



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ
ГРАЂЕВИНСКО-АРХИТЕКТОНСКИ ФАКУЛТЕТ
У НИШУ



Јелена (Аца) Димитријевић

**ПРИЛОГ ПРИНЦИПИМА
ПРОЈЕКТОВАЊА ЕЛЕМЕНАТА
ДОЊЕГ СТРОЈА ЖЕЛЕЗНИЧКЕ ПРУГЕ
У СКЛАДУ СА САВРЕМЕНИМ ЗАХТЕВИМА
ОЧУВАЊА ЖИВОТНЕ СРЕДИНЕ**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Текст ове докторске дисертације ставља се на увид јавности,
у складу са чланом 40., став 9. Закона о високом образовању
(„Сл. гласник РС“, бр. 88/2017, 73/2018, 27/2018 – др. закон,
67/2019, 6/2020 – др. закони, 11/2021 – аутентично тумачење,
67/2021, 67/2021 – др. закон и 76/2023).

НАПОМЕНА О АУТОРСКИМ ПРАВИМА:

Овај текст сматра се рукописом и само се саопштава јавности
(члан 7. Закона о ауторским и сродним правима, „Сл. гласник РС“, бр. 104/2009,
99/2011, 119/2012, 29/2016 – одлука УС и 66/2019).

**Ниједан део ове докторске дисертације не сме се користити ни у какве сврхе,
осим за упознавање са њеним садржајем пре одбране дисертације.**

Ниш, 2024.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND
ARCHITECTURE OF NIŠ



Jelena (Aca) Dimitrijević

**CONTRIBUTION TO THE PRINCIPLES
OF THE RAILWAY SUBSTRUCTURE
ELEMENTS DESIGN
IN ACCORDANCE WITH THE
CONTEMPORARY REQUIREMENTS OF
ENVIRONMENTAL PROTECTION**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2024.

Подаци о ментору и члановима комисије

Ментор:

Др Зоран Бонић, редовни професор
Универзитет у Нишу, Грађевинско-архитектонски факултет
Република Србија

Чланови Комисије:

Др Елефтерија Златановић, ванредни професор
Универзитет у Нишу, Грађевинско-архитектонски факултет у Нишу
Република Србија (председник комисије)

Др Зоран Бонић, редовни професор
Универзитет у Нишу, Грађевинско-архитектонски факултет у Нишу
Република Србија (ментор, члан)

Др Златко Зафировски, редовни професор
Универзитет "Св. Кирил и Методиј" у Скопљу, Грађевински факултет у Скопљу
Република Северна Македонија (члан)

Др Драган Ђорђевић, редовни професор
Универзитет у Нишу, Природно - математички факултет у Нишу
Република Србија (члан)

Др Драган Милићевић, редовни професор
Универзитет у Нишу, Грађевинско-архитектонски факултет у Нишу
Република Србија (члан)

Датум одбране: _____

Подаци о докторској дисертацији

Ментор:	Др Зоран Бонић, редовни професор Универзитет у Нишу, Грађевинско-архитектонски факултет у Нишу
Наслов:	Прилог принципима пројектовања елемената доњег строја железничке пруге у складу са савременим захтевима очувања животне средине
Резиме:	Предмет предложене докторске дисертације је утицај железничког саобраћаја на животну средину, са циљем спречавања/ублажавања загађења воде и тла у рејону железничких пруга. Детаљном анализом прописаних техничких услова за пројектовање елемената доњег строја железничких пруга, утврђени су основни захтеви којима је условљен предлог нових решења у вези са доњим стројем. Извршено је самостално истраживање материјала у трупку пруге у погледу присуства тешких метала. За потребе истраживања су коришћене две технике и то оптичко емисиона спектрометрија са индуковано куплованом плазмом (ICP-OES) и рендгенска флуоресцентна спектрометрија (XRF). Пошто је потврђено да се у трупку пруге налази значајна количина честица тешких метала, приступљено је предлагању савремених решења канала за одводњавање и елемената у самом трупку пруге у циљу спречавања емисије тешких метала у тло и околину. Предложено решење је обухватило замену класичних одводних јаркова инфилтрационим каналима. С тим у вези је спроведено експериментално испитивање филтерских особина четири врсте филтера. Ефикасност предложених филтера је проверена помоћу ICP-OES технике, а као најефикаснији се издвојио филтер са речним агрегатом фракције 4 – 8 mm. Применом софтвера SWMM је извршено упоређивање хидрауличких особина случаја трасе са традиционалним (одводним) јарковима и случаја трасе са предложеним инфилтрационим каналима. Резултати моделирања су показали да употребом инфилтрационих канала не долази до потпуног искоришћења капацитета елемената за одводњавање, што се позитивно одражава на безбедност пруге у погледу плављења.
Научна област:	Грађевинско инжењерство
Научна дисциплина:	Железничке пруге
Кључне речи:	железничке пруге, доњи строј пруга, загађење тешким металима, одводњавање пруге, одрживи систем одводњавања
УДК:	UDK : 625.12/.123(043.3)
CERIF класификација:	T 220
Тип лиценце Креативне заједнице:	CC BY-NC-ND

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	Dr Zoran Bonić, Full Professor University of Niš, Faculty of Civil Engineering and Architecture of Niš
Title:	Contribution to the principles of the railway substructure elements design in accordance with the contemporary requirements of environmental protection
Abstract:	The subject of the doctoral dissertation is the impact of railway traffic on the environment, with the aim of preventing/mitigating water and soil pollution in the area of railway tracks. Through a detailed analysis of the prescribed technical conditions for the design of railway substructure elements, the basic requirements were determined, which conditioned the proposal of new solutions related to the substructure. An independent investigation of the material in the railway body was carried out regarding the presence of heavy metals. For research purposes, two methods were used, optical emission spectrometry with induced coupled plasma (ICP-OES) and X-ray fluorescence spectrometry (XRF). Since it was confirmed that there is a significant amount of heavy metal particles in the railway body, the proposal of contemporary solutions for drainage channels and elements in the railway body itself was approached in order to prevent the release of heavy metals into the surrounding soil and environment. The proposed solution included the replacement of conventional drainage ditches with infiltration channels. In this regard, experimental testing of the filter properties of four types of filters was carried out. The efficiency of the proposed filters was verified using the ICP-OES technique, and the filter with river aggregate of fraction 4 – 8 mm was identified as the most efficient. The hydraulic parameters of the route case with typical (drainage) ditches and the route case with the proposed infiltration channels were evaluated by SWMM software. The modeling results revealed that using infiltration channels does not result in the total utilization of the drainage components' capacity, which improves railway safety in terms of floods.
Scientific Field:	Civil Engineering
Scientific Discipline:	Railways
Key words:	railway track, railway substructure, heavy metals pollution, railway drainage, sustainable drainage system
UDC:	UDK : 625.12/.123(043.3)
CERIF Classification:	T 220
Creative Commons License Type:	CC BY-NC-ND

*Ову докторску дисертацију посвећујем свим знаним и незнаним борцима
за очување животне средине!*

ЗАХВАЛНОСТ АУТОРА

Осим личним ангажовањем у смислу уложеног рада, знања и времена, ове дисертације не би било да није људи који су својим ангажовањем дали огроман допринос у њеној изради. Поред стручне подршке, која је од највећег значаја, добила сам и емотивну и моралну подршку, подстрек, разумевање, стрпљење и толеранцију.

Први међу њима је ментор на изради докторске дисертације, проф. др Зоран Бонић, човек од науке, знања и искуства, увек спреман за нове идеје, али и препреке које се у раду појављују. Његова свесрдна подршка и стрпљење допринели су изради дисертације, а његово учешће у свим сегментима допринели су квалитету и свеобухватности овог рада.

Ништа мању захвалност дугујем и проф. др Драгану Милићевићу, пре свега као творцу саме идеје за тему докторске дисертације још за време мојих докторских студија. Хвала Вам, професоре, што сте препознали пут мојих будућих истраживања, али и истраживања, надам се, још пуно докторанада у будућности.

Проф. др Елефтерија Златановић, велики узор, саветник и сарадник је својим знањем и способношћу несебично помогла да се мој труд и залагање сврста у резултат публикованог научног рада. Особа коју неко ко се бави научним радом може само да пожели поред себе. У њеним саветима нема колебања, нејасноће и одустајања, у њеном раду нема грешака. Мотивациона подршка коју су она и проф. Бонић пружили мени претходних година уткана је у сваку страницу дисертације.

Проф. др Златко Зафировски је својим ведрим духом, добром вољом и знањем незаобилазан фактор сарадње. Специфичност његовог приступа сврстава га у групу изузетно заслужних за мој најзначајнији пројекат на пословном плану, јер је подржао идеју за израду ове дисертације и свесрдно учествовао у њеном стварању.

Проф. др Драгану Ђорђевићу, као и Природно-математичном факултету у Нишу, дугујем захвалност за помоћ око реализације научно-истраживачког експеримента у делу утврђивања потребних метода и алата и хемијских анализа при испитивању ефикасности предложених решења.

Једнако заслужан целом пројекту је и декан Грађевинско-архитектонског факултета, проф. др Славиша Трајковић, који је препознао моје афинитете за

бављење научним радом и који је руковођењем великим системом учинио да се сви делови сложе у један компактан рад, који ће у свету науке, надам се, оставити значајан траг.

За велику помоћ приликом спровођења лабораторијских испитивања посебно се захваљујем асистенту Немањи Маринковићу, маг. инж. грађ., и Бранимиру Станковићу, дипл. инж. грађ., члановима Лабораторије за геотехнику Грађевинско-архитектонског факултета у Нишу, као и проф. др Јелени Мрмошанин са Природно-математичког факултета у Нишу.

Поред ментора и стручних сарадника, у току студирања и рада, као и у току израде дисертације, велика подршка биле су ми и колеге са Грађевинско-архитектонског факултета у Нишу, од којих морам поменути проф. др Милорада Златановића, доц. др Биљану Матејевић Николић, ванр. проф. др Ненада Ристића, доц. др Александру Илић и др., као и Управу Факултета и запослене на пословима администрације Јелену Игић, Драгану Јовановић и Андријану Николић.

Захваљујем се породицама Ристић и Миладиновић на помоћи при реализацији поставке експеримента, као и свим пријатељима који су били уз мене и моју породицу за време трајања израде ове дисертације.

Велику захвалност дугујем својим родитељима, а за неизмерно разумевање, пожртвованост и подршку коју су ми пружили током рада посебно се захваљујем супругу Ивану и својој деци Дарији и Петру.

У Нишу, октобра 2024. године.

САДРЖАЈ

Списак слика:	I
Списак табела:	VII
Списак ознака:	X
Списак скраћеница:	XIII
1 УВОД.....	1
1.1 Циљ истраживања.....	2
1.2 Примењене методе истраживања.....	2
1.3 Полазна хипотеза.....	3
2 ПРЕГЛЕД ПРИМЕНЕ САМООДРЖИВИХ ТЕХНОЛОГИЈА ЗА СМАЊЕЊЕ ЕМИСИЈЕ ШТЕТНИХ СУПСТАНЦИ У ТЛО И СЛАТКОВОДНЕ РЕСУРСЕ.....	4
3 ТЕХНИЧКИ УСЛОВИ КОД ПЛАНИРАЊА И ПРОЈЕКТОВАЊА ДОЊЕГ СТРОЈА ЖЕЛЕЗНИЧКИХ ПРУГА.....	13
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО УТВРЂИВАЊЕ ЗАГАЂЕЊА У ТРУПУ ПРУГЕ.....	25
4.1 Досадашња испитивања присуства тешких метала у трупку пруге и околини железничке пруге.....	25
4.2 Сопствена испитивања присуства тешких метала у трупку пруге.....	32
4.2.1 Испитна деоница.....	33
4.2.2 Узорковање земљишта.....	34
4.2.3 Технике за испитивање узорака земљишта.....	37
Рендгенска флуоресцентна спектрометрија (XRF).....	37
Оптичка емисиона спектрометрија са индуковано куплованом плазмом (ICP-OES).....	39
4.2.4 Снимање узорака XRF ручним спектрометром.....	43
4.2.5 Испитивање узорака ICP-OES спектрометром.....	45
4.2.6 Анализа резултата.....	47
Резултати добијени применом XRF спектрометрије.....	48
Резултати добијени поступком ICP-OES.....	52
4.3 Извођење главних закључака за потребе даљег истраживања.....	56

5	ИСПИТИВАЊЕ ФИЛТРАЦИОНОГ КАПАЦИТЕТА РАЗЛИЧИТИХ ФРАКЦИЈА АГРЕГАТА У КОМБИНАЦИЈИ СА АКТИВНИМ УГЉЕМ	58
5.1	Поставка постројења за спровођење експеримента.....	60
5.2	Припрема филтер мешавина.....	66
5.3	Припрема моделног раствора и начин дозирања.....	72
5.3.1	Удео тешких метала у моделном раствору.....	72
5.3.2	Одређивање количине симулираних падавина.....	73
5.4	Опис тока експеримента	75
5.5	Обрада резултата.....	75
5.6	Резултати и дискусија резултата.....	76
5.6.1	Кадмијум (Cd).....	80
5.6.2	Кобалт (Co).....	84
5.6.3	Бакар (Cu).....	88
5.6.4	Никл (Ni).....	92
5.6.5	Олово (Pb).....	96
5.6.6	Цинк (Zn).....	100
5.7	Закључак.....	103
6	STORM WATER MANAGEMENT MODEL (SWMM).....	105
6.1	Моделирање трупа пруге.....	108
6.2	Модел 1 – модел трупа пруге минимално захтеваних димензија	112
6.3	Модел 2 – модел трупа пруге у насипу	123
6.4	Модел 3 – модел трупа пруге у усеку	134
6.5	Модел 4 – модел трупа пруге у насипу са околном површином	145
6.6	Дискусија резултата моделирања.....	156
7	ЗАВРШНЕ НАПОМЕНЕ.....	158
7.1	Рекапитулација резултата експерименталне анализе.....	158
7.2	Рекапитулација резултата моделирања у SWMM-у	160
7.3	Закључци на основу спроведених истраживања.....	163
7.4	Препоруке за будућа истраживања.....	164
	ЛИТЕРАТУРА.....	166

Списак слика

Слика 3.1	Карактеристични попречни профил железничке пруге у насипу са елементима горњег и доњег строја (КТ- кота терена, КN- кота нивелете и V_{pl} - ширина планума)	14
Слика 3.2	Карактеристични попречни профил железничке пруге у усеку (КТ- кота терена, КN- кота нивелете и V_{pl} - ширина планума).....	14
Слика 3.3	Нагиби косина усека у зависности од врсте тла у којој је усек изведен	19
Слика 3.4	Облик и минималне димензије класичног одводног јарка	20
Слика 3.5	Димензије и положај плитких бетонских елемената за подужно одводњавање	21
Слика 3.6	Димензије и положај дубоких бетонских елемената за подужно одводњавање.....	21
Слика 3.7	Положај заштитног јарка у односу на труп пруге и косину усека.....	21
Слика 3.8	Изглед дренажног канала између два колосека у станици.....	22
Слика 3.9	Пример положаја цевастог пропуста у труп пруге у односу на горњу ивицу прага (ГИП).....	24
Слика 4.1	Пут евакуације атмосферских вода са трупа железничке пруге у насипу	33
Слика 4.2	Пут евакуације атмосферских вода са трупа железничке пруге у усеку	33
Слика 4.3	Мапа пруга јужног коридора са означеном деоницом Ниш – Брестовац	34
Слика 4.4	Позиција узоркованих профила 1 и 2 на деоници Међурово – Белотинац	35
Слика 4.5	Типичан попречни профил пруге са местима узорковања.....	36
Слика 4.6	Основне компоненте ICP-OES уређаја.....	41
Слика 4.7	Генерисање плазме у плазма горионику.....	42
Слика 4.8	XRF ручни анализатор.....	44
Слика 4.9	Изглед узорка припремљеног за снимање XRF анализатором.....	44

Слика 4.10	Процес припреме раствора за испитивање у ICP-OES спектрометру: (а) мешање узорака са водом и хлороводоооичном киселином; (б) изглед наталоженог раствора; (в) филтрирање раствора кроз филтер папир; (г) упаравање филтрата на запремину од 25 ml	46
Слика 4.11	Концентрације тешких метала измерене помоћу XRF технике у попречном профилу 1 и попречном профилу 2 у поређењу са максималним дозвољеним вредностима истих према Уредби РС и према ЕУ Директиви: (а) ванадијум – V; (б) хром – Cr ; (в) кобалт – Co; (г) никл – Ni; (д) бакар – Cu; (ђ) цинк – Zn; (е) баријум – Ba; (ж) олово – Pb.	51
Слика 4.12	Концентрације тешких метала измерене помоћу ICP-OES спектрометра у попречном профилу 1 и попречном профилу 2 у поређењу са максималним дозвољеним вредностима истих према Уредби РС и према ЕУ Директиви: (а) бакар – Cu; (б) кадмијум – Cd ; (в) кобалт – Co; (г) цинк – Zn	55
Слика 5.1	Изглед трупа пруге у насипу са предложеним елементима доњег строја..	58
Слика 5.2	Изглед предложеног решења филтер канала.....	59
Слика 5.3	Шема модела: 1-носач апаратуре (метална конструкција), 2-ослонац за цеви (даска са отворима), 3-елементи за бочно придржање цеви и резервоара, 4-цев са филтер материјалом, 5-дупла PVC спојница, 6-резервоар, 7-дренажни поклопац, 8-отвор ослонаца за цеви, 9-решетка резервоара, 10-прикључак доводног црева, 11-прикључак преливног црева, 12-одушак, 13-контролни стуб, 14-прихватни суд, 15-суд за моделни раствор, 16-потапајућа пумпа, 17-цево за довод моделног раствора, 18-преливно цево, 19-прекидач потапајуће пумпе, 20-адаптер, 21-једнополна утичница	60
Слика 5.4	Изглед модела.....	61
Слика 5.5	Даска за ослањање цеви са филтер материјалом: (а) положај цеви у односу на даску, (б) отвор на дасци, (в) дренажни поклопац на дну цеви, (г) даска за ослањање и дренажни поклопац – поглед одоздо	62

Слика 5.6	Склоп за симулацију падавина: (а) резервоар за воду, (б) спојени поклопци са рупицама за проток воде, (в) веза резервоара и поклопаца (решетке резервоара)	63
Слика 5.7	Резервоар за воду: (а) изглед резервоара када је повезан дуплом PVC спојницом са филтер цеви, (б) веза доводног и преливног црева са резервоаром	64
Слика 5.8	Елементи за бочно придржање цеви и резервоара: (а) у нивоу цеви са филтер материјалима (поглед одозго), (б) у нивоу цеви са филтер материјалима (поглед одоздо)	64
Слика 5.9	Суд за моделни раствор: (а) изглед суда са потапајућом пумпом, цревом за довод течности до резервоара и преливним цревом, (б) ознака запремине суда	65
Слика 5.10	Потапајућа пумпа	65
Слика 5.11	Ознаке цеви са распоредом и карактеристикама филтер слојева.....	66
Слика 5.12	Изглед материјала коришћених за справљање филтер слојева: (а) речни агрегат фракције 2–4 mm, (б)- речни агрегат фракције 4–8 mm, (в)- речни агрегат фракције 8–16 mm, (г)- речни агрегат фракције 16–31,5 mm, (д)- активни угаљ	67
Слика 5.13	Дијаграм гранулометријског састава агрегата фракције 2–4 mm	68
Слика 5.14	Дијаграм гранулометријског састава агрегата фракције 4–8 mm	69
Слика 5.15	Дијаграм гранулометријског састава агрегата фракције 8–16 mm	70
Слика 5.16	Дијаграм гранулометријског састава агрегата фракције 16–31,5 mm	71
Слика 5.17	Уређај за прецизно мерење количина соли тешких метала	72
Слика 5.18	Интензитет кише у функцији трајања кише и вероватноће појаве за град Ниш у периоду од 1951. године до 2008. године.....	73
Слика 5.19	Проценти остатка кадмијума у моделном раствору након проласка кроз карактеристичне филтер слојеве (Филтер 1, Филтер 2, Филтер 3 и Филтер 4) за десет циклуса испитивања	80

Слика 5.20	Проценти остатка кобалта у моделном раствору након проласка кроз карактеристичне филтер слојеве (Филтер 1, Филтер 2, Филтер 3 и Филтер 4) за десет циклуса испитивања.....	84
Слика 5.21	Проценти остатка бакра у моделном раствору након проласка кроз карактеристичне филтер слојеве (Филтер 1, Филтер 2, Филтер 3 и Филтер 4) за десет циклуса испитивања.....	88
Слика 5.22	Проценти остатка никла у моделном раствору након проласка кроз карактеристичне филтер слојеве (Филтер 1, Филтер 2, Филтер 3 и Филтер 4) за десет циклуса испитивања.....	92
Слика 5.23	Проценти остатка олова у моделном раствору након проласка кроз карактеристичне филтер слојеве (Филтер 1, Филтер 2, Филтер 3 и Филтер 4) за десет циклуса испитивања.....	96
Слика 5.24	Проценти остатка цинка у моделном раствору након проласка кроз карактеристичне филтер слојеве (Филтер 1, Филтер 2, Филтер 3 и Филтер 4) за десет циклуса испитивања.....	100
Слика 6.1	Приказ начина уклапања инфилтрационог канала на месту постојећег одводног јарка.....	109
Слика 6.2	Репрезентативни попречни пресек трупа пруге са одводним јарковима и хоризонталном пројекцијом сливних површина (Модел 1.1).....	113
Слика 6.3	Репрезентативни попречни пресек трупа пруге са инфилтрационим каналима и хоризонталном пројекцијом сливних површина (Модел 1.2)..	114
Слика 6.4	Изглед шеме Модела 1.1	120
Слика 6.5	Изглед шеме Модела 1.2	120
Слика 6.6	Поређење количине укупног отицаја при одводњавању одводним јарковима (Модел 1.1) и количине при одводњавању инфилтрационим каналима (Модел 1.2)	121
Слика 6.7	Искоришћеност капацитета цевастог пропуста при одводњавању одводним јарковима (Модел 1.1) и при одводњавању инфилтрационим каналима (Модел 1.2).....	122

Слика 6.8	Искоришћеност капацитета цевовода на изливу при одводњавању одводним јарковима (Модел 1.1) и при одводњавању инфилтрационим каналима (Модел 1.2).....	122
Слика 6.9	Репрезентативни попречни пресек пруге у насипу са одводним јарковима и хоризонталном пројекцијом сливних површина (Модел 2.1)	124
Слика 6.10	Репрезентативни попречни пресек пруге у насипу са инфилтрационим каналима и хоризонталном пројекцијом сливних површина (Модел 2.2)	125
Слика 6.11	Изглед шеме Модела 2.1.....	130
Слика 6.12	Изглед шеме Модела 2.2.....	131
Слика 6.13	Поређење количине укупног отицаја при одводњавању одводним јарковима (Модел 2.1) и количине при одводњавању инфилтрационим каналима (Модел 2.2)	132
Слика 6.14	Искоришћеност капацитета цевастог пропуста при одводњавању одводним јарковима (Модел 2.1) и при одводњавању инфилтрационим каналима (Модел 2.2)	132
Слика 6.15	Искоришћеност капацитета цевовода на изливу при одводњавању одводним јарковима (Модел 2.1) и при одводњавању инфилтрационим каналима (Модел 2.2)	133
Слика 6.16	Репрезентативни попречни пресек пруге у усеку са одводним јарковима и хоризонталном пројекцијом сливних површина (Модел 3.1).....	135
Слика 6.17	Репрезентативни попречни пресек пруге у усеку са инфилтрационим каналима и хоризонталном пројекцијом сливних површина (Модел 3.2)	136
Слика 6.18	Изглед шеме Модела 3.1.....	142
Слика 6.19	Изглед шеме Модела 3.2.....	142
Слика 6.20	Поређење количине укупног отицаја при одводњавању одводним јарковима (Модел 3.1) и количине при одводњавању инфилтрационим каналима (Модел 3.2)	143

Слика 6.21	Искоришћеност капацитета цевастог пропуста при одводњавању одводним јарковима (Модел 3.1) и при одводњавању инфилтрационим каналима (Модел 3.2)	144
Слика 6.22	Искоришћеност капацитета цевовода на изливу при одводњавању одводним јарковима (Модел 3.1) и при одводњавању инфилтрационим каналима (Модел 3.2)	144
Слика 6.23	Репрезентативни попречни пресек пруге у насипу и припадајуће околне површине са одводним јарковима и хоризонталном пројекцијом сливних површина (Модел 4.1).....	146
Слика 6.24	Репрезентативни попречни пресек пруге у насипу и припадајуће околне површине са инфилтрационим каналима и хоризонталном пројекцијом сливних површина (Модел 4.2)	147
Слика 6.25	Изглед шеме Модела 4.1.....	153
Слика 6.26	Изглед шеме Модела 4.2.....	153
Слика 6.27	Поређење количине укупног отицаја при одводњавању одводним јарковима (Модел 4.1) и количине при одводњавању инфилтрационим каналима (Модел 4.2)	154
Слика 6.28	Искоришћеност капацитета цевастог пропуста при одводњавању одводним јарковима (Модел 4.1) и при одводњавању инфилтрационим каналима (Модел 4.2)	155
Слика 6.29	Искоришћеност капацитета цевовода на изливу при одводњавању одводним јарковима (Модел 4.1) и при одводњавању инфилтрационим каналима (Модел 4.2)	155

Списак табела

Табела 3.1	Статички модул деформације (E_{v2}), динамички модул деформације (E_{vd}) и степен збијености (D_{pr}) на врху заштитног слоја у зависности од ранга пруге.....	16
Табела 3.2	Статички модул деформације (E_{v2}), динамички модул деформације (E_{vd}) и степен збијености (D_{pr}) на врху прелазног слоја у зависности од ранга пруге.....	17
Табела 3.3	Статички модул деформације (E_{v2}), динамички модул деформације (E_{vd}) и степен збијености (D_{pr}) тла испод прелазног слоја.....	17
Табела 3.4	Степен збијености (D_{pr}) темељног тла.....	19
Табела 3.5	Статички (E_{v2}) и динамички (E_{vd}) модул деформације темељног тла.....	20
Табела 4.1	Оперативни услови за инструмент iCAP 6000 ICP-OES.....	45
Табела 4.2	Масе припремљених узорак за испитивање ($g \pm 1\%$).....	46
Табела 4.3	Граничне максималне вредности загађујућих, штетних и опасних материја у земљишту према Уредби РС и према ЕУ Директиви изражене у јединицама ppm.....	47
Табела 4.4	Количине метала одређене XRF-ом у јединицама ppm ($ppm \pm 5\%$).....	48
Табела 4.5	Количине метала у узорцима израчунате на основу вредности измерених помоћу ICP-OES спектрометра у јединицама ppm ($ppm \pm 5\%$).....	53
Табела 5.1	Основни показатељи речног агрегата фракције 2–4 mm.....	68
Табела 5.2	Основни показатељи речног агрегата фракције 4–8 mm.....	69
Табела 5.3	Основни показатељи речног агрегата фракције 8–16 mm.....	70
Табела 5.4	Основни показатељи речног агрегата фракције 16–31.5 mm.....	71
Табела 5.5	Масе соли у одговарајућој запремини моделног раствора.....	72
Табела 5.6	Резултати мерења времена протицаја 10 l воде кроз 12 отвора пречника Ø1 mm.....	74

Табела 5.7	Резултати мерења времена протицаја 10 l воде кроз 10 отвора пречника Ø1mm.....	74
Табела 5.8	Количине метала у моделном раствору пре (почетна концентрација) и након проласка кроз цеви са филтер материјалима (Филтер 1, Филтер 2, Филтер 3 и Филтер 4).....	76
Табела 5.9	Количине тешких метала у моделном раствору након проласка кроз филтер цеви (остатак), изражене у процентима.....	78
Табела 5.10	Расподела количине задржаног и процеђеног кадмијума по циклусима, са коначним односом након десет циклуса испитивања.....	81
Табела 5.11	Расподела количине задржаног и процеђеног кобалта по циклусима, са коначним односом након десет циклуса испитивања.....	85
Табела 5.12	Расподела количине задржаног и процеђеног бакра по циклусима, са коначним односом након десет циклуса испитивања.....	89
Табела 5.13	Расподела количине задржаног и процеђеног никла по циклусима, са коначним односом након десет циклуса испитивања.....	93
Табела 5.14	Расподела количине задржаног и процеђеног олова по циклусима, са коначним односом након десет циклуса испитивања.....	97
Табела 5.15	Расподела количине задржаног и процеђеног цинка по циклусима, са коначним односом након десет циклуса испитивања.....	101
Табела 6.1	Параметри кишних епизода са максималном годишњом сумом падавина за плувиографску станицу Ниш, период од 1951. до 2008. године.....	111
Табела 6.2	Карактеристике сливних површина Модела 1.1.....	117
Табела 6.3	Карактеристике сливних површина Модела 1.2.....	118
Табела 6.4	Карактеристике сливних површина Модела 2.1.....	127
Табела 6.5	Карактеристике сливних површина Модела 2.2.....	128
Табела 6.6	Карактеристике сливних површина Модела 3.1.....	139
Табела 6.7	Карактеристике сливних површина Модела 3.2.....	140

Табела 6.8	Карактеристике сливних површина Модела 4.1.....	150
Табела 6.9	Карактеристике сливних површина Модела 4.2.....	151

Списак ознака

A_{vg_x}	средња вредност количине метала мерене ICP-OES поступком
Ag	сребро
Al	алуминијум
As	арсен
B	бор
Ba	баријум
Be	берилијум
Bi	бизмут
Ca	калцијум
Cd	кадмијум
C_{dno}	количина акумулираних метала у слојевима при дну филтера
C_{in}	концентрација метала у припремљеном узорку
Co	кобалт
C_{out}	концентрација метала у филтрираном узорку
C_{pov}	количина акумулираних метала у површинским слојевима филтера
Cr	хром
Cs	цезијум
Cu	бакар
D_{pr}	степен збијености тла
d_{10}	ефективни пречник зрна агрегата
d_{15}	пречник зрна агрегата који припада ординати 85% гранулометријеске криве
d_{60}	доминантни пречник зрна агрегата
d_{85}	пречник зрна агрегата који припада ординати 15% гранулометријеске криве
E	ефикасност уклањања тешких метала

E_{v2}	статички модул деформације
E_{vd}	динамички модул деформације
E_x	концетрација метала 'x' у узорку
Fe	гвожђе
HCl	хлороводонична киселина
Hf	хафнијум
Hg	жива
h_n	растојање од врха пропуста до горње ивице прага
K	коефицијент водонепропустљивости
K	калијум
m	маса узорка
Mg	магнезијум
Mo	молибден
Na	натријум
Nb	ниобијум
Ni	никл
Ø	пречник цевастог попушта
P	фосфор
Pb	олово
Pd	паладијум
P_i	индекс загађења
Rb	рубидијум
S	сумпор
Sb	антимон
Sb	Антимон
Sc	скандијум

Se	селен
Si	силицијум
Sn	калај
Sr	стронцијум
Ta	тантал
Th	торијум
Ti	титанијум
U	коэффициент неравномерности
U	уранијум
V	брзина кретања воза
V	ванадијум
W	волфрам
Y	итријум
Y_d	запреминска маса у сувом стању збијеног тла
Y_{max}	максимална запреминска маса при оптималној влажности добијеној Прокторовим опитом
Zn	цинк
Zr	цирконијум

Списак скраћеница

3D-EDXRF	рендгенска флуоресцентна спектрометрија са поларизованим снопом рентгенских зрака
AAS	atomic absorption spectroscopy (атомска апсорпциона спектроскопија)
BMP	Best Management Practices
B _{pl}	ширина планума
CCD	Charge Coupled Device
CID	Charge Injection Device
CTD	Charge Transfer Device
EDXRF	енергетски дисперзивна рендгенска флуоресцентна спектрометрија
F-AAS	flame atomic absorption spectrometry (пламена атомска апсорпциона спектрометрија)
ICP-MS	inductively coupled plasma–mass spectrometry (масена спектрометрија са индуковано куплованом плазмом)
ICP-OES	inductively coupled plasma/optical emission spectrometry (оптичко емисиона спектрометрија са индуковано куплованом плазмо)
IKD	канал десно
IKL	канал лево
KND	косина насипа десно
KNL	косина насипа лево
KTD	косина трупа десно
KTL	косина трупа лево
KUD	косина усека десно
KUL	косина усека лево
LID	Low Impact Development
O	околна површина
OJD	одводни јарак десно

OJL	одводни јарак лево
PAHs	(Polycyclic aromatic Hydrocarbons) полициклични ароматични угљоводоници
PD	део планума са нагибом удесно
P-EDXRF	портабл рендгенска флуоресцентна спектрометрија
PL	део планума са нагибом улево
PVC	поливинил хлорид
SuDS	Sustainable Drainage Systems
SWMM	Storm Water Management Model
UV	ултра виолетни
WDXRF	таласно дисперзивна рендгенска флуоресцентна спектрометрија
WSUD	Water Sensitive Urban Design
XRF	X-ray fluorescence spectroscopy (рендгенска флуоресцентна спектроскопија)
μEDXRF	микро рендгенска флуоресцентна спектрометрија
AУ	активни угаљ
ГИП	горња ивица прага
ЕУ	Европска Унија
KN	кота нивелете
КТ	кота терена
РС	Република Србија
РФ	радио-фреквентни
TXRF	рендгенска флуоресцентна спектрометрија са тоталном рефлексijом

1 УВОД

Оправданост постојања и развоја железничког саобраћаја, између осталог, се јако дуго заснивала и на мишљењу да је реч о виду саобраћаја који је са еколошког аспекта најприхватљивији. Развој железничког саобраћаја се протеже од возила на парни погон, преко дизел погонских возила, до савремених путничких и теретних композиција на електрични погон. Преласком са дизел на електро вучу се значајно смањило загађење ваздуха, али није престало ослобађање штетних материја током одвијања железничког саобраћаја.

