабилизација која представља средину између цементних стабилизација справљених са 0 и 20% FA (количина FA у центру експеримента је $(0+20)/2=10\%$), односно справљених са 0 и 40% FA (количина FA у центру експеримента је $(0+40)/2=20\%$).

Свако тјеме замишљеног модела представља једну комбинацију утицајних фактора, чиме се добија 8 различитих врста стабилизацијских мјешавина. Мјешавине са 0 или 20% примјеме FA су:

- Тјеме 1 – цементна стабилизација са 4% везива, 0% RAP-а и 20% FA (M2)
- Тјеме 2 – цементна стабилизација са 6% везива, 0% RAP-а и 0% FA (M7)
- Тјеме 3 – цементна стабилизација са 4% везива, 30% RAP-а и 0% FA (M4)
- Тјеме 4 – цементна стабилизација са 6% везива, 30% RAP-а и 20% FA (M11)
- Тјеме 5 – цементна стабилизација са 4% везива, 0% RAP-а и 0% FA (M1)
- Тјеме 6 – цементна стабилизација са 6% везива, 0% RAP-а и 20% FA (M8)
- Тјеме 7 – цементна стабилизација са 4% везива, 30% RAP-а и 20% FA (M5)
- Тјеме 8 – цементна стабилизација са 6% везива, 30% RAP-а и 0% FA (M10)

Све вриједности кодираних бездимензионих величина „ x_i “, као и вриједности њихових одговарајућих производа, које су потребне за прорачунавање коефицијената полинома за стабилизацијске мјешавине са 0 или 20% FA, дате су у табели 10.27..

Табела 10.27. – Вриједности бездимензионих величина „ x_i “ и њихових производа (мјешавине са 0 или 20% FA)

N	Врста цементне стабилизације	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$
1	M2	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
2	M7	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
3	M4	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
4	M11	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
5	M1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
6	M8	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
7	M5	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
8	M10	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1

Иста анализа се може примјенити и код мјешавина са употребом 40% FA, при чему су тјеме замишљеног модела дефинисана у наставку:

- Тјеме 1 – цементна стабилизација са 4% везива, 0% RAP-а и 40% FA (M3)
- Тјеме 2 – цементна стабилизација са 6% везива, 0% RAP-а и 0% FA (M7)
- Тјеме 3 – цементна стабилизација са 4% везива, 30% RAP-а и 0% FA (M4)
- Тјеме 4 – цементна стабилизација са 6% везива, 30% RAP-а и 40% FA (M12)
- Тјеме 5 – цементна стабилизација са 4% везива, 0% RAP-а и 0% FA (M1)
- Тјеме 6 – цементна стабилизација са 6% везива, 0% RAP-а и 40% FA (M9)
- Тјеме 7 – цементна стабилизација са 4% везива, 30% RAP-а и 40% FA (M6)
- Тјеме 8 – цементна стабилизација са 6% везива, 30% RAP-а и 0% FA (M10)

Све вриједности кодираних бездимензионих величина „ x_i “, као и вриједности њихових одговарајућих производа, које су потребне за прорачунавање коефицијената полинома за стабилизацијске мјешавине са 0 или 40% FA, дате су у табели 10.28..

Табела 10.28. – Вриједности бездимензионих величина „ x_i “ и њихових производа (мјешавине са 0 или 40% FA)

N	Врста цементне стабилизације	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$
1	M3	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
2	M7	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
3	M4	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
4	M12	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
5	M1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
6	M9	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
7	M6	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
8	M10	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1

Функционална зависност анализираниог својства од варираних параметара, у методи факторијалног експеримента, апроксимира се полиномом сљедећег облика:

$$f(Z_1, Z_2, Z_3) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \dots (10.2.)$$

Коефицијенти полинома одређују се помоћу сљедећих израза:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j \dots (10.3.)$$

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} y_j \quad (i = 1, 2 \text{ i } 3) \dots (10.4.)$$

$$b_{km} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{kj} x_{mj} y_j \quad (k = 1, 2 \text{ i } 3, m = 1, 2 \text{ i } 3) \dots (10.5.)$$

$$b_{123} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{1j} x_{2j} x_{3j} y_j \dots (10.6.)$$

Под функцијом „ y_j “, која се користи у претходним изразима, подразумејева се средња вриједност појединачних резултата испитивања, за одређену комбинацију утицајних параметара, односно за одређену врсту стабилизацијске мјешавине.

Након одређивања коефицијента полинома, односно аналитичког дефинисања зависности чврстоће при притиску цементне стабилизације од истовременог утицаја варираних параметара, могу се урадити и анализа величине утицаја варираних параметара, непосредним упоређивањем њихових апсолутних вриједности, као и анализа – тестирање „значајности“ коефицијената полинома, а све у циљу поједностављења аналитичког израза (10.2.).

За тестирање значајности коефицијената полинома потребно је срачунати сљедеће величине:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^r (y_i - y_{sr})^2}{r - 1} \dots (10.7.)$$

гдје је : r – број појединачних резултата испитивања

$$S_{y,sr}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N S_{y_j}^2}{N} \dots\dots\dots (10.8.)$$

$$S_{bi}^2 = \frac{S_{y,sr}^2}{N \cdot n} \dots\dots\dots (10.9.)$$

$$t_i = \left| \frac{b_i}{S_{bi}} \right| \dots\dots\dots (10.10.)$$

Критеријум којим се оцјењује „значајност“ појединих коефицијената полинома је:

$$t_i > t_{kr} \dots\dots\dots (10.11.)$$

Таблична вриједност коефицијента „ t_{kr} “ зависи од:

- Броја степени слободе $f = N \cdot (n - 1)$ и
- Нивоа значајности $\alpha = 0,05$

У случајевима када је испуњен услов (10.11.) коефицијенти полинома се прихватају, а у супротном се могу занемарити, при чему квалитет функционалне зависности неће бити битније редукован.

У наставку су приказани резултати факторијалног експеримента за цементне стабилизације са 0 и 20% примјене FA, а након тога и за цементне стабилизације са 0 и 40% примјене FA. Поступак је приказан прво за 7-дневне чврстоће при притиску цементних стабилизација, а након тога и за 28-дневне чврстоће.

На основу описане методе тро-параметарске факторијалне анализе и експерименталних вриједности 7-дневних и 28-дневних чврстоћа при притиску цементних стабилизација справљених са 4 и 6% везива, са 0 и 30% учешћа RAP-а и са 0 и 20% (односно 40%) учешћа FA, срачунати су подаци потребни за дефинисање непознатих коефицијената полинома (10.2.). Сви неопходни улазни подаци приказани су у табелама 10.29., 10.30., 10.31., 10.32..

Табела 10.29. – Вриједности 7-дневних чврстоћа при притиску цементних стабилизација у зависности од варираних параметара (мјешавине са 0 и 20% FA)

N	Количина везива %	Учешће RAP-а %	Учешће FA %	Појединачне вриједности чврстоћа [MPa]			$f_{c,7}$ [MPa]	S_y^2
1	4	0	20	1,201	1,39	1,569	1,3867	0,0339
2	6	0	0	3,464	3,592	3,383	3,4797	0,0111
3	4	30	0	1,194	1,009	1,099	1,1007	0,0086
4	6	30	20	2,354	2,396	2,322	2,3573	0,0014
5	4	0	0	1,383	1,381	1,446	1,4033	0,0014
6	6	0	20	3,546	3,012	3,686	3,4147	0,1265
7	4	30	20	1,007	0,843	0,833	0,8943	0,0095
8	6	30	0	2,410	2,394	2,332	2,3787	0,0017
							ΣS_y^2	0,1940

У табели 10.29. дате су вриједности варираних параметара, појединачне и средње вриједности 7-дневних чврстоћа при притиску цементних стабилизација

справљених са 0 и 20% FA, као и вриједности дисперзија резултата испитивања, одређених помоћу израза (10.7.).

Аналитички израз зависности 7-дневне чврстоће при притиску цементне стабилизације од истовременог утицаја сва три варирана параметра, за количину FA=20% у односу на m_c , гласи:

$$f_{c,7,20\%FA} = 2,052 + 0,8557x_1 - 0,3692x_2 - 0,0387x_3 - 0,1704x_1x_2 + 0,0171x_1x_3 - 0,0183x_2x_3 + 0,0292x_1x_2x_3 \quad \dots \quad (10.12.)$$

Коефицијенти предметног полинома, како у овом тако и у наредним примјерима, срачунати су помоћу израза 10.3. – 10.6..

У табели 10.30. приказани су улазни подаци за анализу 7-дневних чврстоћа при притиску цементних стабилизација справљених са 0 и 40% FA.

Табела 10.30. – Вриједности 7-дневних чврстоћа при притиску цементних стабилизација у зависности од варираних параметара (мјешавине са 0 и 40% FA)

N	Количина везива %	Учешће RAP-а %	Учешће FA %	Појединачне вриједности чврстоћа [MPa]			$f_{c,7}$ [MPa]	S_y^2
1	4	0	40	1,136	0,993	1,231	1,1200	0,0144
2	6	0	0	3,464	3,592	3,383	3,4797	0,0111
3	4	30	0	1,194	1,009	1,099	1,1007	0,0086
4	6	30	40	2,271	2,394	2,382	2,3490	0,0046
5	4	0	0	1,383	1,381	1,446	1,4033	0,0014
6	6	0	40	2,871	3,267	3,384	3,1740	0,0723
7	4	30	40	0,958	0,870	0,784	0,8707	0,0076
8	6	30	0	2,410	2,394	2,332	2,3787	0,0017
							ΣS_y^2	0,1215

Аналитички израз зависности 7-дневне чврстоће при притиску цементне стабилизације од истовременог утицаја сва три варирана параметра, за количину FA=40% у односу на m_c , гласи:

$$f_{c,7,40\%FA} = 1,9845 + 0,8608x_1 - 0,3098x_2 - 0,1061x_3 - 0,1718x_1x_2 + 0,0222x_1x_3 + 0,0412x_2x_3 + 0,0278x_1x_2x_3 \quad \dots \quad (10.13.)$$

У табели 10.31. приказани су улазни подаци за анализу 28-дневних чврстоћа при притиску цементних стабилизација справљених са 0 и 20% FA.

Табела 10.31. – Вриједности 28-дневних чврстоћа при притиску цементних стабилизација у зависности од варираних параметара (мјешавине са 0 и 20% FA)

N	Количина везива %	Учешће RAP-а %	Учешће FA %	Појединачне вриједности чврстоћа [MPa]			$f_{c,28}$ [MPa]	S_y^2
1	4	0	20	2,835	2,540	2,468	2,614	0,038
2	6	0	0	5,936	5,336	5,635	5,636	0,090
3	4	30	0	2,170	2,326	2,267	2,254	0,006
4	6	30	20	4,571	4,811	4,763	4,715	0,016
5	4	0	0	2,336	2,727	2,568	2,544	0,039
6	6	0	20	6,400	6,435	6,186	6,340	0,018
7	4	30	20	2,356	2,361	2,176	2,298	0,011
8	6	30	0	4,391	3,778	3,524	3,898	0,199
							ΣS_y^2	0,417

Аналитички израз зависности 28-дневне чврстоће при притиску цементне стабилизације од истовременог утицаја сва три варирана параметра, за количину $FA=20\%$ у односу на m_c , гласи:

$$f_{c,28,20\%FA} = 3,787 + 1,3598x_1 - 0,4962x_2 + 0,2045x_3 - 0,3447x_1x_2 + 0,0176x_1x_3 + 0,01707x_2x_3 + 0,0175x_1x_2x_3 \quad \dots (10.14.)$$

У табели 10.32. приказани су улазни подаци за анализу 28-дневних чврстоћа при притиску цементних стабилизација справљених са 0 и 40% FA .

Табела 10.32. – Вриједности 28-дневних чврстоћа при притиску цементних стабилизација у зависности од варираних параметара (мјешавине са 0 и 40% FA)

N	Количина везива %	Учешће RAP-а %	Учешће FA %	Појединачне вриједности чврстоћа [MPa]			$f_{c,28}$ [MPa]	S_y^2
1	4	0	40	2,801	2,877	3,101	2,9263	0,0243
2	6	0	0	5,936	5,336	5,635	5,6357	0,0900
3	4	30	0	2,170	2,326	2,267	2,2543	0,0062
4	6	30	40	5,216	5,416	5,189	5,2737	0,0154
5	4	0	0	2,336	2,727	2,568	2,5437	0,0387
6	6	0	40	7,793	7,693	7,140	7,5420	0,1237
7	4	30	40	2,632	2,278	2,415	2,4417	0,0319
8	6	30	0	4,391	3,778	3,524	3,8977	0,1987
							ΣS_y^2	0,5288

Аналитички израз зависности 28-дневне чврстоће при притиску цементне стабилизације од истовременог утицаја сва три варирана параметра, за количину $FA=40\%$ у односу на m_c , гласи:

$$f_{c,28,40\%FA} = 4,064 + 1,523x_1 - 0,598x_2 + 0,482x_3 - 0,404x_1x_2 + 0,339x_1x_3 - 0,091x_2x_3 - 0,042x_1x_2x_3 \quad \dots (10.15.)$$

Изразима (10.12., 10.13., 10.14., и 10.15.) једнозначно су одређене вриједности 7-дневних и 28-дневних чврстоћа при притиску анализираних цементних стабилизација у зависности од комбинованог утицаја употријебљених компонентних материјала, тј. од количине додатка везива и учешћа RAP-а и FA-а. Вриједности чврстоћа при притиску, срачунате помоћу наведених израза, идентичне су са добијеним експерименталним вриједностима, па због тога није потребно тестирати адекватност подела помоћу Fischer-овог критеријума.

10.7.1. Анализа утицаја варираних параметара на чврстоћу при притиску

У циљу дефинисања величине утицаја варираних параметара, вриједности коефицијената полинома за анализирани количине летећег пепела, приказане су у табелама 10.33. и 10.34..

Табела 10.33. – Коефицијенти полинома за зависност „ $f_{c,7} = f_{c,7}(Z_1, Z_2, Z_3)$ “

Количина FA [%]	Коефицијенти полинома							
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
20	2,0519	0,8557	-0,3692	-0,0387	-0,1704	0,0171	-0,0183	0,0292
40	1,9845	0,8608	-0,3098	-0,1061	-0,1718	0,0222	0,0412	0,0278

Табела 10.34. – Коефицијенти полинома за зависност „ $f_{c,28} = f_{c,28}(Z_1, Z_2, Z_3)$ “

Количина FA [%]	Коефицијенти полинома							
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
20	3,7873	1,3598	-0,4962	0,2045	-0,3447	0,1760	0,0107	0,0175
40	4,0640	1,5229	-0,5975	0,4815	-0,4040	0,3390	-0,0907	-0,0419

Коефицијенти полинома дефинишу одређену врсту утицаја, односно имају следеће физичко значење:

- b_0 – дефинише просјечну вриједност чврстоће при притиску свих испитваних цементних стабилизација (центар коцке);
- b_1 – дефинише утицај количине везива (знак „-“ се односи на 4% везива, а знак „+“ на 6% везива);
- b_2 – дефинише утицај учешћа RAP-а (знак „-“ се односи на 0% учешћа RAP-а, а знак „+“ на 30% учешћа);
- b_3 – дефинише утицај учешћа FA (знак „-“ се односи на 0% учешћа FA, а знак „+“ на 20 или 40% учешћа);
- b_{12} – дефинише додатни утицај усљед комбинованог дејства количине везива и учешћа RAP-а;
- b_{13} – дефинише додатни утицај усљед комбинованог дејства количине везива и учешћа FA;
- b_{23} – дефинише додатни утицај усљед комбинованог дејства учешћа RAP-а и учешћа FA и
- b_{123} – дефинише додатни утицај усљед комбинованог дејства, количине везива, учешћа RAP-а и учешћа FA.

Знак „+“, односно знак „-“, испред коефицијената полинома показује која од двије могућности сваког појединачног фактора има већи утицај на чврстоћу при притиску цементне стабилизације.

Апсолутна вриједност коефицијената полинома говори о утицају варираног фактора на вриједност чврстоће при притиску. Већа апсолутна вриједност указује на значајнији утицај варираног фактора на чврстоћу при притиску. Анализом вриједности коефицијената полинома из табеле 10.33. закључено је:

- Највећи утицај на 7-дневну чврстоћу при притиску цементних стабилизација има количина везива. Средња вриједност коефицијента „ b_1 “ износи, за обе

анализиране количине FA (20 или 40%), $c_{sa} +0,86$, што значи да се примјеном веће количине везива (6%) остварује просјечно повећање чврстоће при притиску од $c_{sa} 1,72MPa$;

- Други по величини је коефицијент „ b_2 “, који има негативну вриједност и показује утицај количине RAP -а (0 или 30%) на чврстоћу при притиску цементних стабилизација. Средња вриједност коефицијента „ b_2 “ износи, за обје анализиране количине FA (20 или 40%), $c_{sa} -0,34$, што значи да се примјеном RAP -а (30%) остварује просјечно смањење чврстоће при притиску од $c_{sa} 0,68MPa$;
- Утицај учешћа FA у укупној количини везива дефинисан је коефицијеном „ b_3 “ и има негативне вриједности, што значи да се примјеном FA од 20% остварује смањење чврстоће при притиску од $0,08MPa$ (али је ова вриједност занемарљиво мала), а са количином FA од 40%, смањење чврстоће износи $0,21MPa$;
- Додатни утицај комбинованог дејства количине везива и учешћа RAP -а, дефинисан је коефицијентом „ b_{12} “ и има негативан утицај на чврстоћу при притиску цементне стабилизације и
- Додатни утицај комбинованог дејства варираних параметара, који су изражени преко коефицијената „ b_{13} , b_{23} и b_{123} “, је практично занемарљив, што ће се у наставку детаљно дефинисати.