О утицају железничког саобраћаја на животну средину се није посебно расправљало све до првих озбиљних истраживања квалитета земљишта у непосредној близини пруге. Досадашња истраживања утицаја железнице на околину су се више сводила на утврђивање нивоа буке коју производи железнички саобраћај. Испитивања новијег датума су озбиљно скренула пажњу на утврђивање квалитета површинских и подземних вода које су у посредној вези са трупом пруге. Истраживањем земљишта у рејону железничких пруга, али и ширем појасу до 50 m удаљености, је утврђено постојање опасних супстанци по живот и здравље људи. Елиминацијом других могућих загађивача је доказано да је извор поменутих супстанци управо железница.

Веза трупа пруге и водних ресурса се остварује преко падавина које се отицањем са колосека одводе каналима поред пруге директно у реципијенте. Понирањем кроз тло, атмосферилије доспевају и до подземних вода. Правилником о техничким условима подсистема инфраструктура Републике Србије су утврђени основни захтеви у фази пројектовања, а касније и у фази извођења, у вези са елементима за одводњавање пруга. Један од тих захтева је да се вода која доспе на пругу, било да се ради о прузи на отвореном или железничкој станици, што краћим путем одведе са трупа пруге. За то су предвиђени одговарајући подужни канали (отворени канали и канали у трупу пруге) и колектори. Пажљиво планирање елемената за одводњавање обезбеђује заштиту трупа пруге од штетног утицаја присуства воде и продужава век трајања конструкције.

Атмосферске падавине врше спирање застора, па тако контаминирана вода доспева у подужне канале, а затим и у сабирнике. Овакав систем није самоодржив и захтева решење у погледу прерађивачких постројења. По утврђивању постојања загађења природних ресурса, потребно је анализирати изворе загађења, као и начин

транспортивања штетних супстанци, и напоследку размишљати о регулацији путева њиховог транспорта. Овим сазнањима треба приступити студиозно, са циљем формирања одговарајућих система код пројектовања станица и пруга на отвореном у складу са одрживим развојем. Железница у овом случају представља извор загађења, о чијим ће појединачним аспектима бити више речи у овој дисертацији.

Идеја је да се имплементацијом савремених технологија добије складан систем железничка конструкција – животна средина. Оваква симбиоза би подразумевала несметано функционисање конструктивних система са свим пратећим операцијама без негативних утицаја на животну средину.

1.1 ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

Жива бића имају одређене физиолошке потребе, без чијег задовољења не би могла да преживе. Најважнија од тих потреба је потреба за водом и то не било каквом, већ чистом водом без примеса које могу да наруше здравље, пре свега људи, али и других живих бића.

Све већи недостатак водних ресурса и воде за пиће имплицира озбиљнији приступ њиховом очувању. Пијаћа вода својим природним кружењем долази у контакт са разним загађивачима, чиме се њен квалитет тренутно или трајно нарушава.

Циљ докторске дисертације је утврђивање методологије пројектовања железничких станица и пруга на отвореном у складу са одрживим развојем и доприносом у очувању квалитета пијаће воде.

1.2 ПРИМЕЊЕНЕ МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА

Предлог нове методологије пројектовања се заснива на експерименталном испитивању и нумеричком моделирању. **Експериментална метода** би требало да доведе до конкретних резултата везаних за квалитет пречишћених вода које отичу, док би се **нумеричким моделирањем** утврдиле хидрауличке перформансе предложених решења.

Задаци које треба урадити у оквиру дисертације обухватају:

- Експериментално утврђивање полазних поставки за тражење новог решења канала за одводњавање одговарајућих филтерских карактеристика и експериментална провера функционалности таквих канала;
- Проверу пројектованог решења у SWMM (Storm Water Management Model) софтверу. Предвиђа се провера задовољавајућег капацитета прихватања атмосферских вода за релевантне количине падавина;
- Утврђивање методологије за имплементацију елемената самоодрживих технологија код пројектовања трупа пруге са циљем одводњавања пруга на отвореном. Треба обухватити смернице код одабира и позиционирања елемената савремених технологија који могу бити примењени при пројектовању пруга на отвореном.

1.3 ПОЛАЗНА ХИПОТЕЗА

Применом елемената самоодрживих технологија, могуће је контролисано одвођење атмосферских вода са трупа пруге. На тај начин се вода која отиче одговарајућим системима филтрира, те загађивачи са трупа пруге не доспевају у подтло, околно земљиште, површинске и подземне воде, већ се њихов даљи транспорт онемогућава.

Мотив за израду ове дисертације је, пре свега, очување постојећих ресурса пијаће воде и квалитета земљишта у рејону железничких пруга. Квалитет воде се не сме занемарити у времену када је пијаће воде све мање или је уопште и нема, као што је то случај у подручјима са дугим сушним периодима [Gounder, 2008].

2 ПРЕГЛЕД ПРИМЕНЕ САМООДРЖИВИХ ТЕХНОЛОГИЈА ЗА СМАЊЕЊЕ ЕМИСИЈЕ ШТЕТНИХ СУПСТАНЦИ У ТЛО И СЛАТКОВОДНЕ РЕСУРСЕ

Климатске промене, убрзана урбанизација и еколошки проблеми који карактеришу савремено доба намећу потребу за новим начином управљања атмосферским водама. Неопходан је развој иновативних техника управљања атмосферилијама ради спречавања појаве поплава и загађења услед неконтролисаног одводњавања при екстремним метеоролошким појавама [Eckart et al., 2017].

Општи модел за одводњавање железничких пруга отвореним и затвореним каналима је заступљен широм света. Он обухвата отворене канале (јаркове) и дренажне канале смештене у трупку пруге [Spink et al., 2014]. Системи за одводњавање обухватају све канале који прихватају атмосферске воде са трупа пруге, падавине које се сливају са околних површина и подземне воде [Fisher et al., 2015].

Садржај који се одводњава са трупа железничке пруге у за то предвиђене реципијенте носи са собом потенцијално отровне супстанце. Један део тих супстанци се и директно излива у водотокове, а део њих се инфилтрира у подтло и околну земљиште, где касније, даљом инфилтрацијом, може dospети и у подземне воде. Као што то обично бива, примени решења за паметно одводњавање су претходила истраживања којима су потврђене сумње да осим стварања буке и вибрација, железнички саобраћај доводи и до емисије штетних материја у животну средину. Међу првим објављеним студијама које се баве механизмом загађења животне средине железничким саобраћајем је студија урађена у Швајцарској 2005. године [Burkhardt et al., 2005]. Појединачна истраживања су рађена и пре ове студије, али без свеобухватног приступа изворима и врстама загађивача проузрокованих железничким саобраћајем. Од загађивача су се по регистрованој количини значајно издвојили тешки метали, полициклични ароматични угљоводоници (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons - PAHs) и хербициди [Burkhardt et al., 2014]. Показано је да је ослобађање полицикличних ароматичних угљоводоника у животну средину у директној вези са атмосферским падавинама [Kang et al., 2005; Becker et al., 2001]. Ради спречавања загађења горе наведеним материјама, неопходно је утврдити изворе њиховог настајања. Разматрањем свих могућих извора загађења утврђено је да су то елементи који чине саставне делове колосека и железничких возила, па их није могуће искључити, јер се јављају као

резултат одвијања железничког саобраћаја [Burkhardt et al., 2008; Vo et al., 2015; Samarska et al., 2020; Bouida et al., 2022].

Претходно наведена сазнања су указала да је потребно пројектовању одређених елемената трупа пруге приступити на начин другачији од класичног. Пошто је срж проблема у одводњавању и спирању штетних материја, јасно је да се треба фокусирати на елементе за одводњавање. Извршена су опсежна истраживања свих већ заступљених техника за одводњавање, али и оних које осим одводњавања подразумевају и пречишћавање отицаја. Нису пронађена решења која се баве пречишћавањем отицаја, а да су примењивана на железничким пругама. Због тога се истраживање усмерава ка познатим решењима примењеним у урбанистичким условима, решењима која се могу прилагодити потребама за одводњавање на пругама.

Решење се тражи у савременим (самоодрживим) технологијама за пречишћавање и одвођење атмосферских вода. Општим прегледом литературе самоодрживих система за одводњавање [Rijke et al., 2008] утврђено је да су у употреби појмови попут:

- BMP (Best Management Practices) и LID (Low Impact Development) технологије у Сједињеним Америчким Државама и Канади,
- SuDS технологије (Sustainable Drainage Systems) у Великој Британији и
- WSUD технологије (Water Sensitive Urban Design) у Аустралији и Холандији.

Различити термини се користе за дефинисање сличних појмова у различитим деловима света, што потенцијално доводи до преклапања, противречности и забуне [Fletcher et al., 2014]. Технологије SuDS, BMP, LID и WSUD су веома сличне у многим аспектима. Технолошки напредак и стечена знања се могу применити код сва четири приступа. Називи технологија се везују за одређено подручје и регулативу. Разликују се према областима које обухватају, тј. да ли се баве конкретним проблемима за одводњавање или целокупном мрежом, али су елементи у принципу исти и могу се разликовати у детаљима. Са тим у вези је само важно код примене технологија водити рачуна да то буде у складу са прописаним законом земље у којој се та технологија примењује [Mak, 2015].

BMP (Best Management Practices) се међу првима јавља као појам и технологија давне 1972. године у документима Сједињених Америчких Држава код успостављања основних структура за регулисање испуштања загађујућих материја у

воде и регулисање стандарда квалитета за површинске воде. У буквалном преводу BMP значи "Најбоље праксе управљања". Ова проблематика је уврштена у Програм заштите вода (National Pollutant Discharged Elimination System - NPDES) 1987. године код Агенције за заштиту животне средине Сједињених Америчких Држава (United States Environmental Protection Agency - USEPA). BMP подједнако обухвата мере за спречавање и ублажавање загађења (Best Management Practices Guidance Document, 1981). Примењује се у пољопривреди, код стабилизације подручја погођених ерозијом изазваном природним путем или деловањем човека и код управљања атмосферским водама у урбаним срединама [Ashley et al., 2011]. BMP се класификује у више категорија, укључујући превенцију ерозије, контролу седимента, контролу отицаја, LID (Low Impact Development) и контролу квалитета воде. LID и SuDS технологије су користећи технике BMP-а развиле принципе управљања атмосферским водама.

SuDS (Sustainable Drainage Systems) се, осим регулацијом поплава, бави и управљањем и регулацијом атмосферских вода. Има три главна циља: да управља количином урбаног отицања, да контролише квалитет отицаја и побољша погодности и биодиверзитет на неком подручју [Мак, 2015]. Овај систем садржи низ технологија и техника за регулисање површинских и атмосферских вода на начин приближан природном циклусу кружења воде у природи. Најадекватнији правилник за управљање вода је тренутно "The SuDS Manual" који се примењује у Великој Британији [Woods-Ballard et al., 2007]. Законом је градња условљена да се по принципу SuDS технологија води рачуна о одводњавању. Практично се више води рачуна о количинама падавина, мада би употребом прописаних технологија и проблем квалитета воде био решен [DEFRA, 2011]. Систем SuDS није достигао потребан ниво за генерализацију и свеобухватно разумевање процеса транзиције на нивоу Европске Уније, јер не постоји довољно резултата истраживања студија случаја. Потребно је још доста емпиријских студија о његовој ефикасности. Свака генерализација би била преурањена. Конкретан закључак се може извести само за територију Велике Британије и Шведске [Gimenez-Maranges et al., 2020].

WSUD (Water Sensitive Urban Design) технологија проблем регулације воде сагледава доста шире од система SuDS, јер се бави целокупним циклусом кретања воде и интеграцијом система управљања у урбанистичко пројектовање и планирање [Hoey et al., 2011]. Циљ је свођење утицаја на постојеће природне карактеристике и еколошке процесе неког подручја, са нарочитим освртом на квалитет површинских и подземних

вода, побољшање квалитета испуштених отпадних вода или смањење количине истих, омогућавање употребе атмосферских вода, планирање третирања отпадних вода и смањење количине истих, повећање вишенамених зелених површина и смањење инфраструктурних трошкова за одводњавање. Постоји широк спектар пракси и технологија на располагању ради постизања тих циљева [Hoban, 2019].

LID (Low Impact Development) технологија сагледава све поменуте категорије регулације атмосферских падавина и обухвата две групе техника за регулацију атмосферских вода: технике засноване на инфилтрацији и технике за задржавање воде [Eckart et al., 2017]. Ова технологија представља скуп приступа управљања атмосферским водама, који се примењују да би се смањила количина отицаја и задржавање загађивача што је могуће ближе њиховом извору. Системи LID технологија су разноврсни. Не постоје подаци да је нешто од ових елемената примењено на пругама, али постоји богата историја примене одређених решења у урбаним срединама. Доста таквих решења је могуће користити за прихват и пречишћавање отицаја, а у складу са захтевима које намеће одводњавање железничких пруга.

Од решења која је могуће применити у оквиру елемената доњег строја пруга издвојени су затрављени канали, инфилтрациони канали, дренажни канали, кишне баште, биоретензије, пропусне површине, ретензиони базени и кишна бурад [Dimitrijević et al., 2023]. Основна и заједничка функција сви наведених елемената је биофилтрација воде до нивоа прописаних вредности хемијског састава воде која не загађује околну земљиште и друге водне ресурсе у које се потенцијално може излити.

Биофилтрација воде је метода побољшања квалитета воде филтрирањем кроз биолошки формиране медије. За успешно пројектовање и имплементацију је потребан мултидисциплинарни приступ. Уопштено, систем за биофилтрацију се састоји из затрављеног канала или базена напуњених порозним материјалом на бази песка и ситних фракција агрегата са дренажном цеви на дну канала, односно базена. Хидролошка функција биофилтера је да смање вршни отицај и укупну количину отицања воде. Други циљ система биофилтрације је побољшање квалитета воде путем хемијских, физичких и биолошких процеса [Deletic et al., 2014; Payne et al., 2015]. У зависности од величине биофилтера, био он линијски или површински, и количине воде која се прихвата, биофилтер може бити са или без дренажне цеви. Због своје

високе ефикасности, самоодрживости и компатибилности са околином, биофилтери су у данашње време веома популарни [Payne et al., 2015; Vijayaraghavan et al., 2021]. Feng и сарадници (2022) су показали да биофилтери могу бити одлична мера као предтретман код пречишћавања воде за пиће.

Код нас је за потребе одвођавања пруга распрострањена употреба **затрављених канала** без посебних филтрацијских својстава подслојева. Инфилтрација се обавља у мери у којој то материјал од ког је сачињено подтло дозвољава, па инфилтрирани садржај даље понире без пречишћавања. Затрављени канали имају задатак да смање брзину отицаја и седиментацијом задрже честице у самом каналу. На тај начин је спречен даљи транспорт удела честица [Eckart et al., 2017; Fisher et al., 2015; Davis et al., 2012]. Овде долази до делимичне инфилтрације [Davis et al., 2012], што у случају супстанци кумулативног карактера као што су тешки метали може имати штетне последице. Овакво решење није у потпуности прихватљиво за потребе одводњавања са трупа пруге, већ треба предвидети додатне елементе попут непропусних брана испод конструкције канала, ради спречавања дубље инфилтрације или чак формирања засада биљкама којима погодује такав садржај отицаја [Ekka et al., 2021]. Према Stagge-у и сарадницима (2012), пажљивим одабиром вегетације значајно су се смањиле укупне суспендоване чврсте материје (TSS) и тешки метали (олово, бакар, цинк и кадмијум). У том случају, такав канал би се сматрао унапређеним у погледу пречишћења атмосферских вода.

Канали са одређеним филтерским особинама се деле на инфилтрационе канале, водене канале и филтер канале [Ekka and Hunt, 2020]. И поред значајних резултата који се постижу затрављеним каналима, инфилтрациони канали дају много боље резултате. Значајно смањење загађивача је постигнуто код канала који инфилтрирају воду. Код Flanagan-а и сарадника (2018) је на примеру употребе филтер канала за пречишћавање вода које отичу са коловоза показана изузетна ефикасност у отклањању појединих тешких метала и РаН-а. Слична ефикасност се уочава и код Ekka-е и сарадника (2021). У погледу хидрауличких особина, истичу се инфилтрациони канали, јер могу да прихвате велику количину воде и на тај начин смање вршни отицај [Fardel et al., 2020]. Нема неконтролисаног преливања канала, нити оптерећења на реципијент [Monrabal-Martinez et al., 2018]. Код вршног отицаја најлакше долази до плављења и могућег нарушавања стабилности колосека. Овакав тип технологије помоћу природних процеса третира загађиваче у атмосферским водама, пружајући

најбоље еколошке, социјалне и економске бенефите [Davies et al., 2017; Ekka et al., 2021]. Смернице за изглед и садржај канала дали су Ekka и сарадници (2021) код упоређења ефикасности потопљених и филтер канала. Перформансе филтерских канала у зимском периоду и периоду ниских температура, према лабораторијским и теренским испитивањима, су нешто слабије [Fach et al., 2011] и ово би требало у будућности детаљније испитивати [Flanagan et al., 2018]. Спроведена су испитивања филтерских особина канала у контролисаним условима [Fardel et al., 2020]. Осим филтерских особина канала испитана је и ефикасност пречишћавања у односу на начин прихватања отицаја, тј. да ли је реч о бочном или подужном сливању отицаја. Слично испитивање су претходно спровели Zhang и сарадници (2014), али овим истраживањима није било обухваћено понашање филтера према начину сливања воде. Наведене студије су показале да је смањење разматраних врста загађивача помоћу биофилтера могуће, али да је од пресудног значаја одабир врсте слојева филтера и начина њиховог формирања за циљану филтрацију (тешки метали, РаН итд.).

На железничким пругама код нас, осим одводних јаркова, у употреби су и класични **дренажни канали**. Ови канали служе за прикупљање и одвођење воде са трупа пруге [Fisher et al., 2015; Sanudo et al., 2019]. Формирани су од крупних фракција агрегата без изражених филтерских карактеристика. Једини облик задржавања штетних материја у случају класичних дренажних канала је седиментација у склопу самог канала, али о томе не постоје забележени подаци. Осим на станицама, дренажни канали су често виђени и у усецима, док се на отвореној прузи у насипу најчешће користе класични одводни јаркови.

Биоретензионе површине представљају површине богате вегетацијом. Као што је то случај са филтер каналима, биоретензионе површине прикупљају воду која отиче и тренутно је складиште са циљем пречишћавања путем одговарајућих слојева материјала и помоћу вегетације. Одличне су у отклањању нутријената и метала из отицаја. То су површински елементи са лаком имплементацијом на просторима са изражајним површинским отицајима градских средина. У урбаним срединама су јако популарне, те је данас истраживање отишло у смеру испитивања све интресантнијих материјала за пречишћавање, као што су то приказали Nagara и сарадници (2023) применом обичног и прерађеног малча у кишној башти. У свом испитивању Lim и сарадници (2015) сагледавају интересантан спектар материјала за филтер слој, где показују колико је непознаница и неискоришћених могућности када је одабир типа

филтера у питању. Резултати су охрабрујући у погледу отклањања тешких метала попут бакра (Cu), цинка (Zn), кадмијума (Cd) и олова (Pb), у случају када се користе материјали који би иначе били одложени у природи без неке даље функције или задатка. Дobar део података везаних за истраживање функционалности и ефикасности биофилтера је везан за испитивање карактеристика, како природних, тако и модификованих материјала за филтер слојеве [Reddy et al., 2014; Lohan et al., 2023].

Кишна бурад представљају најједноставније решење за смањење количине отицаја са посматраног подручја. Ово је нарочито битно код вршног отицаја, јер кишна бурад омогућавају тренутно задржавање одређене количине падавина, које касније могу бити коришћене у друге сврхе или једноставно бити испуштене у реципијент када опасност од плављења буде знатно мања [Hoban, 2019]. Овакво решење је веома распрострањено и своју примену проналази код свих објеката високоградње. С тим у вези је лако применљиво и на железничким станицама са већим бројем службених зграда. Иако је тако, код нас није познато да је на неком службеном месту на железници инсталирана кишна бурад.

Пропусне површине попут водопропусних асфалта и бетона, као и бетонских подлога мрежног типа, имају широку примену због могућности прихватања веће количине падавина у урбаним срединама са малим бројем зелених површина [Zhu et al., 2021]. Прегледом литературе [Xie et al., 2019] је утврђено да употреба водопропусних бетонских подлога пружа више еколошких бенефита попут регулације отицања атмосферских вода, квалитета воде, смањења буке и смањење ефекта прегревања градских површина. Најновије генерације пропусних бетонских подлога се одликују високим чврстоћама на притисак са смањењем осетљивости на зачепљење [Kia et al., 2021]. Повећање носивости оваквих подлога омогућава њихову употребу код тешког саобраћаја, што би одговарало прилазним магацинским саобраћајницама на железничким станицама. Иако су порозни бетони показали нешто боље карактеристике у погледу филтрирања [Selbig et al., 2019], подлоге од асфалта не заостају у стабилности и пропустљивости [Akhtar et al., 2021]. Код бетонских мрежа спорно је одржавање, док се у погледу хидролошких преформанси и филтрирања добро рангирају. Према Zhu-у и сарадницима (2021), категоризација у оквиру наведених врста порозних површина је извршена на основу слојева подконструкције, што је у директној вези са пројектованим оптерећењем за посматрану површину. Wijeyawardana и сарадници (2022) померају границе истраживањем утицаја садржаја бетона на

уклањање тешких метала, чиме дају потпору за још детаљнија истраживања у погледу засићења бетона тешким металима. Као и код биоретензија, све је већи број испитивања алтернативних врста материјала за производњу пропусних бетонских подлога [Khankhaје et al., 2023]. Примену на железничким станицама порозне површине могу пронаћи код изградње прилазних путева, паркинга, тротоара, перона, пешачких и службених стаза. Код нас је запажена примена мрежастих бетонских подлога само у оквиру паркинга, али не нужно на железничким станицама, већ као део урбанистичких решења јавних објеката, тржних центара и насеља.

Све наведене варијанте самоодрживих технологија су у свету много заступљеније него код нас. Део ових решења је имплементиран у урбаним срединама и код нас, али недовољно, јер се ова пракса не подразумева као обавезна током пројектовања објеката. Потреба за оваквим техникама је наметнута све озбиљнијим последицама које се јављају услед климатских промена. Сваки појединачни инфраструктурни објекат заузима подручје које је у природним условима предвиђено да прихвати одређену количину воде. Покривањем те површине при изградњи, онемогућено је да се падавине делимично инфилтрирају у тло, па се системи за одводњавање преоптерећују. Успут, киша која отиче до прихватних пунктова, спира са собом загађиваче који су у међувремену произведени разним активностима човека и односи их до слатководних ресурса. Земљу је заменио непропусни бетон и слични материјали који не упијају воду, па се локално јавља константно прегревање атмосфере, што изазива промену микроклиме.

У дисертацији је наведено неколико случајева испитивања концентрације тешких метала у рејону пруге, као и сопствено истраживање присуства тешких метала у самом трупку пруге. Тражењем решења за сузбијање ширења загађивача даље од извора загађења, тј. трупка железничке пруге, закључено је да би, од свих приказаних елемената самоодрживих технологија, било најзначајније имплементирати инфилтрациони канал као вид замене класичних дренажних канала, на месту предвиђеном за дренажне канале, али и на месту одводних јаркова. Због тога је приступљено детаљнијем проучавању ефикасности четири различита типа филтера у отклањању тешких метала. Испитивање је вршено у лабораторијским условима, где су филтери испитивани на утицај мешавине воде са унапред одређеним уделом тешких метала. Филтери су били изложени наведеној мешавини са протоком који је одговарао интензитету двогодишњих падавина за подручје града Ниша. Хидрауличке

карактеристике филтера који је показао најбоље перформансе при октлањању тешких метала су испитане у софтверу Storm Water Management Model (SWMM).

3 ТЕХНИЧКИ УСЛОВИ КОД ПЛАНИРАЊА И ПРОЈЕКТОВАЊА ДОЊЕГ СТРОЈА ЖЕЛЕЗНИЧКИХ ПРУГА

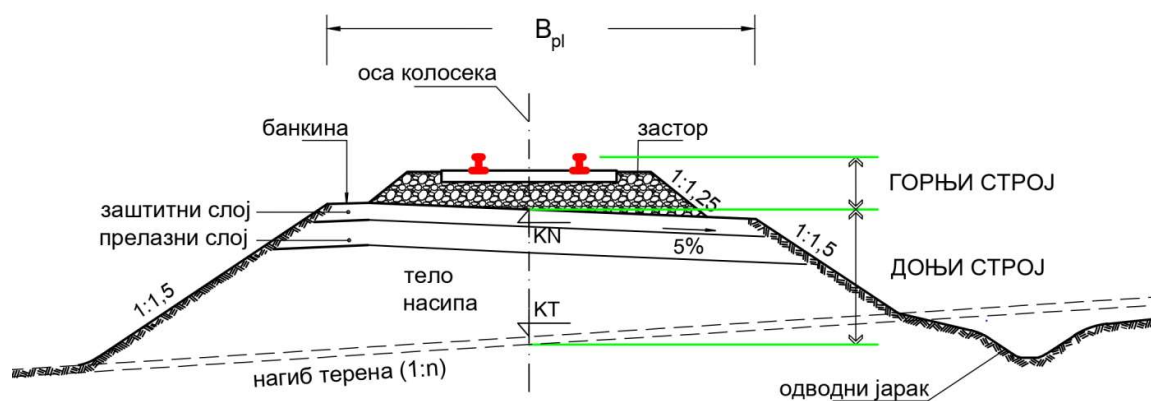
Задатак доњег строја железничких пруга је да омогући савладавање свих природних и вештачких препрека ради имплементације позиције железничке пруге у простору, уз прихватање статичких и динамичких оптерећења од железничких возила, обезбеђења заштите од метеоролошких прилика и хидролошких услова подручја и омогућавања безбедног одвијања саобраћаја, како индивидуалног, тако и у конекцији са друмским саобраћајем.

Доњи строј железничких пруга обухвата [Поповић, 2004]:

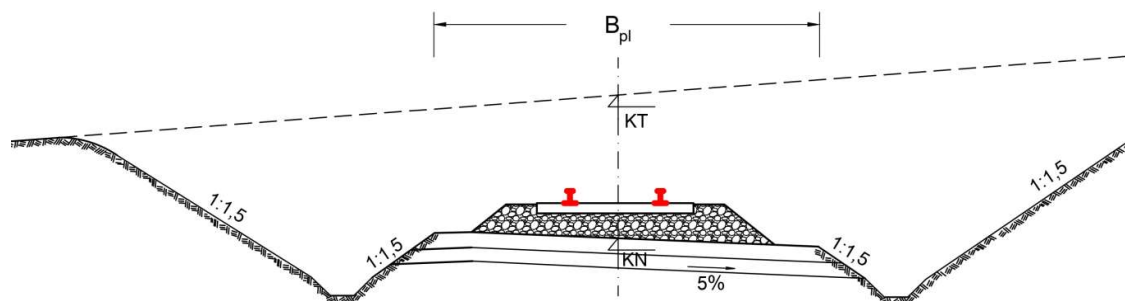
- земљани труп;
- објекте попут мостова, вијадуката, надвожњака, подвожњака, пропуста, тунела и галерија;
- системе за одводњавање;
- различите објекте за заштиту пруге од метеоролошких појава и хидролошких услова терена;
- станична постројења.

Земљани труп је објекат изграђен од ситнозрних или крупнозрних фракција тла или, по потреби, и неких заменских и вештачких материјала. Основни делови земљаног трупа су: планум, заштитни слој, прелазни слој, насип, темељно тло, самоникло тло испод трупа пруге, тло лево и десно у ширини пружног појаса, као и потпорни зидови који осигуравају стабилност трупа испод и изнад нивелете пруге [Поповић, 2004; Fischer et al., 2015]. У зависности од висинске разлике између коте нивелете (KN) и коте терена (КТ), земљани труп може бити у насипу (Слика 3.1), усеку (Слика 3.2) и засеку.

Код пројектовања земљаног трупа је потребно утврдити економично и конструктивно решење, како у фази пројектовања и изградње, тако и у условима редовног одржавања током експлоатације и у случају реконструкције. Нарочито је важно да буду предвиђена најбоља решења за одводњавање воде са трупа пруге, јер је то један од главних предуслова за очување стабилности трупа.