Анализом вриједности коефицијената полинома из табеле 10.34. закључено је:

- Највећи утицај на 28-дневну чврстоћу при притиску цементних стабилизација има количина везива. Средња вриједност коефицијента „ b_1 “ износи, за обје анализиране количине FA (20 или 40%), $c_{sa} +1,44$ што значи да се примјеном веће количине везива (6%) остварује просјечно повећање чврстоће при притиску од $c_{sa} 2,89MPa$;
- Други по величини је коефицијент „ b_2 “, који има негативну вриједност и показује утицај количине RAP -а (0 или 30%) на чврстоћу при притиску цементних стабилизација. Средња вриједност коефицијента „ b_2 “ износи, за обје анализиране количине FA (20 или 40%), $c_{sa} -0,55$, што значи да се примјеном RAP -а (30%) остварује просјечно смањење чврстоће при притиску од $c_{sa} 1,09MPa$;
- Утицај учешћа FA у укупној количини везива дефинисан је коефицијеном „ b_3 “ и има позитивне вриједности, што значи да се примјеном FA од 20% остварује повећање чврстоће при притиску од $0,41MPa$, а са количином FA од 40%, повећање чврстоће износи $0,96MPa$;
- Додатни утицај комбинованог дејства количине везива и учешћа RAP -а, дефинисан је коефицијентом „ b_{12} “ и има негативан утицај на чврстоћу при притиску цементне стабилизације;
- Додатни утицај комбинованог дејства количине везива и учешћа FA , дефинисан је коефицијентом „ b_{13} “ и има позитиван утицај на чврстоћу при притиску цементне стабилизације;
- Додатни утицај комбинованог дејства варираних параметара, који су изражени преко коефицијената „ b_{23} и b_{123} “, је практично занемарљив, што ће се у наставку детаљно дефинисати.

Ради одређивања „значајности“ коефицијената полинома „ $f_{c,7} = f_{c,7}(Z_1, Z_2, Z_3)$ “ и „ $f_{c,28} = f_{c,28}(Z_1, Z_2, Z_3)$ “, извршено је тестирање помоћу „ t “ расподеле. Вриједности тестних карактеристика срачунате су помоћу израза 10.7.-10.10. и приказане су у табели 10.35.

Табела 10.35. – Вриједности срачунатих тестних карактеристика којима се оцјењује значајност коефицијената полинома „ $f_c = f_c(Z_1, Z_2, Z_3)$ “

Тестна карактеристика	20% FA (за $f_{c,7}$)	40% FA (за $f_{c,7}$)	20% FA (за $f_{c,28}$)	40% FA (за $f_{c,28}$)
S_{sr}^2	0,1940	0,1215	0,4168	0,5288
S_{bi}^2	0,0081	0,0051	0,0174	0,02203
S_{bi}	0,0899	0,0712	0,1318	0,14844
t_0	22,8242	27,8722	28,7373	27,3781
t_1	9,5184	12,0899	10,3202	10,2600
t_2	4,1068	4,3511	3,7638	4,0286
t_3	0,4305	1,4902	1,5556	3,2471
t_{12}	1,8954	2,4129	2,6180	2,7216
t_{13}	0,1902	0,3118	1,3356	2,2838
t_{23}	0,2036	0,5787	0,0835	0,6130
t_{123}	0,3248	0,3904	0,1366	0,2829

Критична таблична вриједност тестне карактеристике износи $t_{kr}=2,1199$ за број степени слободе $f=16$ и има ниво значајности $\alpha=0,05$, а критеријум за оцјену значајности дефинисан је изразом 10.11.

Поређењем вриједности „ t_{kr} “ са вриједностима коефицијента полинома из табеле 10.35. закључено је да се генерално могу занемарити коефицијенти „ b_{23} “ и „ b_{123} “ на свим стабилизацијским мјешавинама. Поред њих могу се занемарити и још неки коефицијенти који су у зависности од стабилизацијске мјешавине и периода њега узорака. То су коефицијенти „ b_3 “ и „ b_{13} “ за мјешавине са 20% FA и коефицијент „ b_{13} “ за мјешавине са 40% FA. Сва три поменута коефицијента су везана за 7-дневне чврстоће при притиску стабилизацијских узорака. Као што се из предметне табеле види, постоје појединачна одступања изведеног закључка, која су у табели обиљежена болдовано. То су коефицијенти „ b_3 “ и „ b_{13} “ за мјешавине са 20% FA (на којима је одређена 28-дневна чврстоћа при притиску), као и коефицијенти „ b_3 “ за 40% FA и „ b_{12} “ за 20% FA (за мјешавине на којима је испитана 7-дневна чврстоћа при притиску). У таквим случајевима су коефицијенти прихваћени на основу генералне оцјене за посматрани коефицијент, иако је њихова вриједност мања од „ t_{kr} “.

На основу претходне анализе дефинисани су упрошћени изрази за аналитичко одређивање чврстоће при притиску цементне стабилизације. Одбацавањем коефицијената „ b_3, b_{13}, b_{23} и b_{123} “ из аналитичког израза 10.12. и коефицијената „ b_{13}, b_{23} и b_{123} “ из аналитичког израза 10.13. добијају се упрошћени изрази 10.16. и 10.17. за аналитичко одређивање 7-дневне чврстоће при притиску цементних стабилизација:

$$f_{c,7,20\%FA} = 2,052 + 0,8557x_1 - 0,3692x_2 - 0,1704x_1x_2 \dots\dots\dots (10.16.)$$

$$f_{c,7,40\%FA} = 1,9845 + 0,8608x_1 - 0,3098x_2 - 0,1061x_3 - 0,1718x_1x_2 \dots\dots\dots (10.17.)$$

Одбацавањем коефицијената „ b_{23} “ и „ b_{123} “ из аналитичких израза 10.14. и 10.15. добијају се упрошћени изрази 10.18. и 10.19. за аналитичко одређивање 28-дневне чврстоће при притиску цементних стабилизација.

$$f_{c,28,20\%FA} = 3,787 + 1,360x_1 - 0,496x_2 + 0,205x_3 - 0,345x_1x_2 + 0,176x_1x_3 \quad \dots\dots\dots (10.18.)$$

$$f_{c,28,40\%FA} = 4,064 + 1,523x_1 - 0,598x_2 + 0,482x_3 - 0,404x_1x_2 + 0,339x_1x_3 \quad \dots\dots\dots (10.19.)$$

На овај начин су математичким путем потврђени закључци, који су изведени само на основу вриједности коефицијената полинома, о утицају варираних параметара на чврстоћу при притиску цементних стабилизација. Одбацавањем појединих коефицијената полинома „ $f_c = f_c(Z_1, Z_2, Z_3)$ “ добијају се једноставнији изрази, али се повећавају разлике између експерименталних чврстоћа при притиску и вриједности срачунатих помоћу факторијалног експеримента („ f_c^* “). Вриједности срачунатих разлика, изражених у процентима, за различите периоде његе узорака (7 и 28 дана), приказане су у табелама 10.36. – 10.39..

Табела 10.36. – Разлике између стварних и рачунских вриједности чврстоћа при притиску цементних стабилизација са 20% FA, за „ $f_{c,7}$ “

N	Ознака стабилизације	Количина везива [%]	употреба RAP-a [%]	употреба FA [%]	$f_{c,7}$ [MPa]	$f_{c,7}^*$ [MPa]	Δf_c [%]
1	M2	4	0	20	1,387	1,395	-0,6
2	M7	6	0	0	3,480	3,447	0,9
3	M4	4	30	0	1,101	0,999	9,4
4	M11	6	30	20	2,357	2,368	-0,5
5	M1	4	0	0	1,403	1,395	0,6
6	M8	6	0	20	3,415	3,447	-1,0
7	M5	4	30	20	0,894	0,998	-11,5
8	M10	6	30	0	2,379	2,368	0,4

Табела 10.37. – Разлике између стварних и рачунских вриједности чврстоћа при притиску цементних стабилизација са 40% FA, за „ $f_{c,7}$ “

N	Ознака стабилизације	Количина везива [%]	употреба RAP-a [%]	употреба FA [%]	$f_{c,7}$ [MPa]	$f_{c,7}^*$ [MPa]	Δf_c [%]
1	M3	4	0	40	1,120	1,156	-3,2
2	M7	6	0	0	3,480	3,433	1,3
3	M4	4	30	0	1,101	1,092	0,8
4	M12	6	30	40	2,349	2,258	3,9
5	M1	4	0	0	1,403	1,368	2,5
6	M9	6	0	40	3,174	3,221	-1,5
7	M6	4	30	40	0,871	0,880	-1,0
8	M10	6	30	0	2,379	2,470	-3,8

На основу табела 10.36. и 10.37. (у којима су приказане 7-дневне чврстоће при притиску) може се закључити да се код цементних стабилизација са 20% FA, занемаривањем коефицијената „ b_{13} , b_{23} и b_{123} “ и коефицијента „ b_3 “ добијају одступања од тачне вриједност мања од 11,5% (али то одступање износи само 0,1MPa, јер су за ову старост стабилизације све вриједности чврстоћа при притиску ниске). Код цементних стабилизација са употребом 40% FA, занемаривањем коефицијената „ b_{13} , b_{23} и b_{123} “ највеће одступање износи 3,9% (или 0,09MPa). На основу претходно наведеног може се закључити да је комбиновани утицај, изражен преко поменутих коефицијената, практично занемарљив.

Табела 10.38. – Разлике између стварних и рачунских вриједности чврстоћа при притиску цементних стабилизација са 20% FA, за „ $f_{c,28}$ “

N	Ознака стабилизације	Количина везива [%]	употреба RAP-а [%]	употреба FA [%]	$f_{c,28}$ [MPa]	$f^*_{c,28}$ [MPa]	Δf_c [%]
1	M2	4	0	20	2,614	2,608	0,3
2	M7	6	0	0	5,635	5,608	0,5
3	M4	4	30	0	2,254	2,247	0,3
4	M11	6	30	20	4,715	4,687	0,6
5	M1	4	0	0	2,544	2,561	-0,3
6	M8	6	0	20	6,340	6,369	-0,5
7	M5	4	30	20	2,298	2,304	-0,3
8	M10	6	30	0	3,898	3,926	-0,7

Табела 10.39. – Разлике између стварних и рачунских вриједности чврстоћа при притиску цементних стабилизација са 40% FA, за „ $f_{c,28}$ “

N	Ознака стабилизације	Количина везива [%]	употреба RAP-а [%]	употреба FA [%]	$f_{c,28}$ [MPa]	$f^*_{c,28}$ [MPa]	Δf_c [%]
1	M3	4	0	40	2,926	2,878	1,7
2	M7	6	0	0	5,636	5,768	-2,4
3	M4	4	30	0	2,254	2,206	2,2
4	M12	6	30	40	5,274	5,406	-2,5
5	M1	4	0	0	2,544	2,593	-1,9
6	M9	6	0	40	7,542	7,409	1,8
7	M6	4	30	40	2,442	2,491	-2,0
8	M10	6	30	0	3,898	3,765	3,4

Анализом вриједности дате у табелама 10.38. и 10.39. може се закључити да се при одређивању 28-дневних чврстоћа при притиску код цементних стабилизација и са 20 и са 40% FA, занемаривањем коефицијената „ b_{23} и b_{123} “ добијају мања процентуална одступања од тачних вриједности него приликом одређивања 7-дневних чврстоћа. У случају цементних стабилизација са 20% FA, занемаривањем ова два коефицијента добијају се одступања од експерименталних вриједности мања од 1%, а у случају цементних стабилизација са 40% FA, највеће одступање износи 3,4% (0,13MPa). Дата максимална одступања су у претходним табелама приказана болдовано. И овдје се на основу претходно наведеног може закључити да је комбиновани утицај, изражен преко овдје поменутих коефицијената „ b_{23} и b_{123} “ практично занемарљив.

На основу претходно изведених констатација закључује се да се аналитички изрази 10.16. – 10.19. могу користити за приказ и анализу чврстоће при притиску цементних стабилизација, у зависности од укупне количине везива, као и од употребијене количине RAP-а и FA у стабилизацијским мјешавинама.

11. ЗАКЉУЧАК

Цементне стабилизације коловозних конструкција сврставају се у групу носећих слојева и као такве морају да испуне одређене захтјеве у смислу пријема и преноса саобраћајног оптерећења на доње слојеве и постељицу. Традиционални начин пројектовања претходних мјешавина цементних стабилизација је заснован на принципима пројектовања бетонских мјешавина са мањим учешћима цемента, у односу на конвенционалне бетоне. Разлози за то су вишеструки, а два основна су: различит начин уградње стабилизацијских мјешавина и ограничења у погледу крутости и носивости очврслих стабилизација. Наиме, уградња цементних стабилизација, се за разлику од конвенционалних бетонских мјешавина, обавља поступцима интензивног збијања (у лабораторијским условима уз помоћ набијача за Proctor-ов опит, а на градилишту уз примјену ваљака). Цементне стабилизације, поред захтјева носивости, морају да се анализирају и са аспекта ограничења крутости, због динамичке природе оптерећења на коловозну конструкцију. Из претходно наведених разлога потребно је ограничити вриједности чврстоћа при притиску стабилизација, при чему су пожељне веће вриједности савојних и затезних чврстоћа. Исправно пројектована и изведена цементна стабилизација представљају предуслов за успјешну уградњу асфалтних слојева (за које цементна стабилизација представљају подлогу) и касније нормално одвијање саобраћаја за тако изведену коловозну конструкцију.

Истраживање у овој докторској дисертацији засновано је на идеји анализе могућности примјене рециклираних материјала у градњи путева, са посебним осврстом на примјену старог асфалта (насталог у поступку хладне рециклаже асфалтног коловоза) и електрофилтерског летећег пепела (као нуспроизвода у поступку производње електричне енергије у термоелектранама). Анализом доступне литературе, из домаћих и страних извора, и спровођењем сопственог експерименталног лабораторијског истраживања, уз употребу природног агрегата шљунка, цементног везива и наведених рециклираних материјала (у одређеним процентуалним учешћима), доказана је могућност примјене датих материјала у изради цементних стабилизација коловозних конструкција путева. Имајући у виду да су путеви линијски елементи за чију градњу су потребне значајне количине материјала, примјеном и мале количине датих рециклираних материјала могу се постићи бројни бенефити. Податак да је цијена наведених рециклираних материја доста ниска (и скоро занемарљива) повећава оправданост њихове примјене у градњи коловозних конструкција.

Хладна рециклажа асфалтног коловоза је модеран, функционалан, економичан и енергетски оправдан начин реконструкције или рехабилитације путева, чија повећана примјена би могла држави и друштвеној заједници да донесе многоструке користи. Рециклажа асфалта и његова поновна употреба у градњи путева је и један од видова одрживе градње. Поред примјене у поступцима реконструкције и рехабилитације путева поступак хладне рециклаже старог асфалтног застора проналази оправданост примјене и код градње нових коловозних конструкција, код којих се новонастали материјал може користити и за израду неvezаних или стабилизираних носећих слојева. Израда цементних стабилизација са рециклираним асфалтом и цементом (као везивним материјалом) има бројне предности примјене у односу на остале типове градње путева, а посебно у односу на конвенционалну градњу цементних стабилизација. Лака доступност и могућност примјене материјала,

који су у постпуку реконструкције и рехабилитације одмах и на лицу мјеста употребљиви, су велике предности оваквог начина израде цементних стабилизација. Рециклирањем се не смањују само иницијални трошкови стругања асфалта и уклањања постојећег невезаног каменог агрегата, већ се смањује и употреба агрегата, како природног агрегата шљунка, тако и дробљених камених агрегата чија је цијена коштања и транспорта битна ставка у укупној цијени извођачких радова. Оправданост примјене наведеног рециклираног материјала посебно је изражена у крајевима који су сиромашни резервама камених материјала. У неким земљама, аспекти који се односе на очување животне средине добијају предности примјене у односу на економске аспекте, па се и са тог становишта могу анализирати могућности и оправданости примјене рециклираног асфалта у градњи путева.

Са повећањем примјене поступка хладне рециклаже асфалта путна привреда би у многоме могла да смањи негативни утицај на животну средину, који се првенствено огледа кроз смањење потрошње енергије и употребе необновљивих природних ресурса (камених агрегата и нафтних деривата). Агрегат настао рециклажом старих материјала (у овом случају асфалта) требао би да заузме добар дио индустријске производње сваке државе. Поред описаног начина примјене, у грађевинарству су могуће бројне друге употребе рециклираног асфалтног агрегата, првенствено код градње насипа и невезаних носећих слојева коловозних конструкција. Улагање у опрему за рециклажу и технологију пројектовања и извођења рециклаже не би требало посматрати као баријеру, јер ће се то улагање, гледано дугорочно, многоструко исплатити у експлоатационом периоду пута.

Могућности примјене електрофилтерског летећег пепела у разним привредним гранама раније су доказана. Већа примјена летећег пепела у грађевинарству имала би већи економски, еколошки и практични значај. Такође, она би допринијела заштити животне средине, што би се огледало кроз: смањење загађења ваздуха, земљишта и воде. Смањење површина које су данас прекривене депонијама летећег пепела остварили би се бројни позитивни ефекти на тај начин што би се то земљиште функционално искористило у друге сврхе. Већом примјеном летећег пепела би се смањила употреба других материјала у изради коловозних конструкција, што је оправдано са економске стране и доприноси одрживом развоју. Резерве камених материјала које се користе у путарству су у многим земљама прилично ограничене, а повећана употреба летећег пепела би допринијела њиховој мањој примјени, а самим тим и остварењу бројних других позитивних ефеката, међу којима се посебно истичу финансијска уштеда и уштеда енергије која је неопходна за откривку, производњу, обликовање, експлоатацију, допрему и уградњу камених материјала приликом градње путева. Узимајући у обзир да и летећи пепео посједује пуцоланска својства, примјена цемента (који је један од најскупљих материјала у градњи путева) би се значајно редуковала код градње цементних стабилизација коловозних конструкција, што би значајно утицало на смањење укупне цијене коштања коловозне конструкције. Посебна оправданост примјене наведених отпадних материјала, узимајући у обзир цијене коштања коловозних конструкција, може бити у земљама са мањом економском моћи, као што су земље западног Балкана, а у којима је примјена летећег пепела у градњи путева тренутно на ниском нивоу. Да би се повећала примјена летећег пепела у путарству Србије, неопходно је прилагодити и законску регулативу и стандардизацију.