Слика 3.1 Карактеристични попречни профил железничке пруге у насипу са елементима горњег и доњег строја (KT - кота терена, KN - кота нивелете и B_{pl} - ширина плануума)



Слика 3.2 Карактеристични попречни профил железничке пруге у усеку (KT - кота терена, KN - кота нивелете и B_{pl} - ширина плануума)

Технички захтеви за земљани труп код геотехничког пројектовања, истраживања и испитивања тла, као и геотехничких конструкција, су дефинисани серијом стандарда SRPS EN 1997 (2017). Стандардом SRPS EN 13242 (2010) су дефинисане техничке карактеристике агрегата за невезане и хидраулички везане материјале који се користе код слојева земљаног трупа. Технички услови за армирано тло су дефинисани стандардом SRPS EN 14475 (2011). Стандардом SRPS U.S4.064 (1990) су утврђени типови осигурања косина насипа, засека, усека и ножице насипа.

Лабораторијска испитивања тла у оквиру земљаног трупа се врше према актуелним националним стандардима (из групе SRPS EN ISO 17892 (2015)), који су усклађени са Европским нормама. Методе испитивања за одређивање односа између

садржаја воде и запреминске масе невезаних и хидрауличким везивом везаних мешавина дефинисане су серијом стандарда SRPS EN 13286 (2022) [Правилник о техничким условима подсистема инфраструктура, 2024 (у даљем тексту: Правилник, 2024)].

Један од најважнијих фактора при извођењу слојева земљаног трупa је степен збијености D_{pr} (1), који представља однос измерене запреминске масе у сувом стању збијеног тла и максималне запреминске масе при оптималној влажности одређеној Прокторовим опитом:

$$D_{pr} = \frac{Y_d}{Y_{max}} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

где је:

Y_d - запреминска маса у сувом стању збијеног тла [kN/m^3],

Y_{max} - максимална запреминска маса при оптималној влажности добијеној Прокторовим опитом [kN/m^3].

Збијеност и носивост слојева земљаног трупa се оцењује помоћу статичког модула деформације E_{v2} . Статички модул деформације се одређује опитном плочом, а контрола се врши динамичким модулом деформације E_{vd} . Динамички модул деформације се утврђује опитом падајућим теретом са базном плочом $\varnothing 300 \text{ mm}$. У односу на степен збијености, односно величине модула деформације, утврђени су технички услови квалитета материјала који се уграђује у доњи строј, стандардом SRPS U.B1.047 (1997) [Правилник, 2024].

Планум представља горњу површину доњег строја и служи као стабилна ослона површина елемената горњег строја, ради прихватања и преношења оптерећења са горњег строја. Основни технички захтеви за планум су равност површине и нагиб, али и филтерска стабилност и постојаност на дејство мраза. Ширина планума (B_{pl}) зависи од броја колосека, размака међу њима, зоне опасности (2,20 m за брзине возила $V \leq 120 \text{ km/h}$, 2,50 m за брзине $V \leq 160 \text{ km/h}$ и 3,00 m за брзине $V > 160 \text{ km/h}$) и сигурносног појаса (0,80 m). Број колосека одређује и нагиб планума, те је код једноколосечне пруге нагиб једностран, а код двоколосечне двостран. У оба случаја захтевани нагиб износи 1:20 (5%), осим у зони колосечних веза где је нагиб планума 1:33. Дебљина слоја на врху планума је одређена дубином смрзавања, а то условљава и карактеристике материјала од којег ће тај слој бити израђен, па се у складу са тим бира материјал отпоран на дејство мраза и капиларно пењање воде у материјалу. Планум

није целом површином прекривен застором, већ су његови крајеви слободни. Тај простор представља банкину минималне ширине 60 cm, а изузетно 55 cm у области ножице засторне призме са косином.

Основна функција **заштитног слоја** је да обезбеди заштиту колосека од дејства мраза, али и да обезбеди потребну носивост планума пруге и спречи трајне пластичне деформације трупa пруге. Сачињен је од дробљеног агрегата или песковитог шљунка, који може бити стабилизovan везивом уколико постоји потреба за повећањем носивости заштитног слоја. Материјал који се користи за израду заштитног слоја мора бити у складу са стандардом SRPS EN 13242 (2010) [Правилник, 2024]. Минимална прописана дебљина овог слоја је 20 cm. Изводи се у нагибу од 5% са толеранцијом до $\pm 0,4\%$. Захтевана вредност за равност слоја износи $\leq 20 \text{ mm} / 4 \text{ m}$. Овај слој се третира као водопропустан. С тим у вези, пречник зрна агрегата који припада ординати 15% гранулометријске криве заштитног слоја мора бити четири пута мањи од величине зрна агрегата на ординати 85% (тј., $d_{85} \geq 4 \times d_{15}$, где је d пречник зрна агрегата), са максималном величином зрна до 60 mm. У случају вредности коефицијента водонепропустљивости $K \geq 10^{-4} \text{ m/s}$ при степену збијености $D_{pr} = 1$, процедна крива треба да заврши у заштитном слоју на косини насипа или одводног јарка при максималним падавинама. Коефицијент неравномерности гранулометријског састава материјала треба да испуни услов $U = d_{60} / d_{10} \geq 15$ (d_{60} – доминантни пречник зрна агрегата (највећи пречник зрна од којег има 60% ситнијих); d_{10} – ефективни пречник зрна агрегата (највећи пречник зрна од којег има 10% ситнијих)). За осигурање заштите тла од мраза и спречавање капиларног пењања воде, потребно је да буде испуњен услов да је вредност коефицијента неравномерности гранулометријског састава материјала за израду заштитног слоја $U \geq 15$ и услов да материјал не садржи више од 3% фракција мањих од 0,02 mm. Носивост на врху заштитног слоја се прописује према врсти, тј. рангу пруге и приказана је у Табели 3.1.

Табела 3.1 Статички модул деформације (E_{v2}), динамички модул деформације (E_{vd}) и степен збијености (D_{pr}) на врху заштитног слоја у зависности од ранга пруге [Правилник, 2024]

РАНГ ПРУГЕ	МАГИСТРАЛНА	РЕГИОНАЛНА	ЛОКАЛНА
$E_{v2} \text{ [MN/m}^2\text{]}$	>120	>100	>80
$E_{vd} \text{ [MN/m}^2\text{]}$	>50	>45	>40
$D_{pr} \text{ [%]}$	100–103	>100	>97

Прелазни слој је смештен одмах испод заштитног слоја и заједно са њим чини слој за заштиту од дејства мраза. Састоји се од крупнозрног шљунковитог или песковитог тла, тј. материјала отпорног на капиларно пењање воде, са величином зрна агрегата 0/125 mm. Прописано је да проценат зрна агрегата мањих од 0,063 mm треба да буде испод 12%, а проценат агрегата величине зрна мањих од 0,02 mm да не прелази 5%. Максимална величина зрна агрегата је 300 mm и не прелази $\frac{2}{3}$ дебљине слоја који се изводи. Такође, морају бити испуњени услови да је вредност коефицијента неравномерности гранулометријског састава материјала за израду прелазног слоја $U \geq 15$ и да материјал не садржи више од 3% фракција мањих од 0,02 mm, или да је вредност коефицијента неравномерности материјала $U \leq 5$ и да материјал не садржи више од 10% фракција мањих од 0,02 mm. Прелазни слој може бити механички или хемијски стабилизован. Техничким условима је прописано да је равност прелазног слоја, када се гради од земљаног материјала, $\leq 20 \text{ mm} / 4 \text{ m}$, односно $\leq 30 \text{ mm} / 4 \text{ m}$ када је реч о каменом материјалу. Попречни нагиб прелазног слоја прати нагиб заштитног слоја и износи $\geq 5\%$, са толеранцијом $\pm 1\%$ [Правилник, 2024]. Носивост прелазног слоја је прописана према рангу пруге, а захтеване карактеристике слоја су приказане у Табели 3.2.

Табела 3.2 Статички модул деформације (E_{v2}), динамички модул деформације (E_{vd}) и степен збијености (D_{pr}) на врху прелазног слоја у зависности од ранга пруге [Правилник, 2024]

РАНГ ПРУГЕ	МАГИСТРАЛНА	РЕГИОНАЛНА	ЛОКАЛНА
$E_{v2} \text{ [MN/m}^2\text{]}$	>80	>60	>45
$E_{vd} \text{ [MN/m}^2\text{]}$	>35	>30	>25
$D_{pr} \text{ [%]}$	>100	>97	>95

Прописане су и карактеристике слојева испод прелазног слоја у погледу њихове носивости и приказане у Табели 3.3.

Табела 3.3 Статички модул деформације (E_{v2}), динамички модул деформације (E_{vd}) и степен збијености (D_{pr}) тла испод прелазног слоја [Правилник, 2024]

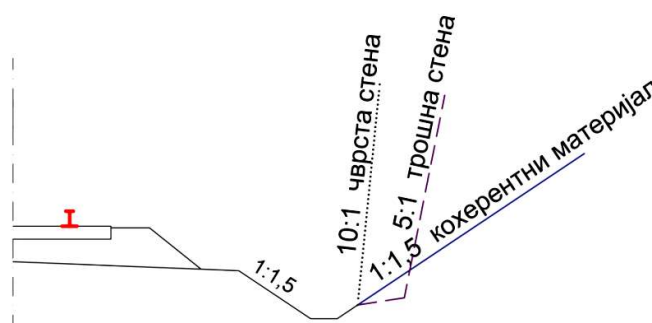
		$E_{v2} \text{ [MN/m}^2\text{]}$	$E_{vd} \text{ [MN/m}^2\text{]}$	$D_{pr} \text{ [%]}$
На нивоу планума испод прелазног слоја		60	30	100
Насип	дубина $\leq 2 \text{ m}$	45	25	100
	дубина $> 2 \text{ m}$	20	20	95
Усек		45	25	95

Насип је израђен од механички стабилованих невезаних слојева агрегата који преносе оптерећења из горњих слојева на темељно тло, најчешће од материјала који је локално доступан или у близини градилишта. Када се испод прелазног слоја у насипу налази ситан материјал који може под оптерећењем да се утискује у више слојеве, потребно је предвидети заштиту у виду филтер слоја. Овај слој може бити изграђен од филтер песка или синтетичких материјала попут геотекстила.

Геосинтетички материјали су неизоставни елемент за побољшање механичких и хидрауличких особина трупа пруге у експлоатацији. У зависности од намене, постоје геотекстили (чије су функције раздвајање слојева различитог гранулометријског састава који улазе у састав трупа пруге, филтрација воде која отиче са трупа пруге, пренос оптерећења од саобраћаја на доњи строј и ојачање трупа пруге), геомембране (са функцијама одбране од прекомерног расквашавања слојева испод геомембране и контроле капиларног пењања воде), георешетке (за повећање носивости трупа пруге), геомреже (за ојачање структуре тла и смањење консолидације засторног слоја), геосаће (за ојачање и стабилизација тла у трупцу пруге) и геокомпозитни материјали (комбиновани материјали) [Fischer et al., 2015]. Ови материјали морају бити у складу са стандардима SRPS EN 13250 (2017) и SRPS EN 13251 (2017). У случају геосинтетичких материјала који се користе код система за одводњавање, карактеристике се дефинишу стандардом SRPS EN 13253 (2017). Карактеристике геотекстила и сродних материјала, као и геомембрана код изградње тунела и других подземних грађевина, утврђене су стандардима SRPS EN 13256 (2015) и SRPS EN 13491 (2018) [Правилник, 2024].

Осим одговарајуће збијености слојева материјала у насипу, за одржавање стабилности трупа пруге јако је важно извршити стабилизацију косина, како у насипу, тако и у усеку. Најраспрострањенија мера за стабилизацију косина је хумузирање косина, наношењем слоја хумуса у дебљини од 15 cm. Материјал од кога је сачињен насип директно утиче на нагиб косине насипа. Уобичајено је да нагиб косине код нестеновитих материјала не прелази 1:1,5. У случају насипа висине веће од 8 m и нагиба косине стрмијег од 1:1,5 предвиђају се банке ширине не мање од 2,5 m и попречног нагиба ка косини $\geq 5\%$ [Правилник, 2024]. Облагање косина је мера која се примењује ако насип током великих водостаја преузима функцију одбрамбеног насипа, када се хумузирањем не обезбеђује довољна стабилност косина или је насип константно изложен дејству водотока. У случају усека, стабилизација косина је мера

која утиче на обезбеђивање континуираног одвијања железничког саобраћаја при свим временским условима. Ове мере зависе, пре свега, од материјала у усеку и дубине усека. Код земљаних материјала где је под нагибом 1:1,5 могуће обезбедити стабилност косина усека хумузирањем не примењују се друге мере, осим постављања заштитиних канала при врху косине за прихватање слива ван подручја усека. У случају стенских маса, а у зависности од типа стене, дозвољавају се и знатно већи нагиби, до чак 10:1 (Слика 3.3). Уколико постоји стална или повремена опасност од одрона мањих или већих комада стена, примењују се заштитне мере у виду челичних мрежа са тегом, прсканим бетоном, по потреби са анкерованим челичним шипкама.



Слика 3.3 Нагиби косина усека у зависности од врсте тла у којој је усек изведен

Темељно тло се испод свих горе наведених слојева изводи на здравом самониклом тлу, након уклањања хумуса (насип), тј. уклањања хумуса и ископа земље (усек). У погледу геометријских услова темељно тло мора да има равност слоја 30 mm / 4 m када се састоји од земљаног материјала, односно 50 mm / 4 m уколико је реч о каменитом материјалу. Овде је такође попречни нагиб слоја $\geq 5\%$ са толеранцијом $\pm 1\%$. Захтевани степен збијености темељног тла D_{pr} и карактеристике носивости темељног тла под насипом E_{v2} и E_{vd} су прописани у зависности од дубине темељног тла у односу на планум пруге. Вредности су приказане у Табелама 3.4 и 3.5.

Табела 3.4 Степен збијености (D_{pr}) темељног тла [Правилник, 2024]

	D_{pr} [%]
$\leq 0,5$ m испод планума пруге	98
0,5 m – 2,0 m испод планума пруге	95
$> 2,0$ m испод планума пруге	92

Табела 3.5 Статички (E_{v2}) и динамички (E_{vd}) модул деформације темељног тла [Правилник, 2024]

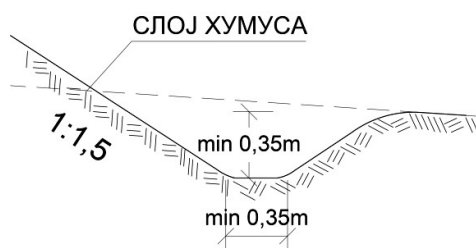
	E_{v2} [MN/m ²]	E_{vd} [MN/m ²]
Испод горње површине насипа до дубине ≤ 1 m	>45	>25
Испод горње површине насипа до дубине ≤ 2 m	>20	>20

У случају када темељно тло не испуњава прописане захтеве, потребно је предвидети ојачање истог или потпуну замену материјала. Код постојања подземних вода у нивоу темељног тла, неопходно је формирање одговарајућег дренажног система.

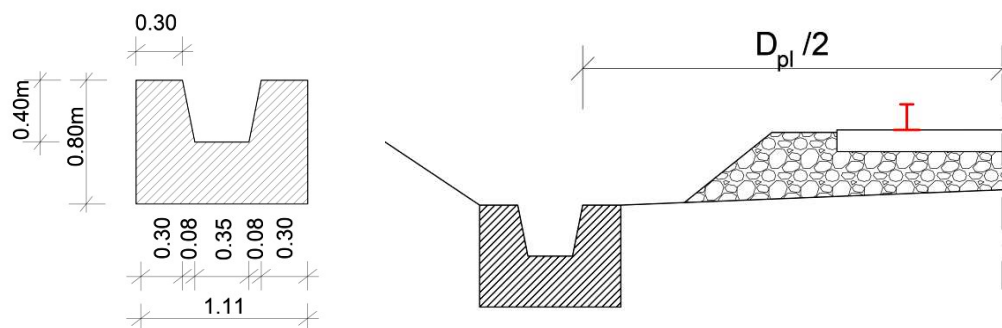
Од елемената доњег строја који чине саставни део земљаног трупa су и **елементи за одводњавање** површинских и подземних вода које доспевају до трупa пруге. То су одводни јаркови земљаног трупa и косина, одводни јаркови на косинама усека и насипа, заштитни јаркови, дренажни канали, пропуси и вертикална окна. Пројектовање елемената за одводњавање се врши на основу теренских услова, метеоролошких и геолошких услова, као и сливног подручја.

Одводни јаркови се граде поред планума пруге, паралелно оси колосека (Слике 3.4, 3.5 и 3.6). Њима се вода води до најближег пропуста или реципијента.

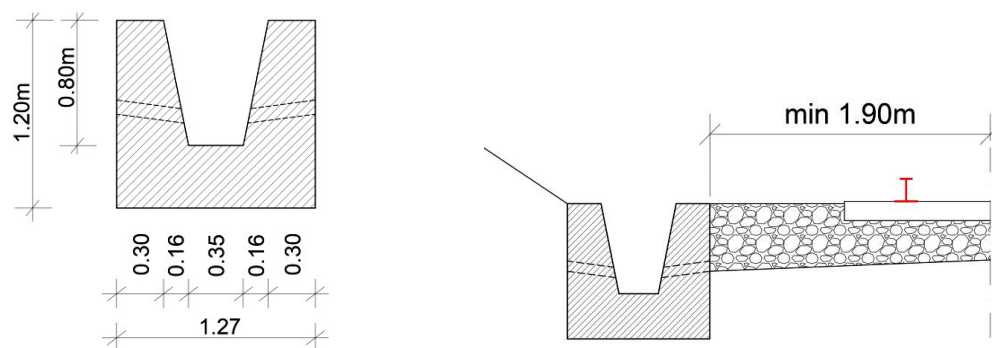
Заштитни јаркови се граде изнад усека или засека, на најмање 5,0 m удаљености од горње ивице косине усека или засека (Слика 3.7). Ови јаркови служе да прихвате воду са околних површина, како би растеретили одводне јаркове на плануму или као систем заштите на клизним подручјима.



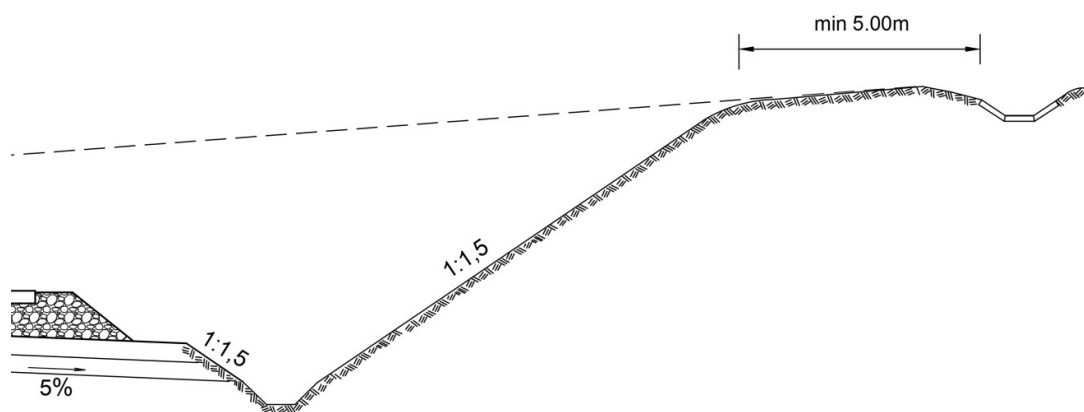
Слика 3.4 Облик и минималне димензије класичног одводног јарка



Слика 3.5 Димензије и положај плитких бетонских елемената за подужно одводњавање



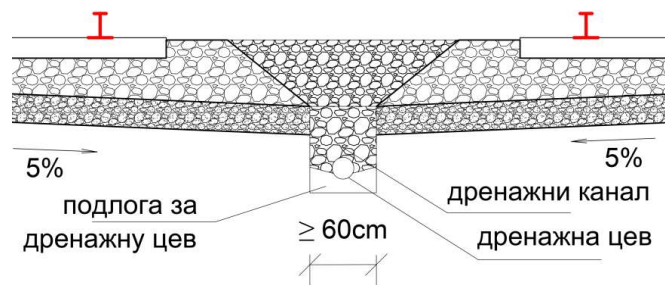
Слика 3.6 Димензије и положај дубоких бетонских елемената за подужно одводњавање



Слика 3.7 Положај заштитног јарка у односу на труп пруге и косину усека

Сви видови јаркова изводе се у подужном паду не мањем од 2–3%, нити већем од 25%, са полупречником хоризонталне кривине јарка не мањим од 10 m. Јаркови су најчешће трапезастог облика са нагибом страница у зависности од основног материјала. У невезаном материјалу нагиб страница јарка не прелази 1:2, у везаном материјалу је око 1:1,5, а у стеновитом материјалу од 1:1 до 2:1. По потреби се, у случају малих подужних падова, врши облагање дна јаркова калдрмом или бетоном.

Дренажни канали су канали које служе за прихватање површинских и подземних вода. У зависности од намене, могу бити плитке дренаже за одводњавање станичних платоа, перона, путних прелаза и скретница (Слика 3.8) или сложени дренажни системи за одводњавање подземних вода са падина или испод трупа пруге. Плитке дренаже се примењују и на местима где нема услова за извођење прописних одводних јаркова. Ширину дренажног канала условљава величина кашике багера за ископавање дренажног канала. Обично се изводе канали са минималном ширином од 60 cm. Код пројектовања дренажних канала за прихватање атмосферских падавина, неопходно је предвидети положај и капацитет постојећих комуналних објеката ради несметаног прикључења дренаже на њих. Такође, обавезно је да се предвиде ревизиони шахтови на местима споја две или више дренажних цеви, као и на местима промене попречног пресека цеви, правца или пада. Размак међу шахтовима не сме да буде већи од 50 m. Дренажни канали се уопштено гледано састоје из подложног водонепропусног слоја, дренажне цеви и мешавине зрна агрегата, са опционим употребом геотекстила за обавијење мешавине зрна агрегата.



Слика 3.8 Изглед дренажног канала између два колосека у станици

У оквиру слојева дренажних канала као материјал за подложни слој може да се користи набијена глина или мешавина цементног бетона. Дренажне цеви морају у

погледу квалитета одговарати захтевима DIN 4262-1 који се односе на системе цеви за подземно одводњавање. У дренажне слојеве се могу уграђивати мешавине зрна агрегата обавијене или необавијене геотекстилом. Мешавина зрна за засипање дренажа која није обавијена геотекстилом мора одговарати следећим граничним вредностима:

$$12 < \frac{d_{15D}}{d_{15Z}} < 40$$

$$12 < \frac{d_{50D}}{d_{50Z}} < 52$$

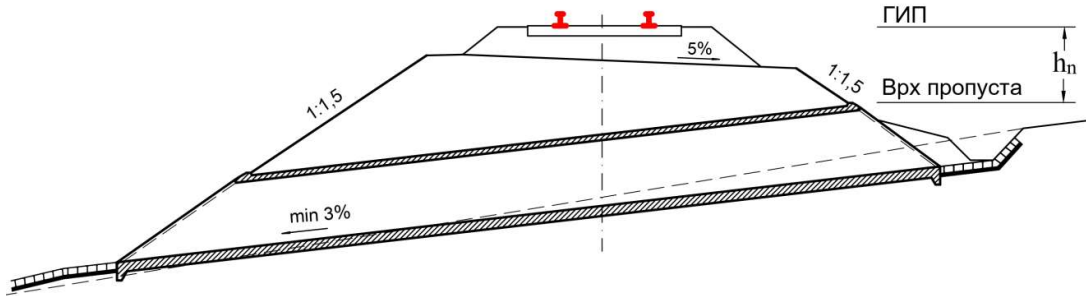
где је:

d_{15D} , d_{50D} - пречник зрна код 15% односно 50% просејавања мешавине зрна агрегата за засипање дренаже,

d_{15Z} , d_{50Z} - пречник зрна код 15% односно 50% просејавања земљаног материјала уз дренажу, којем се жели спречити продор у дренажу.

Пречник највећег зрна у мешавини за дренажни слој може да износи 63 mm. Ако се мешавина за дренажу обавија геотекстилом, онда она мора да задовољи услов да коефицијент водопропустљивости износи $k > 10^{-4}$ m/s. Узорак за испитивање мора бити припремљен по модификованом Прокторовом опиту. Коефицијент неравномерности $U = d_{60}/d_{10}$ треба да буде већи од 8 код необавијених мешавина, а код мешавина састављених из више од три фракције и обавијених геотекстилом вредност коефицијента U мора бити већи од 3. Код једнофракцијских мешавина, вредност за U нема ограничења.

Пропусти су објекти у трупу пруге који служе за превођење воде са једне стране трупа пруге на другу страну ради њеног уливања у реципијент. Ови објекти могу бити цевастог или сандучастог облика или засведени, отвора до 5,0 m. Код планирања положаја пропуста, важно је водити рачуна о минималној дебљини покривача од врха пропуста до горње ивице прага (ГИП, Слика 3.9). За цевасте пропуст отвора $\emptyset \leq 1,50$ m, дебљина овог слоја треба да буде $h_n \geq 1,50$ m. У случају цевастих пропуста димензија $\emptyset > 1,50$ m, дељина покривача h_n треба да буде већа од пречника цеви. Код сандучастих пропуста h_n износи од 0,4 m до 4,0 m, а изнад пропуста засведеног облика $h_n = 0,2-0,3$ m, у зависности од светле ширине и висине пропуста.



Слика 3.9 Пример положаја цевастог пропуста у трупу пруге у односу на горњу ивицу прага (ГИП)

На основу свеобухватно приказаних техничких услова код планирања и пројектовања доњег строја железничких пруга, може се јасније сагледати опсег могућих измена на системима за одводњавање, а да то буде у складу са прописаним правилима при пројектовању железничких пруга. Тражење решења треба да се заснива на принципу што мањих промена прописаног изгледа трупа пруге и утицаја на његову функционалност и стабилност.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО УТВРЂИВАЊЕ ЗАГАЂЕЊА У ТРУПУ ПРУГЕ

4.1 Досадашња испитивања присуства тешких метала у трупку пруге и околини железничке пруге

Прегледом доступне литературе којом су обухваћена испитивања тла на трупку пруге и околној средини, као и других елемената колосека, утврђено је да се питањем утицаја железничког саобраћаја на животну средину у новије време бави све више истраживача. Највећи број студија се бави испитивањем површинских слојева тла, како у самом трупку, тако и у околини. Далеко је већи број истраживања са фокусом на анализи концентрације тешких метала у околном земљишту, нарочито када је реч о пољопривредним подручјима или у близини насељених места, у поређењу са бројем истраживања која су била фокусирана на сам колосек и његове елементе. Прегледом су била обухваћена истраживања новијег датума, у последњих 13 година, која су послужила за планирање сопственог експерименталног истраживања спроведеног у оквиру ове дисертације.

Једно од истраживања којим је обухваћен како колосек, тако и појас поред пруге, спровели су Brtnický и сарадници (2022). Истраживање је вршено дуж прометног железничког коридора у граду Сталова Вола у Пољској. Студија је обухватила 13,5 km пруге која пролази кроз поља усева, урбанистичка подручја и шумске регије. Један део деонице се простире кроз област тешке индустрије. У овој студији узорци за испитивање узети су са једне и са друге стране пруге на четири кључне позиције и то: на колосеку, на насипу и на 25 m и 50 m удаљености од колосека, на дубини 0 – 25 cm. Узорковање је вршено на сваких 500 m дужине пруге на одабраној деоници. Утврђивање присуства тешких метала попут бакра (Cu), никла (Ni), олова (Pb) и цинка (Zn) је извршено помоћу пламене атомске апсорпционе спектрометрије (flame atomic absorption spectrometry (F-AAS)). Том приликом је потврђен значајан утицај железничког саобраћаја на загађење околне средине, нарочито у случају Cu, Ni и Zn, чија концентрација опада са удаљавањем од колосека. У случају ових метала, утврђена је критична концентрација до удаљености од 25 m, иако вредности нису биле прекорачене према прописаним границама за дозвољену концентрацију тешких метала у земљишту према законској регулативи у Пољској (Regulation of the Minister of the Environment, 2016). У случају олова (Pb), уочљиво је повећање концентрације у узорцима са удаљавањем од колосека, што се може

приписати пореклу олова од издувних гасова и придруженом утицају тешке индустрије. Brtnický и сарадници (2022) су се у дискусији осврнули посебно на то да концентрација испитиваних тешких метала опада са удаљеношћу од колосека упоређујући резултате сопствених истраживања са резултатима других аутора, који су показали да концентрација ових тешких метала не опада на удаљености од 50 m од колосека [Wang et al., 2011; Zhang et al., 2013; Liu et al., 2009; Meng et al., 2018] или незнатно опада [Chen et al., 2014]. Упоређујући резултате сопствених испитивања са испитивањима других аутора, Brtnický и сарадници (2022) долазе до закључка да је неопходно предвидети мониторинг појаса железничке пруге у најмањој ширини од 50 m, све са циљем контроле загађења од железничког саобраћаја. У погледу утицаја на живи свет, константован је штетан утицај на вегетацију у појасу 50 m лево и десно од колосека, што додатно појачава потребу да се утврди ширина појаса са једне и друге стране колосека у оквиру којег би контрола концентрације тешких метала била обавезна.

Попут Brtnický-ог и сарадника (2022), Chen и сарадници (2014) су вршили узорковање земљишта и биљног покривача подручја у ширини пружног појаса од 50 m. За испитивање узорака земљишта на присуство тешких метала кадмијума (Cd), хрома (Cr), бакра (Cu), гвожђа (Fe), олова (Pb) и цинка (Zn), коришћена је атомска апсорпциона спектроскопија (atomic absorption spectroscopy (AAS)). Међу испитиваним тешким металима, по количини су се значајно издвојили Cd и Pb, вишеструко прекорачујући допуштене вредности прописане Националним стандардом за квалитет земљишта као животне средине у НР Кини (National Standard for Soil Environment Quality in China). У случају кадмијума (Cd) допуштена вредност од 0,2 mg/kg (0,2 ppm – parts per milion) била је прекорачена 14 до 20 пута. Прекорачење олова (Pb) је било 1,5 до 2,5 пута веће од допуштене вредности од 35 mg/kg (35 ppm). Chen и сарадници (2014) су извели закључак да је распрострањавање честица олова даље од колосека мање код усека већих дубина, услед онемогућења ширења издувних гасова. Овај податак је значајан у погледу предвиђања могућих мера за заштиту околине од штетног утицаја олова услед одвијања железничког саобраћаја.

Од испитивања која обухватају елементе горњег и доњег строја, издвојило се истраживање Samarska-е и сарадника (2020). У овом истраживању вршена је провера присуства тешких метала у материјалу застора, тачније у туцанику. Аутори су изразили сумњу да би застор могао бити потенцијални извор тешких метала са

железничког колосека. Узоркован је материјал са железничке станице Kamianske-Pasazhyrske у Украјини, са колосека који су најчешће коришћени. Ова станица је одабрана због великог интензитета саобраћаја. За потребе утврђивања присуства тешких метала у застору је коришћена рендгенска флуоресцентна спектроскопија (X-ray fluorescence spectroscopy (XRF)) са детектором уређаја типа "GOLDD" (SiliziumDrift-Detector). Испитивање материјала из застора (туцаника) није показало да туцаник садржи тешке метале попут кадмијума (Cd), кобалта (Co), молибдена (Mo), паладијума (Pd), калаја (Sn) и волфрама (W). Регистроване су мање количине олова (Pb) и арсена (As), нешто испод 35 ppm. Остали резултати испитивања материјала из застора на присуство тешких метала потврђују значајну количину гвожђа (Fe), мангана (Mn), бакра (Cu), хрома (Cr), никла (Ni) и цинка (Zn). Заједничка особина ових метала је да сви представљају компоненте челичних елемената колосека, који до материјала у застору доспевају при трењу између шина и точкова возила. Истраживање је употпуњено прањем материјала застора и поновним испитивањем на присуство тешких метала, истом техником (XRF). Концентрација метала Fe, Mn, Cu, Cr и Ni се смањила након прања, док се вредности Zn нису значајно смањиле, што намеће закључак да се материјал из застора може сматрати једним од извора Zn.

Међу ауторима који су у својим истраживањима показали да више придружених загађујућих материја, укључујући и тешке метале, не прелазе дозвољене вредности прописане за то подручје, али свеукупно могу утицати на жива бића, су и Wierzbicka и сарадници (2015). Овим истраживањем је обухваћено подручје од пет железничких станица на североистоку Пољске (Białystok Fabryczny, Siemianówka, Hajnówka, Hawa Główna и Waliły).

Запажено је да су при спровођењу оваквих испитивања аутори посебно водили рачуна о томе да се што је могуће више искључе спољашњи утицаји, како би се утврђени резултати приписали искључиво утицају железничког саобраћаја. Таквим ставом су се водили и Wiłkomirski и сарадници (2011) код одабира подручја за потребе испитивања ослобађања тешких метала и полицикличних ароматичних угљоводоника (polycyclic aromatic hydrocarbons - PAHs) у околину. За испитивано подручје је одабран железнички чвор Hawa Główna на југу Пољске, претежно окружен шумама и језерима без тешке индустрије у близини. Са друге стране, овај железнички чвор као изузетно саобраћајно оптерећен, на раскршћу главних саобраћајних праваца у тој регији, представља одличну локацију за испитивање. Позиције узорковања аутори су одабрали

према саобраћајној оптерећености колосека у оквиру самог железничког чвора и према операцијама које се одвијају на одговарајућим колосецима. Још један од циљева овог истраживања је упоређивање резултата овог са истраживањем спроведеним 2001. године на истој локацији, чије су резултате објавили у свом раду Malawska и Wilkomirski (2001). У оквиру операција које се одвијају у железничком чвору, рађено је узорковање на колосецима за пријем и отпрему возова, колосецима са кратким задржавањем возила (путнички колосеци и главни пролазни колосек), колосецима за прање и одржавање железничких возила, где не постоји постројење за прихватање и прераду тих отпадних вода, и на колосецима у оквиру магацинског простора. Сви узорци су узети са трупа пруге на дубини од 0 – 20 cm. За потребе испитивања узорака и утврђивања концентрације Pb, Cd, Cu, Zn, Fe, Co, Cr и Mo је коришћена оптичко емисиона спектрометрија са индуковано куплованом плазмом (inductively coupled plasma/optical emission spectrometry - ICP-OES), док је концентрација живе (Hg) одређена помоћу АМА 254 анализатора (Advanced Mercury Analyzer). Генерално, контаминација земљишта свим наведеним тешким металима, осим живе, је била већа на главним пролазним, путничким и пријемно-отпремним колосецима, него на колосецима са утоварном рампом и у простору за чишћење. Велика прекорачења допуштених вредности за живу (30 пута више од дозвољених) су регистрована на положајима колосека за одржавање железничких возила.

Компарацијом утицаја дизел и електро вуче у погледу ослобађања тешких метала у околину у свом истраживању су се бавили Wang и сарадници (2022). Испитивањем су била обухваћена четири подручја и то: два подручја лоцирана у руралном подручју са колосецима на којима саобраћају возови са дизел вучом (Datemonbetsu у месту Hokkaido и Komagawa у месту Saitama у Јапану) и два подручја лоцирана у урбаном подручју са електрифицираним колосецима (Tachikawa у Токију и Niigata city у Нигати у Јапану). Узорковање земљишта је вршено у површинском слоју до 3 cm дубине, на одабраним позицијама различите удаљености од колосека [Wang et al., 2022]. Одређивање присуства свих тешких метала је вршено помоћу масене спектрометрије са индуковано куплованом плазмом (inductively coupled plasma–mass spectrometry (ICP-MS)). У поређењу са електро вучом, возови вучени дизел локомотивама су емитовали неупоредиво веће количине тешких метала у околно земљиште. Дакле, негативни утицај железнице на повећање еколошког и здравственог

ризика у близини колосека којим саобраћају дизел локомотиве је дупло већи од утицаја у близини електрифицираних колосека.

Резултате анализа земљишта на присуство загађујућих тешких метала попут олова, кадмијума и цинка у непосредној близини станица су у свом раду приказали и Vaiškūnaitė и сарадници (2020). Испитивање је вршено на три локације, односно на три железничке станице у Литванији (Vilnius, Kaunas и Klaipėda). Узорковање је спроведено на 1 m, 5 m, 10 m, 15 m и 25 m удаљености од прагова и по дубини на 10 cm, 10–20 cm и 20–40 cm. Контрола узорака на присуство олова и кадмијума је вршена помоћу AAS, док је присуство цинка контролисано помоћу F-AAS. Осим испитивања узорака земљишта узетих са наведених локација, испитано је и присуство Pb, Cd и Zn у дрвеним праговима помоћу AAS. Резултати испитивања су показали да је концентрација испитиваних метала највећа у првих 10 cm дубине и то важи за сва три метала (Pb, Cd и Zn). Анализом концентрације метала у зависности од удаљености од прагова у случају Pb је приметан блажи скок између 1 m и 5 m удаљености, након чега концентрација опада и после 15 m се одржава константном. Нема прекорачења допуштених вредности за Pb ($Pb < 80 \text{ mg/kg}$ (80 ppm) - Lithuanian Hygiene Norm on *Threshold Limit Value of Hazardous Substances in the Soil* (HN 60:2015)). У случају Cd концентрација расте све до 15 m удаљености од прагова, када достиже свој максимум и након тога опада. Управо на тој удаљености кадмијум премашује допуштену вредност ($Cd < 1,5 \text{ mg/kg}$ (1,5 ppm) - Lithuanian Hygiene Norm on *Threshold Limit Value of Hazardous Substances in the Soil* (HN 60:2015)). Занимљиво је да су концентрације Cd на удаљености 25 m од прагова готово истоветне на свим дубинама узорковања. У случају Zn је уочен исти тренд раста концентрације као и у случају Cd, у смислу пораста концентрације овог метала до 15 m удаљености од прагова, опадања концентрације са већим удаљеностима и међусобног приближавања вредности концентрације метала на свим дубинама узорковања на 25 m удаљености од прага. Није забележено прекорачење допуштене вредности за Zn од 300 mg/kg (300 ppm) (Lithuanian Hygiene Norm on *Threshold Limit Value of Hazardous Substances in the Soil* (HN 60:2015)). Испитивањем прагова утврђено је присуство Pb, Cd и Zn у њима. Концентрација ових метала у праговима је мања него у испитаним узорцима земљишта, али непрописним одлагањем прагова у рејону пруге, као што је то обичај код реконструкција, може се изазвати повећање концентрације метала у околном земљишту.

Још једно испитивање које су спровели Zhang и сарадници (2012) је укључило проучавање састава земљишта око пруге у појасу ширине до 200 m. Посматране су три локације различитих природних и хидролошких карактеристика. Ширина подручја којом је обухваћено испитивање не залази у урбана нити рурална подручја, као ни у индустријску зону. У овом истраживању вршено је површинско узорковање тла до дубине од 10 cm, а на одстојању од колосека на 2 m, 5 m, 10 m, 20 m, 30 m, 50 m, 60 m, 70 m, 80 m, 100 m, 150 m и 200 m. Испитивање узорака тла је вршено техником ICP-MS. Том приликом је одређена концентрација ванадијума (V), хрома (Cr), кобалта (Co), никла (Ni), бакра (Cu), цинка (Zn), кадмијума (Cd) и олова (Pb). Од поменутих метала, највећи утицај на загађење околине су показале измерене вредности за Zn, Cd и Pb. Упоређењем вредности по ширини обухваћеног појаса од 200 m, максималне вредности су регистроване на 20 m растојања од колосека. За удаљености од колосека веће од 90 m примећена је релативна униформност са благим падом концентрација метала. Анализом дијаграма вредности метала у зависности од удаљености од колосека, аутори су дошли до закључка да рељеф терена и врста и густина вегетације значајно утичу на степен ширења метала у околну средину, о чему је дата опсежна дискусија у раду Zhang-а и сарадника (2012).

У погледу истраживања присуства тешких метала у рејону железничких пруга на територији Републике Србије издвојила су се истраживања Стојића са сарадницима (Стојић и сарадници, 2017; Стојић и сарадници, 2023). Првобитно истраживање наведених аутора [Stojić et al., 2017] је обухватило истражно подручје на северозападу Србије за деонице на траси пруге Стара Пазова – Нови Сад и на траси пруге Стара Пазова – Рума – Сремска Митровица. Испитиване деонице су коришћене за саобраћање путничких и теретних возова. Део пруге где су вршена испитивања је окружен обрадивим пољопривредним земљиштем без индустријских објеката и постројења у близини. Деоница је у насипу просечне висине 2 m. Земљиште је узорковано са дубине од 30 cm по одредбама Система контроле плодности земљишта, на позицијама од 0,03 km до 4,19 km удаљености од колосека. Узорци су, између осталог, испитивани на присуство металоида As и тешких метала Cu, Zn, Mn, Pb, Co, Cr, Ni, Cd, Hg и Fe. Ово испитивање је вршено помоћу технике ICP-OES, док је концентрација Fe одређена помоћу AAS. Од анализираних метала, максималне допуштене вредности тешких метала у земљишту прописане за Републику Србију су прекорачене у случају Co и Ni, скоро у свим узорцима. Иако је вредност индекса

загађења (P_i) у случају преосталих метала испод 1,0, што указује на задовољавајући квалитет тла, уочљива је његова релативно константна вредност са удаљеношћу од колосека у случају никла, хрома, кобалта, мангана, арсена и гвожђа.

Са друге стране, упоређујући железнички и друмски саобраћај у свом истраживању, Стојић и сарадници (2023) су показали да је путнички саобраћај већи загађивач животне средине од железничког. Истраживање је обухватило област Панонске низије, анализирајући узорке земљишта узете поред путева и пруга који се експлоатишу под истим географским условима. Узорци су тестирани на присуство металоида As и тешких метала попут Cd, Co, Zn, Cu, Ni, Pb, Cr и Hg. За потребе испитивања узорака је коришћена техника ICP-OES са изузетком Hg, где је коришћен *Milestone DMA 80* анализатор (Direct Mercury Analyzer). Регистровано је загађење које потиче од пруге услед прекорачења дозвољених вредности концентрације Cd и Hg прописаних Уредбом о максималним допуштеним вредностима штетних метала у земљишту (2019) (у даљем тексту: Уредба РС). У случају Cd, регистроване вредности концентрације у узорцима поред ауто-путева су биле знатно више у односу на концентрације забележене поред пруга.

Овај кратки преглед досадашњих истраживања је показао колико је важно правилно одабрати истражно подручје, позиције узорковања и методе мерења, ради ефикасног утврђивања постојања тешких метала у рејону железничких пруга. Као што се може закључити из изложеног, сваки од аутора се приликом бирања испитног подручја трудио да избегне друге могуће утицаје сем железнице. Такође, сва поменута испитивања су вршена за површински део терена, било да се ради о самом колосеку или је у питању терен изван трупа пруге. Нема резултата који потврђују инфилтрацију у дубље слојеве земљишта, иако су испитивања показала да тешки метали миграњем захватају широк појас са обе стране железничког колосека. Све коришћене методе су поуздане, с тим што се у јако малом броју истраживања примењује више од једне методе за исти метал.

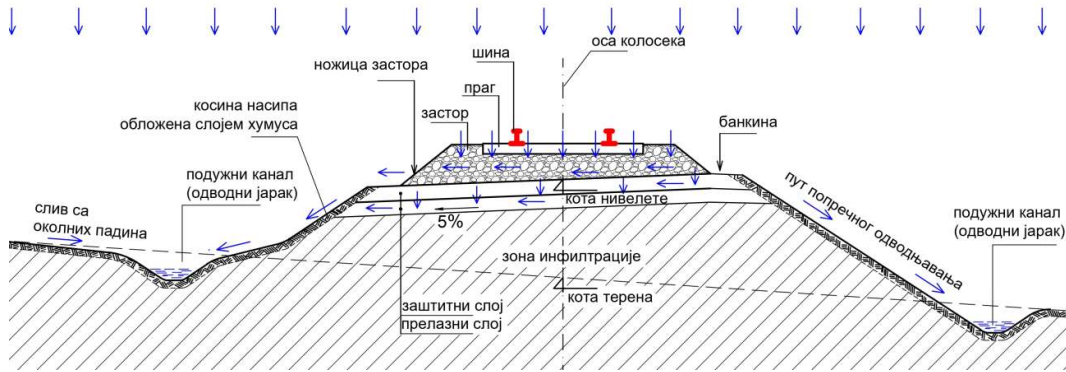
На основу изложених истраживања, одлучено је да се спроведе сопствено истраживање са циљем утврђивања присуства тешких метала у трупу пруге, с тим да се испитивањем обухвате и дубљи слојеви трупа пруге, а не само површински како је то у већини досадашњих истраживања било спроведено. За испитивање узорака земљишта одабране су две технике и то: оптичко емисиона спектроскопија са индуковано

куплованом плазмом (ICP-OES) и рендгенска флуоресцентна спектроскопија (XRF). Пошто је хоризонтална миграција тешких метала доказана бројним истраживањима, од којих су нека и овде наведена, она није била предмет истраживања у оквиру ове дисертације.

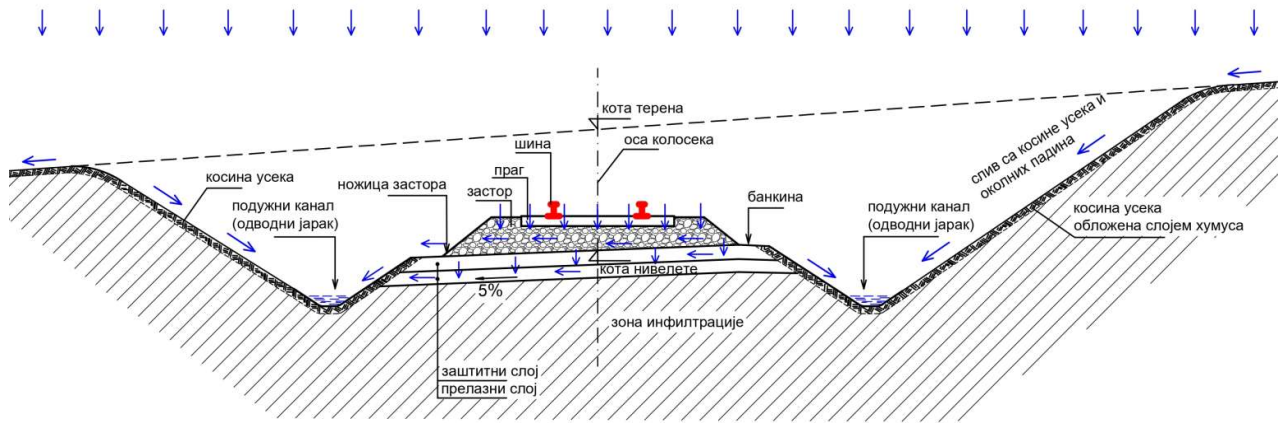
4.2 СОПСТВЕНА ИСПИТИВАЊА ПРИСУСТВА ТЕШКИХ МЕТАЛА У ТРУПУ ПРУГЕ

Због недостатка одговарајућих података о томе да је земљиште у трупку пруге испитивано на дубини већој од 30 cm на присуство тешких метала, требало је извршити анализу могућих релевантних локација са којих ће бити узети узорци, као и начина узорковања тла за испитивање. Узевши у обзир да се услед трошења елемената инфраструктуре и возила, тешки метали површински гомилају, јасно је да приликом атмосферских падавина може доћи до њиховог спирања, најпре бочно са трупа пруге, а затим и подужно дуж канала [Burkhardt et al., 2014]. Наравно, како део воде не отекне, јер се инфилтрира у тло, тако се и део честица загађивача инфилтрира у тло испод трупа пруге.

С тим у вези, најпре је урађена анализа могућег кретања тешких метала, јер се претпоставља да са инфилтрацијом дела падавина у труп пруге и метали мигрирају у труп пруге. Приказ одводњавања атмосферских падавина са трупа пруге у насипу и усеку је дат на Сликама 4.1 и 4.2. Највећа концентрација отицаја кроз застор је управо код ножице застора, који је због своје крупне гранулације веома водопропустљив [Sanudo et al., 2019]. Одмах испод слоја застора су заштитни и прелазни слој, који по својим карактеристикама и гранулометријском саставу спадају у делимично пропустљиве слојеве. Одређена количина воде ће се издренирати попречно, али један део ће се свакако инфилтрирати у тло испод прелазног слоја. Уколико је реч о насипу, како је приказано на Слици 4.1, говори се о телу насипа и подтлу као делу конструкције где долази до инфилтрације отицаја. У случају усека (Слика 4.2), инфилтрација се врши у самоникло тло. Инфилтрација је један од начина транспорта опасних материја у дубље слојеве земљишта [Tedoldi et al., 2017; Qi et al., 2022; Du and Li, 2023]. Одводни јаркови при ножицама насипа су крајње тачке евакуације воде са трупа пруге [Fischer et al., 2015; Правилник, 2024], одакле се вода одводи подужно, паралелно оси колосека.



Слика 4.1 Пут евакуације атмосферских вода са трупа железничке пруге у насипу



Слика 4.2 Пут евакуације атмосферских вода са трупа железничке пруге у усеку

4.2.1 ИСПИТНА ДЕОНИЦА

Када се јавила идеја за спровођење овакве врсте истраживања, детаљно је испланиран начин узорковања и испитивања материјала. Највећи проблем у вези са испитивањем материјала по дубини трупа пруга је добијање дозволе за извођење таквих испитивања од надлежних институција (Инфраструктура железница). Због тога су изабране деонице за испитивање на којима је у том тренутку вршена реконструкција, на магистралној железничкој прузи Ниш – Прешево – граница Северне Македоније, на деоници Међурово – Белотинац од km 253+072,00 до km 253+283,00 (Слика 4.3). У оквиру реконструкције ове деонице вршена је потпуна замена елемената горњег и доњег строја. Горњи строј је пре ове реконструкције

обухватао колосек на застору, са дрвеним праговима и причврслним прибором К. Извршена је потпуна замена свих елемената горњег строја. У оквиру доњег строја, извршена је делимична замена материјала у трупуге. Пруга је изграђена 1884. године. Познати податак који се односи на претходну реконструкцију везан је за 1965. годину, када је такође урађена реконструкција горњег и доњег строја пруге. До 1974. године, на овој деоници су саобраћали возови са дизел вучом. Након тога уведена је електро вуча све до данашњих дана, што значи да је реч о 59 година експлоатационог периода после реконструкције, од тога 9 година са дизел вучом и 50 година са електро вучом. Није евидентирана ниједна потпуна замена елемената горњег строја од последње реконструкције 1965. године. У периоду од 1965. године до данас, замена елемената горњег строја је вршена на појединим елементима трасе услед дотрајалости, док на трупуге нису вршене никакве значајније поправке.



Слика 4.3 Мапа пруга јужног коридора са назначеном деоницом
Ниш – Брестовац [www.ppf.rs]

4.2.2 УЗОРКОВАЊЕ ЗЕМЉИШТА

Деоница пруге на којој су изведена испитивања је претежно окружена обрадивим пољопривредним земљиштем. Одводњавање на овој деоници је вршено класичним системима за одводњавање, у овом случају отвореним јарковима неправилног облика. Јаркови су делимично затрављени. Са једне стране пруге на овој

деоници се налази атарски пут и на тој страни не постоји јасна граница између јарка и земљаног пута. Атмосферске воде овим подужним каналима отичу до пропуста који се налази на стационажи km 252+049,00, а затим до крајњег реципијента, реке Јужне Мораве.

Кључна ствар код планирања узимања узорак био је одабир положаја попречних профила. Основна идеја је била да се положаји попречних профила одаберу тако да се елиминише сваки могући спољни утицај на резултате испитивања. Одабрано је да то буду профили који се налазе у насипу, јер је једино тако искључена могућност да је приликом плавлјења подручја труп пруге могао доћи у контакт са садржајем који не потиче од железничког саобраћаја. Пошто је утврђено да ће узорковање бити вршено на попречним профилима у насипу, било је неопходно одредити тачне локације узимања узорак у оквиру појединачног попречног профила.

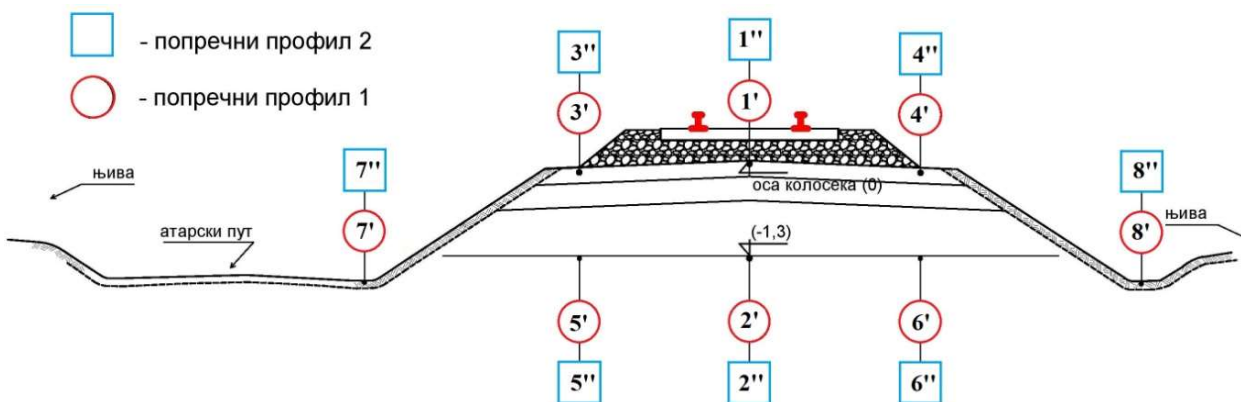
Одабрана су два попречна профила на највећој могућој удаљености од око 100 m (Слика 4.4). У тренутку када је рађено узорковање, око 200 m пруге је планирано за потпуно уклањање и постављање горњег и доњег строја. У погледу положаја трасе у односу на терен, као и распореда околних површина, два изабрана попречна профила (профил 1 и профил 2) су се разликовала једино у погледу висине насипа. Узорци су узети ручним алатом при постепеном машинском уклањању горњег и доњег строја у току реконструкције.



Слика 4.4 Позиција попречних профила 1 и 2 на деоници Међурово – Белотинац

На Слици 4.5 је приказан типичан попречни профил пруге на местима узорковања. Облик трупа пруге као и положај и распоред елемената горњег строја у потпуности одговарају типичном попречном профилу једноколосечне железничке пруге у насипу. Положај локације узорковања на профилу је биран према начину одводњавања са трупа пруге (Слика 4.1). Положај и дубина узорковања, као и нумерација узорака, детаљно су приказани на Слици 4.5. Узето је 8 узорака по профилу, што представља укупно 16 узорака. Профилу број 1 одговарају означена места узорака 1', 2', 3', 4', 5', 6', 7' и 8', а профилу под редним бројем 2 одговарају ознаке 1'', 2'', 3'', 4'', 5'', 6'', 7'' и 8''.

Код одводњавања, највећа концентрација отицаја кроз застор је управо код ножице застора. У складу са тим, извршено је узорковање на овим местима на изабраним профилима (узорци означени бројевима 3', 3'', 4' и 4''). Узорковање је рађено и у самој оси пруге, како одмах испод застора (узорци 1' и 1''), тако и на дубини од 1,3 m $\pm$ 10 cm (узорци 2' и 2''). На истој дубини су, на делу испод ножице застора, узети узорци ради провере могућности инфилтрације (узорци 5', 5'', 6' и 6''). Крајње испитиване позиције су јаркови код ножица насипа (узорци 7', 7'', 8' и 8'').



Слика 4.5 Типичан попречни профил пруге са местима узорковања

4.2.3 ТЕХНИКЕ ЗА ИСПИТИВАЊЕ УЗОРАКА ЗЕМЉИШТА

Рендгенска флуоресцентна спектрометрија (XRF)

Рендгенска флуоресцентна спектрометрија (XRF) је аналитичка техника која налази примену у разним индустријским областима и за потребе широког спектра научних истраживања и помоћу које се одређује хемијски састав испитиваног материјала, односно процентуално учешће појединих хемијских елемената у анализираном тлу. Прилагодљивост и прецизност XRF инструмената ову технику чине незаменљивом у бољем разумевању хемијског састава анализираног материјала. Одликује се могућношћу утврђивања широког опсега хемијских елемената, са осетљивошћу од чак 10^{-8} g [Margui et al., 2022].

Анализа узорка може бити вршена без припреме материјала, што овој техници даје још једну предност када су у питању недеструктивне методе испитивања. То доприноси брзини испитивања, јер се ова техника лако примењује *in situ*. Понекад је ипак неопходно да се изврши припрема материјала испитиваног узорка како би се отклониле грешке које могу настати због нехомогености испитиваног материјала. Припрема зависи пре свега од врсте материјала који се испитује.

Уопштено, процес снимања обухвата емитовање високоенергетског зрачења које побуђује атоме у испитиваном материјалу изазивајући јонизацију електрона. На тај начин се стварају електронске шупљине у унутрашњим љускама погођеног атома. Електрони из спољашњих љуски попуњавају те шупљине и емитују флуоресцентно зрачење карактеристично за сваки елемент периодног система. Фотони настали током попуњавања унутрашњих атомских љуски за сваки од елемената имају одређену енергију, тачно дефинисану разликом енергије између два енергетска нивоа. Зрачење одређене енергије карактерише се спектралним линијама.

Постоје различите врсте система рендгенске флуоресценције које су доступне данас. Избор најпогоднијег спектрометра се заснива на захтевима за дату сврху. Инструменти за рендгенску флуоресценцију су подељени на две главне гране, те постоји енергетски дисперзивна (EDXRF) и таласно дисперзивна рендгенска флуоресцентна (WDXRF) спектрометрија [Revenko and Pashkova, 2023]. Основна разлика се огледа у начину разликовања енергије рендгенских фотона који се емитују са узорка.

Као надоградња EDXRF са поларизованим снопом рендгенских зрака јавља се 3D-EDXRF [Margui et al., 2022]. Предности овог модела су повећана осетљивост и специфичност за анализу елемената у траговима. Употреба одговарајуће секундарне мете (направљене од различитих материјала) између рендгенске цеви и узорка омогућава не само повећање производње рендгенског, већ и смањење интензитета измереног зрачења континуума, дакле значајно повећање односа сигнал-шум и побољшање граница детекције.

Још један тип XRF уређаја из групе EDXRF јесу такозвани портабл спектрометри (P-EDXRF) [Margui et al., 2022]. То су преносиви уређаји код којих је доминирала употреба радиоактивних извора рендгенских зрака. Ови извори су били веома погодни за употребу у преносивим уређајима цилиндара приближно 5 mm висине и пречника, без потребе за спољним напајањем. Међутим, кратко време полураспада неких изотопа, строги регулаторни захтеви повезани са транспортом радиоактивних материјала и ограничене осетљивости доступне за трагове одређивање метала представљали су значајне препреке широј распрострањености ових спектрометара. Недавни технолошки напредак довео је до доступности компактне метал-керамичке рендгенске цеви мале снаге која се може хладити ваздухом, а која је у великој мери заменила радиоактивне изворе рендгенских зрака рентабилнијим ручним уређајима [Margui et al., 2022]. Преносиви XRF инструменти су сада доступни као мале и лаке јединице, тежине око 2 kg. Ови уређаји су од посебног значаја у одређеним критичним ситуацијама када је потребно брзо доћи до резултата мерења и по потреби хитно реаговати у погледу спречавања могуће контаминације или спровођења брзе санације контаминираних материјала [Hokura, 2021].

Једна од најновијих грана EDXRF, која се веома брзо развија захваљујући развоју капиларне оптике и пикселизованих детектора, јесте микро рендгенска флуоресцентна спектрометрија (μ EDXRF). У односу на остале системе, овде је концентрација рендгенског снопа сведена на мању величину увођењем фокусирајуће оптике (монокапиларна или поликапиларна сочива) између извора рендгенских зрака и узорка. Стандардни спектрометри су опремљени микроскопом или камером за прецизан одабир положаја мерења и за преглед подручја на монитору у току мерења. Могуће је чак вршити аутоматизовано тачкасто, линијско или површинско мерење одабраног подручја. Ова врста спектрометра се све чешће користи у студијама посматрања и очувања животне средине.

Још једна варијација EDXRF су спектрометри са тоталном рефлексијом (TXRF) [Revenko and Pashkova, 2023]. Код ових спектрометара је побољшана граница детекције променом положаја ударног снопа са 45° на мање од 0.1° . Ови спектрометри имају микроаналитичку способност, што је пресудно код узорак са ограниченом масом. Ово је још један систем који је лако применљив *in situ*.

Уопштено гледано, XRF уређаји се деле на уређаје који се користе у лабораторијама, преносне ручне спектрометре и аутоматизоване индустријске спектрометре. За потребе научних истраживања значајне су прве две групе уређаја.

Припрема узорака зависи од сврхе испитивања материјала. Уколико је важно да узорак након испитивања остане неоштећен, односно у свом изворном облику, онда је потребно да такав материјал буде очишћен како би се припремио за испитивање. Ово је недеструктивно испитивање материјала помоћу XRF-а. У другом случају, када се ради о материјалу чије узорковање није условљено горе наведеним захтевима, приступа се припреми узорка за анализу у зависности од испитиваног материјала и уређаја који је одабран за снимање. Идеалан узорак за XRF анализу мора имати савршено равну површину, пошто су XRF системи калибрисани на основу фиксне геометрије. У основи, узорци могу бити у чврстом и течном агрегатном стању. Код чврстих узорака је најважније хомогенизовати узорак у зависности од материјала. С обзиром на то да сваки од уређаја поседује одређена правила и ограничења при снимању, узорак треба припремити у складу са инструкцијама које се тичу тачно изабраног уређаја како би се добили најпоузданији подаци.