12. НАУЧНИ ДОПРИНОС И ПРАВЦИ ДАЉЕГ ИСТРАЖИВАЊА

Пројектовање и примјена цементних стабилизација у поступцима реконструкције, рехабилитације или новоградње коловозних конструкција је перспективан и до краја неистражен тип градње путева, који у путоградњи Србије још увијек није довољно заступљен. У овом истраживању акценат је стављен на анализу могућности примјену рециклираних и отпадних материјала у градњи цементних стабилизација и оптимизацију поступка дефинисања компонентних материјала у стабилизацијским мјешавинама. Детаљном анализом досадашних истраживања могућности примјене рециклираних и отпадних материјала, тј. рециклираног асфалтног агрегата и електрофилтерског летећег пепела, у изради цементних стабилизација, може се закључити да ова научна област није још увијек довољно истражена. Научни допринос ове докторске дисертације се првенствено огледа кроз испуњење дефинисаних хипотеза, а то су:

- Замјена природног агрегата шљунка са рециклираним асфалтним агрегатом у комбинацији са индустријским нуспроизводом - електрофилтерским летећим пепелом (као материјалом замјене за дио цементног везива) има оправданост примјене у изради слојева цементних стабилизација коловозних конструкција, за одређена процентуална учешћа појединих компонентних материјала;
- Употребом поменутих рециклираних материјала добијају се задовољавајуће физичке и механичке карактеристике цементних стабилизација (у поређењу са стабилизацијама природног агрегата шљунка са цементом), при чему се могу остварити бројни финансијски бенефити с обзиром на ниске цијене наведених рециклираних материјала;
- Стабилизације са електрофилтерским летећим пепелом имају значајан каснији развој чврстоћа и исте или боље физичко-механичке карактеристике од чисто цементних стабилизација;
- Лака доступност и велика могућност примјене рециклираног асфалтног агрегата и електрофилтерског летећег пепела из термоелектрана (који се сматра за најзаступљенији отпадни материјал у Србији), а све у циљу промоције одрживе градње и заштите животне средине.

Поред испитивања дефинисаних механичких карактеристика цементне стабилизације, због динамичке природе саобраћајног оптерећења, у даљим истраживањима потребно је анализирати динамичке и реолошке карактеристике цементних стабилизација, при чему се првенствено мисли на одређивање динамичких модула еластичности и дефинисање отпорности на замор стабилизованог слоја и комплетне коловозне конструкције. Идеална цементна стабилизација је она која има високе вриједности чврстоћа и ниске вриједности динамичких модула еластичности, што је само по себи контрадикторно, међутим тај однос је могуће редуковати примјеном одређених адитива, чија примјена у свијету је све више заступљена. За одређивање динамичких карактеристика неопходно је познавати и вриједности односа попречних и подужних деформација, тј. *Poisson*-овог коефицијента, који за стабилизацијске мјешавине најчешће износи од 0,15 до 0,30 [10]. Ограничавајући фактор код одређивања карактеристика цементних стабилизација су специјални захтјеви стандардизације, који се односе на димензије

узорака и тачно дефинисан поступак справљања, а који често нису повољни за израду испитних узорака.

Поступци испитивања физичко-механичких карактеристика цементних стабилизација у свијету су доста напредовали у посљедње вријеме, при чему се првенствено мисли на примјену триаксијалног опита у испитивању, чија примјена би требала бити заступљенија код нас и свакако у том правцу треба у будућности размишљати.

Примјена отпадних материјала у градњи путева у свијету је све популарнија. Поред рециклираног асфалтног агрегата за градњу цементних стабилизација користе се и други рециклирани материјали, првенствено рециклирани бетон, па би се у будућности акценат могао ставити на анализу могућности примјене рециклираног бетона у градњи цементних стабилизација. Употреба отпадних материјала, осим кроз примјену агрегата за израду стабилизација, може се анализирати и кроз примјену везивних материјала. Примјена цемента (који је уз битумен најскупљи везивни материјал у коловозној конструкцији) поред електрофилтерског летећег пепела може успјешно да се редукује употребом и других отпадних материјала попут гранулисане згуре из високих пећи и разних врста биопепела, али је за њихову већу примјену потребно спровести обимна научна истраживања и детаљно дефинисати могућности примјене.

Поред наведених препорука, за даља истраживања на пољу примјене цементних стабилизација са летећим пепелом, пожељно је спровести испитивања и анализу резултата физичко-механичких карактеристика узорака његованих дуже од 90 дана и при различитим условима његе (тј. анализирати утицај варијације температуре и влажности околине на добијене резултате испитивања), као и анализу факторијалног експеримента за индиректне затезне чврстоће.

13. ЛИТЕРАТУРА

- [1] M.I.Giani, G.Dotelli, N.Brandini, L.Zampori, *Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling*, Resources, Conservation and Recycling 104 (2015): 224–238
- [2] A.Tabaković, C.McNally, E.Fallon, *Specification development for cold in-situ recycling of asphalt*, Construction and Building Materials 102 (2016): 318–328
- [3] D.A.Byrne, *Recycling of asphalt pavements in new bituminous mixes*, School of built environment, Napier University, United Kingdom (2005)
- [4] Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA), *Basic Asphalt Recycling Manual*, U.S. Department of Transportation and Federal Highway Administration, United States (2001)
- [5] J.Read, D.Whiteoak, *The Shell Bitumen Handbook*, Fifth Edition, London (2003)
- [6] J.J.A.Gerardu, C.F.Hendriks, *Recycling of road pavement materials in the Netherlands*, Road engineering division of the rijkswaterstaat, Delft, Netherlands (1985)
- [7] P.Braunović, *Kolovozne konstrukcije od stabilizovanog lokalnog materijala*, Građevinska knjiga Beograd (1991)
- [8] S.Dimter, *Svojstva stabilizacijskih mješavina namijenjenih gradnji cesta*, Doktorska disertacija, Građevinski fakultet Zagreb, Hrvatska (2005)
- [9] М.М.Ршумовић, *Цементи као везиво за израду слојева коловозне конструкције, Материјали и конструкције* (1994): 48-53
- [10] B.Babić, *Utjecaj promjena u sastavu na inženjerska svojstva mješavine cementom stabilizovanog šljunka*, Doktorska disertacija, Fakultet građevinskih znanosti Zagreb, Hrvatska (1981)
- [11] Институт за путеве, *Коришћење електрофилтерског пепела и шљаке произведених у термоелектранама Никола Тесла А и Б и термоелектранама Костолац А и Б за потребе путограње*, Београд (2008)
- [12] B.Stojanović, *Balast pereо, pogodna sirovina za gradnju puteva*, Savjetovanje o primjeni elektrofилтерског пепела и шљаке у изградњи путне инфраструктуре, Tuzla (BiH) (2003)
- [13] Wirtgen group, *Wirtgen Cold Recycling Technology*, 1st edition, Windhagen, Germany (2012)
- [14] M.A.Estrada, *Full-Depth Reclamation (FDR)*, Western States In-place Recycling Conference Ontario, CA (2012)
- [15] *World energy outlook 2019*, International Energy Agency, iea.org/weo, ISBN 978-92-64-97300-8
- [16] M.Stojanović, V.Radonjanin, M.Malešev, T.Milović, S.Furgan, *Compressive strength of cement stabilizations containing recycled and waste materials*, Građevinar 73 (2021) 8: 791-804
- [17] B.Hrast, *Hladna reciklaža obstojećih cest – stabiliziranje z različnimi vezivi*, Master rad, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Ljubljana (Slovenija) (2012)
- [18] *Стратегија безбедности саобраћаја на путевима Републике Србије за период од 2015. до 2020.године* („Сл. гласник РС”, бр. 64/2015)
- [19] Д.Дрндарски, *Рециклирање постојећих асфалтних коловоза*, Рехабилитација и реконструкција путева, Златибор (2007)
- [20] Ђ.Uzelac, *Putevi i Saobraćajnice*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad (2015)
- [21] *Uredba o kategorizaciji državnih puteva* („Sl.glasnik RS”, br.105/2013, 119/2013 i 93/2016)
- [22] Ђ.Uzelac i grupa autora, *Upustvo i tehnički uslovi za duboku reciklažu na licu mesta po hladnom postupku kod rehabilitacije kolovoznih konstrukcija*, Beograd (2002)
- [23] Y.S.Yeo, *Characterisation of Cement Treated Crushed Rock Base Course for Western Australian Roads*, Doctoral thesis (Australia) (2011)
- [24] J.Kennedy, *Hydraulically-bound mixtures for pavements*, Cement and Concrete Industry Publication, Camberley (2006)

- [25] R.Jakovljević, *Optimizacija sastava nosećeg sloja kolovozne konstrukcije na bazi agregata od hladno recikliranog asfalta sa aspekta mehaničkih karakteristika*, Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad (2016)
- [26] G.Tebaldi, E.Dave, P.Marsac, P.Muraya, M.Hugener, M.Pasetto, A.Graziani, A.Grilli, A.Marradi, L.Wendling, et al. *Classification of recycled asphalt (RA) material*, 2nd International Symposium on Asphalt Pavement and Environment, France, Transportation research board (2012)
- [27] FMG group, Shatec engineering consultants, *Cold in-place recycling with expanded asphalt mix (CIR EAM/FOAM) technology*, United States (2013)
- [28] Y.Niazu, M.Jalili, *Effect of Portland cement and lime additives on properties of cold in-place recycled mixtures with asphalt emulsion*, Construction and Building Materials 23 (2009): 1338-1343
- [29] A.J.N.Lewis, D.C.Collings, *Cold in place recycling: a relevant process for road Rehabilitation and upgrading*, 7th Conference on asphalt pavements for Southern Africa, Kloof, South Africa (1999)
- [30] K.Šarić, *Ponovna uporaba recikliranega asfalta v cementni stabilizaciji z uporabo dodatka NovoCrete*, Magistarski rad, Maribor (2013)
- [31] Wirtgen group, *Cutting-edge Wirtgen technology in successful operation on Interstate 81*, Windhagen, Germany (2012)
- [32] National cooperative highway research program, *Recycling and Reclamation of Asphalt Pavement Using In-Place Methods*, Transport research board of the national academies, Washington (2011)
- [33] Hrvatske ceste doo, *Tehnički uvjeti za izradu nosivih slojeva kolnika tehnologijom recikliranja po hladnom postupku*, Zagreb (2013)
- [34] G.Petković, C.J.Engelsen, A.O.Håøya, G.D.Breedveld, *Environmental impact from the use of recycled materials in road construction: method for decision-making in Norway*, Resources, Conservation and Recycling 42 (2004): 249-264
- [35] National asphalt pavement association (NAPA), *Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage*, Lanham, Maryland (2015)
- [36] CEDR Transnational Road Research Programme Call 2012: *Report on available test and mix design procedures for cold-recycled bitumen stabilised materials*, EU (2014)
- [37] EAPA – European asphalt pavement association, *Asphalt in figures*, Belgium (2019)
- [38] S.Cmiljanić, V.Vujanić, *Problemi u primjeni elektrofilterskog pepela i šljake u izgradnji puteva u Republici Srbiji, Savjetovanje o primjeni elektrofilterskog pepela i šljake u izgradnji putne infrastrukture*, Tuzla (2003)
- [39] American Coal Ash Association, *Fly Ash Facts for Highway Engineers*, Aurora, Colorado (2003)
- [40] M.Thomas, *Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete*, Portland Cement Association, Illinois, US (2007)
- [41] C.E.Brackett, *Availability, Quantity and Present Utilization of Fly Ash*, Proc.FACC, BMIC, Washington D. C. (1979)
- [42] M.Stojanović, V.Radonjanin, M.Malešev, T.Milović, S.Furgan, *Compressive strength of cement stabilizations containing recycled and waste materials*, Građevinar 73 (2021) 8: 791-804
- [43] Lj.Tanasijević, *Upotreba elektrofilterskog pepela i šljake proizvedenih iz termoenergetskih postrojenja*, Privredna komora Srbije - internet prezentacija (2011)
- [44] A.Imamović, D. Zenunović, *Proizvodnja mješavina pepela, kreča i kamena, oprema i tehnologija primjenjena u svijetu*, Institut GIT Tuzla (2003)
- [45] J.Dragaš, S.Marinković, Lj.Miličić, S.Marković, N.Tošić, I.Ignjatović, *Geopolimeri na bazi alkalno aktiviranog elektrofilterskog pepela kao novo vezivo u betonu*, IZGRADNJA 67 (2013): 9-10, 275-284

- [46] S.Mahvash, S.López-Querol, A.Bahadori-Jahromi, *Effect of class F fly ash on fine sand compaction through soil stabilization*, Structural Engineering, Civil Engineering (2017)
- [47] Z.Tang, S.Ma, J.Ding, Y.Wang, S. Zheng, G.Zhai, *Current Status and Prospect of Fly Ash Utilization in China*, World of Coal Ash (WOCA) Conference, Lexington, KY (2013)
- [48] D.Kisić, S.Miletić, V.Radonjić, S.Radanović, J.Filipović, I.Gržetić, *Prirodna radioaktivnost uglja i letećeg pepela u termoelektrani Nikola Tesla B*, Hemijska Industrija 67 (5) (2013): 729–738
- [49] M.Životić, D. Stojiljković, A. Jovović, V. Čidić, *Mogućnosti korišćenja pepela i šljake sa deponije termoelektrane Nikola Tesla kao otpada sa upotrebom vrijednošću*, Hemijska industrija 66 (3) (2012): 403-412
- [50] A.M. Dizdar, *Mikrovalna i ultrazvučna digestija pepela krutih goriva*, Diplomski rad, Zagreb (2012)
- [51] *Закон о управљању отпадом – који дефинише поновну употребу отпада у које се сврстава и летећи пепео*, („Сл.Гласник РС”, бр. 36/2009 и 88/2010, члан 38.)
- [52] *Правилник о категоријама, испитивању и класификацији отпада*, („Сл.Гласник РС”, бр. 56/2010)
- [53] *Правилник о условима и начину сакупљања, транспорта, складиштења и третмана отпада који се користи као секундарна сировина или за добијање енергије*, („Сл.Гласник РС”, бр. 98/2010)
- [54] *Уредба о техничким и другим захтевима за пепео, као грађевински материјал намењен за употребу у изградњи, реконструкцији, санацији и одржавању инфраструктурних објеката јавне намене*, („Сл.гласник РС”, бр. 56/2015)
- [55] R.Taha, A.S. Al-Harthy, K.Al-shamsi, *Cement stabilization of reclaimed asphalt pavement aggregate for road bases and subbase*, Journal of Materials in Civil Engineering (2002)
- [56] L.Xiangguo, Y.Xiaobo, M.Baoguo, H.Jian, L.Junxiao, *Cement-fly Ash Stabilization of Cold In-place Recycled (CIR) Asphalt Pavement Mixtures for Road Bases or Subbases*, Journal of Wuhan University of Technology – Mater. Sci.Ed (2013)
- [57] M.Isola, G.Betti, A. Marradi, G.Tebaldi, *Evaluation of cement treated mixtures with high percentage of reclaimed asphalt pavement*, Construction and Building Materials 48 (2013): 238-247
- [58] Institut za materijale Srbije (IMS), *Prethodna proba: Obilaznica oko Smedereva km 262+704 do 268+700 i državni put IB reda km 108+197 do km 110+450 – Izveštaj o ispitivanju*, Beograd (2015)
- [59] M.Baoguo, H.Wen, W.Dingbang, *Performance of RAP in the System of Cold In-place Recycling of Asphalt Pavement*, Journal of Wuhan University of Technology (2011)
- [60] F.F.Camargo, T.B.Edil, C.H.Benson, *Strength and stiffness of recycled materials stabilised with fly ash: a laboratory study*, Road Materials and Pavement Design (2013)
- [61] H.Wen, J.Warner, T.Edil, *Laboratory comparison of crushed aggregate and recycled pavement material with and without high carbon fly ash*, Presented at 87th annual meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC (2008)
- [62] J.K.Thakur, J.Han, *Recent Development of Recycled Asphalt Pavement (RAP) Bases Treated for Roadway Applications*, Transp. Infrastruct. Geotech. (2015) 68–86
- [63] H.Wen, M.P.Tharaniyil, B.Ramme, *Investigation of Performance of Asphalt Pavement with Fly-Ash Stabilized Cold In-Place Recycled Base Course*, Transportation Research Record (2016)
- [64] *Cement Treated RAP Mixes for Roadway Bases*, Research report, Center for Transportation Infrastructure Systems The University of Texas (2010)
- [65] J.C.Tolbert, *Effect of High Percentages of Reclaimed Asphalt Pavement on Mechanical Properties of Cement-Treated Base Material*, Brigham Young University – Provo (2014)
- [66] D.X.Xuan, L.J.M.Houben, A.A.A.Molenaar, Z.H.Shui, *Mechanical properties of cement-treated aggregate material – A review*, Materials and Design 33 (2012) 496–502

- [67] H.Wen, T.B.Edil, *Sustainable Reconstruction of Highways with In-Situ Reclamation of Materials Stabilized for Heavier Loads*, Proc. 2nd Int. Conf. on Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (2009)
- [68] H.E.Bofinger, *The measurement of the tensile properties of soil-cement*, Road research laboratory, Crowthorne, Berkshire (1970)
- [69] K.Sobhan, M.Mashnad, *Fatigue Durability of Stabilized Recycled Aggregate Base Course Containing Fly Ash and Waste-Plastic Strip Reinforcement – Final report*, Department of Civil and Geological Engineering New Mexico State University November (2000)
- [70] K.Ksaibati, T.Conklin, *Field Performance Evaluation of – Cement Treated Bases With and Without Fly Ash*, Transportation Research Record (1994): 16-21
- [71] A.Šasegi, *Svojstva mješavina stabiliziranih cementom*, Diplomski rad, Građevinski fakultet Osijek, Hrvatska (2016)
- [72] S.Lim, D.G.Zollinger, *Estimation of the compressive strength and modulus of elasticity of cement-treated aggregate base materials*, Meeting of the Transportation Research Board Washington (2003)
- [73] S.Saride, D.Avirneni, S.C.P.Javadi, A.J.Puppala, L.R.Hoyos, *Evaluation of Fly ash Treated Reclaimed Asphalt Pavement for Base/Subbase Applications*, Indian Geotech (2015): 401–411
- [74] I.S.Bessa, A.L.Aranha, K.L.Vasconcelos, A.H.M.Silva, L.L.B.Bernucci, *Laboratory and field evaluation of recycled unbound layers with cement for use in asphalt pavement rehabilitation*, Materials and Structures (2015)
- [75] F.Camargo, H.Wen, T.Edil, Y.H. Son, *Comparative assessment of crushed aggregates and bound/unbound recycled asphalt pavement as base materials*, International Journal of Pavement Engineering (2012)
- [76] A.V.Brown, *Cement Stabilization of Aggregate Base Materials Blended with Reclaimed Asphalt Pavement*, Department of Civil and Environmental Engineering Brigham Young University – Provo (2006)
- [77] P.A.Dixon, *Factors Affecting the Strength of Road Base Stabilized with Cement Slurry or Dry Cement in Conjunction with Full-Depth Reclamation*, Brigham Young University – Provo (2011)
- [78] K.Nusit, P.Jitsangiam, J.Kodikara, H.H.Bui, *Dynamic Modulus Measurements of Bound Cement-Treated Base Materials*, Geotechnical Testing Journal (2015)
- [79] J.Suebsuk, A.Suksan, S.Horpibulsuk, *Strength assessment of cement treated soil reclaimed asphalt pavement (RAP) mixture*, International Journal of Geomatics and Geosciences (Int. J. of GEOMATE), Japan (2014): 878-884
- [80] A.Mohammadinia, A.Arulrajah, S.Horpibulsuk, A.Chinkulkijniwat, *Effect of fly ash on properties of crushed brick and reclaimed asphalt in pavement base/subbase applications*, Journal of Hazardous Materials 321 (2016): 547–556
- [81] Y.S.Yeo, *Characterisation of Cement Treated Crushed Rock Basecourse for Western Australian Roads*, School of Civil and Mechanical Engineering, Curtin University, Australia (2011)
- [82] A.Mista, S.Upadhyaya, F.Gustin, A.Roohanirad, J.Stokes, *Full-Depth Cold In-Place Recycling of Asphalt Pavements Using Self-Cementing Fly-Ash: Field and Laboratory Study*, World of Coal Ash (WOCA), Lexington, Kentucky, USA (2005)
- [83] H.Taherkhani, F.Farkhi, *Mechanical properties of cement stabilized mixtures of recycled asphalt and cement concrete for use in pavement*, Indian J.Sci.Res. (2014): 288-296
- [84] A.Habal, *Laboratory investigations on stabilized reclaimed asphalt pavement (RAP) material*, Indian highways (2015)
- [85] Agrela F., Ramirez A., Barbudo A., Galvín A.P., Jimenez J.R., *Real application of cement treated mixed recycled aggregates on road bases in Malaga, Spain*, Transportation Research Board (2012)

- [86] M.Pejaković, *Otpornost na smrzavanje cementom stabiliziranih mješavina*, Diplomski rad, Građevinski fakultet Osijek, Hrvatska (2015)
- [87] A.Mohammadinia, A.Arulrajah, J.Sanjayan, M.M.Disfani, M.W.Bo, S.Darmawan, *Laboratory Evaluation of the Use of Cement-Treated Construction and Demolition Materials in Pavement Base and Subbase Applications*, Journal of Materials in Civil Engineering (2014)
- [88] T.Šolić, S.Rajić, *Tehnološki postupci izrade nosivih slojeva kolničke konstrukcije*, Građevinar 61 (2009): 29-37
- [89] M.H.Maher, P.N.Balagurum, *Properties of flowable high – volume fly ash – cement composite*, Journal of materials in Civil Engineering (1993): 212-225
- [90] K.Šarić, *Ponovna uporaba recikliranega asfalta v cementni stabilizaciji z uporabo dodatka NovoCrete*, Magistarski rad, Maribor (Slovenija) (2013)
- [91] T.Ćulibrk, L.Matijević, D.Pocrnja, *Izrada probne dionice sa polukrutim kolničkim zastorom na ŽC 5182 u NP „Sjeverni Velebit”*, Hrvatski cestar (2012)
- [92] Direkcija ceste Federacije BiH, JP Putevi Republike Srpske, *Smjernice za projektovanje, građenje, održavanje i nadzor na putevima; Knjiga II: Građenje; Dio 2: Posebni tehnički uslovi; Tačka 2.2.2.11.3. Vezani donji nosivi slojevi*, Sarajevo/Banja Luka, (Bosna i Hercegovina) (2005)
- [93] Wirtgen group, *High-quality in place-recycling of asphalt layers Cold Recycler 3800 CR*, Windhagen, Germany (2012)
- [94] S.Dimter, M.Šperac, *Stabilizacijske mješavine s letećim pepelom u nosivim slojevima kolničke konstrukcije*, Zbornik radova, 1.bh kongres o cestama, Sarajevo, BiH (2007)
- [95] ЈП Пuteви Србије, *Технички услови за грађене путева у Републици Србији*, Београд (2009)
- [96] M.Malešev, *Parametarska analiza uticaja novih vrsta cementa proizvedenih prema EN 197-1 na svojstva betona*, Doktorska disertacija, Građevinski fakultet Beograd (2003)
- [97] <http://www.eapa.org>
- [98] <https://en.wikipedia.org/wiki/Europe>
- [99] <http://carma.org/plant/detail/31240>
- [100] www.putevi-srbije.rs/index.php/организација/сектор-за-стратегију-пројектовање-и-развој/одељење-за-безбедност-саобраћаја
- [101] http://ec.europa.eu/transport/road_safety/specialist/statistics/map-viewer/
- [102] https://ec.europa.eu/transport/road_safety/specialist/statistics_en
- [103] https://www.theglobaleconomy.com/rankings/roads_quality/#Serbia
- [104] https://sr.wikipedia.org/sr/wiki/Путна_мрежа_у_Србији
- [105] <https://www.eea.europa.eu>
- [106] <https://www.asphalt.de/themen/umwelt/wiederverwendung/>
- [107] <http://www.ecoba.com/ecobaccputil.html>
- [108] <https://aca-usa.org/wp-content/uploads/coal-combustion-products-use/Coal-Ash-Production-and-Use.pdf>
- [109] <https://www.aaa-usa.org/>
- [110] <http://www.circainfo.ca/>
- [111] <http://www.ecoba.com/>
- [112] <https://www.coalash.co.za>
- [113] <http://www.asiancoalash.org>
- [114] <http://www.jcoal.or.jp/eng/work/04/>
- [115] <http://www.wccpn.net/>
- [116] <https://bankwatch.org/wp-content/uploads/2019/12/comply-or-close-BA.pdf>

СТАНДАРДИ КОРИШЋЕНИ У ИСТРАЖИВАЊУ

- [C1] JUS U.E9.024:1970 – Noseći slojevi podloga za puteve od cementom stabilizovanog tla, Tehnički uslovi za izgradnju, JZS, Beograd;
- [C2] SRPS U.E9.024:1980 – Projektovanje i građenje puteva - Izrada nosećih slojeva kolovoznih konstrukcija puteva od materijala stabilizovanih cementom i sličnim hidrauličnim vezama - Tehnički uslovi, ICC;
- [C3] SRPS EN 13286-41:2012 – Nevezane i hidrauličkim vezivom vezane mešavine - Deo 41: Metoda ispitivanja za određivanje čvrstoće pri pritisku mešavina vezanih hidrauličkim vezivom, ICC;
- [C4] SRPS EN 13286-2:2012 – Nevezane i hidrauličkim vezivom vezane mešavine - Deo 2: Metode ispitivanja za laboratorijsku referentnu zapreminsku masu i sadržaj vode - Zbijanje po Proктору, ICC;
- [C5] SRPS EN 13286-42:2012 – Nevezane i hidrauličkim vezivom vezane mešavine - Deo 42: Metoda ispitivanja za određivanje čvrstoće pri indirektnom zatezanju mešavina vezanih hidrauličkim vezivom, ICC;
- [C6] SRPS U.B1.050:1970 – Geomehanička ispitivanja - Ispitivanje otpornosti cementom stabilizovanog tla prema mrazu, ICC;
- [C7] EN 14227-1:2013 – Hydraulically bound mixtures - Specifications - Part 1: Cement bound granular mixtures, CEN;
- [C8] SRPS B.C8.022:1976 – Cement. Ispitivanje čvrstoće cementa, ICC;
- [C9] SRPS B.C8.023:1982 – Cementi. Metode ispitivanja fizičkih osobina cementa, ICC;
- [C10] SRPS B.C8.024:1964 – Određivanje specifične površine portland-cementa, ICC;
- [C11] SRPS B.C1.011:2001 – Cement - Portland-cement, portland-kompozitni cement, metalurški cement, pucolanski cement, kompozitni cement - Definicije, klasifikacija i tehnički uslovi, ICC;
- [C12] SRPS EN 197-1:2010 – Cement - Deo 1: Sastav, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti za obične cemente, ICC;
- [C13] SRPS EN 13286-1:2012 – Nevezane i hidrauličkim vezivom vezane mešavine - Deo 1: Metode ispitivanja za laboratorijsku referentnu zapreminsku masu i sadržaj vode - Uvod, opšti zahtevi i uzorkovanje, ICC;
- [C14] SRPS U.B1.038:1997 – Geomehanička ispitivanja - ODREĐIVANJE ODNOSA VLAŽNOSTI I SUVE ZAPREMINSKE MASE TLA, ICC;
- [C15] SRPS B.C1.018:2015 – Nemetalne mineralne sirovine - Pucolanski materijali - Sastojci za proizvodnju cementa - Klasifikacija, tehnički uslovi i metode ispitivanja, ICC;
- [C16] ASTM C618-17 – Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete;
- [C17] SRPS B.H8.359:1973 – Metode ispitivanja uglja i koksa - Određivanje hemijskog sastava pepela - Osnovne odredbe, ICC;
- [C18] CAN/CSA-A3001-13:2013 – Cementitious Materials Used in Concrete;
- [C19] EN 14227-3:2013 – Hydraulically bound mixtures–Specifications–Part 3, Fly ash bound mixtures, CEN;
- [C20] EN 14227-4:2013 – Hydraulically bound mixtures–Specifications–Part 4, Fly ash for hydraulically bound mixtures, CEN;
- [C21] EN 14227-14:2006 – Hydraulically bound mixtures–Specifications–Part 14, Soil treated by fly ash, CEN;

- [C22] EN 450-1:2012 – Fly ash for concrete–Part 1: Definition, specifications and conformity criteria, CEN;
- [C23] EN 450-2:2012 – Fly ash for concrete–Part 2: Conformity evaluation, CEN;
- [C24] ASTM C311-17 – Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete;
- [C25] ASTM D5239-12 – Standard Practice for Characterizing Fly Ash for Use in Soil Stabilization;
- [C26] ASTM E850-10 – Standard Guide for Characterization of Inorganic Process Wastes for Use as Structural Fill;
- [C27] ASTM E1861-97 – Standard Guide for Use of Coal Combustion By-products in Structural Fills (Withdrawn 2003);
- [C28] ASTM D5370-14 – Standard Specification for Pozzolanic Blended Materials in Construction Applications;
- [C29] AS 1129-1971 – Fly ash for use in concrete;
- [C30] AS/NZS 3582.1:2016 – Supplementary cementitious materials, Part 1: Fly Ash;
- [C31] CAN/CSA A23.5-97 – Canadian Specification for Supplementary Cementing Materials (includes Fly Ash);
- [C32] BS EN 450-1:2012 – Fly ash for concrete. Definition, specifications and conformity criteria;
- [C33] BS 6610:1996 – Specification for Pozzolanic pulverized-fuel ash cement;
- [C34] DIN EN 450-1:2012 – Flugasche für Beton – Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien;
- [C35] DIN EN 445:1996-07 – Einpreßmörtel für Spannglieder – Prüfverfahren;
- [C36] DIN EN 446:1996-07 – Einpreßmörtel für Spannglieder – Einpreßverfahren;
- [C37] DIN EN 447:1996-07 – Einpreßmörtel für Spannglieder - Anforderungen für üblichen Einpreßmörtel;
- [C38] DIN EN 450:1995-01 – Flugasche für Beton - Definitionen, Anforderungen und Güteüberwachung;
- [C39] DIN EN 451-1:1995-01 – Prüfverfahren für Flugasche - Teil 1: Bestimmung des freien Calciumoxidgehalts;
- [C40] DIN EN 451-2:1995-01 – Prüfverfahren für Flugasche - Teil 2: Bestimmung der Feinheit durch Naßsiebung;
- [C41] HRN U.Eg.024/80 – Projektiranje i građenje cesta. Izrada nosivih slojeva kolničke konstrukcije putova od materijala stabilizovanih cementom i sličnim hidrauličnim vezivom. Tehnički uvjeti;
- [C42] SRPS U.B1.018:2005 – Geomehanička ispitivanja - Određivanje granulometrijskog sastava;
- [C43] AASHTO T27-14 – Standard Method of Test for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates;
- [C44] ASTM D1633-17 – Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil - Cement Cylinders;
- [C45] AASHTO T180-17 – Standard Method of Test for Moisture - Density Relations of Soils;
- [C46] JTG E51-2009 – Test Methods of Materials Stabilized with Inorganic Binders for Highway Engineering;
- [C47] ASTM D698-12 – Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort;

- [C48] ASTM D2166-16 – Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil;
- [C49] UNI EN 13242:2013 – Aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici per l'impiego in opere di ingegneria civile e nella costruzione di strade;
- [C50] UNI EN 12620:2008 – Aggregati per calcestruzzo;
- [C51] ASTM D3497-79(2003) – Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures;
- [C51] ASTM D2487-17 – Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes;
- [C52] AASHTO M147-65(2004) – Standard Specification for Materials for Aggregate and Soil-Aggregate Subbase, Base, and Surface Courses;
- [C53] ASTM D5102-04 – Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures;
- [C54] ASTM D1557-12 – Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort;
- [C55] EN 13286-2:2010 – Unbound and hydraulically bound mixtures. Test methods for laboratory reference density and water content. Proctor compaction, CEN;
- [C56] EN 13286-41:2003 – Unbound and hydraulically bound mixtures. Test method for determination of the compressive strength of hydraulically bound mixtures, CEN;
- [C57] ASTM D558-11 – Standard Test Methods for Moisture-Density (Unit Weight) Relations of Soil-Cement Mixtures;
- [C58] ASTM C39/C39M-12 – Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens;
- [C59] ASTM C469/C469M-14 – Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression;
- [C60] IS 2386-1(1963)– Methods of Test for Aggregates for Concrete, Part I: Particle Size and Shape;
- [C61] IS 2720-10(1991) – Methods of test for soils, Part 10: Determination of unconfined compressive strength;
- [C62] ASTM D422-63(2007) – Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils;
- [C63] AS 3972-2010 – General purpose and blended cements;
- [C64] AS 5101.2.2-2008 – Methods for preparation and testing of stabilized materials Sampling - Preparation of stabilized pavement materials;
- [C65] AS 1289.3.6.3-2003 – Methods of testing soils for engineering purposes Soil classification tests - Determination of the particle size distribution of a soil - Standard method of fine analysis using a hydrometer;
- [C66] AS 1028.5.2.1-2003 – Methods of testing soils for engineering purposes, Method 5.2.1: Soil compaction and density tests – determination of the dry density/moisture content relation of a soil using modified compaction effort;
- [C67] AS5101.4.-2008 – Methods for preparation and testing of stabilised materials, Method 4: Unconfined compressive strength of compacted materials;
- [C68] AS1012.10-2000 – Methods of testing concrete, Method 10: Determination of indirect tensile strength of concrete cylinders, „Brazil” or splitting test;
- [C69] ASTM C136/C136M-14 – Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates;
- [C70] IS 2720-8(1983): Methods of test for soils, Part 8: Determination of water content-dry density relation using heavy compaction;

- [C71] EN 933-1:2012 – Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method, CEN;
- [C72] UNE 103501:1994 – Geotécnia. Ensayo de compactación. Proctor modificado;
- [C73] NLT-305/90 – Resistencia a compresión simple de materiales tratados con conglomerantes hidráulicos;
- [C74] EN 13791:2007 – Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components, CEN;
- [C75] EN 13286-50:2004 – Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 50: Method for the manufacture of test specimens of hydraulically bound mixtures using Proctor equipment or vibrating table compaction, CEN;
- [C76] HRN U.B1.050 – Ispitivanje otpornosti cementom stabiliziranog tla na smrzavanje;
- [C77] SIST EN 14227-1:2005 – Hidraulično vezane zmesi – Specifikacije – 1. del: S cementom stabilizirane mešanice za vezane spodnje nosilne plast;
- [C78] SRPS EN 196-6:2011 – Metode ispitivanja cementa – Deo 6: Određivanje finoće mliva, ICC;
- [C79] SRPS EN 196-3:2017 – Metode ispitivanja cementa – Deo 3: Određivanje vremena vezivanja i stalnosti zapremine, ICC;
- [C80] SRPS B.C8.023:1997 – Cement - Određivanje zapreminske mase, ICC;
- [C81] SRPS EN 196-1:2008 – Metode ispitivanja cementa - Deo 1: Ispitivanje čvrstoće, ICC;
- [C82] SRPS B.Bo.001:1984 – Prirodni kamen – Uzimanje uzoraka kamena i kamenih agregata, ICC;
- [C83] SRPS B.B8.030:1986 – Kameni agregat - Određivanje zapreminske mase u rastresitom i zbijenom stanju, ICC;
- [C84] SRPS EN 1097-6:2016 – Ispitivanje mehaničkih i fizičkih svojstava agregata — Deo 6: Određivanje stvarne zapreminske mase i upijanja vode, ICC;
- [C85] SRPS B.B8.034:1986 – Kameni agregat - Određivanje lakih čestica, ICC;
- [C86] SRPS B.B8.037:1986 – Kameni agregat - Određivanje slabih zrna, ICC;
- [C87] SRPS B.B8.038:1982 – Prirodni i drobljeni kameni agregati - Određivanje sadržaja grudvi gline, ICC;
- [C88] SRPS U.B1.024:1968 – Geomehanička ispitivanja - Određivanje sadržaja sagorljivih i organskih materija tla, ICC;
- [C89] SRPS EN 933-4:2010 – Ispitivanja geometrijskih svojstava agregata - Deo 4: Određivanje oblika zrna - Indeks oblika, ICC;
- [C90] SRPS U.B1.020:1980 – Geomehanička ispitivanja - Određivanje konzistencije tla - Aterbergove granice, ICC;
- [C91] SRPS U.M8.105:1985 – Ugljovodonične mešavine za puteve - Ispitivanje udela bitumena indirektnom metodom, ICC;
- [C92] SRPS EN 450-2:2010 – Leteći pepeo za beton - Deo 2: Vrednovanje usaglašenosti, ICC;
- [C93] SRPS EN 450-1:2010 – Leteći pepeo za beton - Deo 1: Definicija, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti, ICC;
- [C94] EN 13286-54:2016 – Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 54: Test method for the determination of frost susceptibility - Resistance to freezing and thawing of hydraulically bound mixtures, CEN.