Оптичка емисиона спектрометрија са индуковано куплованом плазмом (ICP-OES)

Оптичка емисиона спектрометрија са индуктивно куплованом плазмом (ICP-OES), која се понекад назива и ICP-атомска емисиона спектроскопија, је моћна аналитичка техника која се користи за одређивање елементног састава различитих узорака. Ово је техника елементарне анализе која своје аналитичке податке изводи из емисионих спектра елемената побуђених унутар високотемпературне плазме. То укључује стварање изузетно високе температуре и јонизоване аргон плазме, која побуђује атоме или јоне у узорку. Како се ови атоми враћају у основно стање, они емитују карактеристичну светлост на одређеним таласним дужинама. Мерењем

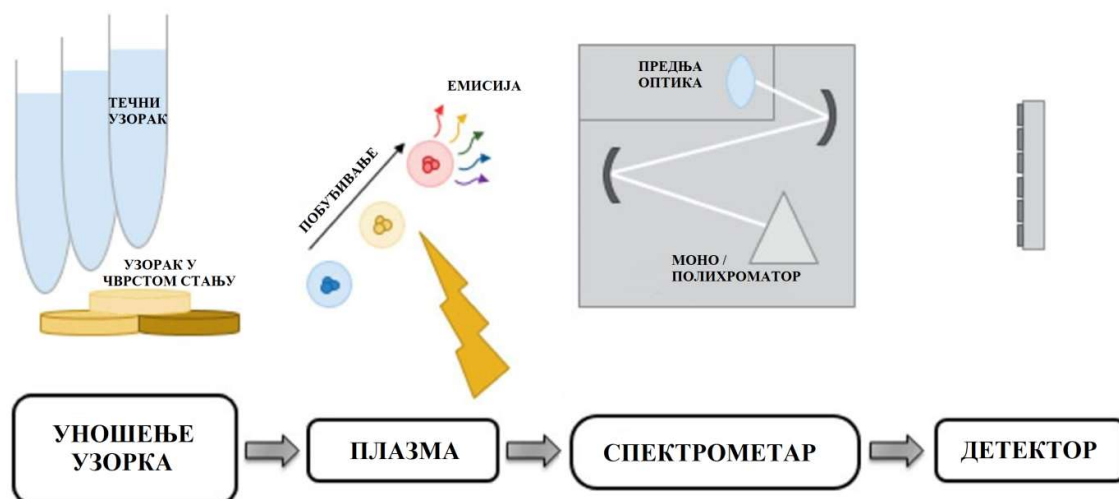
емитоване светлости, ICP-OES може да идентификује и квантификује елементе присутне у узорку [Velimirović, 2013].

Ова техника има широку примену у мониторингу животне средине, провери квалитета хране и пића, фармацеутској и другим индустријама где је потребна прецизна елементарна анализа [Okem et al., 2012; Støving et al., 2013; Frahm et al., 2016; Harris et al., 2018; Rehan et al., 2020; Liu et al., 2021; Hang et al., 2022]. Може се применити на различите типове узорака у течном и чврстом агрегатном стању. У зависности од типа узорака који се испитују, потребне су одговарајуће технике припреме узорака или употреба специфичног прибора како би се омогућило да се узорак испита помоћу ICP-OES инструмента [Dean, 2005].

Предности коришћења ICP-OES технике у односу на друге технике елементарне анализе, као што су ICP-MS или AAS, укључују њен широк линеарни динамички опсег, високу толеранцију матрице и побољшану брзину анализе коју може постићи [Velimirović, 2013].

ICP-OES инструмент се састоји од четири основне компоненте: система за увођење узорака, извора побуђивања (плазма), спектрометра (за избор таласне дужине) и детектора (Слика 4.6). Узорак (обично течност) се уводи у плазму, а оптички систем (спектрометар) се користи за одвајање таласних дужина светлости специфичних за елементе и за фокусирање разрешене светлости на детектор што је ефикасније могуће. Спектрометар се састоји од две секције, предње оптике и моно или полихроматора. Када светлост изађе из моно или полихроматора, фокусира се на детектор и изведени сигнали се обрађују како би се квантификовао елементарни састав.

Различити типови **узорака** се могу анализирати помоћу ICP-OES уређаја. Узорци се морају довести у стање које ICP-OES инструмент као целина може да обради за елементарну анализу, па се по правилу преводи у раствор који се у облику аеросола уводи у плазму. Течни узорак се уводи помоћу перисталтичке пумпе да би се обезбедио константан и стабилан проток. Распршивач користи ток гаса велике брзине (обично аргона) да разбије мале капљице течности у аеросол. Аеросол се затим уноси у комору за распршивање која уклања веће капљице.



Слика 4.6. Основне компоненте ICP-OES уређаја [www.termofisher.com].

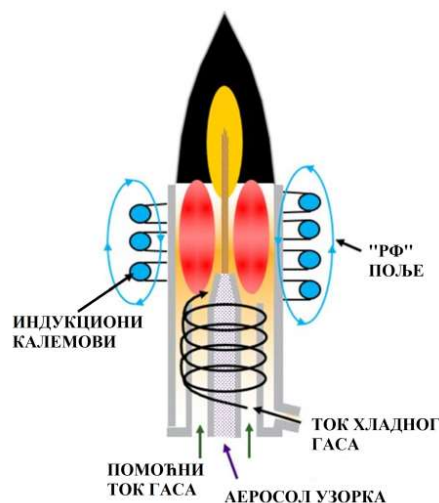
Пре него што дође до емисије, растварач у коме је узорак растворен мора да се испари. Такође, остаци узорка морају бити преведени у пару, а постојећи молекули подељени на атоме. Све су то задаци плазме. **Плазма** је гас, у овом случају аргон, који садржи значајан број аргонових јона. Плазма се формира засијавањем гаса аргона који пролази кроз плазма бакљу електронима. Електрони се убрзавају и сударају са атомима аргона ослобађајући више електрона и формирајући јоне аргона. Елементи, у облику атома, се уносе у плазму. Део ових атома ће постати јонизован унутар плазме. Када је атом или јон побуђен у плазми, његови електрони се крећу са нижег на виши енергетски ниво. Након релаксације ових електрона у њихово почетно стање, енергија се емитује у облику фотона. Емитовани фотони поседују таласне дужине које су карактеристичне за њихове елементе.

Код ICP-OES инструмената, плазма се може емитовати на два начина [Dean, 2005]:

- Радијално – зрачење плазме се посматра ортогонално кроз централни канал ICP-а;
- Аксијално – посматрање зрачења плазме се поклапа са централним каналом ICP-а;

Радијални приказ плазме нуди мању осетљивост од аксијалног. Модерни спектрометри могу да користе обе врсте гледања у зависности од потребне осетљивости анализа, односно код одређивања већих или мањих концентрација елемената [Velimirović, 2013].

Генерисање плазме се врши у плазма "бакљи", која се састоји од три кварцне цеви: спољне цеви горионика, помоћне цеви и ињекторске цеви (Слика 4.7). Између спољашње и помоћне цеви уводи се ток хладног гаса. Овај гас садржи плазму и држи је даље од спољне цеви бакље, штитећи је од топљења. Помоћни ток гаса се користи за подизање дна плазме из цеви ињектора. Аеросол узорка се уводи у плазму преко танке ињекторске цеви типичног отвора од 1–2 mm.



Слика 4.7 Генерисање плазме у плазма горионику [www.termofisher.com]

Радио-фреквентни генератор (РФ) је део који снабдева ICP уређај снагом, која може да достигне вредност и до 2000 W. Температура која се развија унутар плазме може бити и до 10.000°C. Ефикасан и моћан радио-фреквентни (РФ) генератор помаже у развоју и одржавању плазме, која је способна да потпуно раздвоји скоро сваки узорак. Стабилност РФ генератора у великој мери зависи од његове способности да се прилагоди променљивим условима у плазми услед различитости узорака или матрице узорака. Историјски гледано, постојала су два главна приступа контроли и усклађивању РФ генератора: генератори контролисани кристалом и слободни генератори. Генератори контролисани кристалом усклађују и закључавају фреквенцију РФ генератора са осцилацијом референтног кристала. Слободни генератори усклађују произведену снагу са снагом коју захтева плазма и дозвољавају да фреквенција мало варира.

Из спектра који емитује извор плазме, помоћу спектрометра се издваја таласна дужина од интереса. У зависности од начина дисперзије различитих таласних дужина,

постоје монохроматори и полихроматори. За разлику од монохроматора, где се истовремено посматра само једна таласна дужина, полихроматор се може користити за истовремено одређивање више елемената у узорку. Ова истовремена детекција побољшава стабилност анализе и значајно смањује потрошњу узорка и укупно време анализе. Након проласка кроз елементе спектрометра распршени спектар се фокусира на детектор.

Фотомултипликатори су дуго коришћени као **детектори** код ICP-OES инструмената. Сада су заступљенији вишеканални детектори који се базирају на технологији уређаја за пренос наелектрисања (CTD, CCD и CID). Употреба ових детектора омогућава високу осетљивост детектовања и покривања широког опсега таласних дужина у UV и видљивом делу спектра.

4.2.4 СНИМАЊЕ УЗОРАКА XRF РУЧНИМ СПЕКТРОМЕТРОМ

Снимање узорака је најпре вршено ручним XRF спектрометром, марке LANScientific, модел RTU-XRF7460 (Слика 4.8), у Лабораторији за геотехнику Грађевинско-архитектонског факултета Универзитета у Нишу. Овај уређај је могуће користити за утврђивање концентрације тешких метала у земљишту на узорцима у чврстом агрегатном стању, у облику прашине, праха, комада земље или чак танких слојева земљишта са дометом детекције Mg-U. Овакав начин испитивања је недеструктиван и прилагодљив узоркованом материјалу, јер се не постављају готово никакви захтеви у погледу облика или величине узорка. Излазни подаци се након снимања добијају у облику табела (Excel) или текста (PDF). Резултати представљају удео тешких метала у узорку и добијају се у унапред (пре снимања) одабраним јединицама мере *ppm (mg/kg)* или у *масеним процентима (%)*.



Слика 4.8 XRF ручни анализатор

Узорковани материјал је био у делимично растреситом стању. Материјал је осушен, а потом уситњен како би се постигла хомогеност узорка за испитивање. Типичан изглед узорка прописно припремљеног за анализу помоћу XRF анализатора је дат на Слици 4.9. Сваки од узорака је снимљен по три пута у трајању од 30 секунди. Одабрано је да излазна листа резултата буде у опште прихваћеним јединицама ppm (mg/kg). Даља обрада података је извршена у програму Excel. Као коначна вредност усвојена је средња вредност свих снимања сваког појединачног узорка (минимум три снимања по узорку).



Слика 4.9 Изглед узорка припремљеног за снимање XRF анализатором

4.2.5 ИСПИТИВАЊЕ УЗОРАКА ICP-OES СПЕКТРОМЕТРОМ

Поступак одређивања трагова и врсте метала у наведеним узорцима је вршен на ICP-OES спектрометру серије *iCAP 6000*, фирме *Thermo scientific*, у Лабораторији за аналитичку и физичку хемију Природно-математичког факултета Универзитета у Нишу. Оперативне карактеристике инструмента су приказане у Табели 4.1. Овај поступак представља изузетно прецизну технику у погледу одређивања чак и јако малих количина метала у узорцима, о чему говоре и бројна упоређивања код валидације нових предложених техника испитивања са поменутом ICP-OES техником [Rehan et al., 2018; Rehan et al., 2020].

Табела 4.1 Оперативни услови за инструмент *iCAP 6000 ICP-OES*

Снага RF генератора	1150 W
Брзина пумпе за анализу	50 rpm
Брзина пумпе за испирање	100 rpm
Проток гаса за распршивање	0,7 lit/m
Проток гаса за хлађење	12 lit/min
Проток помоћног гаса	0,5 lit/min
Правац посматрања плазме	аксијални
Време испирања	30 s

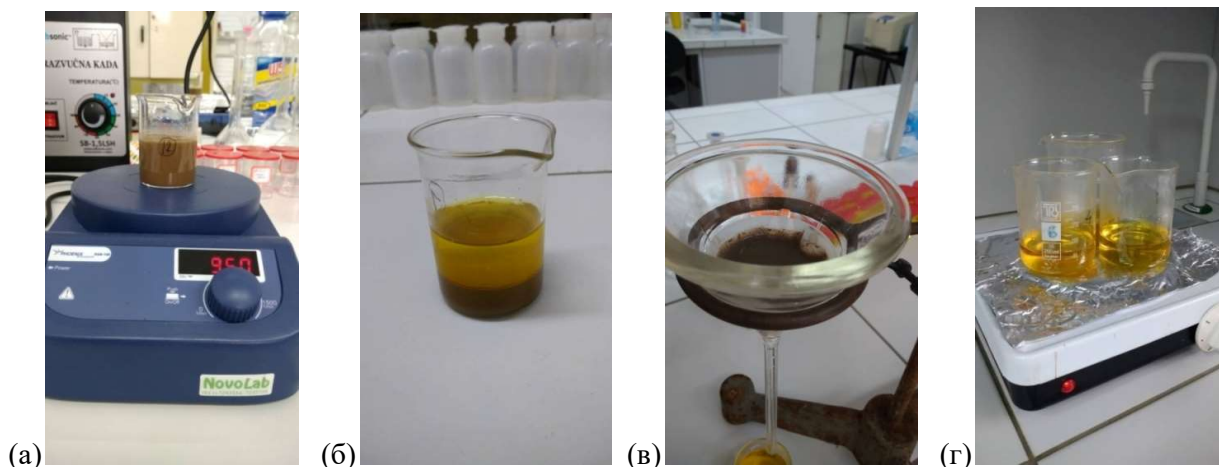
Ова техника испитивања захтева узорак у виду раствора. За потребе припреме узорака за анализу коришћене су дејонизована вода и хлороводонична киселина (HCl) [Velimirović et al., 2020]. Најпре је извршено мерења сваког узорака од приближно 5g. Тачан износ масе по узорку је дат у Табели 4.2. Мерења су вршена за узорак у сувом и уситњеном стању. После мерења је сваком од узорака додато по 25ml дејонизоване воде. По додавању дејонизоване воде, извршено је мешање сваког појединачног узорака у трајању од сат времена помоћу магнетних мешалица при брзини од 850–1400 обртаја/мин. Брзина мешања је била варијабилна због различитих величина судова и магнета за мешање. Измешани раствори су остављени да се исталоже и избистре. Након два дана је додата хлороводонична киселина (35% g.r.) у запремини од 10 ml по раствору. Хлороводонична киселина је у овом случају требало да постигне симулацију ефекта испирања тла киселим кишама. Припрема раствора узорака тла је требало да симулира природне услове када је тло изложено падавинама, те зато није додата само дејонизована вода или само хлороводонична киселина, како је то случај код већине испитивања техником ICP-OES, већ је направљена комбинација.

Обављен је још један циклус мешања након додавања хлороводоничне киселине (Слика 4.10 (а)).

Табела 4.2 Масе припремљених узорка за испитивање ($g \pm 1\%$)

Ознака узорка	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'
маса [g]	5,0490	5,0832	5,0144	5,0367	5,0283	5,0137	5,0941	5,0897
Ознака узорка	1''	2''	3''	4''	5''	6''	7''	8''
маса [g]	5,0568	4,9909	5,015	5,0383	5,0611	5,0128	5,0708	5,0445

Након поновног таложења (Слика 4.10 (б)), поступак је даље обухватио цеђење раствора кроз филтер папир уз испирање дејонизованом водом (Слика 4.10 (в)). Процеђени садржај је упаравањем доведен на одабрану запремину од 25 ml за све узорке (Слика 4.10 (г)). Након тога је извршена анализа ICP-OES спектрометром.



Слика 4.10 Процес припреме раствора за испитивање у ICP-OES спектрометру: (а) мешање узорка са водом и хлороводоничном киселином; (б) изглед раствора након таложења; (в) филтрирање раствора кроз филтер папир; (г) упаравање филтрата на запремину од 25 ml.

4.2.6 АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА

Резултати испитивања оба поступка су анализирани према граничним максималним вредностима загађујућих, штетних и опасних материја у земљишту прописаним за Републику Србију [Уредба РС] и према вредностима препорученим у земљама Европске Уније [EU Directive 86/278/EEC, 1986 (у даљем тексту: ЕУ Директива)]. Вредности, прописане ЕУ Директивом представљају препоруку опсега допуштених вредности хрома, никла, бакра, цинка, кадмијума, олова и живе. Ова Директива није дословно обавезујућа, већ свака од чланица ЕУ може извршити корекције, најчешће у складу са рН вредношћу посматраног тла неке државе или неког одређеног подручја [Collivignarelli et al., 2019]. Концентрације метала који нису обухваћени ЕУ Директивом су разматране према Уредби РС. Табела 4.3 приказује граничне максималне вредности загађујућих, штетних и опасних метала у земљишту према Уредби РС и препоручене максималне вредности појединих тешких метала према ЕУ Директиви.

Табела 4.3 Граничне максималне вредности загађујућих, штетних и опасних материја у земљишту према Уредби РС и према ЕУ Директиви изражене у јединицама ррт

Метал	Уредба РС*	ЕУ
Кадмијум (Cd)	0,8	1,0–3,0
Хром (Cr)	100	100
Бакар (Cu)	36	50–140
Никл (Ni)	35	30–75
Олово (Pb)	85	50–300
Цинк (Zn)	140	150–300
Жива (Hg)	0,3	1,0–1,5
Арсен (As)	29	-
Баријум (Ba)	160	-
Кобалт (Co)	9	-
Молибден (Mo)	3	-
Антимон (Sb)	3	-
Берилијум (Be)	1,1	-
Селен (Se)	0,7	-
Торијум (Th)	1	-
Ванадијум (V)	42	-

* вредности прописане Уредбом о граничним вредностима загађујућих, штетних и опасних материја у земљишту, за подручје Републике Србије [Уредба РС]

** Европска Директива 86/278/EEC [Directive 86/278/EEC, 1986; Collivignarelli et al., 2019]

РЕЗУЛТАТИ ДОБИЈЕНИ ПРИМЕНОМ XRF СПЕКТРОМЕТРИЈЕ

У Табели 4.4 су представљени резултати средњих вредности мерења количине метала у узорцима (узорци 1'- 8' и 1''- 8'' према Слици 4.5).

Табела 4.4 Количине метала одређене XRF-ом у јединицама ppm (ppm $\pm$ 5%)

Метал Бр. уз.	Al	Si	P	S	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe
Уредба РС (макс. доп. вред. у ppm) ЕУ	-	-	-	-	-	-	-	-	42	100	-	-
Директива (макс. доп. вред. у ppm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-
1'	98281,2	310420,0	832,5	208,3	20804,5	17000,8	12,1	7405,9	141,3	130,6	912,4	53063,3
2'	81917,2	268652,0	811,6	203,8	20640,2	14941,6	11,9	6214,3	129,3	107,9	843,8	48475,7
3'	98539,4	347885,2	942,0	258,1	23002,3	30956,2	13,5	6827,2	141,4	127,2	1192,1	54642,7
4'	85444,4	273087,0	783,0	231,1	19488,5	21876,2	10,8	5079,6	108,0	95,6	877,9	39203,7
5'	102023,5	339627,7	1002,5	234,6	22944,9	17619,1	12,9	6942,1	143,4	111,5	1190,9	51727,8
6'	76807,7	282160,0	506,9	238,4	18416,0	13297,1	6,0	3772,6	99,2	82,2	757,4	34481,5
7'	95377,6	345455,9	982,7	256,8	22351,4	20601,6	13,4	6895,6	143,3	124,4	1016,4	54908,9
8'	93555,0	356912,2	721,8	215,5	18776,5	16684,3	10,6	3915,4	90,5	74,3	717,0	38998,6
1''	95065,8	289698,4	789,5	192,8	19088,9	13898,8	11,5	5831,4	116,7	101,3	870,2	45513,2
2''	96195,2	357613,3	971,1	249,6	22310,7	17482,4	13,2	6443,3	141,1	118,0	987,9	48424,4
3''	105546,5	352708,2	1015,9	249,6	23823,0	25204,5	14,6	7382,7	153,7	131,7	1336,2	64883,6
4''	86513,8	283698,4	836,8	215,5	19117,6	17876,3	11,7	5551,5	118,2	104,1	1046,4	50288,2
5''	85992,1	271777,2	774,2	183,2	18285,7	15067,5	11,4	6061,7	123,5	107,1	1046,0	47219,6
6''	87773,8	285785,6	732,8	184,2	19036,8	17312,5	10,5	5982,7	121,7	110,9	1062,8	47535,8
7''	78687,9	247164,4	739,8	171,8	16243,5	16157,4	9,5	4828,3	103,2	89,1	788,3	37448,2
8''	76684,5	265868,7	756,7	186,6	18199,8	16376,4	10,4	5477,3	113,2	96,8	961,0	44009,3
Метал Бр. уз.	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo
Уредба РС (макс. доп. вред. у ppm) ЕУ	9	35	36	140	29	0,7	-	-	-	-	-	3
Директива (макс. доп. вред. у ppm)	-	30	50	150	-	-	-	-	-	-	-	-
1'	23,7	47,5	50,1	117,6	16,0	0,3	119,9	171,7	34,1	263,0	19,3	0,8
2'	21,3	45,7	43,3	115,0	17,3	0,3	135,5	158,2	33,8	260,3	19,1	0,8
3'	25,1	56,0	68,7	175,8	18,2	0,3	124,4	188,9	34,9	256,6	21,0	0,9
4'	17,0	41,2	41,7	210,5	16,9	0,2	89,5	266,3	24,8	202,9	15,5	0,7
5'	23,3	51,1	55,7	122,3	15,6	0,3	127,2	219,0	35,8	279,3	21,3	0,9
6'	22,5	38,6	33,6	198,1	18,5	0,1	77,4	154,3	17,0	145,3	8,8	0,4
7'	25,0	53,7	60,2	160,8	20,2	0,3	139,1	189,4	37,2	256,8	20,9	0,9
8'	15,8	37,1	30,8	108,6	13,1	0,1	103,8	150,4	27,9	182,9	21,1	0,9
1''	20,5	45,1	46,5	110,0	14,2	0,2	118,0	140,5	30,9	221,3	18,1	0,8
2''	22,0	52,5	51,0	121,4	17,6	0,3	142,1	174,9	35,4	291,2	19,3	0,8
3''	29,5	61,3	64,4	154,9	19,0	0,3	140,3	203,0	38,1	277,2	21,9	0,9
4''	22,3	46,3	56,8	307,6	21,9	0,2	112,7	205,8	30,3	225,0	17,8	0,8
5''	21,1	43,0	46,1	106,0	14,2	0,3	111,6	150,9	30,7	234,3	18,2	0,8

6''	21,3	43,8	57,5	147,9	17,8	0,2	115,8	183,8	31,4	229,9	18,4	0,8
7''	17,0	39,3	46,9	107,1	13,6	0,2	96,5	136,6	26,0	181,1	15,6	0,7
8''	19,9	42,1	45,5	116,0	13,5	0,1	103,8	148,6	29,2	201,9	17,1	0,7
Метал Бр. уз.	Ag	Sn	Sb	Cs	Ba	Hf	Ta	W	Hg	Pb	Bi	
Уредба РС (макс. доп. вред. у ppm)	-	-	-	-	160	-	-	-	0,3	85	-	
ЕУ Директива (макс. доп. вред. у ppm)	-	-	-	-	-	-	-	-	1	50	-	
1'	0,2	4,4	1,3	6,9	406,1	4,2	1,5	29,0	0,1	42,8	0,9	
2'	0,1	4,2	1,3	6,0	366,0	5,1	1,2	27,3	0,1	50,1	0,8	
3'	0,2	4,9	1,5	7,3	445,0	5,0	1,2	34,4	0,1	53,9	0,9	
4'	0,1	3,8	1,0	6,3	340,9	4,8	1,1	38,9	0,1	48,7	0,5	
5'	0,2	4,9	1,5	8,1	441,3	6,3	1,5	29,9	0,1	42,3	0,9	
6'	0,1	1,7	1,1	3,5	245,7	2,2	0,6	25,7	0,1	45,8	0,3	
7'	0,2	5,0	1,5	7,4	461,8	5,6	1,4	32,6	0,1	59,7	0,9	
8'	0,1	3,7	1,1	5,9	543,3	4,3	0,8	20,1	0,1	33,6	0,4	
1''	0,1	4,2	1,3	6,3	371,6	4,8	1,2	25,9	0,1	36,5	0,7	
2''	0,2	4,7	1,4	7,7	421,8	5,4	1,4	29,5	0,1	51,2	0,9	
3''	0,2	5,3	1,6	7,8	463,8	4,7	1,6	36,1	0,1	51,5	1,0	
4''	0,1	4,2	1,3	6,4	377,8	5,0	1,3	43,6	0,1	63,7	0,8	
5''	0,1	3,9	1,2	6,0	351,5	4,2	1,2	24,8	0,1	40,4	0,8	
6''	0,1	4,1	1,2	6,3	366,5	4,3	1,3	30,2	0,1	52,9	0,7	
7''	0,1	3,6	1,1	5,5	322,2	3,8	1,1	23,4	0,1	40,0	0,6	
8''	0,1	3,9	1,2	5,5	342,4	4,2	1,0	25,0	0,1	34,9	0,7	

Поређењем количине **ванадијума** (V) са прописаном максимално дозвољеном концентрацијом према Уредби РС, константовано је да су регистроване вредности два до четири пута веће од дозвољених (Слика 4.11 (а)).

Хром (Cr) је у већем броју узорака имао прекорачења, с тим да су највеће концентрације биле присутне у површинским слојевима, посебно код ножице застора (узорак 3'') и у каналу атарског пута (узорак 7'') (Слика 4.11 (б)).

Иако не постоји прописана максимална вредност за концентрацију **гвожђа** (Fe), интересно је прокоментарисати резултат код два разматрана профила са аспекта овог метала. Примећено је да је у случају профила 1 (чији су узорци означени црвеним круговима на Слици 4.5), мало већа концентрација гвожђа била на страни атарског пута, док је на профилу 2 (узорци означени плавим квадратима на Слици 4.5) обрнуто. Претпоставка је да је можда нагиб трупа условио правац одводњавања и да су нагиби трупа ова два профила супротне оријентације, па да је због тога и таква расподела количине гвожђа. Интересантна је појава повећања концентрације гвожђа по дубини. То се јасно уочава поређењем количине гвожђа на узорку 1'' на мањој дубини и на

узорцима на већој дубини (узорци 2", 5" и 6"), где је забележена већа концентрација гвожђа. Не постоји јасно прописана максимална допуштена вредност за овај метал у Уредби РС и ЕУ Директиви, те се није потребно даље бавити анализом концентрације гвожђа.

Кобалт (Co) и **никл** (Ni) су на оба разматрана профила имали прекорачене вредности (Слика 4.11 (в) и 4.11 (г)). У овом случају, максималне регистроване вредности за оба метала потврђене су у ножици застора (узорак 3"). Уочене су нешто веће вредности на страни трупа ка атарском путу. Закључено је да су већа прекорачења допуштених вредности у случају кобалта (Слика 4.11 (в)) у односу на никл (Слика 4.11 (г)).

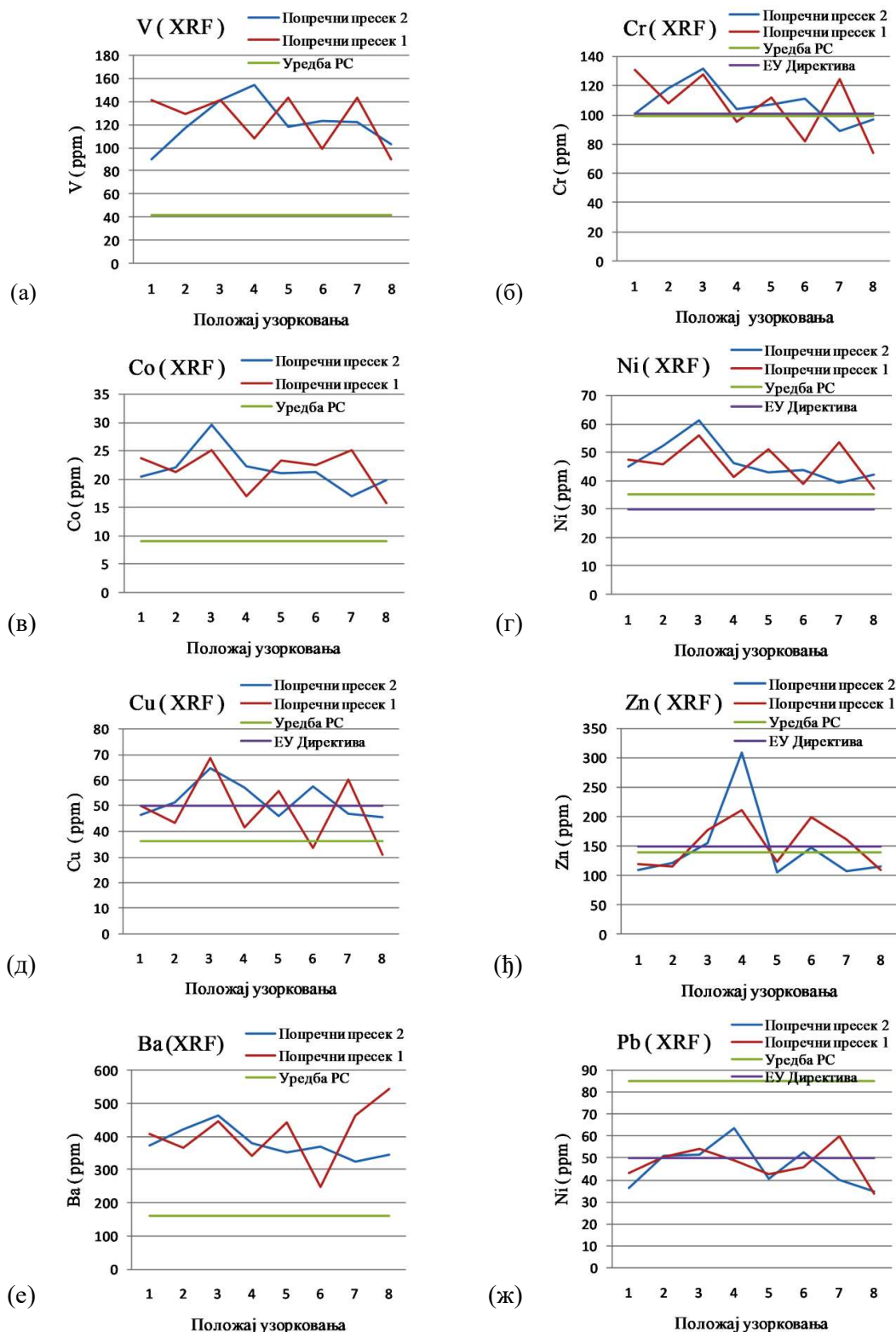
У случају **бакра** (Cu) забележено је прекорачење максимално дозвољене концентрације прописане Уредбом РС, нарочито у узорцима узетим код ножице застора (узорци 3' и 3") и у каналу на страни атарског пута (узорак 7') (Слика 4.11 (д)).

Максимална дозвољена концентрација **цинка** (Zn) била је прекорачена на појединим позицијама у оквиру разматраних профила, при чему су вредности на месту ножице застора (узорци 4' и 4"), на страни оријентисаној ка пољопривредном земљишту, биле готово два пута веће од прописаних (Слика 4.11 (ђ)).

Баријум (Ba) је далеко изнад дозвољених вредности, понегде и до 3,5 пута више од прописаног. Узорак из дренажног канала на попречном профилу 1 (узорак 8') се издвојио по количини баријума. Није уочена посебна правилност миграције баријума на осталим позицијама (Слика 4.11 (е)).

Регистрована количина **олова** (Pb) прекорачује дозвољену вредност прописану ЕУ Директивом. Највише прекорачених вредности је забележено код ножице застора (узорци 3', 3" и 4"). Што се тиче Уредбе РС измерена количина олова се налази у дозвољеним границама (Слика 4.11 (ж)).

Концентрације осталих метала и металоида потенцијално опасних по животну средину, попут **живе**, **арсена** и **селена**, биле су у границама дозвољених вредности.