ПРИЛОГ 1. - Комплетни резултати испитивања стабилизацијских мјешавина

Број узорка	Мјешавина	Пречник, d [cm]			Висина, h [cm]	Маса узорка након справљања - m ₁ [g]	Маса узорка прије испитивања - m ₂ [g]	Разлика у масама, (m ₁ -m ₂) [g]	Запремина узорка - V, [cm ³]	Запреminsка маса прије испитивања - γ, [kg/m ³]	Вријеме проласка ултразвука - t, [μs]	Брзина проласка ултразвука - V _z [km/s]	Сила лома, за черстоћу при притиску, f _c [kN]		Сила лома, за индиректну затезну черстоћу, ITS [kN]	Индиректна затезна черстоћа, ITS [MPa]	Мјешавина
		Дно узорка	Врх узорка	Средња вриједност									f _c [MPa]	f _c [MPa]			
1	M1-fc,7-1	100,86	100,38	10,06	12,12	2175	2170	5,4	963,75	2251,22	43,60	2,78	11,00	1,383	/	/	M1-fc,7-1
2	M1-fc,7-2	101,14	100,29	10,07	12,06	2175	2166	9,3	960,79	2254,09	43,30	2,79	11,00	1,381	/	/	M1-fc,7-2
3	M1-fc,7-3	100,82	100,45	10,06	12,08	2178	2169	9,0	960,85	2257,37	42,10	2,87	11,50	1,446	/	/	M1-fc,7-3
средња вриједност→				10,07	12,09	2176,00	2168,10	7,90	961,79	2254,23	43,00	2,81	11,17	1,403			
4	M1-ITS,7-1	99,80	100,80	10,03	12,12	2163	2158	5,0	957,55	2253,68	42,20	2,87	/	/	2,50	0,131	M1-ITS,7-1
5	M1-ITS,7-2	100,02	101,05	10,05	12,10	2163	2155	8,0	960,37	2243,92	42,20	2,87	/	/	2,50	0,131	M1-ITS,7-2
6	M1-ITS,7-2	99,73	101,40	10,06	12,14	2174	2167	7,0	964,28	2247,27	41,90	2,90	/	/	2,50	0,130	M1-ITS,7-2
средња вриједност→				10,05	12,12	2166,67	2160,00	6,67	960,73	2248,29	42,10	2,88			2,50	0,13072	
7	M2-fc,7-1	100,11	100,60	10,04	12,08	2171	2164	7,0	955,51	2264,76	45,80	2,64	9,50	1,201	/	/	M2-fc,7-1
8	M2-fc,7-2	100,09	100,70	10,04	12,06	2180	2174	6,0	954,85	2276,80	44,90	2,69	11,00	1,390	/	/	M2-fc,7-2
9	M2-fc,7-3	100,20	101,20	10,07	12,03	2175	2169	6,3	958,11	2263,52	44,30	2,72	12,50	1,569	/	/	M2-fc,7-3
средња вриједност→				10,05	12,06	2175,33	2168,90	6,43	956,16	2268,36	45,00	2,68	11,00	1,3867			
10	M2-ITS,7-1	100,22	100,46	10,03	12,10	2180	2175	5,0	956,41	2274,12	43,10	2,81	/	/	2,00	0,105	M2-ITS,7-1
11	M2-ITS,7-2	100,15	100,50	10,03	12,08	2169	2164	5,3	954,86	2265,98	43,10	2,80	/	/	2,10	0,110	M2-ITS,7-2
12	M2-ITS,7-3	100,13	101,30	10,07	12,05	2163	2157	6,0	959,59	2247,83	42,80	2,81	/	/	2,10	0,110	M2-ITS,7-3
средња вриједност→				10,05	12,07	2170,67	2165,23	5,43	956,95	2262,65	43,00	2,81			2,07	0,108	
13	M3-fc,7-1	100,02	100,84	10,04	12,02	2175	2165	9,6	951,79	2275,10	45,80	2,62	9,00	1,136	/	/	M3-fc,7-1
14	M3-fc,7-2	100,14	101,13	10,06	12,06	2189	2182	6,6	959,02	2275,70	46,80	2,58	7,90	0,993	/	/	M3-fc,7-2
15	M3-fc,7-3	100,13	101,21	10,07	12,03	2181	2174	7,4	957,14	2270,95	45,50	2,64	9,80	1,231	/	/	M3-fc,7-3
средња вриједност→				10,06	12,03	2181,67	2173,83	7,84	955,98	2273,92	46,03	2,61	8,90	1,120			

Број узорка	Мјешавина	Пречник, d [cm]			Висина, h [cm]	Маса узорка након исправљања - m ₁ , [g]	Маса узорка прије испитивања - m ₂ , [g]	Разлика у масама, (m ₁ -m ₂) [g]	Запремина узорка - V ₁ , [cm ³]	Запремина маса прије испитивања - V ₂ , [kg/m ³]	Вријеме проласка ултразвука - t, [μs]	Брзина проласка ултразвука - V _t , [km/s]	Сила лома, за черстоћу при притиску, f _c [kN]	Черстоћа при притиску, f _c [MPa]	Сила лома, за индиректну затезну черстоћу, ITS [kN]	Индиректна затезна черстоћа, ITS [MPa]	Мјешавина
		Дно узорка	Врх узорка	Средња вриједност													
16	M3-ITS,7-1	100,40	100,83	10,06	12,04	2181	2176	4,9	956,89	2274,15	44,53	2,70	/	/	1,80	0,095	M3-ITS,7-1
17	M3-ITS,7-2	100,45	101,03	10,07	12,08	2187	2183	4,4	962,46	2267,78	42,70	2,83	/	/	2,00	0,105	M3-ITS,7-2
18	M3-ITS,7-3	100,24	101,13	10,07	12,03	2182	2174	8,3	957,82	2269,44	43,70	2,75	/	/	2,10	0,110	M3-ITS,7-3
средња вриједност→				10,07	12,05	2183,33	2177,49	5,84	959,06	2270,46	43,64	2,76			1,97	0,103	
19	M4-fc,7-1	100,42	100,84	10,06	12,07	2115	2107	8,0	959,96	2194,88	45,10	2,68	9,50	1,194	/	/	M4-fc,7-1
20	M4-fc,7-2	100,24	100,75	10,05	12,06	2097	2091	5,6	956,59	2186,30	44,50	2,71	8,00	1,009	/	/	M4-fc,7-2
21	M4-fc,7-3	100,43	100,93	10,07	12,05	2092	2084	8,6	959,32	2172,06	45,10	2,67	8,75	1,099	/	/	M4-fc,7-3
средња вриједност→				10,06	12,06	2101,43	2094,03	7,40	958,62	2184,41	44,90	2,69	8,75	1,101			
22	M4-ITS,7-1	100,42	100,70	10,06	12,05	2103	2097	6,0	956,64	2192,05	43,10	2,79	/	/	2,10	0,110	M4-ITS,7-1
23	M4-ITS,7-2	100,22	100,65	10,04	12,09	2095	2090	5,0	957,43	2182,92	43,30	2,79	/	/	1,80	0,094	M4-ITS,7-2
24	M4-ITS,7-3	100,15	101,00	10,06	12,03	2100	2097	3,3	955,81	2193,63	43,60	2,76	/	/	1,60	0,084	M4-ITS,7-3
средња вриједност→				10,05	12,05	2099,33	2094,57	4,77	956,63	2189,53	43,33	2,78			1,83	0,096	
25	M5-fc,7-1	100,30	100,82	10,06	12,00	2107	2100	6,9	953,30	2202,97	45,80	2,62	8,00	1,007	/	/	M5-fc,7-1
26	M5-fc,7-2	100,30	100,89	10,06	12,08	2102	2096	5,8	959,69	2184,25	46,10	2,62	6,70	0,843	/	/	M5-fc,7-2
27	M5-fc,7-3	100,31	100,62	10,05	12,06	2095	2089	5,8	956,34	2184,58	46,10	2,62	6,60	0,833	/	/	M5-fc,7-3
средња вриједност→				10,05	12,05	2101,33	2095,17	6,17	956,44	2190,60	46,00	2,62	7,10	0,894			
28	M5-ITS,7-1	100,28	100,95	10,06	12,05	2115	2111	3,9	958,16	2203,28	44,30	2,72	/	/	1,50	0,079	M5-ITS,7-1
29	M5-ITS,7-2	100,20	100,80	10,05	12,02	2112	2106	6,3	953,75	2207,80	44,20	2,72	/	/	1,70	0,090	M5-ITS,7-2
30	M5-ITS,7-3	100,17	100,69	10,04	12,06	2111	2106	4,9	955,12	2205,07	44,30	2,72	/	/	1,60	0,084	M5-ITS,7-3
средња вриједност→				10,05	12,04	2112,67	2107,63	5,03	955,68	2205,38	44,27	2,72			1,60	0,084	

Број узорка	Мјешавина	Пречник, d [cm]			Висина, h [cm]	Маса узорка након исправљања - m ₁ , [g]	Маса узорка прије испитивања - m ₂ , [g]	Разлика у масама, (m ₁ -m ₂) [g]	Запремина узорка - V ₁ , [cm ³]	Запреminsка маса прије испитивања - V ₂ , [kg/m ³]	Вријеме проласка ултразвука - t, [μs]	Брзина проласка ултразвука - V _g , [km/s]	Сила лома, за черстоћу при притиску, f _c [kN]	Черстоћа при притиску, f _c [MPa]	Сила лома, за индиректну затезну черстоћу, ITS [kN]	Индиректна затезна черстоћа, ITS [MPa]	Мјешавина
		Дно узорка	Врх узорка	Средња вриједност													
31	M6-fc,7-1	100,22	100,79	10,05	12,10	2121	2112	8,8	959,64	2201,04	47,80	2,53	7,60	0,958	/	/	M6-fc,7-1
32	M6-fc,7-2	100,43	100,58	10,05	12,13	2122	2115	7,0	962,34	2197,78	48,00	2,53	6,90	0,870	/	/	M6-fc,7-2
33	M6-fc,7-3	100,03	100,60	10,03	12,08	2127	2124	3,0	955,07	2223,93	48,20	2,51	6,20	0,784	/	/	M6-fc,7-3
средња вриједност→				10,044	12,10	2123,33	2117,07	6,27	959,01	2207,58	48,00	2,52	6,900	0,871			
34	M6-ITS,7-3	100,74	100,18	10,05	12,05	2136	2131	4,8	955,13	2231,31	46,90	2,57	/	/	2,00	0,105	M6-ITS,7-3
35	M6-ITS,7-3	101,60	100,40	10,10	12,08	2132	2127	5,2	967,99	2197,12	47,30	2,55	/	/	1,50	0,078	M6-ITS,7-3
36	M6-ITS,7-3	100,71	100,24	10,05	12,15	2119	2115	3,7	962,95	2196,68	48,30	2,51	/	/	1,00	0,052	M6-ITS,7-3
средња вриједност→				10,06	12,09	2129,00	2124,43	4,57	962,03	2208,37	47,50	2,55			1,50	0,0785	
37	M7-fc,7-1	100,18	101,25	10,07	12,04	2186	2179	7,3	958,95	2271,96	28,90	4,17	27,60	3,464	/	/	M7-fc,7-1
38	M7-fc,7-2	100,26	100,75	10,05	12,07	2190	2186	4,0	957,42	2283,22	30,10	4,01	28,50	3,592	/	/	M7-fc,7-2
39	M7-fc,7-3	100,53	100,72	10,06	12,08	2186	2183	3,5	960,42	2272,44	27,40	4,41	26,90	3,383	/	/	M7-fc,7-3
средња вриједност→				10,06	12,06	2187,33	2182,40	4,93	958,93	2275,87	28,80	4,19	27,67	3,4798			
40	M7-ITS,7-1	100,41	100,80	10,06	12,04	2194	2188	6,1	957,26	2285,59	30,00	4,01	/	/	5,90	0,310	M7-ITS,7-1
41	M7-ITS,7-2	100,28	101,15	10,07	12,05	2187	2181	5,6	960,15	2271,94	29,60	4,07	/	/	5,40	0,283	M7-ITS,7-2
42	M7-ITS,7-3	100,25	100,78	10,05	12,08	2189	2184	5,2	958,24	2278,96	29,40	4,11	/	/	5,40	0,283	M7-ITS,7-3
средња вриједност→				10,06	12,06	2190,00	2184,37	5,63	958,55	2278,83	29,67	4,06			5,57	0,292	
43	M8-fc,7-1	100,14	101,47	10,08	11,94	2174	2168	5,8	952,93	2275,31	29,90	3,99	28,30	3,546	/	/	M8-fc,7-1
44	M8-fc,7-2	100,34	100,68	10,05	12,00	2185	2180	4,8	951,88	2290,42	29,50	4,07	23,90	3,012	/	/	M8-fc,7-2
45	M8-fc,7-3	100,23	100,62	10,04	12,08	2200	2193	7,1	956,61	2292,37	29,60	4,08	29,20	3,686	/	/	M8-fc,7-3
средња вриједност→				10,06	12,00	2186,33	2180,43	5,90	953,80	2286,03	29,67	4,05	27,13	3,415			

Број узорка	Мјешавина	Пречник, d [cm]			Висина, h [cm]	Маса узорка након справљања - m_1 , [g]	Маса узорка прије испитивања - m_2 , [g]	Разлика у масама, $(m_1 - m_2)$ [g]	Запремина узорка - V , [cm ³]	Запреминска маса прије испитивања - γ , [kg/m ³]	Вријеме проласка ултразвука - t , [μ s]	Брзина проласка ултразвука - V_0 , [km/s]	Сила лома, за черстоћу при притиску, f_c [kN]	Черстоћа при притиску, f_c [MPa]	Сила лома, за индиректну затезну черстоћу, ITS [kN]	Индиректна затезна черстоћа, ITS [MPa]	Мјешавина
		Дно узорка	Врх узорка	Средња вриједност													
46	M8-ITS,7-1	100,32	100,92	10,06	12,03	2203	2198	5,2	956,27	2298,30	30,40	3,96	/	/	5,30	0,279	M8-ITS,7-1
47	M8-ITS,7-2	100,27	101,05	10,07	12,06	2193	2188	4,7	959,42	2280,86	30,30	3,98	/	/	5,20	0,273	M8-ITS,7-2
48	M8-ITS,7-3	100,12	100,96	10,05	12,05	2194	2188	5,6	956,26	2288,50	29,30	4,11	/	/	6,20	0,326	M8-ITS,7-3
средња вриједност →				10,06	12,04	2196,67	2191,50	5,17	957,32	2289,22	30,00	4,02			5,57	0,293	
49	M9-fc,7-1	100,56	100,99	10,08	12,00	2182	2177	5,2	957,30	2273,88	30,90	3,88	22,90	2,871	/	/	M9-fc,7-1
50	M9-fc,7-2	100,32	100,99	10,07	12,00	2191	2186	5,0	955,19	2288,56	30,10	3,99	26,00	3,267	/	/	M9-fc,7-2
51	M9-fc,7-3	100,33	100,88	10,06	12,00	2196	2192	3,7	954,24	2297,44	30,20	3,97	26,90	3,384	/	/	M9-fc,7-3
средња вриједност →				10,07	12,00	2189,67	2185,03	4,63	955,58	2286,63	30,40	3,95	25,27	3,174			
52	M9-ITS,7-1	100,32	100,84	10,06	12,02	2190	2186	3,7	954,80	2289,81	30,50	3,94	/	/	4,90	0,258	M9-ITS,7-1
53	M9-ITS,7-2	100,33	100,97	10,07	12,00	2199	2191	7,9	954,85	2294,70	30,60	3,92	/	/	4,80	0,253	M9-ITS,7-2
54	M9-ITS,7-3	100,19	100,90	10,05	12,04	2209	2205	3,6	955,96	2307,01	31,30	3,85	/	/	4,00	0,210	M9-ITS,7-3
средња вриједност →				10,06	12,02	2199,33	2194,27	5,07	955,20	2297,17	30,80	3,90			4,57	0,240	
55	M10-fc,7-1	100,16	100,75	10,05	12,03	2140	2138	2,1	953,14	2243,01	31,70	3,79	19,10	2,410	/	/	M10-fc,7-1
56	M10-fc,7-2	100,27	100,78	10,05	12,05	2132	2131	1,5	956,37	2227,69	31,60	3,81	19,00	2,394	/	/	M10-fc,7-2
57	M10-fc,7-3	100,18	100,82	10,05	12,01	2129	2124	5,5	952,64	2229,06	31,50	3,81	18,50	2,332	/	/	M10-fc,7-3
средња вриједност →				10,05	12,03	2133,67	2130,63	3,03	954,05	2233,26	31,60	3,81	18,87	2,379			
58	M10-ITS,7-1	100,11	100,16	10,01	12,07	2152	2149	3,5	950,78	2259,73	31,30	3,86	/	/	4,90	0,258	M10-ITS,7-1
59	M10-ITS,7-2	100,25	101,28	10,08	12,09	2145	2138	7,4	964,05	2217,31	31,20	3,87	/	/	4,80	0,251	M10-ITS,7-2
60	M10-ITS,7-3	100,18	100,85	10,05	12,03	2136	2134	2,5	954,51	2235,17	31,20	3,86	/	/	4,60	0,242	M10-ITS,7-3
средња вриједност →				10,05	12,06	2144,33	2139,87	4,47	956,45	2237,40	31,23	3,86			4,77	0,250	