Слика 4.11 Концентрације тешких метала измерене помоћу XRF технике у попречном профилу 1 и попречном профилу 2 у поређењу са максималним дозвољеним вредностима истих према Уредби РС и према ЕУ Директиви: (а) ванадијум – V; (б) хром – Cr; (в) кобалт – Co; (г) никл – Ni; (д) бакар – Cu; (ђ) цинк – Zn; (е) баријум – Ba; (ж) олово – Pb

Допуштене вредности према ЕУ Директиви су прекорачене за хром (Cr), никл (Ni), бакар (Cu), олово (Pb) и цинк (Zn), што је упоредно са Уредбом РС приказано на Сликама 4.11 (б), (г)–(ђ) и (ж). Пошто према ЕУ Директиви не постоје ограничења за V, Co и Ba, дијаграми за ове тешке метале су приказани само према Уредби РС (Слике 4.11 (а), (в) и (е)).

Детаљнијом анализом дијаграма (Слике 4.11 (а)–(ж)) и амплитудних вредности, уочено је да су највеће регистроване концентрације тешких метала у ножици застора (узорци на локацијама 3', 3'', 4' и 4'') и у каналима за одводњавање (узорци 7', 7'', 8' и 8'').

РЕЗУЛТАТИ ДОБИЈЕНИ ПОСТУПКОМ ICP-OES

Количине метала у узорцима (2) су одређене срачунавањем средње вредности концентрација одређених помоћу ICP-OES поступка, а према изразу:

$$E_x = \frac{A_{vg_x} \cdot 25}{m} \quad [ppm] \quad (2)$$

где је:

x — ознака метала;

E_x — концентрација метала 'x' у узорку;

A_{vg_x} — средња вредност мерене количине метала добијена помоћу ICP – OES (ppm);

m — маса узорка (g);

25 — коефицијент који представља запремину испитиваног филтрата (ml), након упаравања .

Ова једначина се односи на гравиметријски фактор који се често користи у геохемији за одређивање концентрације метала у јединицама ppm [Harvey, 2023]. Израчунате вредности су дате у Табели 4.5.

У случају **бабра** (Cu) су уочене варијације регистрованих вредности по узорцима, али и неколико прекорачења (Слика 4.12 (а)). Код попречног профила 1 у ножици застора допуштена вредност је била скоро дуплирана (узорак 3'). Још једно прекорачење је регистровано на положају ножице застора, али на дубини од 1,3 m (узорак 6'). По питању попречног профила 2, регистровано је прекорачење допуштених вредности испод ножице застора (узорак 4'') и у каналу за одводњавање (узорак 7''). Интересантно је да је бакар резултовао најмањом концентрацијом у оси колосека, независно од дубине (узорци 1', 1'', 2' и 2''). На основу наведеног, закључено је да је, у односу на гвожђе, бакар склонији транспортовању и да прати пут евакуације воде са трупa пруге и кроз сам труп.

Табела 4.5 Количине метала у узорцима израчунате на основу вредности измерених помоћу ICP-OES спектрометра у јединицама ppm (ppm $\pm$ 5%)

Метал Бр. уз.	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	V	Zn	Ba
Уредба РС (макс. доп. вред. у ppm) ЕУ	29	0,8	9	100	36	-	-	35	85	42	140	160
Директива (макс. доп. вред. у ppm)	-	1	-	100	50	-	-	30	50	-	150	-
1'	5,2	5,1	14,1	30,2	24,5	2113,3	365,9	28,0	10,1	32,3	47,6	94,1
2'	5,5	5,1	14,0	28,5	25,5	2100,6	288,5	23,3	20,2	33,1	53,6	82,4
3'	6,6	5,6	13,3	29,2	67,1	2080,0	339,2	25,4	21,9	29,8	84,5	88,8
4'	6,7	4,6	12,1	25,5	30,5	2093,6	306,2	22,2	28,9	27,2	105,7	66,1
5'	4,8	4,4	12,3	24,7	21,6	2128,5	334,8	22,2	13,1	28,3	49,0	78,9
6'	7,2	5,0	12,7	24,0	41,7	2112,2	340,4	22,5	23,9	30,2	78,5	82,5
7'	7,1	5,3	13,2	29,1	36,5	2004,8	309,1	25,2	19,8	32,0	64,2	91,5
8'	4,5	4,2	11,4	25,6	30,1	2050,2	293,8	22,5	11,7	25,7	49,1	75,2
1''	5,3	5,8	15,5	33,0	27,7	2099,2	388,8	28,9	15,0	36,7	53,0	106,6
2''	5,6	6,0	15,9	32,9	28,8	2068,3	393,7	28,5	21,1	37,8	58,1	65,3
3''	6,7	5,4	32,0	29,8	34,0	1987,5	355,0	33,9	12,1	31,0	55,1	85,4
4''	6,9	7,1	13,9	30,4	45,9	2002,2	347,2	27,8	33,0	34,3	161,5	96,7
5''	4,7	5,6	15,8	30,7	30,6	2030,7	366,4	26,9	19,6	34,7	69,0	101,3
6''	5,7	5,3	13,9	29,1	32,6	2068,7	354,2	25,1	20,7	33,7	64,9	95,9
7''	6,7	5,4	13,7	30,1	40,5	1993,3	332,7	26,8	20,5	33,3	64,6	89,2
8''	5,5	5,8	17,0	32,4	34,7	2010,6	343,9	29,2	13,5	33,7	75,7	96,8

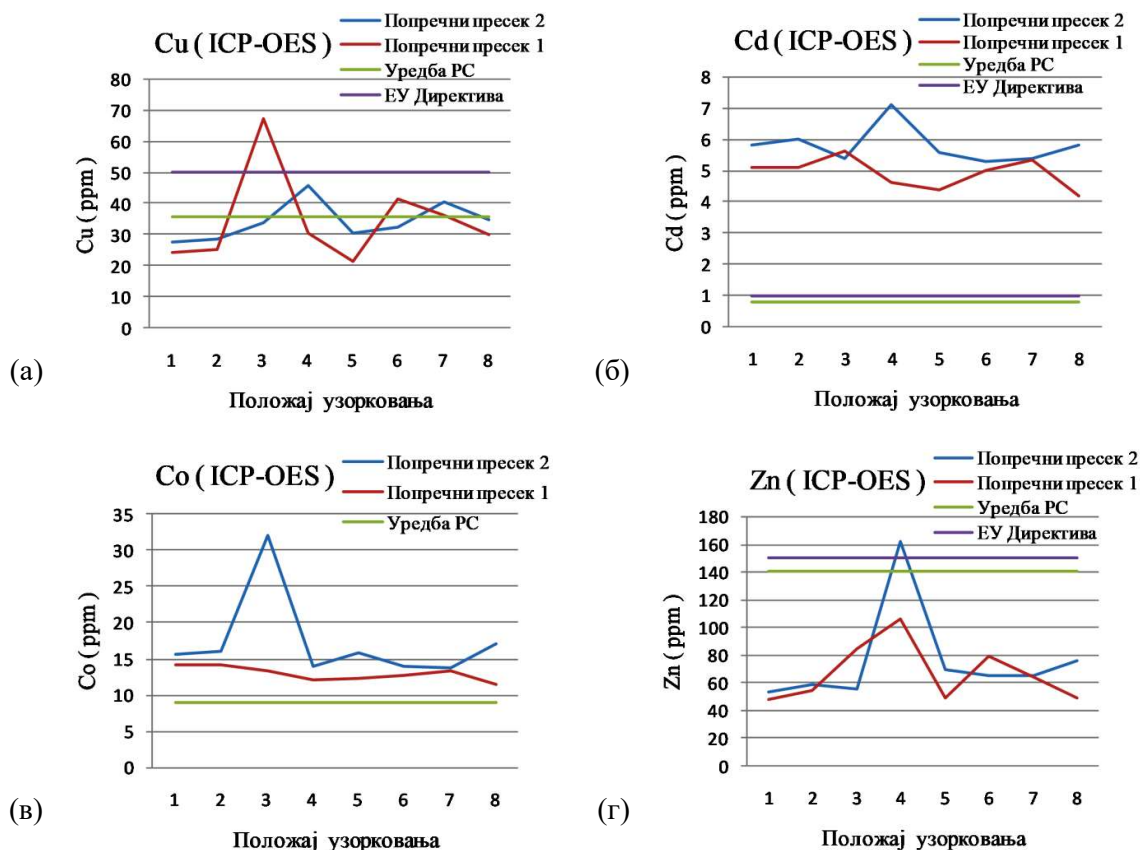
Метал Бр. уз.	Al	B	Ca	K	Mg	Na	P	Si
Уредба РС (макс. доп. вред. у ppm) ЕУ	-	-	-	-	-	-	-	-
Директива (макс. доп. вред. у ppm)	-	-	-	-	-	-	-	-
1'	8739,4	1,7	1732,6	1280,5	883,3	25,4	398,1	444,4
2'	8316,6	2,1	1457,2	2034,2	844,4	52,8	449,0	262,4
3'	8001,9	4,5	1918,5	1338,6	785,7	17,6	471,1	137,7
4'	6318,6	4,6	1825,1	1112,3	718,7	30,8	601,1	329,0
5'	7393,2	1,8	1543,8	1364,3	797,9	31,2	391,4	329,2
6'	7260,1	4,7	1708,3	1558,2	781,4	28,8	504,6	134,8
7'	8470,6	5,9	1853,6	1658,8	769,0	17,2	498,6	129,5
8'	7195,9	2,4	1730,5	1304,1	699,5	14,0	519,7	209,4
1''	9640,5	2,4	1681,4	1881,6	854,3	31,3	327,6	291,6
2''	9352,0	3,0	1711,1	2167,4	855,1	76,5	443,3	384,2
3''	8429,7	2,0	1892,4	1090,7	781,2	15,7	351,9	137,5
4''	8757,9	2,3	1969,4	1485,1	718,5	24,2	568,2	391,6
5''	8955,6	5,1	1877,6	1657,7	759,2	17,4	421,6	338,6
6''	8448,4	2,9	1598,4	1584,4	746,1	20,2	462,3	359,0
7''	8356,7	3,8	1889,3	1976,5	756,8	12,6	624,2	171,1
8''	8895,8	5,3	1810,4	1468,4	727,5	18,1	517,4	214,0

Метал који се највише истакао у прекорачењу дозвољених граничних вредности, чак пет до девет пута, је **кадмијум** (Cd) (Слика 4.12 (б)). Није уочена никаква правилност код расподеле концентрације кадмијума по профилу пруге. У случају попречног профила 2 регистрована су већа прекорачења допуштених вредности.

Кобалт (Co) је такође био присутан у недозвољеним количинама (Слика 4.12 (в)), са посебним освртом на позицију испод ножице застора (узорак 3"), где је регистровано прекорачење максимално дозвољене количине чак 3,5 пута. Остали узорци су са прекораченим садржајем кобалта, за око 30% до 50% преко дозвољене вредности. Код упоређења узорака, изузев узорка 3", нема значајнијих скокова. У случају попречног профила 2 регистрована су већа прекорачења допуштених вредности.

Позиције испод ножице застора (узорци 4' и 4") су се издвојиле у погледу концентрације **цинка** (Zn), а код попречног профила 2 (узорак 4") је дошло и до прекорачења дозвољених вредности за око 15% (Слика 4.12 (г)). **Никл** (Ni) са дозвољеном границом 35 ppm (Табела 2.3) није достигао граничне вредности, али су регистроване вредности јако блиске максималној, те их не треба занемарити због кумулативног карактера тешких метала. Остали метали издвојени ICP-OES анализом су у дозвољеним границама (Табела 4.5).

Резултати из Табеле 4.5 истичу концентрацију **гвожђа** (Fe). Оно што је нарочито привукло пажњу јесте истоветност регистрованих вредности у свим испитиваним узорцима. Наиме, уочено је да је опсег концентрације гвожђа од 1987,5 ppm до 2128,5 ppm, где је разлика максималне и минималне регистроване вредности приближно 7%. Разлика у концентрацији гвожђа измереној у оси колосека одмах испод застора (узорци 1' и 1") и концентрације на дубини од 1,3 m испод тих позиција (узорци 2' и 2") је безначајна. Штавише, могло би се рећи да је гвожђе донекле равномерно распоређено по трупку пруге и да је миграција на високом нивоу, како у самом трупку, тако и у бочним каналима. Запажено је да је најмања концентрација гвожђа измерена испод ножице застора (узорци 3', 3", 4' и 4") и у каналима (узорци 7', 7", 8' и 8"), што је у потпуној супротности са максималним регистрованим вредностима осталих испитаних метала.



Слика 4.12 Концентрације тешких метала измерене помоћу ICP-OES спектрометра у попречном профилу 1 и попречном профилу 2 у поређењу са максималним дозвољеним вредностима истих према Уредби РС и према ЕУ Директиви: (а) бакар – Cu; (б) кадмијум – Cd; (в) кобалт – Co; (г) цинк – Zn

Дијаграми на Сликама 4.12 (а), 4.12 (б) и 4.12 (г) приказују поређење максималних препоручених вредности према Уредби РС и ЕУ Директиви за Cd, Cu и Zn, респективно. Кобалт (Co) није обухваћен ЕУ Директивом, па је стога извршено поређење само са вредностима прописаним Уредбом РС. Иначе, у случају кадмијума (Слика 4.12 (б)) на свим испитаним позицијама, а у поређењу са ЕУ Директивом, дозвољена вредност од 1 ppm је вишеструко прекорачена. Чак и у поређењу са дозвољеном вредношћу према ЕУ Директиви (Табела 2.3) од 3 ppm, измерена вредност је дупло већа.

Анализом дијаграма са Слика 4.12 (а)–(г), долази се до закључка да су максималне вредности концентрације метала регистроване на положајима ножица застора оба профила (узорци са локација 3 и 4). Поред ових вредности, од значаја је

количина метала измерена у каналима за одводњавање (узорци на локацијама 7 и 8), а по средини колосека само у случају Cd (узорци на локацијама 1 и 2).

Грубом анализом вредности добијених XRF спектрометом и ICP-OES спектрометром уочава се да су вредности регистроване техником XRF знатно више. Вредности добијене анализом у ICP-OES спектрометру би биле приближније онима снимљеним помоћу XRF-а, под условом да је раствор био припремљен искључиво хлороводоничном киселином. На тај начин би концентрација издвојених метала била већа. Пошто је узорак испитиваног тла третиран блажим раствором хлороводоничне киселине, а не концентрованом хлороводоничном киселином, издвојене су и мање количине метала из раствора. Циљ испитивања је био да се у лабораторијским условима симулира испирање трупа пруге атмосферским водама, где хлороводонична киселина у додатој количини треба да симулира ефекат киселих киша.

4.3 ИЗВОЂЕЊЕ ГЛАВНИХ ЗАКЉУЧАКА ЗА ПОТРЕБЕ ДАЉЕГ ИСТРАЖИВАЊА

Сагледавши горе наведене резултате добијене контролом узорака земљишта из трупа пруге у насипу помоћу техника XRF и ICP-OES, закључено је следеће:

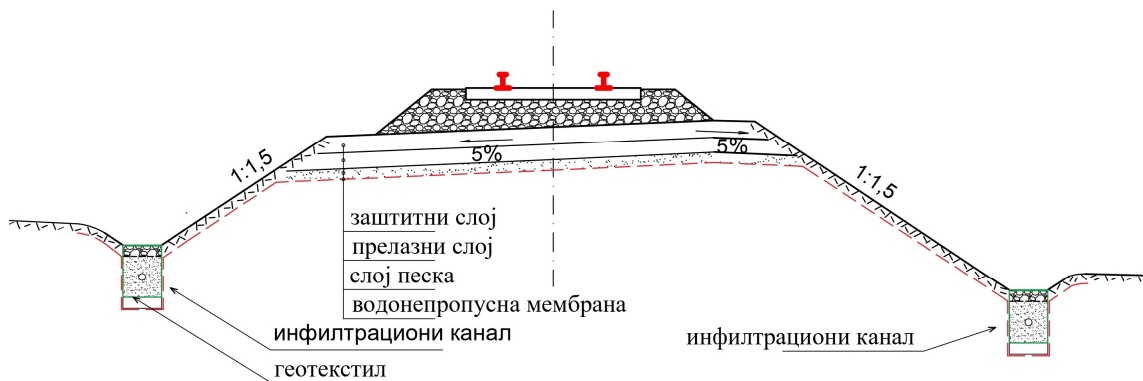
- Потврђено је присуство тешких метала у трупу железничке пруге и да значајан део њих прекорачује максималне дозвољене вредности тих метала у земљишту, а које су прописане одговарајућим актом Републике Србије (Уредба РС) и обавезујућим документом Европске Уније (ЕУ Директива). Овим сазнањима потврђена је оправданост и дата потпора даљем истраживању могућих решења, која би на самоодржив начин елиминисала или макар смањила емисију тешких метала у околину. Потребно је било осврнути се и на метале који нису прекорачили дозвољене вредности, пошто имају могућност нагомилавања.
- Највећа концентрација опасних метала регистрована је на месту ножице застора и у каналима за одводњавање. Ови подаци су најзначајни за предлагање решења положаја и облика елемената самоодрживих технологија. Закључак је, дакле, да тамо где је најизраженији проток атмосферских падавина (застор и канали за одводњавање), ту је и највећа концентрација метала, те је важно пратити пут

отицања падавина. Овај закључак је подједнако важан и за будућа истраживања загађења у трупуге, пре свега при одабиру позиција за узорковање.

- Можда најзначајнији део закључка је потврђена инфилтрација тешких метала у доње слојеве трупа пруге. Важно је напоменути да је у горе наведеном испитивању узорковање рађено до дубине од 1,3 m, што даље значи да није познато до које дубине метали могу да се инфилтрирају и угрозе квалитет подземних вода. С тим у вези, потребно је истражити могућности спречавања инфилтрације тешких метала у доње слојеве трупа пруге.

5 ИСПИТИВАЊЕ ФИЛТРАЦИОНОГ КАПАЦИТЕТА РАЗЛИЧИТИХ ФРАКЦИЈА РЕЧНОГ АГРЕГАТА У КОМБИНАЦИЈИ СА АКТИВНИМ УГЉЕМ

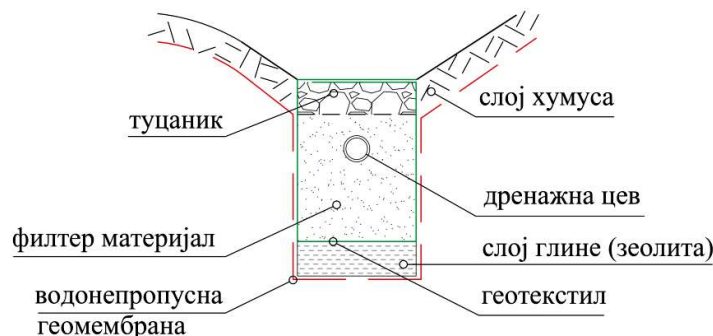
На основу изведених закључака у претходном поглављу, а са циљем да се смањи инфилтрација тешких метала у тло ослобођених одвијањем железничког саобраћаја, предложена су решења у виду инфилтрационих канала и њихова употреба уместо класичних одводних јаркова. Као мера којом би се смањила инфилтрација у ниже слојеве трупa пруге предвиђена је употреба водонепропусне мембране, постављене испод заштитног и прелазног слоја. Изглед предложеног решења трупa пруге са свим елементима дат је на Слици 5.1.



Слика 5.1 Изглед трупa пруге у насипу са предложеним елементима доњег строја

Водонепропусна мембрана је положена на земљани труп, изнад које је предвиђено насипање песка у најмањој могућој дебљини (мисли се на најмању могућу дебљину у погледу извођења), као баријера између водонепропусне мембране и прелазног слоја. Прелазни слој садржи мешавину ситнозрних и крупнозрних агрегата и у директном контакту са водонепропусном мембраном може изазвати њено оштећење. Предвиђено је да се водонепропусна мембрана, осим на трупу пруге, непрекидно протеже по зидовима и дну инфилтрационог канала, све до горње ивице јарка са стране канала супротно од колосека (Слика 5.2). Након полагања водонепропусне мембране у каналу, предвиђено је насипање слоја глиновитог материјала, по могућству са делимичним уделом зеолита. Овај захтев није обавезујући, али пошто је зеолит познат по високом учинку везивања тешких метала, било би значајно да се то узме у обзир код одабира материјала за слој при дну филтер канала [Hermawan et al., 2021; Medykowska et al., 2022; Velarde et al., 2023]. Слој глине би требало да прати пад канала, који би у

овом случају износио 1 % подужно као код одводних јаркова. Изнад слоја глине постављен је геотекстил који обавија филтер слој и слој туцаника, а странице геотекстила се преклапају изнад туцаника на врху филтер канала. Геотекстил треба да спречи продирање ситних честица околног тла у дренажне слојеве. Слој туцаника у филтер каналу нема филтерске особине, већ служи као потпора за хумузиране косине насипа и усека.



Слика 5.2 Изглед предложеног решења филтер канала

За потребе одређивања садржаја филтерског слоја спроведена су сопствена експериментална истраживања, помоћу којих је извршена провера филтерских способности одређених фракција речног агрегата и активног угља, у погледу отклањања тешких метала из вештачки справљеног раствора. Експеримент је заснован на великом броју истраживања других аутора који су показали да се биофилтрацијом постижу значајни резултати код смањења концентрације тешких метала, о чему је било речи у Поглављу 2.

Ефикасност уклањања тешких метала (3) представља проценат смањења концентрације тешких метала након проласка кроз филтер слој у односу на задату концентрацију тешких метала и рачуна се као:

$$E = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

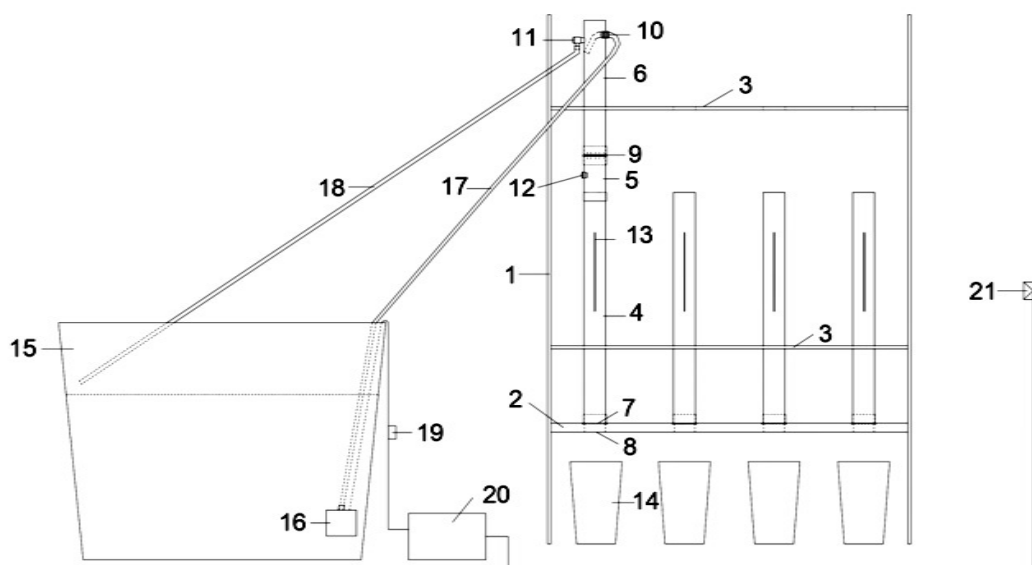
E – ефикасност уклањања тешких метала;

C_{in} – концентрација метала у припремљеном раствору (ppm);

C_{out} – концентрација метала у филтрираном узорку (ppm).

5.1. ПОСТАВКА ПОСТРОЈЕЊА ЗА СПРОВОЂЕЊЕ ЕКСПЕРИМЕНТА

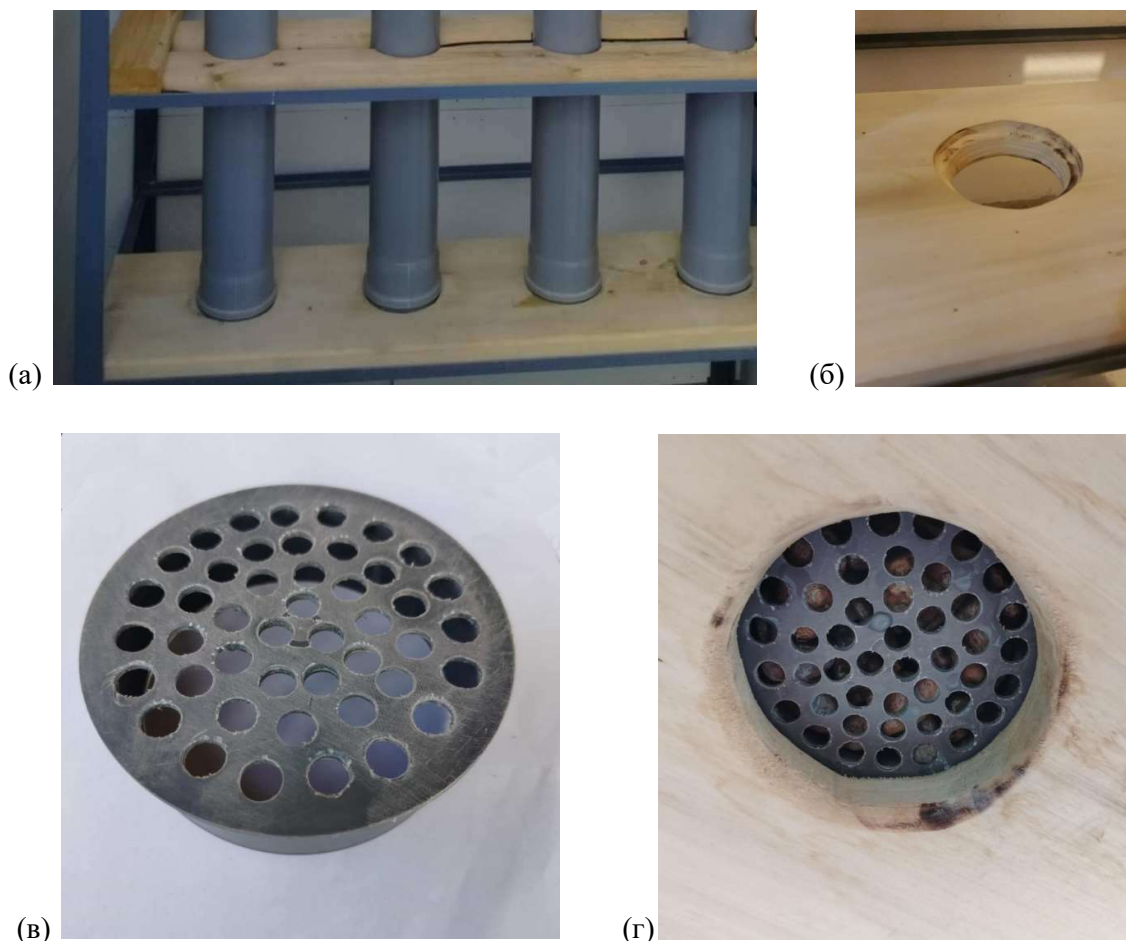
На Слици 5.3 је приказана шема модела формираног у сврхе испитивања филтрационог капацитета различитих фракција речног агрегата у комбинацији са активним угљем. Носач апаратуре је метална конструкција димензија 120×60×185 cm (ш×д×в). Модел чине четири PVC цеви напуњене различитим материјалима за филтрирање (Слика 5.4). Цеви су димензија попречног пресека Ø110 mm и висине 103 cm. Ослонац за цеви је даска дебљине 3 cm која има четири отвора, профилисана тако да цеви не испадну кроз отвор, а процеђени материјал може несметано да отиче (Слике 5.5 (а) и 5.5 (б)). Свака од цеви на дну има дренажни поклопац са рупама величине Ø10 mm, распоређеним равномерно по пресеку, тако да се кроз њих може несметано вршити дренажање. Број рупа на дренажном поклопцу износи око 45 (Слике 5.5 (в) и 5.5 (г)). Мерено од дна цеви, на висини од 50 cm почиње контролна скала (вертикални прорез у цеви) дужине 35 cm. Ова скала служи за проверу потенцијалног засићења филтер слојева и преливања изнад нивоа филтер слоја.



Слика 5.3 Шема модела: 1-носач апаратуре (метална конструкција), 2-ослонац за цеви (даска са отворима), 3-елементи за бочно придржање цеви и резервоара (даска), 4-цев са филтер материјалом, 5-дупла PVC спојница, 6-резервоар, 7-дренажни поклопац, 8-отвор ослонаца за цеви, 9-решетка резервоара, 10-прикључак доводног црева, 11-прикључак преливног црева, 12-одушац, 13-контролни стуб, 14-прихватни суд, 15-суд за моделни раствор, 16-потапајућа пумпа, 17-цево за довод моделног раствора, 18-преливно цево, 19-прекидач потапајуће пумпе, 20-адаптер, 21-једнополна утичница

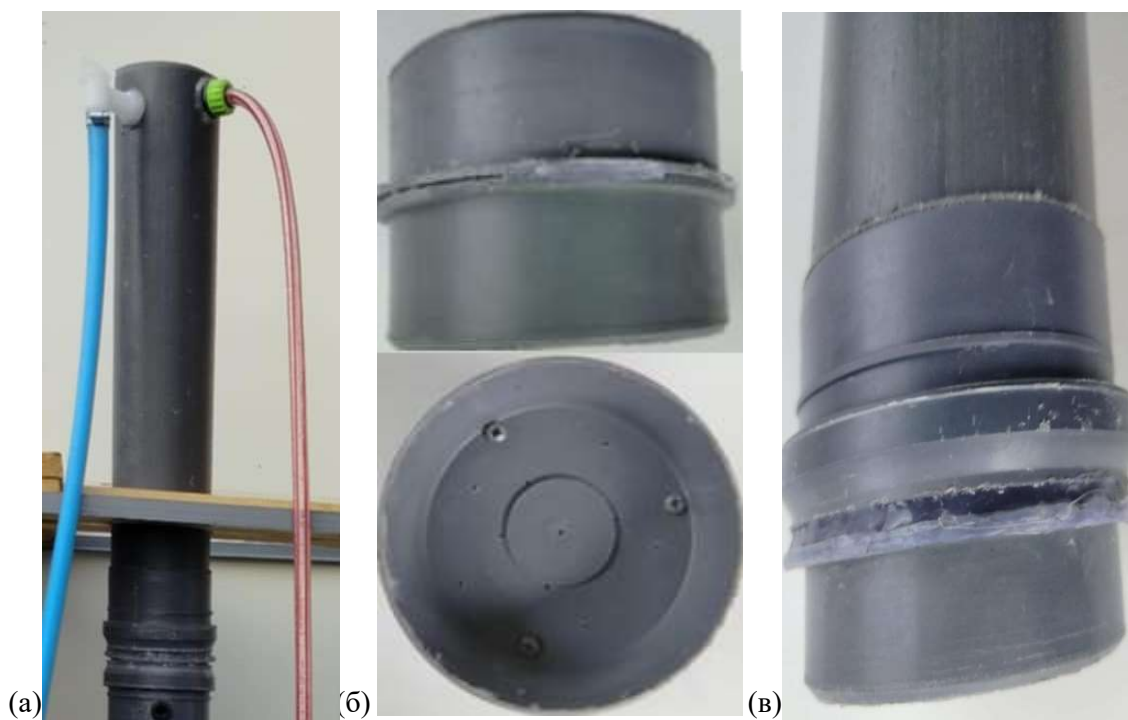


Слика 5.4 Изглед модела



Слика 5.5 Даска за ослањање цеви са филтер материјалом: (а) положај цеви у односу на даску, (б) отвор на дасци, (в) дренажни поклопац на дну цеви, (г) даска за ослањање и дренажни поклопац – поглед одоздо

Резервоар је такође направљен од PVC цеви попречног пресека $\varnothing 110$ mm и висине 55 cm (Слика 5.6(а)). Са доње стране је затворен са два међусобно залепљена поклопца са рупицама, који формирају решетку резервоара. Број рупица на залепљеним поклопцима одређује проток моделног раствора из резервоара (Слика 5.6 (б)). Моделни раствор је вештачки справљен раствор од воде и додатих соли тешких метала. Веза између резервоара и решетке резервоара је остварена помоћу заптивајуће гумице. За осигурање ове везе од могућег цурења раствора извршено је и додатно заптивање споја затопљеном пластиком, што је чини фиксном (Слика 5.6(в)). Један резервоар опслужује све четири цеви, јер се експеримент не одвија на свим цевима истовремено, већ појединачно за сваку цев понаособ. Резервоар се на цев са филтер материјалима монтира преко дупле PVC спојнице, која по средини има одушак у виду отвора, са гумицом за заптивање по самом ободу отвора.