Број узорка	Мјешавина	Пречник, d [cm]			Висина, h [cm]	Маса узорка након справљања - m ₁ , [g]	Маса узорка прије испитивања - m ₂ , [g]	Разлика у масама, (m ₁ -m ₂) [g]	Запремина узорка - V, [cm ³]	Запреминска маса прије испитивања - γ, [kg/m ³]	Вријеме проласка ултразвука - t, [μs]	Брзина проласка ултразвука - V _t , [km/s]	Сила лома, за черстоћу при пририсуку, f _c [kN]	Черстоћа при притиску, f _c [MPa]	Сила лома, за индиректну затезну черстоћу, ITS [kN]	Индиректна затезна черстоћа, ITS [MPa]	Мјешавина
		Дно узорка	Врх узорка	Средња вриједност													
61	M11-fc,7-1	100,17	100,97	10,06	12,01	2147	2141	5,7	954,21	2243,64	34,40	3,49	18,70	2,354	/	/	M11-fc,7-1
62	M11-fc,7-2	100,18	100,80	10,05	12,04	2134	2133	1,0	954,91	2233,40	34,30	3,51	19,00	2,396	/	/	M11-fc,7-2
63	M11-fc,7-3	100,08	100,80	10,04	12,05	2129	2127	1,8	954,44	2228,23	34,10	3,53	18,40	2,322	/	/	M11-fc,7-3
средња вриједност→				10,05	12,03	2136,27	2133,43	2,83	954,52	2235,09	34,27	3,51	18,70	2,357			
64	M11-ITS,7-1	100,10	101,46	10,08	12,03	2154	2149	4,8	959,71	2239,41	34,10	3,53	/	/	4,80	0,252	M11-ITS,7-1
65	M11-ITS,7-2	100,30	101,22	10,08	12,03	2150	2146	4,1	958,85	2237,99	34,20	3,52	/	/	4,80	0,252	M11-ITS,7-2
66	M11-ITS,7-3	100,15	101,22	10,07	12,08	2159	2155	4,0	961,41	2241,48	34,00	3,55	/	/	4,40	0,230	M11-ITS,7-3
средња вриједност→				10,07	12,04	2154,33	2150,02	4,31	959,99	2239,63	34,10	3,53			4,67	0,245	
67	M12-fc,7-1	100,34	101,14	10,07	12,00	2150	2148	1,9	956,48	2246,15	36,30	3,31	18,10	2,271	/	/	M12-fc,7-1
68	M12-fc,7-2	100,30	100,74	10,05	12,08	2155	2154	1,1	958,66	2246,37	35,70	3,38	19,00	2,394	/	/	M12-fc,7-2
69	M12-fc,7-3	100,11	100,90	10,05	12,01	2133	2129	4,0	952,66	2235,22	36,00	3,34	18,90	2,382	/	/	M12-fc,7-3
средња вриједност→				10,06	12,03	2146,10	2143,77	2,33	955,93	2242,58	36,00	3,34	18,67	2,349			
70	M12-ITS,7-1	100,28	101,65	10,10	11,98	2151	2148	2,6	958,76	2240,78	36,10	3,32	/	/	4,50	0,237	M12-ITS,7-1
71	M12-ITS,7-2	100,23	100,90	10,06	12,00	2140	2136	4,0	953,00	2241,35	36,30	3,31	/	/	4,40	0,232	M12-ITS,7-2
72	M12-ITS,7-3	100,28	101,80	10,10	12,00	2159	2156	2,5	961,78	2242,18	36,00	3,33	/	/	3,90	0,205	M12-ITS,7-3
средња вриједност→				10,09	11,99	2150,00	2146,95	3,05	957,85	2241,44	36,13	3,32			4,27	0,225	
73	M1-fc,28-1	100,12	100,70	10,04	12,18	2172	2165	7,0	964,08	2245,66	35,20	3,46	18,50	2,336	/	/	M1-fc,28-1
74	M1-fc,28-2	99,95	100,45	10,02	12,12	2141	2135	6,0	955,80	2233,74	34,90	3,47	21,50	2,727	/	/	M1-fc,28-2
75	M1-fc,28-3	100,20	100,45	10,03	12,09	2131	2124	7,0	955,65	2222,57	35,10	3,44	20,30	2,568	/	/	M1-fc,28-3
средња вриједност→				10,03	12,13	2148,00	2141,33	6,67	958,51	2233,99	35,07	3,46	20,10	2,544			

Број узорка	Мјешавина	Пречник, d [cm]			Висина, h [cm]	Маса узорка након справљања - m_1 [g]	Маса узорка прије испитивања - m_2 [g]	Разлика у масама, ($m_1 - m_2$) [g]	Запремина узорка - V_1 [cm ³]	Запреminsка маса прије испитивања - V_2 [kg/m ³]	Вријеме проласка ултразвука - t [μs]	Брзина проласка ултразвука - V_0 [km/s]	Сила лома, за черстоћу при притиску, f_c [kN]	Черстоћа при притиску, f_c [MPa]	Сила лома, за индиректну затезну черстоћу, ITS [kN]	Индиректна затезна черстоћа, ITS [MPa]	Мјешавина	
		Дно узорка	Врх узорка	Средња вриједност														
76	M1-ITS,28-1	100,13	100,61	10,04	12,17	2159	2153	6,0	962,60	2236,65	36,70	3,31	/	/	3,50	0,182	M1-ITS,28-1	
77	M1-ITS,28-2	100,07	100,88	10,05	12,10	2159	2148	11,0	959,07	2239,68	36,00	3,36	/	/	4,50	0,236	M1-ITS,28-2	
78	M1-ITS,28-3	100,01	101,13	10,06	12,09	2166	2156	10,0	960,40	2244,89	36,80	3,29	/	/	3,60	0,188	M1-ITS,28-3	
средња вриједност→				10,05	12,12	2161,33	2152,33	9,00	960,69	2240,40	36,50	3,32			3,87	0,202		
79	M2-fc,28-1	100,32	101,17	10,07	12,10	2160	2151	8,7	964,23	2231,11	33,70	3,59	22,60	2,835	/	/	M2-fc,28-1	
80	M2-fc,28-2	100,14	100,61	10,04	12,12	2160	2156	4,0	958,66	2248,97	33,80	3,58	20,10	2,540	/	/	M2-fc,28-2	
81	M2-fc,28-3	100,20	100,38	10,03	12,09	2150	2140	9,7	954,98	2241,19	34,50	3,50	19,50	2,468	/	/	M2-fc,28-3	
средња вриједност→				10,05	12,10	2156,67	2149,20	7,47	959,29	2240,42	34,00	3,56	20,73	2,615				
82	M2-ITS,28-1	100,17	100,84	10,05	12,08	2160	2153	7,4	958,37	2246,11	34,40	3,51	/	/	5,60	0,294	M2-ITS,28-1	
83	M2-ITS,28-2	100,22	100,86	10,05	12,09	2160	2145	15,2	960,15	2233,82	34,30	3,53	/	/	5,40	0,283	M2-ITS,28-2	
84	M2-ITS,28-3	100,07	100,66	10,04	12,08	2165	2159	6,1	956,02	2258,22	34,30	3,52	/	/	5,10	0,268	M2-ITS,28-3	
средња вриједност→				10,05	12,09	2161,67	2152,10	9,57	958,18	2246,05	34,33	3,52			5,37	0,281		
85	M3-fc,28-1	100,17	101,20	10,07	12,14	2174	2163	10,9	966,18	2238,81	32,20	3,77	22,30	2,801	/	/	M3-fc,28-1	
86	M3-fc,28-2	100,20	100,70	10,05	12,08	2165	2157	7,6	957,00	2254,33	32,10	3,76	22,80	2,877	/	/	M3-fc,28-2	
87	M3-fc,28-3	99,80	100,80	10,03	12,10	2166	2164	1,6	956,20	2263,54	33,20	3,65	24,50	3,101	/	/	M3-fc,28-3	
средња вриједност→				10,05	12,10	2168,33	2161,63	6,70	959,80	2252,22	32,50	3,73	23,20	2,926				
88	M3-ITS,28-1	99,96	100,80	10,04	12,08	2185	2174	11,5	955,99	2273,57	32,90	3,67	/	/	6,40	0,336	M3-ITS,28-1	
89	M3-ITS,28-2	100,14	100,84	10,05	12,09	2169	2159	10,2	959,19	2250,64	32,20	3,76	/	/	5,90	0,309	M3-ITS,28-2	
90	M3-ITS,28-3	100,24	100,72	10,05	12,08	2156	2147	8,7	958,13	2241,13	32,90	3,67	/	/	5,20	0,273	M3-ITS,28-3	
средња вриједност→				10,05	12,09	2170,00	2159,87	10,13	957,77	2255,11	32,67	3,70			5,83	0,306		

Број узорка	Мјешавина	Пречник, d [cm]			Висина, h [cm]	Маса узорка након справљања - m ₁ [g]	Маса узорка прије испитивања - m ₂ [g]	Разлика у масама, (m ₁ -m ₂) [g]	Запремина узорка - V ₁ [cm ³]	Запреminsка маса прије испитивања - γ ₁ [kg/m ³]	Вријеме проласка ултразвука - t ₁ [μs]	Брзина проласка ултразвука - V ₂ [km/s]	Сила лома, за черстоћу при прирису, f _c [kN]	Черстоћа при притиску, f _c [MPa]	Сила лома, за индиректну затезну черстоћу, ITS [kN]	Индиректна затезна черстоћа, ITS [MPa]	Мјешавина	
		Дно узорка	Врх узорка	Средња вриједност														
91	M4-fc,28-1	100,11	100,80	10,05	12,09	2094	2084	10,1	958,05	2175,14	36,40	3,32	17,20	2,170	/	/	M4-fc,28-1	
92	M4-fc,28-2	100,13	100,59	10,04	12,07	2081	2076	5,1	954,58	2174,64	35,70	3,38	18,40	2,326	/	/	M4-fc,28-2	
93	M4-fc,28-3	100,08	101,00	10,05	12,07	2093	2085	8,0	957,85	2176,80	35,70	3,38	18,00	2,267	/	/	M4-fc,28-3	
средња вриједност→				10,05	12,07	2089,33	2081,60	7,73	956,83	2175,53	35,93	3,36	17,87	2,254				
94	M4-ITS,28-1	100,24	100,60	10,04	12,07	2112	2099	13,3	956,04	2195,21	37,20	3,24	/	/	3,10	0,163	M4-ITS,28-1	
95	M4-ITS,28-2	100,29	100,55	10,04	12,10	2105	2098	7,5	958,18	2189,06	37,00	3,27	/	/	3,50	0,183	M4-ITS,28-2	
96	M4-ITS,28-3	100,11	100,73	10,04	12,10	2098	2086	11,9	958,02	2177,52	36,50	3,31	/	/	4,60	0,241	M4-ITS,28-3	
средња вриједност→				10,04	12,09	2105,00	2094,10	10,90	957,41	2187,26	36,90	3,28			3,73	0,196		
97	M5-fc,28-1	100,13	100,92	10,05	12,14	2114	2100	13,7	963,12	2180,73	34,90	3,48	18,70	2,356	/	/	M5-fc,28-1	
98	M5-fc,28-2	100,28	100,57	10,04	12,13	2098	2094	4,4	960,96	2178,65	35,20	3,45	18,70	2,361	/	/	M5-fc,28-2	
99	M5-fc,28-3	99,89	100,76	10,03	12,16	2108	2099	9,5	961,58	2182,34	35,80	3,40	17,20	2,176	/	/	M5-fc,28-3	
средња вриједност→				10,04	12,14	2106,67	2097,47	9,20	961,89	2180,57	35,30	3,44	18,20	2,298				
100	M5-ITS,28-1	100,21	100,86	10,05	12,11	2111	2103	8,5	961,24	2187,32	36,20	3,35	/	/	3,50	0,183	M5-ITS,28-1	
101	M5-ITS,28-2	100,20	100,74	10,05	12,14	2118	2109	8,9	962,46	2191,40	35,70	3,40	/	/	3,90	0,204	M5-ITS,28-2	
102	M5-ITS,28-3	100,18	100,35	10,03	12,14	2109	2101	7,7	958,14	2193,08	35,30	3,44	/	/	4,30	0,225	M5-ITS,28-3	
средња вриједност→				10,04	12,13	2112,67	2104,32	8,35	960,61	2190,60	35,73	3,39			3,90	0,204		
103	M6-fc,28-1	100,16	100,46	10,03	12,10	2132	2123	8,9	956,00	2220,82	34,30	3,53	20,80	2,632	/	/	M6-fc,28-1	
104	M6-fc,28-2	100,37	100,80	10,06	12,16	2127	2120	7,3	965,86	2194,63	34,90	3,48	18,10	2,278	/	/	M6-fc,28-2	
105	M6-fc,28-3	100,03	100,66	10,03	12,18	2120	2109	10,7	963,23	2189,82	35,20	3,46	19,10	2,415	/	/	M6-fc,28-3	
средња вриједност→				10,04	12,14	2126,33	2117,37	8,97	961,69	2201,76	34,80	3,49	19,33	2,442				

Број узорка	Мјешавина	Пречник, d [cm]			Висина, h [cm]	Маса узорка након справљања - m_1 , [g]	Маса узорка прије испитивања - m_2 , [g]	Разлика у масама, $(m_1 - m_2)$ [g]	Запремина узорка - V_1 , [cm ³]	Запреminsка маса прије испитивања - V_1 , [kg/m ³]	Вријеме проласка ултразвука - t , [μs]	Брзина проласка ултразвука - V_2 , [km/s]	Сила лома, за черстоћу при прирису, f_c [kN]	Черстоћа при притиску, f_c [MPa]	Сила лома, за индиректну затезну черстоћу, ITS [kN]	Индиректна затезна черстоћа, ITS [MPa]	Мјешавина	
		Дно узорка	Врх узорка	Средња вриједност														
106	M6-ITS,28-1	99,91	101,00	10,05	12,09	2118	2114	3,8	958,37	2206,04	35,20	3,44	/	/	4,50	0,236	M6-ITS,28-1	
107	M6-ITS,28-2	99,89	101,36	10,06	12,02	2116	2108	7,8	955,57	2206,22	35,00	3,43	/	/	4,30	0,226	M6-ITS,28-2	
108	M6-ITS,28-3	100,27	101,22	10,07	12,03	2100	2090	10,3	958,97	2179,12	34,80	3,46	/	/	4,60	0,242	M6-ITS,28-3	
средња вриједност →				10,06	12,05	2111,33	2104,03	7,30	957,63	2197,13	35,00	3,44			4,47	0,235		
109	M7-fc,28-1	100,22	101,01	10,06	12,06	2190	2184	6,2	959,20	2276,70	25,90	4,66	47,20	5,936	/	/	M7-fc,28-1	
110	M7-fc,28-2	100,21	101,19	10,07	12,11	2190	2176	13,6	964,80	2255,80	26,80	4,52	42,50	5,336	/	/	M7-fc,28-2	
111	M7-fc,28-3	100,20	101,25	10,07	12,12	2180	2171	9,4	965,60	2247,93	26,00	4,66	44,90	5,635	/	/	M7-fc,28-3	
средња вриједност →				10,07	12,10	2186,67	2176,93	9,73	963,20	2260,14	26,23	4,61	44,87	5,636				
112	M7-ITS,28-1	100,33	101,07	10,07	12,14	2199	2186	12,7	966,79	2261,40	26,40	4,60	/	/	8,50	0,443	M7-ITS,28-1	
113	M7-ITS,28-2	100,50	100,85	10,07	12,13	2199	2187	12,2	965,44	2265,14	26,00	4,66	/	/	11,90	0,620	M7-ITS,28-2	
114	M7-ITS,28-3	100,04	100,83	10,04	12,04	2166	2154	11,7	953,87	2258,49	26,30	4,58	/	/	9,50	0,500	M7-ITS,28-3	
средња вриједност →				10,06	12,10	2188,00	2175,82	12,18	962,03	2261,68	26,23	4,61				9,97	0,521	
115	M8-fc,28-1	100,29	100,97	10,06	12,08	2191	2182	8,6	960,83	2271,36	25,70	4,70	50,90	6,400	/	/	M8-fc,28-1	
116	M8-fc,28-2	100,24	100,67	10,05	12,11	2187	2173	14,3	959,72	2263,90	25,30	4,79	51,00	6,435	/	/	M8-fc,28-2	
117	M8-fc,28-3	100,12	100,73	10,04	12,10	2186	2181	5,3	958,59	2274,91	25,50	4,75	49,00	6,186	/	/	M8-fc,28-3	
средња вриједност →				10,05	12,10	2188,00	2178,60	9,40	959,71	2270,06	25,50	4,74	50,30	6,340				
118	M8-ITS,28-1	100,46	101,18	10,08	12,05	2190	2178	12,1	962,07	2263,76	25,80	4,67	/	/	9,80	0,513	M8-ITS,28-1	
119	M8-ITS,28-2	100,03	101,91	10,10	12,01	2190	2176	13,6	961,97	2262,43	25,30	4,75	/	/	11,80	0,619	M8-ITS,28-2	
120	M8-ITS,28-3	100,22	100,88	10,06	12,03	2181	2172	9,0	955,58	2272,98	25,40	4,74	/	/	10,80	0,568	M8-ITS,28-3	
средња вриједност →				10,08	12,03	2187,00	2175,43	11,57	959,87	2266,39	25,50	4,72				10,80	0,566	

Број узорка	Мјешавина	Пречник, d [cm]			Висина, h [cm]	Маса узорка након справљања - m ₁ , [g]	Маса узорка прије испитивања - m ₂ , [g]	Разлика у масама, (m ₁ -m ₂) [g]	Запремина узорка - V, [cm ³]	Запреминска маса прије испитивања - γ, [kg/m ³]	Вријеме проласка ултразвука - t, [μs]	Брзина проласка ултразвука - V _c , [km/s]	Сила лома, за черстоћу при пририсуку, f _c [kN]	Черстоћа при притиску, f _c [MPa]	Сила лома, за индиректну затезну черстоћу, ITS [kN]	Индиректна затезна черстоћа, ITS [MPa]	Мјешавина	
		Дно узорка	Врх узорка	Средња вриједност														
121	M9-fc,28-1	100,39	101,55	10,10	12,08	2191	2180	10,8	967,26	2254,00	25,00	4,83	62,40	7,793	/	/	M9-fc,28-1	
122	M9-fc,28-2	100,31	100,81	10,06	12,05	2188	2176	11,8	956,64	2274,84	25,40	4,74	61,10	7,693	/	/	M9-fc,28-2	
123	M9-fc,28-3	99,89	100,68	10,03	12,06	2179	2174	5,2	952,76	2281,59	25,50	4,73	56,40	7,140	/	/	M9-fc,28-3	
средња вриједност→				10,06	12,06	2186,00	2176,73	9,27	958,88	2270,14	25,30	4,77	59,97	7,542				
124	M9-ITS,28-1	100,28	101,32	10,08	12,01	2203	2196	6,8	958,58	2291,10	25,90	4,64	/	/	11,30	0,594	M9-ITS,28-1	
125	M9-ITS,28-2	100,34	100,80	10,06	12,03	2197	2184	13,3	955,24	2286,02	25,70	4,68	/	/	12,30	0,647	M9-ITS,28-2	
126	M9-ITS,28-3	100,76	100,20	10,05	12,06	2206	2197	9,3	956,23	2297,26	24,60	4,90	/	/	15,50	0,814	M9-ITS,28-3	
средња вриједност→				10,06	12,03	2202,00	2192,20	9,80	956,68	2291,46	25,40	4,74				13,03	0,685	
127	M10-fc,28-1	100,44	100,76	10,06	12,04	2141	2134	7,0	956,84	2230,25	28,40	4,24	34,90	4,391	/	/	M10-fc,28-1	
128	M10-fc,28-2	100,41	100,70	10,06	12,06	2120	2109	11,1	957,58	2202,33	28,50	4,23	30,00	3,778	/	/	M10-fc,28-2	
129	M10-fc,28-3	100,18	100,98	10,06	12,09	2124	2121	3,3	960,83	2207,15	28,60	4,23	28,00	3,524	/	/	M10-fc,28-3	
средња вриједност→				10,06	12,06	2128,33	2121,20	7,13	958,42	2213,24	28,50	4,23	30,97	3,897				
130	M10-ITS,28-1	100,35	100,42	10,04	12,08	2138	2127	11,4	955,77	2225,02	29,60	4,08	/	/	8,30	0,436	M10-ITS,28-1	
131	M10-ITS,28-2	100,09	100,69	10,04	12,15	2136	2126	10,5	961,72	2210,11	30,80	3,94	/	/	7,50	0,391	M10-ITS,28-2	
132	M10-ITS,28-3	100,26	100,05	10,02	12,12	2128	2119	8,8	954,70	2219,75	29,70	4,08	/	/	8,50	0,446	M10-ITS,28-3	
средња вриједност→				10,03	12,11	2134,00	2123,77	10,23	957,40	2218,29	30,03	4,03				8,10	0,424	
133	M11-fc,28-1	100,02	100,82	10,04	12,05	2148	2141	7,2	954,69	2242,40	28,60	4,21	36,20	4,571	/	/	M11-fc,28-1	
134	M11-fc,28-2	100,24	100,86	10,06	12,10	2139	2135	3,8	960,98	2221,91	28,40	4,26	38,20	4,811	/	/	M11-fc,28-2	
135	M11-fc,28-3	100,22	100,83	10,05	12,14	2146	2138	7,9	963,83	2218,34	28,50	4,26	37,80	4,763	/	/	M11-fc,28-3	
средња вриједност→				10,05	12,10	2144,33	2138,03	6,30	959,83	2227,55	28,50	4,25	37,40	4,715				

Број узорка	Мјешавина	Пречник, d [cm]			Висина, h [cm]	Маса узорка након справљања - m ₁ , [g]	Маса узорка прије испитивања - m ₂ , [g]	Разлика у масама, (m ₁ -m ₂) [g]	Запремина узорка - V, [cm ³]	Запреminsка маса прије испитивања - γ, [kg/m ³]	Вријеме проласка ултразвука - t, [μs]	Брзина проласка ултразвука - V _u , [km/s]	Сила лома, за черстоћу при притиску, f _c [kN]	Черстоћа при притиску, f _c [MPa]	Сила лома, за индиректну затезну черстоћу, ITS [kN]	Индиректна затезна черстоћа, ITS [MPa]	Мјешавина	
		Дно узорка	Врх узорка	Средња вриједност														
136	M11-ITS,28-1	100,30	101,44	10,09	12,01	2151	2143	7,9	959,51	2233,54	28,70	4,18	/	/	9,80	0,515	M11-ITS,28-1	
137	M11-ITS,28-2	100,18	101,63	10,09	11,99	2150	2144	6,3	958,74	2235,96	29,30	4,09	/	/	8,40	0,442	M11-ITS,28-2	
138	M11-ITS,28-3	100,07	101,40	10,07	12,08	2157	2145	11,9	963,00	2227,50	28,70	4,21	/	/	9,40	0,492	M11-ITS,28-3	
средња вриједност→				10,08	12,03	2152,67	2143,96	8,71	960,42	2232,33	28,90	4,16			9,20	0,483		
139	M12-fc,28-1	100,15	100,90	10,05	12,06	2149	2146	2,8	956,85	2242,99	28,00	4,31	41,40	5,216	/	/	M12-fc,28-1	
140	M12-fc,28-2	100,17	100,92	10,05	12,04	2148	2143	5,3	955,64	2242,16	27,80	4,33	43,00	5,416	/	/	M12-fc,28-2	
141	M12-fc,28-3	100,48	101,10	10,08	12,07	2168	2160	8,1	962,62	2243,78	28,20	4,28	41,40	5,189	/	/	M12-fc,28-3	
средња вриједност→				10,06	12,05	2155,00	2149,60	5,40	958,37	2242,98	28,00	4,30	41,93	5,274				
142	M12-ITS,28-1	100,40	100,92	10,07	12,08	2144	2137	7,3	961,49	2222,29	28,10	4,30	/	/	9,80	0,513	M12-ITS,28-1	
143	M12-ITS,28-2	100,91	100,14	10,05	12,05	2159	2150	9,4	956,21	2248,04	28,10	4,29	/	/	9,30	0,489	M12-ITS,28-2	
144	M12-ITS,28-3	100,09	100,82	10,05	12,08	2143	2136	6,7	957,42	2231,32	27,60	4,38	/	/	10,50	0,551	M12-ITS,28-3	
средња вриједност→				10,05	12,07	2148,67	2140,87	7,80	958,37	2233,88	27,93	4,32			9,87	0,518		
145	M1-fc,90-1	100,44	100,24	10,03	12,10	2152	2138	13,7	956,81	2234,83	28,00	4,32	35,00	4,426	/	/	M1-fc,90-1	
146	M1-fc,90-2	100,50	100,23	10,04	12,12	2148	2121	26,8	958,47	2213,11	28,50	4,25	31,50	3,982	/	/	M1-fc,90-2	
147	M1-fc,90-3	100,48	100,14	10,03	12,08	2155	2138	17,0	954,81	2239,18	28,50	4,24	29,50	3,733	/	/	M1-fc,90-3	
средња вриједност→				10,03	12,10	2151,67	2132,50	19,17	956,70	2229,04	28,33	4,27	32,00	4,047				
148	M1-ITS,90-1	100,40	100,31	10,04	12,06	2140	2113	27,1	954,01	2214,76	28,90	4,17	/	/	7,80	0,410	M1-ITS,90-1	
149	M1-ITS,90-2	100,06	101,04	10,06	12,10	2158	2136	21,9	961,05	2222,66	28,40	4,26	/	/	8,00	0,418	M1-ITS,90-2	
150	M1-ITS,90-3	100,22	100,60	10,04	12,14	2137	2130	7,0	960,91	2216,64	28,80	4,21	/	/	7,00	0,366	M1-ITS,90-3	
средња вриједност→				10,04	12,10	2145,00	2126,33	18,67	958,66	2218,02	28,70	4,22			7,60	0,398		

Број узорка	Мјешавина	Пречник, d [cm]			Висина, h [cm]	Маса узорка након справљања - m ₁ [g]	Маса узорка прије испитивања - m ₂ [g]	Разлика у масама, (m ₁ -m ₂) [g]	Запремина узорка - V, [cm ³]	Запреminsка маса прије испитивања - γ, [kg/m ³]	Вријеме проласка ултразвука - t, [μs]	Брзина проласка ултразвука - V _l , [km/s]	Сила лома, за черстоћу при притиску, f _c [kN]	Черстоћа при притиску, f _c [MPa]	Сила лома, за индиректну затезну черстоћу, ITS [kN]	Индиректна затезна черстоћа, ITS [MPa]	Мјешавина
		Дно узорка	Врх узорка	Средња вриједност													
151	M2-fc,90-1	100,06	100,68	10,04	12,15	2178	2157	20,8	961,26	2244,12	28,60	4,25	42,10	5,321	/	/	M2-fc,90-1
152	M2-fc,90-2	100,14	100,62	10,04	12,15	2170	2154	15,6	961,37	2241,01	28,90	4,20	37,50	4,739	/	/	M2-fc,90-2
153	M2-fc,90-3	100,78	100,25	10,05	12,10	2155	2134	20,7	960,39	2222,34	28,90	4,19	33,20	4,184	/	/	M2-fc,90-3
средња вриједност →				10,04	12,13	2167,67	2148,64	19,03	961,00	2235,82	28,80	4,21	37,60	4,748			
154	M2-ITS,90-1	100,48	99,96	10,02	12,11	2136	2118	18,5	954,91	2217,48	28,80	4,20	/	/	7,90	0,415	M2-ITS,90-1
155	M2-ITS,90-2	101,29	100,02	10,07	12,08	2165	2143	22,3	961,23	2229,15	28,80	4,19	/	/	9,50	0,497	M2-ITS,90-2
156	M2-ITS,90-3	100,49	100,33	10,04	12,10	2164	2139	25,0	958,38	2231,94	28,40	4,26	/	/	12,10	0,634	M2-ITS,90-3
средња вриједност →				10,04	12,10	2155,00	2133,09	21,91	958,18	2226,19	28,67	4,22			9,83	0,515	
157	M3-fc,90-1	100,12	100,39	10,03	12,12	2169	2137	32,0	957,00	2233,01	29,40	4,12	29,00	3,674	/	/	M3-fc,90-1
158	M3-fc,90-2	100,33	100,66	10,05	12,17	2178	2165	13,3	965,56	2241,87	29,80	4,08	27,50	3,467	/	/	M3-fc,90-2
159	M3-fc,90-3	100,53	100,55	10,05	12,13	2184	2163	21,1	963,01	2245,95	29,30	4,14	29,40	3,703	/	/	M3-fc,90-3
средња вриједност →				10,04	12,14	2177,00	2154,84	22,16	961,86	2240,28	29,50	4,12	28,63	3,615			
160	M3-ITS,90-1	100,47	100,82	10,06	12,12	2139	2120	19,0	964,06	2199,02	28,70	4,22	/	/	8,00	0,418	M3-ITS,90-1
161	M3-ITS,90-2	100,02	100,79	10,04	12,10	2167	2148	19,0	958,13	2241,88	28,80	4,20	/	/	7,90	0,414	M3-ITS,90-2
162	M3-ITS,90-3	100,22	100,67	10,04	12,07	2177	2146	31,0	956,51	2243,57	29,20	4,13	/	/	7,00	0,368	M3-ITS,90-3
средња вриједност →				10,05	12,10	2161,00	2138,00	23,00	959,57	2228,15	28,90	4,19			7,63	0,400	
163	M4-fc,90-1	100,22	101,09	10,07	12,18	2111	2087	23,8	968,87	2154,26	29,70	4,10	23,00	2,890	/	/	M4-fc,90-1
164	M4-fc,90-2	100,08	100,84	10,05	12,16	2119	2096	23,1	963,85	2174,50	29,90	4,07	22,00	2,776	/	/	M4-fc,90-2
165	M4-fc,90-3	100,05	100,40	10,02	12,06	2105	2087	18,1	951,46	2193,37	30,20	3,99	21,90	2,776	/	/	M4-fc,90-3
средња вриједност →				10,04	12,13	2111,67	2090,00	21,67	961,39	2174,04	29,93	4,05	22,30	2,814			

Број узорка	Мјешавина	Пречник, d [cm]			Висина, h [cm]	Маса узорка након справљања - m ₁ [g]	Маса узорка прије испитивања - m ₂ [g]	Разлика у масама, (m ₁ -m ₂) [g]	Запремина узорка - V, [cm ³]	Запреминска маса прије испитивања - γ, [kg/m ³]	Вријеме проласка ултразвука - t, [μs]	Брзина проласка ултразвука - V _u [km/s]	Сила лома, за черстоћу при притиску, f _c [kN]	Черстоћа при притиску, f _c [MPa]	Сила лома, за индиректну затезну черстоћу, ITS [kN]	Индиректна затезна черстоћа, ITS [MPa]	Мјешавина
		Дно узорка	Врх узорка	Средња вриједност													
166	M4-ITS,90-1	100,64	99,96	10,03	12,12	2103	2080	23,5	957,55	2171,70	30,00	4,04	/	/	6,30	0,330	M4-ITS,90-1
167	M4-ITS,90-2	100,68	100,47	10,06	12,03	2096	2075	20,6	955,89	2171,17	29,90	4,02	/	/	6,30	0,331	M4-ITS,90-2
168	M4-ITS,90-3	100,05	100,75	10,04	12,03	2106	2079	26,9	952,65	2182,44	29,90	4,02	/	/	6,70	0,353	M4-ITS,90-3
средња вриједност →				10,04	12,06	2101,67	2078,00	23,67	955,36	2175,10	29,93	4,03			6,43	0,338	
169	M5-fc,90-1	99,74	100,39	10,01	12,11	2099	2073	26,5	952,43	2176,00	29,90	4,05	25,50	3,243	/	/	M5-fc,90-1
170	M5-fc,90-2	100,69	100,28	10,05	12,11	2115	2096	18,7	960,61	2182,27	29,80	4,06	25,50	3,215	/	/	M5-fc,90-2
171	M5-fc,90-3	100,26	100,30	10,03	12,16	2111	2092	19,1	960,48	2177,97	30,00	4,05	24,20	3,064	/	/	M5-fc,90-3
средња вриједност →				10,03	12,13	2108,33	2086,90	21,43	957,84	2178,75	29,90	4,06	25,07	3,174			
172	M5-ITS,90-1	100,25	100,66	10,05	12,12	2115	2096	19,4	960,82	2181,01	30,40	3,99	/	/	7,40	0,387	M5-ITS,90-1
173	M5-ITS,90-2	100,39	100,25	10,03	12,13	2099	2074	25,4	958,48	2163,42	29,80	4,07	/	/	8,80	0,461	M5-ITS,90-2
174	M5-ITS,90-3	100,52	100,65	10,06	12,10	2126	2096	29,9	961,72	2179,52	29,80	4,06	/	/	8,90	0,465	M5-ITS,90-3
средња вриједност →				10,05	12,12	2113,33	2088,42	24,91	960,34	2174,65	30,00	4,04			8,37	0,438	
175	M6-fc,90-1	100,23	100,48	10,04	12,16	2121	2083	38,0	961,52	2166,36	30,80	3,95	20,00	2,528	/	/	M6-fc,90-1
176	M6-fc,90-2	100,28	100,24	10,03	12,13	2115	2092	23,0	957,89	2183,97	31,00	3,91	21,80	2,761	/	/	M6-fc,90-2
177	M6-fc,90-3	100,50	100,21	10,04	12,18	2124	2110	13,6	963,66	2190,00	31,20	3,90	19,30	2,440	/	/	M6-fc,90-3
средња вриједност →				10,03	12,16	2120,00	2095,14	24,86	961,02	2180,11	31,00	3,92	20,37	2,577			
178	M6-ITS,90-1	100,10	100,53	10,03	12,13	2121	2084	37,0	959,02	2173,06	31,40	3,86	/	/	6,00	0,314	M6-ITS,90-1
179	M6-ITS,90-2	100,09	100,73	10,04	12,15	2134	2113	21,0	962,18	2196,05	30,80	3,95	/	/	6,50	0,339	M6-ITS,90-2
180	M6-ITS,90-3	99,99	100,64	10,03	12,16	2110	2083	27,0	960,76	2168,08	30,80	3,95	/	/	6,50	0,339	M6-ITS,90-3
средња вриједност →				10,03	12,15	2121,67	2093,33	28,33	960,65	2179,06	31,00	3,92			6,33	0,331	

Број узорка	Мјешавина	Пречник, d [cm]			Висина, h [cm]	Маса узорка након справљања - m ₁ , [g]	Маса узорка прије испитивања - m ₂ , [g]	Разлика у масама, (m ₁ -m ₂) [g]	Запремина узорка - V, [cm ³]	Запреминска маса прије испитивања - γ, [kg/m ³]	Вријеме проласка ултразвука - t, [μs]	Брзина проласка ултразвука - V _t , [km/s]	Сила лома, за черстошу при прициску, f _c [kN]	Черстоћа при притиску, f _c [MPa]	Сила лома, за индиректну затезну черстошу, ITS [kN]	Индиректна затезна черстоћа, ITS [MPa]	Мјешавина
		Дно узорка	Врх узорка	Средња вриједност													
181	M7-fc,90-1	100,21	100,39	10,03	12,11	2200	2168	31,7	956,68	2266,49	25,80	4,69	68,10	8,619	/	/	M7-fc,90-1
182	M7-fc,90-2	100,38	100,68	10,05	12,11	2184	2157	26,6	961,47	2243,86	26,40	4,59	59,50	7,496	/	/	M7-fc,90-2
183	M7-fc,90-3	100,30	100,60	10,05	12,08	2191	2165	26,0	957,00	2262,27	25,80	4,68	68,60	8,656	/	/	M7-fc,90-3
средња вриједност→				10,04	12,10	2191,67	2163,57	28,10	958,38	2257,54	26,00	4,65	65,40	8,257			
184	M7-ITS,90-1	100,79	100,23	10,05	12,13	2198	2168	30,2	962,75	2251,68	26,20	4,63	/	/	17,50	0,913	M7-ITS,90-1
185	M7-ITS,90-2	100,66	100,16	10,04	12,13	2190	2160	30,2	960,44	2248,76	26,30	4,61	/	/	16,50	0,863	M7-ITS,90-2
186	M7-ITS,90-3	100,37	100,60	10,05	12,12	2217	2185	31,7	961,40	2273,04	25,50	4,75	/	/	19,30	1,009	M7-ITS,90-3
средња вриједност→				10,05	12,13	2201,67	2170,97	30,70	961,53	2257,83	26,00	4,67			17,77	0,928	
187	M8-fc,90-1	100,14	101,00	10,06	12,07	2194	2167	26,5	958,42	2261,02	25,40	4,75	77,00	9,693	/	/	M8-fc,90-1
188	M8-fc,90-2	100,20	100,67	10,04	12,14	2218	2189	29,0	961,87	2275,78	25,10	4,84	80,40	10,148	/	/	M8-fc,90-2
189	M8-fc,90-3	100,26	100,49	10,04	12,12	2209	2187	22,0	959,22	2279,99	25,10	4,83	80,40	10,160	/	/	M8-fc,90-3
средња вриједност→				10,05	12,11	2206,83	2181,00	25,83	959,83	2272,26	25,20	4,81	79,27	10,001			
190	M8-ITS,90-1	101,10	100,31	10,07	12,06	2198	2171	27,0	960,75	2259,68	25,20	4,79	/	/	21,50	1,127	M8-ITS,90-1
191	M8-ITS,90-2	100,31	101,00	10,07	12,08	2202	2173	29,0	961,07	2261,01	25,00	4,83	/	/	22,90	1,199	M8-ITS,90-2
192	M8-ITS,90-3	100,72	99,95	10,03	12,11	2195	2167	28,0	957,58	2262,99	25,10	4,83	/	/	22,00	1,153	M8-ITS,90-3
средња вриједност→				10,06	12,08	2198,33	2170,33	28,00	959,80	2261,23	25,10	4,81			22,13	1,160	
193	M9-fc,90-1	100,10	100,83	10,05	12,06	2208	2183	25,0	955,63	2284,37	25,00	4,82	73,50	9,272	/	/	M9-fc,90-1
194	M9-fc,90-2	100,20	100,41	10,03	12,03	2185	2156	29,0	950,29	2268,78	25,20	4,77	69,00	8,732	/	/	M9-fc,90-2
195	M9-fc,90-3	100,50	100,64	10,06	12,09	2213	2181	32,0	960,72	2270,17	25,10	4,82	73,50	9,253	/	/	M9-fc,90-3
средња вриједност→				10,04	12,06	2202,00	2173,33	28,67	955,55	2274,44	25,10	4,80	72,00	9,085			