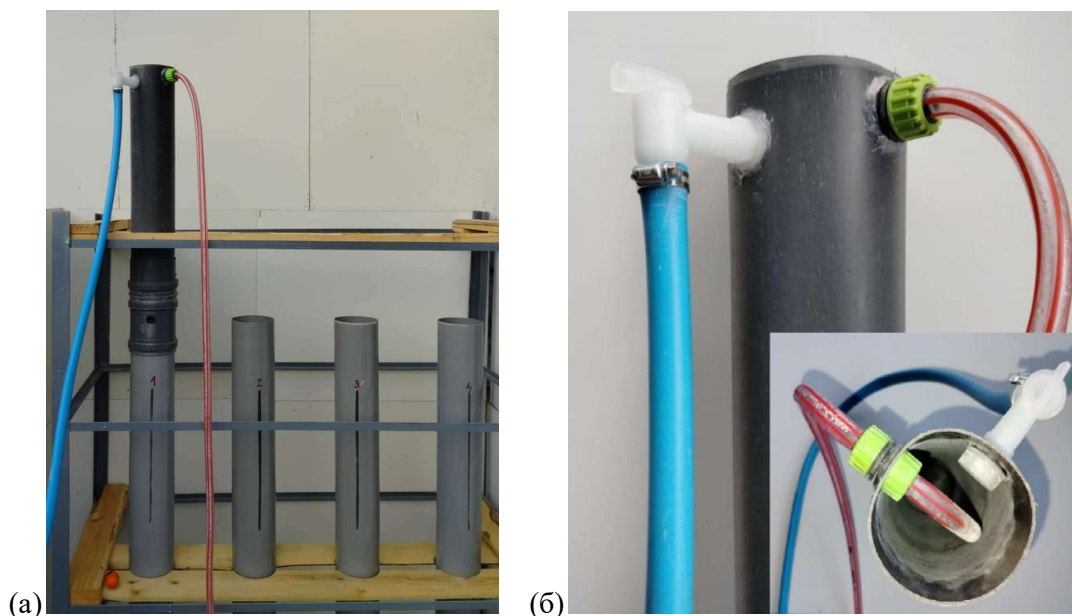


Слика 5.6 Склоп за симулацију падавина: (а) резервоар раствора, (б) спојени поклопци са рупицама за проток раствора, (в) веза резервоара и спојених поклопаца (решетке резервоара)

При самом врху резервоара изведена су два отвора (Слике 5.7 (а) и 5.7 (б)). Један отвор служи за доток моделног раствора, а други као преливна грана за константно одржавање нивоа раствора у резервоару.

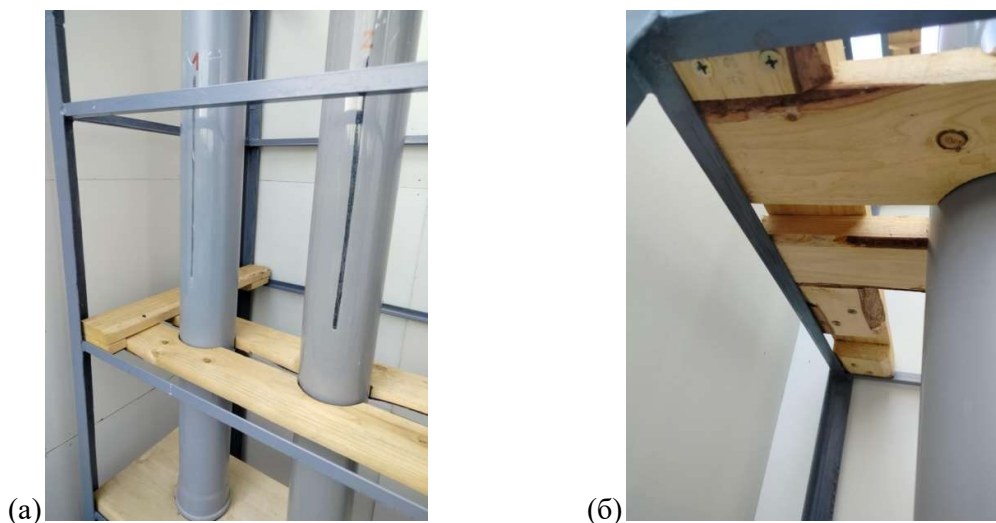
На месту улаза црева за довод раствора постављена је дупла спојница са заптивајућом гумицом са унутрашње стране зида резервоара. Са спољашње стране зида резервоара је извршено затапање пластиком за додатно осигурање везе. Црево за довод моделног раствора је пречника пола цола (12,7 mm) и 3 m дужине.

Насупрот отвора за довод моделног раствора постављена је славина на коју се монтира преливно црево 3/4 цола и дужине 2 m. Славина са унутрашње стране зида резервоара има заптивајућу гумицу, а са спољне стране је, као код дупле спојнице доводног црева, додатно осигурана затапајућом пластиком. Црево је за славину причвршћено металном шелном. Отвор за преливно црево је монтиран на 50 cm од дна резервоара за раствор. Ова висина стуба раствора у резервоару одговара потребном притиску раствора за прорачунати проток кроз решетку резервоара. Раствор се при преливању гравитацијски одводи преливним цревом до суда за моделни раствор.



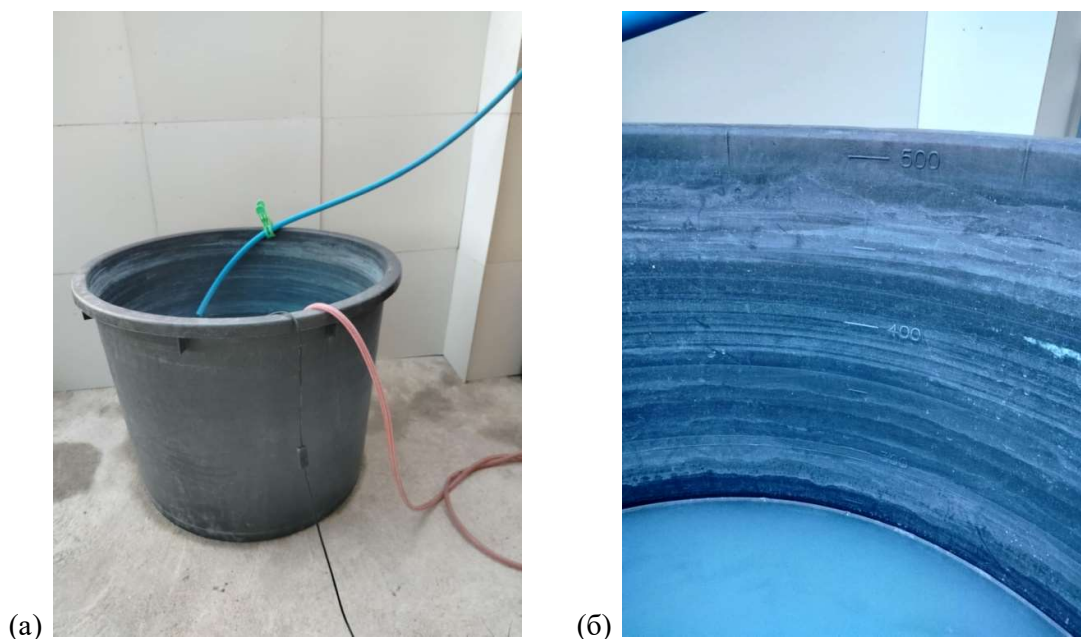
Слика 5.7 Резервоар за воду: (а) изглед резервоара када је повезан дуплом PVC спојницом са филтер цеви, (б) веза доводног и преливног црева са резервоаром

У склопу металне конструкције, осим даске за ослањање цеви, постоје и елементи за бочно придржање цеви са филтер материјалом у њој и резервоара постављеног изнад цеви. Елементи за бочно придржање цеви са филтер материјалима су на висини од 40 cm од даске за ослањање. Елементи за придржање резервоара су на висини од 120 cm од даске за ослањање. Ови елементи су монтажано-демонтажни (Слике 5.8 (а) и 5.8 (б)).



Слика 5.8 Елементи за бочно придржање цеви и резервоара: (а) у нивоу цеви са филтер материјалима (поглед одозго), (б) у нивоу цеви са филтер материјалима (поглед одоздо)

Суд за моделни раствор је запремине 500 литара течности. Постављен је у нивоу металне конструкције, а најмање 120 см испод нивоа прелива резервоара. Поседује поклопац за осигурање од упадања нежељених објеката. Моделни раствор се помоћу потапајуће пумпе транспортује из суда до улаза у резервоар (Слике 5.9 (а) и 5.9 (б)). Пумпа је капацитета 12 lit/min, на 12V, а на електромережу је повезана преко адаптера за струју. Опремљена је прекидачем (Слика 5.10).



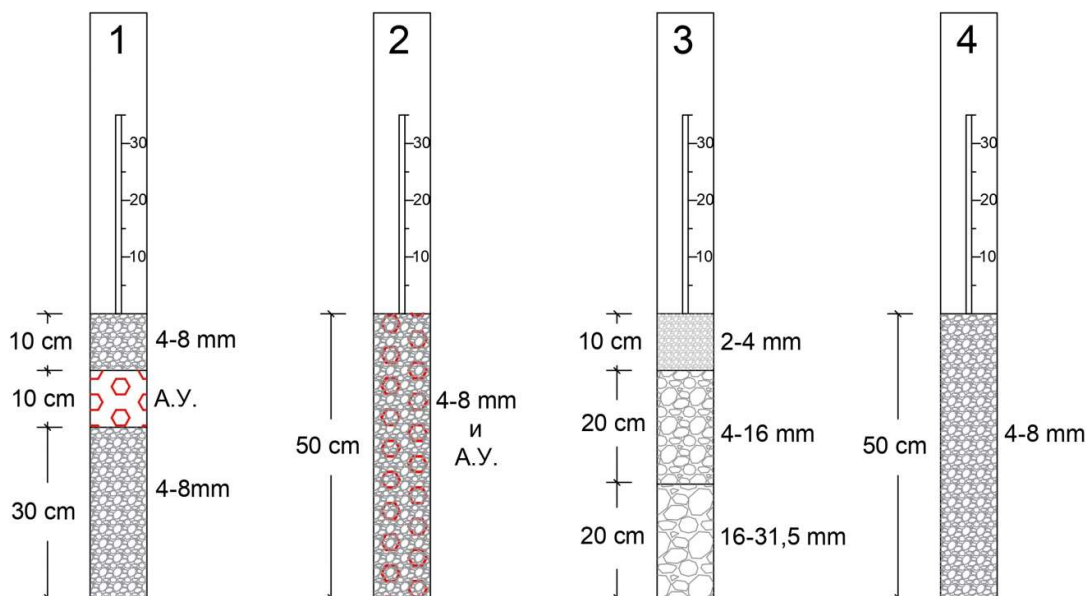
Слика 5.9 Суд за моделни раствор: (а) изглед суда са потапајућом пумпом, цревом за довод течности до резервоара и преливним цревом, (б) ознака запремине суда.



Слика 5.10 Потапајућа пумпа

5.2 ПРИПРЕМА ФИЛТЕР МЕШАВИНА

Укупно је четири цеви са са филтер материјалима, чији су филтрацијски капацитети испитани (Слика 5.11). Прва цев, означена бројем 1, садржала је речни агрегат фракције 4–8 mm у висини од 30 cm, затим 10 cm активног угља (АУ) и још 10 cm истог агрегата и исте фракције. У другој цеви, означеној бројем 2, у висини од 50 cm се налазила мешавина речног агрегата фракције 4–8 mm и активног угља (АУ), тако да активни угаљ има 20% запреминског удела. Остатак је чинио речни агрегат. Трећа цев, означена бројем 3, се састојала од речног агрегата различитих фракција поређаних на следећи начин: при дну цеви је био агрегат фракције 16–31,5 mm у висини од 20 cm, затим мешавина фракција 4–8 mm и 8–16 mm са по 50 % удела и висином од 20 cm, док је при врху у висини од 10 cm насипан агрегат величине зрна 2–4 mm. Четврта цев, са ознаком 4, представљала је контролну цев за прве две и напуњена је агрегатом фракције 4–8 mm у пуној висини филтер слоја од 50 cm. Код цеви број 1, 2 и 4 је при самом дну поређан један слој зрна агрегата 16–31,5 mm приближне дебљине 4 cm, како не би дошло до испадања материјала кроз дренажни поклопац. Цеви су пуњене материјалом уз лагано протресање цеви гуменим чекићем, без додатног збијања. Материјал је насипан у слојевима дебљине 2–5 cm уз константну проверу висине стуба материјала у цеви, како би се постигле приказане дебљине слојева.



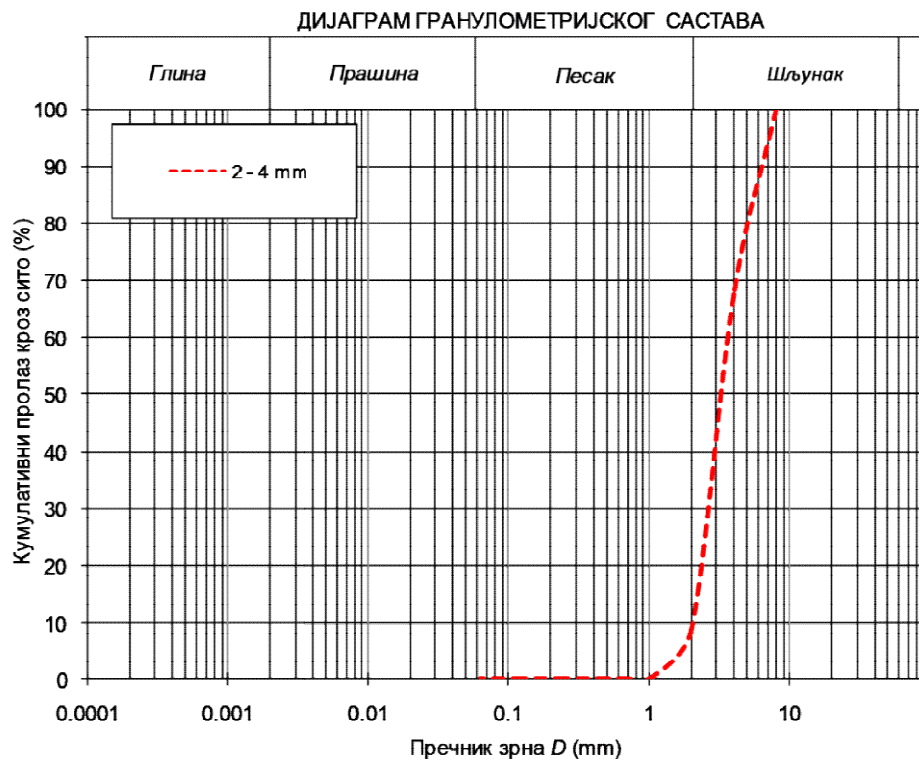
Слика 5.11 Ознаке цеви са распоредом и карактеристикама филтер слојева

Изглед речног агрегата (фракција 2–4 mm, 4–8 mm, 8–16 mm и 16–31,5 mm) и активног угља употребљених у горе наведеним филтер слојевима, приказан је појединачно на сликама 5.12 (а)–(д).



Слика 5.12 Изглед материјала коришћених за справљање филтер слојева: (а) речни агрегат фракције 2–4 mm, (б) речни агрегат фракције 4–8 mm, (в) речни агрегат фракције 8–16 mm, (г) речни агрегат фракције 16–31,5 mm, (д) активни угљ

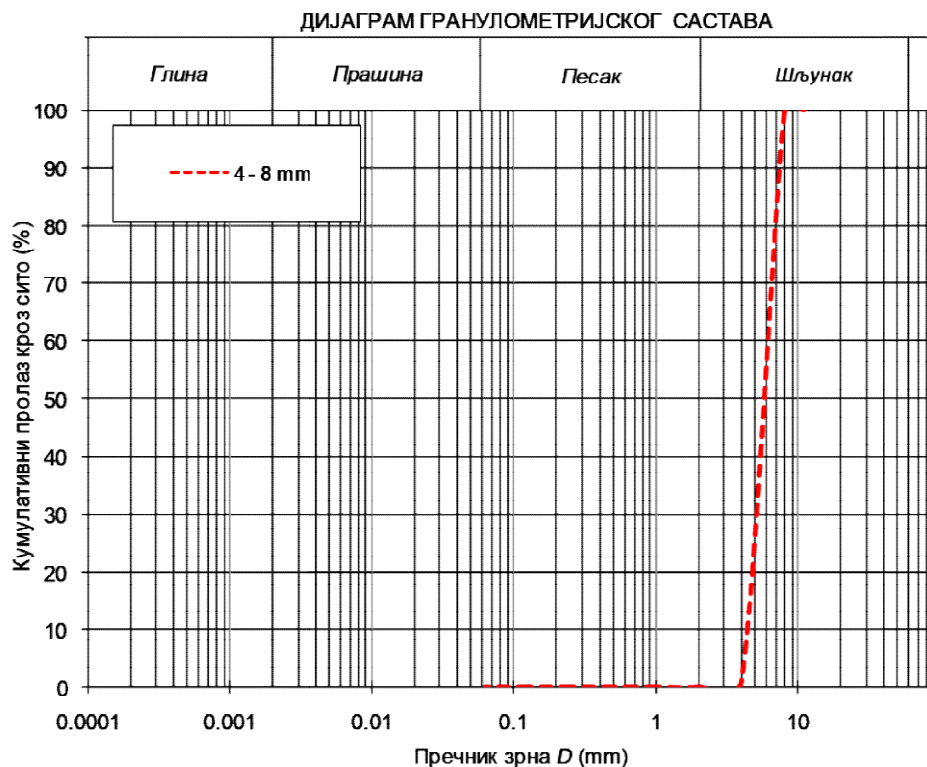
Гранулометријски састав речног агрегата коришћеног за формирање филтер слојева је приказан према фракцији агрегата на Слици 5.13 (2 – 4 mm), Слици 5.14 (4 – 8 mm), Слици 5.15 (8 – 16 mm) и Слици 5.16 (16 – 31,5 mm). Основни показатељи агрегата по фракцијама су приказани у Табели 5.1 (2 – 4 mm), Табели 5.2 (4 – 8 mm), Табели 5.3 (8 – 16 mm) и Табели 5.4 (16 – 31,5 mm). Испитивања материјала су вршена у Лабораторији за геотехнику Грађевинско-архитектонског факултета Универзитета у Нишу.



Слика 5.13 Дијаграм гранулометријског састава агрегата фракције 2 – 4 mm

Табела 5.1 Основни показатељи речног агрегата фракције 2 – 4 mm

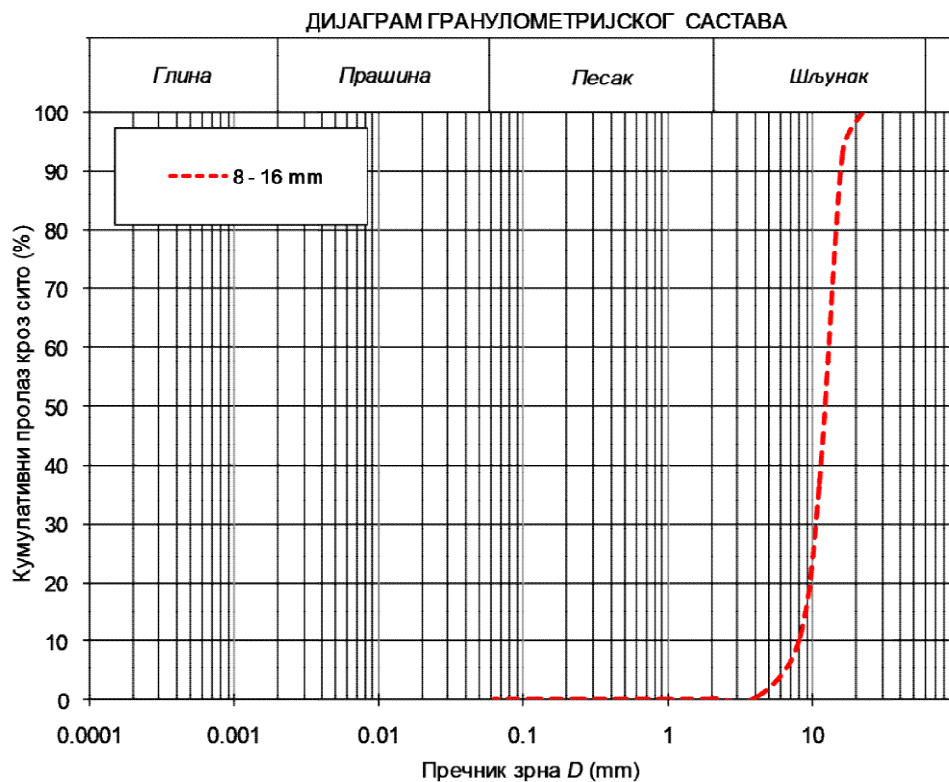
Показатељ	Симбол	Дим.	Ознака пробе на даљину			
			2 – 4 mm			
Ширина највећег зрна	$D_{\max}$	mm	7,2			
Учешће шљунка	$D > 2 \text{ mm}$	%	91,1			
Учешће песка	$2 - 0,06 \text{ mm}$	%	8,9			
Учешће прашине и глине	$D < 0,06 \text{ mm}$	%	0,0			
Карактеристичан пречник	D_{60}	mm	3,66			
“	D_{30}	mm	2,56			
“	D_{10}	mm	2,02			
“	D_{15}	mm	2,21			
“	D_{50}	mm	3,32			
“	D_{85}	mm	5,94			
Коефицијент неуједначености	C_u	1	1,8			
Коефицијент закривљења	C_z	1	0,9			



Слика 5.14 Дијаграм гранулометријског састава агрегата фракције 4 – 8 mm

Табела 5.2 Основни показатељи речног агрегата фракције 4 – 8 mm

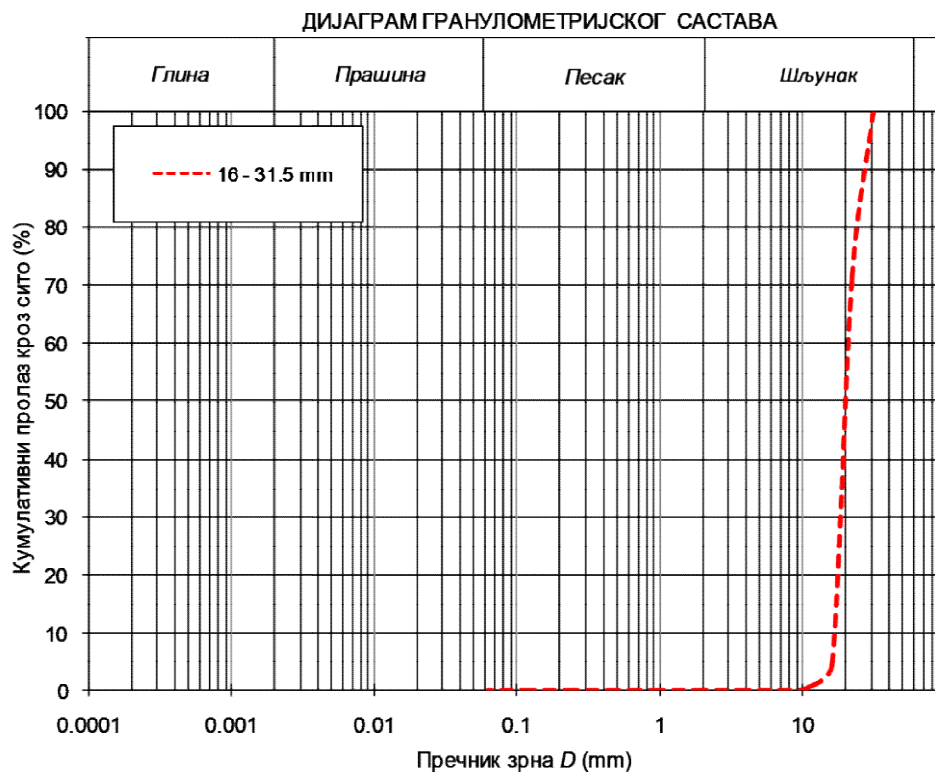
Показатељ	Симбол	Дим.	Ознака пробе на даљину			
			4 – 8 mm			
Ширина највећег зрна	$D_{\max}$	mm	9,4			
Учешће шљунка	$D > 2 \text{ mm}$	%	100,0			
Учешће песка	$2 - 0,06 \text{ mm}$	%	0,0			
Учешће прашине и глине	$D < 0,06 \text{ mm}$	%	0,0			
Карактеристичан пречник	D_{60}	mm	6,05			
“	D_{30}	mm	4,90			
“	D_{10}	mm	4,26			
“	D_{15}	mm	4,45			
“	D_{50}	mm	5,76			
“	D_{85}	mm	7,05			
Коефицијент неуједначености	C_u	1	1,4			
Коефицијент закривљења	C_z	1	0,9			



Слика 5.15 Дијаграм гранулометријског састава агрегата фракције 8 – 16 mm

Табела 5.3 Основни показатељи речног агрегата фракције 8 – 16 mm

Показатељ	Симбол	Дим.	Ознака пробе на даљину			
			8 – 16 mm			
Ширина највећег зрна	$D_{\max}$	mm	20,4			
Учешће шљунка	$D > 2 \text{ mm}$	%	99,8			
Учешће песка	$2 - 0,06 \text{ mm}$	%	0,2			
Учешће прашине и глине	$D < 0,06 \text{ mm}$	%	0,0			
Карактеристичан пречник	D_{60}	mm	13,00			
“	D_{30}	mm	10,34			
“	D_{10}	mm	7,91			
“	D_{15}	mm	8,56			
“	D_{50}	mm	12,11			
“	D_{85}	mm	16,23			
Коефицијент неуједначености	C_u	1	1,6			
Коефицијент закривљења	C_z	1	1,0			



Слика 5.16 Дијаграм гранулометријског састава агрегата фракције 16 – 31,5 mm

Табела 5.4 Основни показатељи речног агрегата фракције 16 – 31,5 mm

Показатељ	Симбол	Дим.	Ознака пробе на даљину			
			16 – 31,5 mm			
Ширина највећег зрна	$D_{\max}$	mm	29,7			
Учешће шљунка	$D > 2 \text{ mm}$	%	100,0			
Учешће песка	$2 - 0,06 \text{ mm}$	%	0,0			
Учешће прашине и глине	$D < 0,06 \text{ mm}$	%	0,0			
Карактеристичан пречник	D_{60}	mm	21,19			
“	D_{30}	mm	18,22			
“	D_{10}	mm	16,47			
“	D_{15}	mm	18,10			
“	D_{50}	mm	20,86			
“	D_{85}	mm	28,46			
Коефицијент неуједначености	C_u	1	1,3			
Коефицијент закривљења	C_z	1	1,0			

5.3 ПРИПРЕМА МОДЕЛНОГ РАСТВОРА И НАЧИН ДОЗИРАЊА

5.3.1 УДЕО ТЕШКИХ МЕТАЛА У МОДЕЛНОМ РАСТВОРУ

Основа за раствор је вода из градског водовода. За потребе припреме моделног раствора коришћене су соли тешких метала, чији су називи и количине детаљно приказани у Табели 5.5. Размеравање количина соли је вршено прецизном вагом марке Јоһан серије LT-MS500, приказаној на Слици 5.17.



Слика 5.17 Уређај за прецизно мерење количина соли тешких метала

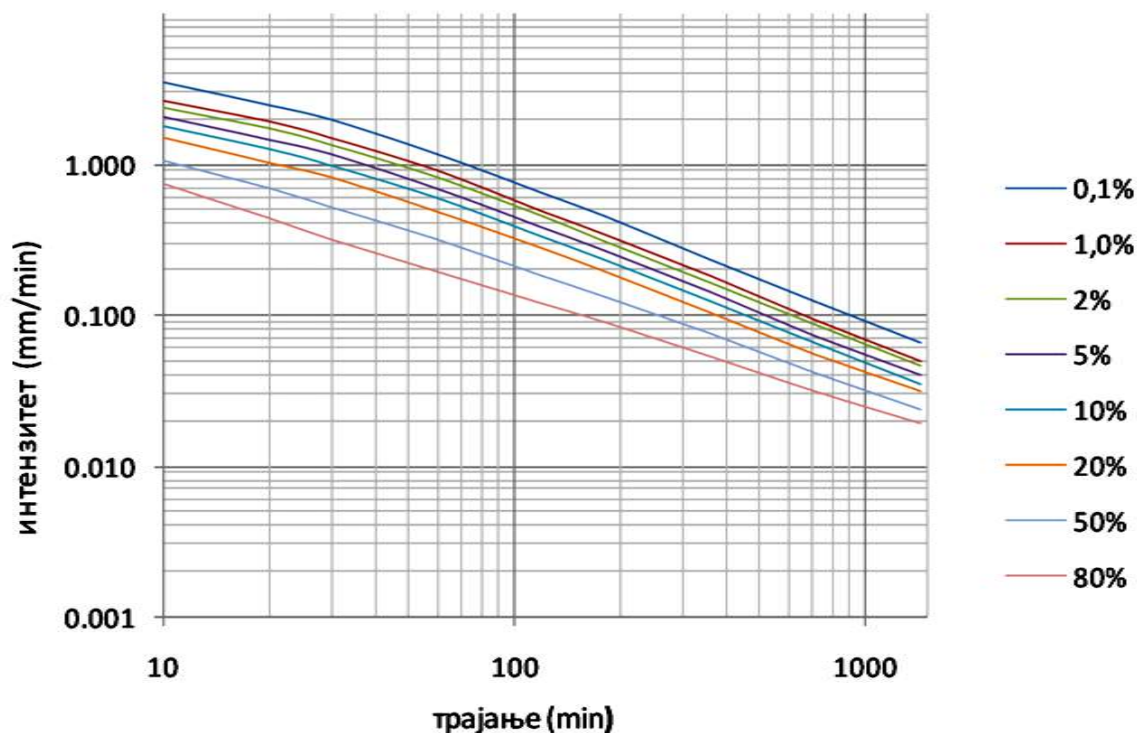
Моделни раствор је направљен растварањем по 50 g соли цинк нитрата хексахидрата ($\text{Zu}(\text{NO}_3)_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$), бакар сулфата пентахидрата ($\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$), олово (II) нитрата ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$), кадмијум нитрата тетрахидрата ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$) и никл сулфата тетрахидрата ($\text{NiSO}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$), и 30 g соли кобалт хлорида хексахидрата ($\text{CoCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$) у 500 литара воде (Табела 5.5). Због недовољне количине моделног раствора за десет циклуса испитивања, направљен је додатни раствор са истим запреминским уделом соли тешких метала, само за запремину од 200 литара (Табела 5.5).