Број узорка	Мјешавина	Пречник, d [cm]			Висина, h [cm]	Маса узорка након исправљања - m ₁ , [g]	Маса узорка прије испитивања - m ₂ , [g]	Разлика у масама, (m ₁ -m ₂) [g]	Запремина узорка - V ₁ , [cm ³]	Запремина маса прије испитивања - V ₂ , [kg/m ³]	Вријеме проласка ултразвука - t, [μs]	Брзина проласка ултразвука - V _t , [km/s]	Сила лома, за черстоћу при притиску, f _c [kN]	Черстоћа при притиску, f _c [MPa]	Сила лома, за индиректну затезну черстоћу, ITS [kN]	Индиректна затезна черстоћа, ITS [MPa]	Мјешавина
		Дно узорка	Врх узорка	Средња вриједност													
196	M9-ITS,90-1	100,24	100,83	10,05	12,06	2192	2171	21,0	957,59	2267,14	25,40	4,75	/	/	19,00	0,997	M9-ITS,90-1
197	M9-ITS,90-2	100,22	101,00	10,06	12,05	2190	2163	27,0	957,99	2257,86	25,00	4,82	/	/	18,00	0,945	M9-ITS,90-2
198	M9-ITS,90-3	100,31	101,06	10,07	12,05	2190	2162	28,0	959,26	2253,83	25,20	4,78	/	/	18,50	0,971	M9-ITS,90-3
средња вриједност→				10,06	12,05	2190,67	2165,33	25,33	958,28	2259,61	25,20	4,78			18,50	0,9712	
199	M10-fc,90-1	100,33	100,50	10,04	12,15	2138	2102	36,2	962,20	2184,37	28,10	4,32	35,50	4,483	/	/	M10-fc,90-1
200	M10-fc,90-2	100,20	100,63	10,04	12,15	2130	2102	28,5	961,96	2184,60	28,20	4,31	39,10	4,937	/	/	M10-fc,90-2
201	M10-fc,90-3	100,31	100,46	10,04	12,14	2117	2106	11,4	961,07	2190,89	27,70	4,38	41,00	5,180	/	/	M10-fc,90-3
средња вриједност→				10,04	12,15	2128,33	2102,97	25,37	961,74	2186,62	28,00	4,34	38,53	4,867			
202	M10-ITS,90-1	100,22	100,91	10,06	12,16	2135	2124	11,5	966,11	2198,00	27,70	4,39	/	/	12,50	0,651	M10-ITS,90-1
203	M10-ITS,90-2	100,10	100,88	10,05	12,15	2142	2106	35,7	963,64	2185,78	28,00	4,34	/	/	10,50	0,547	M10-ITS,90-2
204	M10-ITS,90-3	100,14	100,66	10,04	12,11	2138	2104	33,6	958,35	2195,86	27,40	4,42	/	/	13,90	0,728	M10-ITS,90-3
средња вриједност→				10,05	12,14	2138,33	2111,40	26,93	962,70	2193,21	27,70	4,38			12,30	0,642	
205	M11-fc,90-1	100,07	100,91	10,05	12,10	2148	2119	29,0	959,99	2207,32	27,40	4,42	51,50	6,493	/	/	M11-fc,90-1
206	M11-fc,90-2	100,14	100,86	10,05	12,13	2155	2119	36,0	961,84	2203,06	27,50	4,41	51,50	6,492	/	/	M11-fc,90-2
207	M11-fc,90-3	100,41	100,42	10,04	12,18	2147	2122	25,5	964,57	2199,42	27,10	4,49	54,30	6,857	/	/	M11-fc,90-3
средња вриједност→				10,05	12,14	2150,00	2119,83	30,17	962,14	2203,27	27,33	4,44	52,43	6,614			
208	M11-ITS,90-1	100,88	100,26	10,06	12,07	2155	2132	23,0	959,05	2223,02	27,20	4,44	/	/	15,30	0,802	M11-ITS,90-1
209	M11-ITS,90-2	100,66	100,09	10,04	12,09	2156	2126	30,0	956,53	2222,63	26,80	4,51	/	/	17,40	0,913	M11-ITS,90-2
210	M11-ITS,90-3	100,18	100,47	10,03	12,19	2146	2125	21,0	963,48	2205,55	27,20	4,48	/	/	15,90	0,828	M11-ITS,90-3
средња вриједност→				10,04	12,12	2152,33	2127,67	24,67	959,69	2217,07	27,07	4,48			16,20	0,848	

Број узорка	Мјешавина	Пречник, d [cm]			Висина, h [cm]	Маса узорка након справљања - m ₁ , [g]	Маса узорка прије испитивања - m ₂ , [g]	Разлика у масама, (m ₁ -m ₂) [g]	Запремина узорка - V, [cm ³]	Запреminsка маса прије испитивања - γ, [kg/m ³]	Вријеме проласка ултразвука - t, [μs]	Брзина проласка ултразвука - V _t , [km/s]	Сила лома, за чврстоћу при притиску, f _c [kN]	Чврстоћа при притиску, f _c [MPa]	Сила лома, за индиректну затезну чврстоћу, ITS [kN]	Индиректна затезна чврстоћа, ITS [MPa]	Мјешавина
		Дно узорка	Врх узорка	Средња вриједност													
211	M12-fc,90-1	100,34	100,67	10,05	12,12	2152	2122	30,0	961,54	2206,87	27,50	4,41	45,00	5,672	/	/	M12-fc,90-1
212	M12-fc,90-2	100,29	100,59	10,04	12,07	2139	2106	33,0	956,58	2201,60	27,30	4,42	47,50	5,995	/	/	M12-fc,90-2
213	M12-fc,90-3	100,12	100,68	10,04	12,15	2145	2115	30,0	961,91	2198,75	27,70	4,39	45,00	5,684	/	/	M12-fc,90-3
средња вриједност→				10,04	12,11	2145,33	2114,33	31,00	960,01	2202,41	27,50	4,41	45,83	5,784			
214	M12-ITS,90-1	100,07	101,23	10,07	12,09	2163	2138	25,0	961,69	2223,16	27,40	4,41	/	/	15,00	0,785	M12-ITS,90-1
215	M12-ITS,90-2	100,00	101,18	10,06	12,07	2148	2117	31,0	959,04	2207,42	27,50	4,39	/	/	14,80	0,776	M12-ITS,90-2
216	M12-ITS,90-3	100,61	99,92	10,03	12,07	2150	2123	27,0	952,85	2228,05	27,60	4,37	/	/	13,50	0,710	M12-ITS,90-3
средња вриједност→				10,05	12,07	2153,67	2126,00	27,67	957,86	2219,54	27,50	4,39			14,43	0,757	

ПРИЛОГ 2. – Фотографије направљене током лабораторијских испитивања стабилизацијских мјешавина



Фотографија 1. – Разлика у боји осушеног (фракција 4/8mm) и водом засићеног (фракција 8/16mm) RAP-а



Фотографија 2. – Природни фракционисани камени агрегат шљунак (фракција 4/8mm)



Фотографија 3. – Везивни материјали – цемент (лијево) и летећи пепео (десно)



Фотографија 4. – Мјешавина природног агрегата шљунка (0/16mm)



Фотографија 5. – Мјешавина природног агрегата шљунка и рециклираног асфалтног агрегата у односу 70:30



Фотографија 6. – Сува мјешавина свих компонентних материјала потребна за справљање једног стабилизацијског узорка



Фотографија 7. – Збијање узорка Proctor-овим набијачем



Фотографија 8. – Сегрегација воде на дну цилиндричног калупа након поступка збијања



Фотографија 9. – Вађење узорка из цилиндричног калупа након поступка збијања



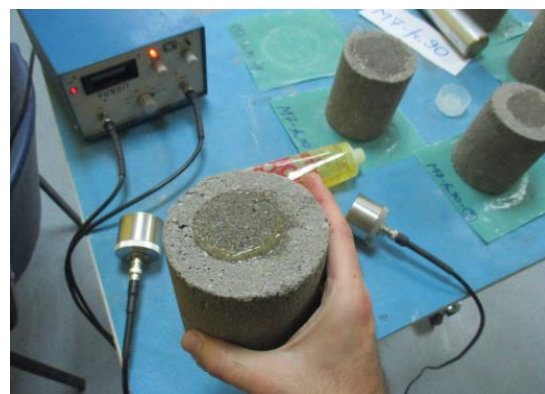
Фотографија 10. – Стабилизацијска мјешавина након поступка сушења и одређивања суве запреминске масе



Фотографија 11. – Стабилизацијски узорак након скидања наставка са калупа и поравнања његове горње површине



Фотографија 12. – Заштита стабилизацијских узорка PVC фолијама ради одржавања константне влажности



Фотографија 13. – Припрема узорка за испитивање времена проласка ултразвука



Фотографија 14. – Стабилизацијски узорак у преси за одређивање чврстоће при притиску (f_c)



Фотографија 15. – Правилан лом узорка (лијево) после испитивања чврстоће при притиску (f_c) у односу на узорак прије испитивања (десно)



Фотографија 16. – Стабилизацијски узорак у преси, припремљен за тзв. бразилски опит цијепања (одређивање ITS-a)



Фотографија 17. – Лом стабилизацијског узорка након опита цијепањем



Фотографија 18. – Пукотина настала након лома узорка, при одређивању индиректне затезне чврстоће (ITS)



Фотографија 19. – Правилан лом узорка, настао при одређивању индиректне затезне чврстоће (ITS)



Фотографија 20. – Видљива зрна рециклираног асфалтног агрегата на уздужном пресеку цилиндричног узорка (након испитивања ITS-a)



Фотографија 21. – Подужни пресјек стабилизацијског узорка са природним агрегатом шљунком, након опита цијепања

Овај Образац чини саставни део докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта који се брани на Универзитету у Новом Саду. Попуњен Образац укоричити иза текста докторске дисертације, односно докторског уметничког пројекта.

План третмана података

Назив пројекта/истраживања
Цементом стабиловани носећи слојеви коловозних конструкција на бази рециклираних материјала
Назив институције/институција у оквиру којих се спроводи истраживање
Факултет техничких наука, Департман за грађевинарство и геодезију, Универзитет у Новом Саду
Назив програма у оквиру ког се реализује истраживање
Истраживање је реализовано у оквиру пројекта које је финансирало Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије под називом „Истраживање могућности примене отпадних и рециклираних материјала у бетонским композитима, са оценом утицаја на животну средину, у циљу промоције одрживог грађевинарства у Србији – ТР 36017“.
1. Опис података
<p>1.1 Врста студије</p> <p>Укратко описати тип студије у оквиру које се подаци прикупљају</p> <p><u>Докторска дисертација.</u></p> <p><u>Предмет истраживања пројекта ТР 36017 су бетонски композити на бази индустријског, грађевинског и других отпадних материјала. Кроз теоријска и експериментална истраживања утврђује се могућност замене природног агрегата у бетону коришћењем рециклираних домаћих отпадних материјала и замене дела цемента индустријским отпадом, секундарним и другим минералним материјалима.</u></p> <p>1.2 Врсте података</p> <p>а) квантитативни</p> <p>б) квалитативни</p> <p>1.3. Начин прикупљања података</p> <p>а) анкете, упитници, тестови</p> <p>б) клиничке процене, медицински записи, електронски здравствени записи</p> <p>в) генотипови: навести врсту _____</p>

- г) административни подаци: навести врсту _____
- д) узорци ткива: навести врсту _____
- ђ) снимци, фотографије: навести врсту _____
- е) текст, навести врсту _____
- ж) мапа, навести врсту _____
- з) остало: описати _____ сопствено лабораторијско експериментално истраживање _____

1.3 Формат података, употребљене скале, количина података

1.3.1 Употребљени софтвер и формат датотеке:

- а) Ехсел фајл, датотека _____ .xls _____
- б) SPSS фајл, датотека _____
- в) PDF фајл, датотека _____ .pdf _____
- г) Текст фајл, датотека _____ .doc _____
- д) JPG фајл, датотека _____ JPEG _____
- е) Остало, датотека _____

1.3.2. Број записа (код квантитативних података)

- а) број варијабли _____ 3 _____
- б) број мерења (испитаника, процена, снимака и сл.) _____ Велики број _____

1.3.3. Поновљена мерења

а) да

б) не

Уколико је одговор да, одговорити на следећа питања:

- а) временски размак између поновљених мера је _____
- б) варијабле које се више пута мере односе се на _____
- в) нове верзије фајлова који садрже поновљена мерења су именоване као _____ / _____

Напомене: _____ Понављање испитивања није резултат грешке већ чињеница да се одређивано својство материјала мења током времена испитивања _____

Да ли формати и софтвер омогућавају дељење и дугорочну валидност података?

а) Да

б) Не

Ако је одговор не, образложити ___/_____

2. Прикупљање података

2.1 Методологија за прикупљање/генерисање података

2.1.1. У оквиру ког истраживачког нацрта су подаци прикупљени?

а) експеримент, навести тип ___ На свежој стабилизацијској мешавини одрђени су Proctor-ови опити. На очврслим стабилизацијским узорцима одређене су: чврстоће при притиску, индиректне затезне чврстоће, као и запреминске масе, брзине и времена проласка ултразвучног таласа. _____

б) корелационо истраживање, навести тип _____

ц) анализа текста, навести тип _____

д) остало, навести шта _____

2.1.2 Навести врсте мерних инструмената или стандарде података специфичних за одређену научну дисциплину (ако постоје).

___ Хидрауличне пресе (капацитета 150kN) за одређивање чврстоће при притиску и индиректне затезне чврстоће, уређај за испитивање брзине и времена проласка ултразвучног таласа (Pundit), метални калуп и ручни набијач масе 2,5 kg за одређивање Proctor-овог опита. _____

2.2 Квалитет података и стандарди

SRPS EN 13286-41:2012, SRPS EN 13286-42:2012, SRPS EN 13286-2:2012, EN 14227-1:2013, SRPS U.E9.024:1980.

2.2.1. Третман недостајућих података

а) Да ли матрица садржи недостајуће податке? Да **Не**

Ако је одговор да, одговорити на следећа питања:

а) Колики је број недостајућих података? ___/_____

б) Да ли се кориснику матрице препоручује замена недостајућих података? Да Не

в) Ако је одговор да, навести сугестије за третман замене недостајућих података
_____/_____

2.2.2. На који начин је контролисан квалитет података? Описати

У овом раду подаци су резултат различитих експерименталних истраживања. Квалитет, тј. поузданост добијених података се обезбеђује бирањем одговарајућег броја узорака тако да се при обради резултата могу применити статистичке методе. Детаљан поступак рада у сваком од експерименталних испитивања је или дефинисан одговарајућим стандардом/техничком регулативом или релевантном стручном литературом, а квалитет података је контролисан на основу одговарајућих стандарда и упоредних резултата досадашњих истраживања у овој научној области.

2.2.3. На који начин је извршена контрола уноса података у матрицу?

Контрола уноса података је подразумевала физичку проверу, што је био задатак докторанда. Анализа уноса података је такође била задатак докторанда, али је праћена и усмеравана од стране ментора рада. После тога су подаци уношени у матрицу.

3. Третман података и пратећа документација

3.1. Третман и чување података

3.1.1. Подаци ће бити депоновани у Репозиторијуму докторских дисертација на Универзитету у Новом Саду.

3.1.2. URL адреса _____ <https://cris.uns.ac.rs/searchDissertations.jsf> _____

3.1.3. DOI _____

3.1.4. Да ли ће подаци бити у отвореном приступу?

- а) Да
- б) Да, али после ембарга који ће трајати до ____/____
- в) Не

Ако је одговор не, навести разлог ____/_____

3.1.5. Подаци неће бити депоновани у репозиторијум, али ће бити чувани.

Образложење

3.2 Метаподаци и документација података

3.2.1. Који стандард за метаподатке ће бити примењен? _____

3.2.1. Навести метаподатке на основу којих су подаци депоновани у репозиторијум.

Ако је потребно, навести методе које се користе за преузимање података, аналитичке и процедуралне информације, њихово кодирање, детаљне описе варијабли, записа итд.

3.3 Стратегија и стандарди за чување података

3.3.1. До ког периода ће подаци бити чувани у репозиторијуму? _____

3.3.2. Да ли ће подаци бити депоновани под шифром? **Да** **Не**

3.3.3. Да ли ће шифра бити доступна одређеном кругу истраживача? **Да** **Не**

3.3.4. Да ли се подаци морају уклонити из отвореног приступа после извесног времена?

Да **Не**

Образложити

4. Безбедност података и заштита поверљивих информација

Овај одељак МОРА бити попуњен ако ваши подаци укључују личне податке који се односе на учеснике у истраживању. За друга истраживања треба такође размотрити заштиту и сигурност података.

4.1 Формални стандарди за сигурност информација/података

Истраживачи који спроводе испитивања с људима морају да се придржавају Закона о заштити података о личности (https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_zastiti_podataka_o_licnosti.html) и одговарајућег институционалног кодекса о академском интегритету.

4.1.2. Да ли је истраживање одобрено од стране етичке комисије? Да **Не**

Ако је одговор Да, навести датум и назив етичке комисије која је одобрила истраживање

_____ / _____

4.1.2. Да ли подаци укључују личне податке учесника у истраживању? Да **Не**

Ако је одговор да, наведите на који начин сте осигурали поверљивост и сигурност информација везаних за испитанике:

- а) Подаци нису у отвореном приступу
- б) Подаци су анонимизирани
- ц) Остало, навести шта

5. Доступност података

5.1. Подаци ће бити

а) јавно доступни

б) доступни само уском кругу истраживача у одређеној научној области

ц) затворени

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести под којим условима могу да их користе:

_____ / _____

Ако су подаци доступни само уском кругу истраживача, навести на који начин могу приступити подацима:

_____/_____

5.4. Навести лиценцу под којом ће прикупљени подаци бити архивирани.

_____/_____

6. Улоге и одговорност

6.1. Навести име и презиме и мејл адресу власника (аутора) података

_____ Милија Стојановић, email: milijastojanovic@gmail.com _____

6.2. Навести име и презиме и мејл адресу особе која одржава матрицу с подацима

_____ Милија Стојановић, email: milijastojanovic@gmail.com _____

6.3. Навести име и презиме и мејл адресу особе која омогућује приступ подацима другим истраживачима

_____ Милија Стојановић, email: milijastojanovic@gmail.com _____