Табела 5.5 Маса соли у одговарајућој запремини моделног раствора

НАЗИВ И ОЗНАКА СОЛИ	МАСА СОЛИ ЗА 500 lit [g]	МАСА СОЛИ ЗА 200 lit [g]
метал цинк нитрат хексахидрат $\text{Zu}(\text{NO}_3)_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$	50	20
бакар сулфат пентахидрат $\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$	50	20
олово (II) нитрат $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	50	20
кобалт хлорид хексахидрат $\text{CoCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$	30	12
кадмијум нитрат тетрахидрат $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$	50	20
никл сулфат тетрахидрат $\text{NiSO}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$	50	20

5.3.2 ОДРЕЂИВАЊЕ КОЛИЧИНЕ СИМУЛИРАНИХ ПАДАВИНА

За потребе симулирања падавина, анализирани су параметри кишних епизода за подручје града Ниша у периоду од 1951. године до 2008. године [Prohaska и Bartoš Divac, 2014]. Количина падавина је одабрана према iТкр-кривој која приказује интензитет кише у функцији трајања кише и вероватноће појаве. За испитивање су усвојене падавине са вероватноћом појаве на две године (крива 50%) у трајању од 20 min са интензитетом од око 0,75 mm/min (Слика 5.18).



Слика 5.18 Интензитет кише у функцији трајања кише и вероватноће појаве за град Ниш у периоду од 1951. године до 2008. године [Prohaska и Bartoš Divac, 2014]

У експерименту, протицаји наведених интензитета обезбеђени су одговарајућим бројем рупица на дуплом поклопцу, искључиво системом пробања. Поступак утврђивања протицаја према броју рупа је најпре рађен за 12 отвора пречника 1 mm. Мерење је вршено на резервоару идентичних карактеристика као што је резервоар на моделу (Ø110) и за константну висину стуба 50 cm. Сprovedено је пет пробних испитивања протицаја како би се утврдило време истицања за 10 lit воде. Висина воде од 50 cm је одржавана за све време истицања. Резултати пробних мерења су дати у Табели 5.6.

Табела 5.6 Резултати мерења времена протицаја 10 lit воде кроз 12 отвора пречника $\varnothing 1\text{ mm}$

Број пробног мерења протицаја	Време истицања за 10 литара воде		Интензитет протицаја
	[min sec]	[min]	[lit/min]
1	9 min 46s	9,76 min	1,025
2	9 min 38s	9,64 min	1,040
3	9 min 38s	9,64 min	1,040
4	9 min 58s	9,96 min	1,004
5	10 min 02s	10,04 min	0,996
Средња вредност прорачунатих интензитета			1,021 [lit/min]

Просечна добијена вредност од око 1,0 lit/min, што одговара падавинама од око 1 mm/min, је била већа од тражене (0,75 mm/min). То је условило смањење броја отвора на решетци резервоара. Извршено је заптивање два отвора и мерење је поновљено. За десет отвора пречника 1 mm добијени су резултати приказани у Табели 5.7.

Табела 5.7 Резултати мерења времена протицаја 10 l воде кроз 10 отвора пречника $\varnothing 1\text{ mm}$

Број пробног мерења протицаја	Време истицања за 10 литара воде		Интензитет протицаја
	[min sec]	[min]	[lit/min]
1	13 min 42s	13,70 min	0,730
2	13 min 38s	13,63 min	0,734
3	13 min 40s	13,67 min	0,731
4	13 min 40s	13,67 min	0,731
5	13 min 41s	13,68 min	0,731
Средња вредност прорачунатих интензитета			0,731 [lit/min]

Коначно, за задату висину воде у резервоару од 50 cm, утврђено је да је потребно обезбедити 10 отвора пречника 1 mm да би се при константној висини воде у резервоару обезбедио протицај 0,731 mm/min, што је близу горњој граници од 0,75 mm/min, те је испитивање спроведено са овом вредношћу протицаја.

5.4 ОПИС ТОКА ЕКСПЕРИМЕНТА

У склопу овог експерименталног истраживања спроведено је десет циклуса испитивања. Припрема експеримента обухватила је справљање моделног раствора према количинама соли тешких метала, а у свему према Табели 5.5. Најпре је извршено мешање соли са мањом количином воде, како би се обезбедило њихово боље растварање. Тако растворене соли су сипане у суд од 500 литара и настављено је са мешањем раствора. Пре покретања потапајуће пумпе, извршена је провера свих инсталација и елемената за бочну стабилност цеви. Суд за прихватање процеђеног садржаја је постављен испод цеви на којој је у тој етапи вршено испитивање. Пре сваког циклуса је спроведено мешање раствора и њено узорковање. Тек након узорковања је извршено пуштање пумпе у рад. Појединачно време рада пумпе по цеви је износило 20 минута, што одговара времену трајања падавина за које је обезбеђен проток од 0,731 mm/min. Иако је пумпа искључивана након 20 минута рада, било је потребно сачекати да се заостали садржај из филтер слоја процеди. Пошто са искључивањем пумпе опада притисак у цеви, што за последицу има спорије одвијање даљег протока, узорковање процеђеног садржаја је вршено одмах након искључења пумпе. Када процеђивање престане, процеђена течност се одлаже у посебан суд како би након завршеног циклуса процеђивања била прописно одложена. Овај поступак је поновљен на све четири цеви, чиме је комплетиран један циклус испитивања. Сваки од 10 циклуса је рађен са протоком интензитета од око 0,731 mm/min. Између испитивања цеви, било је предвиђено да се провери проходност рупица на решетки резервоара помоћу челичне игле пресека 1,0 mm, уколико дође до таложења раствора на дну резервоара. Важно је напоменути да је узорковање моделног раствора вршено пре сваког циклуса.

5.5 ОБРАДА РЕЗУЛТАТА

Концентрација метала у процеђеним узорцима је испитана ICP-OES техником са оперативним карактеристикама апарата већ приказаним у Табели 4.1. Испитивање је вршено у Лабораторији за аналитичку и физичку хемију Природно-математичког факултета Универзитета у Нишу.

5.6 РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА

Количине метала добијене мерењем помоћу ICP-OES инструмента, пре пропуштања кроз филтер и након пропуштања кроз филтер су приказане у Табели 5.9. Резултати су изражени у јединицама ppm, за 10 циклуса испитивања ефикасности предложених филтер материјала (Филтер 1, Филтер 2, Филтер 3 и Филтер 4) у отклањању тешких метала (кадмијума- Cd, кобалта- Co, бакра- Cu, никла- Ni, олова- Pb и цинка- Zn). Вредности за Cd, Co, Cu, Ni и Zn су добијене мерењем из разблажених узорака, док су вредности за Pb због мале концентрације мерене на неразблаженим узорцима.

Табела 5.8 Количине метала у моделном раствору пре (почетна концентрација) и након проласка кроз цеви са филтер материјалима (Филтер 1, Филтер 2, Филтер 3 и Филтер 4).

Редни број циклуса	Ознака метала	Количина метала (ppm)				
		Почетна концентрација	Филтер 1	Филтер 2	Филтер 3	Филтер 4
1	Cd	33,13	6,16	6,25	7,83	5,73
	Co	13,89	11,39	11,78	12,14	11,52
	Cu	2,45	1,38	1,18	1,05	1,19
	Ni	22,25	17,90	18,24	18,96	18,08
	Pb	0,42	0,11	0,15	0,11	0,06
	Zn	18,89	12,26	12,19	13,44	12,57
2	Cd	26,25	5,68	3,53	5,56	4,13
	Co	14,41	12,42	11,81	12,28	12,03
	Cu	0,37	0,35	0,22	0,11	0,08
	Ni	20,40	17,60	17,10	17,77	17,40
	Pb	0,07	0,06	0,04	0,06	0,06
	Zn	17,20	11,90	10,22	12,90	11,40
3	Cd	24,28	5,20	4,60	5,54	4,67
	Co	13,57	11,10	11,82	11,90	11,45
	Cu	1,04	0,71	0,45	0,48	0,36
	Ni	19,30	15,7	16,70	16,80	16,10
	Pb	0,14	0,06	0,07	0,12	0,07
	Zn	16,15	10,44	10,74	11,03	10,62
4	Cd	17,83	6,47	16,03	29,34	7,25
	Co	13,60	12,26	12,99	13,06	12,25
	Cu	1,55	0,96	1,08	1,83	0,96
	Ni	21,13	18,94	19,98	19,99	18,51
	Pb	0,14	0,07	0,10	0,40	0,07
	Zn	15,05	10,82	13,78	15,11	11,32
5	Cd	8,73	7,25	5,55	7,43	5,50
	Co	12,70	11,90	11,44	12,55	11,59

	Cu	0,73	0,64	0,31	0,50	0,55
	Ni	18,03	16,70	15,81	17,52	16,31
	Pb	0,18	0,16	0,17	0,15	0,16
	Zn	11,45	8,32	7,00	8,90	7,60
6	Cd	7,76	8,62	8,82	8,86	6,15
	Co	12,92	11,86	11,81	12,10	11,05
	Cu	0,66	0,62	0,69	0,70	0,42
	Ni	18,2	16,40	16,30	16,70	15,4
	Pb	0,24	0,10	0,17	0,15	0,15
	Zn	9,33	6,61	6,50	6,74	5,50
7	Cd	22,55	6,47	5,98	6,03	6,10
	Co	14,01	12,36	12,68	13,24	12,75
	Cu	2,33	1,81	1,48	1,50	1,29
	Ni	21,52	18,73	19,03	20,04	19,5
	Pb	0,36	0,20	0,16	0,22	0,18
	Zn	17,52	11,53	11,47	12,27	11,10
8	Cd	18,72	7,69	5,93	6,60	5,75
	Co	13,98	12,70	12,47	13,13	12,43
	Cu	1,36	1,10	0,98	0,93	0,80
	Ni	19,70	17,70	17,31	18,30	17,00
	Pb	0,29	0,30	0,22	0,27	0,31
	Zn	15,00	10,34	10,01	10,70	9,40
9	Cd	7,98	6,95	7,05	7,50	6,00
	Co	13,52	12,30	12,30	12,73	11,92
	Cu	0,81	0,79	0,57	0,53	0,51
	Ni	18,70	16,60	16,70	17,20	15,76
	Pb	0,32	0,26	0,24	0,23	0,28
	Zn	9,78	7,30	6,90	7,16	6,50
10	Cd	9,17	7,08	6,53	6,71	6,88
	Co	13,55	11,90	11,60	11,76	11,57
	Cu	2,10	1,65	0,80	0,69	0,61
	Ni	20,38	17,60	17,06	17,29	16,92
	Pb	0,27	0,20	0,21	0,24	0,21
	Zn	10,95	6,13	5,71	5,46	5,19

Ради лакшег сагледавања вредности остатка тешких метала у раствору, након проласка кроз одговарајуће филтер материјале, прорачунати су проценти заостале концентрације метала у процеђеном раствору. Због уочљиве хетерогености почетних концентрација у оквиру сваког метала понаособ (Табела 5.9), однос почетних концентрација и концентрација након проласка кроз филтер материјале је дата у процентима. Свака почетна концентрација метала за одговарајући циклус испитивања представља 100%, док је остатак изражен у односу на одговарајућу почетну концентрацију посматраног метала. Количине тешких метала у моделном раствору након проласка кроз филтер цеви изражене у процентима су приказане у Табели 5.10.

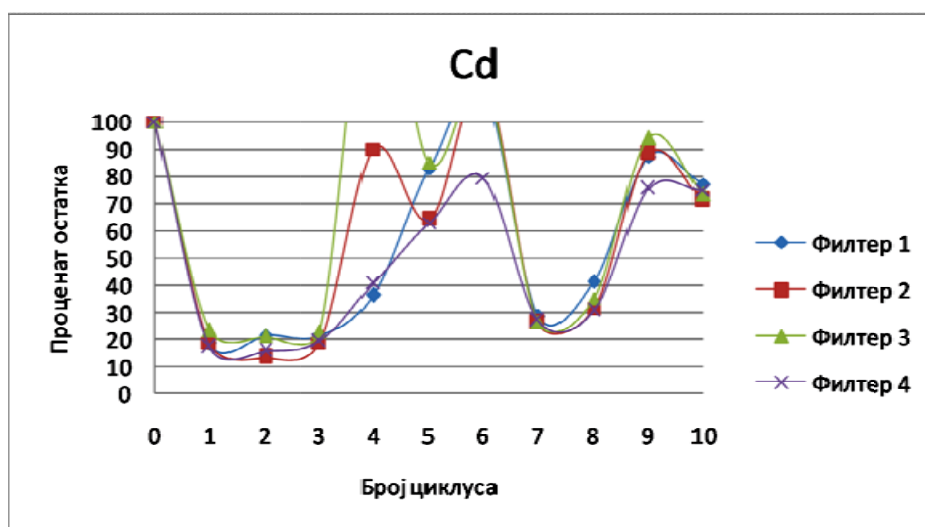
Табела 5.9 Количине тешких метала у моделном раствору након проласка кроз филтер цеви (остатак), изражене у процентима

Редни број циклуса	Ознака метала	Почетна концентрација (%)	Остатак (%)			
			Филтер 1	Филтер 2	Филтер 3	Филтер 4
1	Cd	100	18,6	18,9	23,6	17,3
	Co	100	82,0	84,8	87,4	83,0
	Cu	100	56,0	48,0	42,7	48,6
	Ni	100	80,4	82,0	85,2	81,3
	Pb	100	38,1	34,8	26,2	15,3
	Zn	100	65,0	64,6	71,2	66,5
2	Cd	100	21,6	13,4	21,2	15,7
	Co	100	86,2	82,0	85,2	83,5
	Cu	100	94,5	59,0	30,1	22,0
	Ni	100	86,3	83,8	87,1	85,3
	Pb	100	87,3	56,8	85,4	76,4
	Zn	100	69,2	59,4	75,0	66,3
3	Cd	100	21,4	18,9	22,8	19,2
	Co	100	81,8	87,1	87,8	84,4
	Cu	100	67,8	42,8	46,1	34,6
	Ni	100	81,3	86,5	87,0	83,4
	Pb	100	45,6	53,3	91,2	48,3
	Zn	100	64,6	66,5	69,3	65,7
4	Cd	100	36,3	90,0	165,0	40,6
	Co	100	90,1	95,5	96,0	90,1
	Cu	100	61,6	69,4	118,0	61,6
	Ni	100	89,6	94,5	94,6	87,6
	Pb	100	51,4	69,1	280,0	48,3
	Zn	100	71,9	91,5	100,0	75,2
5	Cd	100	83,0	64,0	85,0	63,0
	Co	100	93,7	90,0	98,8	91,2
	Cu	100	88,3	42,8	69,0	75,8
	Ni	100	92,6	87,7	97,2	90,5
	Pb	100	84,7	89,3	83,8	87,0
	Zn	100	72,7	61,3	77,7	66,4
6	Cd	100	111,0	114,0	114,0	79,3
	Co	100	91,8	91,4	93,6	85,5
	Cu	100	94,0	105,0	106,0	63,6
	Ni	100	90,1	89,6	91,8	84,6
	Pb	100	43,2	68,9	61,6	61,7
	Zn	100	70,8	69,7	72,2	58,9
7	Cd	100	28,7	26,5	26,7	27,0
	Co	100	88,3	90,5	94,5	91,0
	Cu	100	77,5	63,5	64,4	55,2
	Ni	100	87,0	88,4	93,1	90,6
	Pb	100	54,5	45,2	61,3	49,6
	Zn	100	65,8	65,4	70,0	63,4

8	Cd	100	41,1	31,7	35,3	30,7
	Co	100	90,8	89,2	93,9	88,9
	Cu	100	80,9	72,0	68,4	58,8
	Ni	100	89,8	87,9	92,9	86,3
	Pb	100	104,0	76,4	91,3	106,0
	Zn	100	69,0	66,7	71,3	62,7
9	Cd	100	87,1	88,3	94,0	75,2
	Co	100	91,0	91,0	94,2	88,2
	Cu	100	98,0	70,8	65,2	63,4
	Ni	100	88,8	89,3	92,0	84,3
	Pb	100	80,0	73,7	72,0	88,4
	Zn	100	74,6	70,5	73,2	66,5
10	Cd	100	77,1	71,2	73,2	75,0
	Co	100	87,9	85,6	86,8	85,4
	Cu	100	78,5	37,9	32,9	29,1
	Ni	100	86,4	83,7	84,8	83,0
	Pb	100	75,2	78,9	90,0	77,8
	Zn	100	56,0	52,1	49,9	47,4

5.6.1 КАДМИЈУМ (Cd)

На основу вредности из Табеле 5.9 проценти остатка кадмијума у моделном раствору након проласка кроз карактеристичне филтер слојеве (Филтер 1, Филтер 2, Филтер 3 и Филтер 4), за десет циклуса испитивања, приказани су помоћу дијаграма на Слици 5.19.



Слика 5.19 Проценати остатка кадмијума у моделном раствору након проласка кроз карактеристичне филтер слојеве (Филтер 1, Филтер 2, Филтер 3 и Филтер 4) за десет циклуса испитивања

Анализом дијаграма са Сlike 5.19, уочено је пар битних особина посматраних филтера. Пре свега, изузетно су добре перформансе свих филтера у прва три циклуса испитивања. У ова три циклуса благо предњаче Филтер 2 и Филтер 4 у погледу смањења кадмијума и у случају сваког од филтера, уопштено гледано, концентрација кадмијума се смањује приближно 77–83%. У наредна три циклуса испитивања (4, 5 и 6) уочен је скок вредности кадмијума и ту предњачи Филтер 3, а одмах затим Филтер 2 и Филтер 1. У оквиру ових циклуса (4, 5 и 6), Филтер 4 задржава највећи проценат кадмијума у поређењу са остала три филтера. Циклус 7 враћа сва четири филтера у опсег смањења кадмијума од 70–80% у односу на почетну концентрацију, а онда се полако повећава проценат проласка кадмијума кроз све разматране филтере све до циклуса 9 у којем поново долази до пада процента проласка кадмијума. Из приказаних дијаграма на Слици 5.19 и вредности из Табеле 5.9, јасно је да смањење количине кадмијума постоји, али да очигледно проценат смањења проласка кадмијума,

посматрајући сваки циклус понаособ, зависи и од количине дозирањог метала, тј. броја циклуса. С тим у вези, прорачуната је количина задржаног и процеђеног кадмијума у сваком од филтера по циклусима, а вредности су приказане у Табели 5.10.

Табела 5.10 Расподела количине задржаног и процеђеног кадмијума по циклусима, са коначним односом након десет циклуса испитивања

Број циклуса		Концентрација за Cd (ppm)			
		Филтер 1	Филтер 2	Филтер 3	Филтер 4
1	процеђена количина	6,16	6,25	7,83	5,73
	остатак у филтеру	26,97	26,88	25,3	27,4
	укупно дозирањо	33,13*			
2	процеђена количина	5,68	3,53	5,56	4,13
	остатак у филтеру	20,57	22,72	20,69	22,12
	$\sum_{i=1}^2$ укупно дозирањо	33,13 + 26,25* = 59,38			
	$\sum_{i=1}^2$ процеђена количина	11,84	9,78	13,39	9,86
	$\sum_{i=1}^2$ остатак у филтеру	47,54	49,6	45,99	49,52
3	процеђена количина	5,20	4,60	5,54	4,67
	остатак у филтеру	19,08	19,68	18,74	19,61
	$\sum_{i=1}^3$ укупно дозирањо	59,38 + 24,28* = 83,66			
	$\sum_{i=1}^3$ процеђена количина	17,04	14,38	18,93	14,53
	$\sum_{i=1}^3$ остатак у филтеру	66,62	69,28	64,73	69,13
4	процеђена количина	6,47	16,03	29,34	7,25
	остатак у филтеру	11,36	1,80	- 11,51	10,58
	$\sum_{i=1}^4$ укупно дозирањо	83,66 + 17,83* = 101,49			
	$\sum_{i=1}^4$ процеђена количина	23,51	30,41	48,27	21,78
	$\sum_{i=1}^4$ остатак у филтеру	77,98	71,08	53,22	79,71
5	процеђена количина	7,25	5,55	7,43	5,50
	остатак у филтеру	1,48	3,18	1,30	3,23

	$\sum_{1}^5$ укупно дозирано	$101,49 + \underline{8,73}^* = 110,22$			
	$\sum_{1}^5$ процеђена количина	30,76	35,96	55,70	27,28
	$\sum_{1}^5$ остатак у филтеру	79,46	74,26	54,52	82,94
6	процеђена количина	8,62	8,82	8,86	6,15
	остатак у филтеру	- 0,86	-1,06	- 1,10	1,61
	$\sum_{1}^6$ укупно дозирано	$110,22 + \underline{7,76}^* = 117,98$			
	$\sum_{1}^6$ процеђена количина	39,38	44,78	64,56	33,43
	$\sum_{1}^6$ остатак у филтеру	78,60	73,20	53,42	84,55
7	процеђена количина	6,47	5,98	6,03	6,10
	остатак у филтеру	16,08	16,57	16,52	16,45
	$\sum_{1}^7$ укупно дозирано	$117,98 + \underline{22,55}^* = 140,53$			
	$\sum_{1}^7$ процеђена количина	45,85	50,76	70,59	39,53
	$\sum_{1}^7$ остатак у филтеру	94,68	89,77	69,94	101,00
8	процеђена количина	7,69	5,93	6,60	5,75
	остатак у филтеру	11,03	12,79	12,12	12,97
	$\sum_{1}^8$ укупно дозирано	$140,53 + \underline{18,72}^* = 159,25$			
	$\sum_{1}^8$ процеђена количина	53,54	56,69	77,19	45,28
	$\sum_{1}^8$ остатак у филтеру	105,71	102,56	82,06	113,97
9	процеђена количина	6,95	7,05	7,50	6,00
	остатак у филтеру	1,03	0,93	0,48	1,98
	$\sum_{1}^9$ укупно дозирано	$159,25 + \underline{7,98}^* = 167,23$			
	$\sum_{1}^9$ процеђена количина	60,49	63,74	84,69	51,28

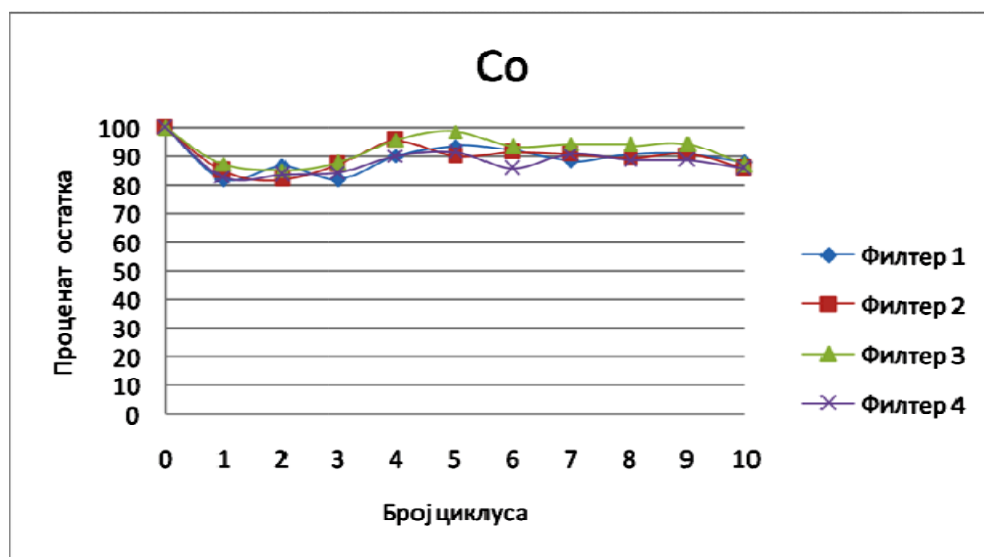
	$\sum_1^9$ остатак у филтеру	106,74	103,49	82,54	115,95
10	процеђена количина	7,08	6,53	6,71	6,88
	остатак у филтеру	2,09	2,64	2,46	2,29
	$\sum_1^{10}$ укупно дозирано	<i>167,23 + 9,17* = 176,40</i>			
	$\sum_1^{10}$ процеђена количина	67,57	70,27	91,40	58,16
	$\sum_1^{10}$ остатак у филтеру	108,83	106,13	85,00	118,24

*количина кадмијума (ppm) дозираног у посматраном циклусу испитивања

Након спроведених десет циклуса испитивања, утврђено је да је укупно по сваком од филтера било дозирано 176,4 ppm кадмијума. Највише кадмијума, око 67% од укупне дозиране количине, је задржано у Филтеру 4 (118,24 ppm), а најмање у Филтеру 3 (85 ppm – 48% дозиране количине). Филтер 1 и Филтер 2 су дали приближне вредности када је количина задржаног кадмијума у питању, 108,83 ppm и 106,13 ppm респективно, што је приближно 61% од укупне дозиране количине. Према изложеним резултатима и њиховој дискусији, константовано је да је Филтер 4 показао најбоље карактеристике у погледу задржавања кадмијума у филтер слоју, како појединачно по циклусима, тако и по завршетку десетог циклуса испитивања, са чак 67% задржаног кадмијума у односу на укупну дозирану количину за тих десет циклуса. Запажено је испирање акумулираног кадмијума у 4. циклусу за Филтер 3, као и у 6. циклусу за Филтере 1, 2 и три, када је испрана већа количина кадмијума од дозиране количине у наведеним циклусима.

5.6.2 КОБАЛТ (Co)

На основу вредности из Табеле 5.9, проценти смањења кобалта у моделном раствору након проласка кроз карактеристичне филтер слојеве (Филтер 1, Филтер 2, Филтер 3 и Филтер 4), за десет циклуса испитивања, приказани су помоћу дијаграма на Слици 5.20.



Слика 5.20 Проценти остатка кобалта у моделном раствору након проласка кроз карактеристичне филтер слојеве (Филтер 1, Филтер 2, Филтер 3 и Филтер 4) за десет циклуса испитивања

Код кобалта се, слично као код кадмијума, уочава највећи проценат задржавања кобалта филтерима у прва три циклуса (циклуси 1, 2 и 3). Приметна је блага варијација у погледу смањења процента задржавања код четвртог и петог циклуса. Након 5. циклуса, дијаграми сва четири филтера попримају тренд константе. Убедљиво највеће задржавање кобалта је примећено код Филтера 4, а најмање код Филтера 3. У оквиру свих десет циклуса испитивања, а појединачно по циклусу за сваки од филтера, није задржано више од 20% кобалта. Анализом вредности из Табеле 5.9 и дијаграма са Слике 5.20, није запажено испирање акумулираног кобалта у филтерима, односно испирање веће количине тог метала у односу на дозирану вредност, посматрано по циклусу. Кумулативно гледано, понашање свих филтера у погледу задржавања, односно испирања кобалта, детаљније је прорачунато у Табели 5.11.

Табела 5.11 Расподела количине задржаног и процеђеног кобалта по циклусима, са коначним односом након десет циклуса испитивања

Број циклуса		Концентрација за Со (ppm)			
		Филтер 1	Филтер 2	Филтер 3	Филтер 4
1	процеђена количина	11,39	11,78	12,14	11,52
	остатак у филтеру	2,51	2,11	1,75	2,37
	укупно дозирање	13,89*			
2	процеђена количина	12,42	11,81	12,28	12,03
	остатак у филтеру	1,99	2,60	2,13	2,38
	$\sum_{i=1}^2$ укупно дозирање	13,89 + 14,41* = 28,3			
	$\sum_{i=1}^2$ процеђена количина	23,81	23,59	24,42	23,55
	$\sum_{i=1}^2$ остатак у филтеру	4,50	4,70	3,88	4,75
3	процеђена количина	11,10	11,82	11,90	11,45
	остатак у филтеру	2,47	1,75	1,67	2,12
	$\sum_{i=1}^3$ укупно дозирање	28,3 + 13,57* = 41,87			
	$\sum_{i=1}^3$ процеђена количина	34,90	35,41	36,32	35,00
	$\sum_{i=1}^3$ остатак у филтеру	6,97	6,45	5,55	6,87
4	процеђена количина	12,26	12,99	13,06	12,25
	остатак у филтеру	1,34	0,61	0,54	1,35
	$\sum_{i=1}^4$ укупно дозирање	41,87 + 13,6* = 55,47			
	$\sum_{i=1}^4$ процеђена количина	47,16	48,40	49,38	47,25
	$\sum_{i=1}^4$ остатак у филтеру	8,31	7,06	6,09	8,22
5	процеђена количина	11,9	11,44	12,55	11,59
	остатак у филтеру	0,80	1,26	0,15	1,11
	$\sum_{i=1}^5$ укупно дозирање	55,47 + 12,7* = 68,17			
	$\sum_{i=1}^5$ процеђена количина	59,06	59,84	61,93	58,84

	$\sum_1^5$ остатак у филтеру	9,11	8,32	6,24	9,33
6	процеђена количина	11,86	11,81	12,10	11,05
	остатак у филтеру	1,06	1,11	0,82	1,87
	$\sum_1^6$ укупно дозирано	$68,17 + \underline{12,92}^* = 81,09$			
	$\sum_1^6$ процеђена количина	70,92	71,65	74,03	69,89
	$\sum_1^6$ остатак у филтеру	10,17	9,43	7,06	11,20
7	процеђена количина	12,36	12,68	13,24	12,75
	остатак у филтеру	1,64	1,32	0,76	1,25
	$\sum_1^7$ укупно дозирано	$81,09 + \underline{14,00}^* = 95,10$			
	$\sum_1^7$ процеђена количина	83,28	84,33	87,27	82,64
	$\sum_1^7$ остатак у филтеру	11,81	10,75	7,82	12,45
8	процеђена количина	12,70	12,47	13,13	12,43
	остатак у филтеру	6,02	6,25	5,60	6,29
	$\sum_1^8$ укупно дозирано	$95,10 + \underline{18,72}^* = 113,82$			
	$\sum_1^8$ процеђена количина	95,98	96,80	100,40	95,07
	$\sum_1^8$ остатак у филтеру	17,83	17,02	13,42	18,74
9	процеђена количина	12,30	12,30	12,73	11,92
	остатак у филтеру	1,22	1,22	0,79	1,60
	$\sum_1^9$ укупно дозирано	$113,82 + \underline{13,52}^* = 127,34$			
	$\sum_1^9$ процеђена количина	108,28	109,10	113,13	107,00
	$\sum_1^9$ остатак у филтеру	19,05	18,24	14,21	20,34
10	процеђена количина	11,90	11,60	11,76	11,57
	остатак у филтеру	1,65	1,95	1,79	1,98

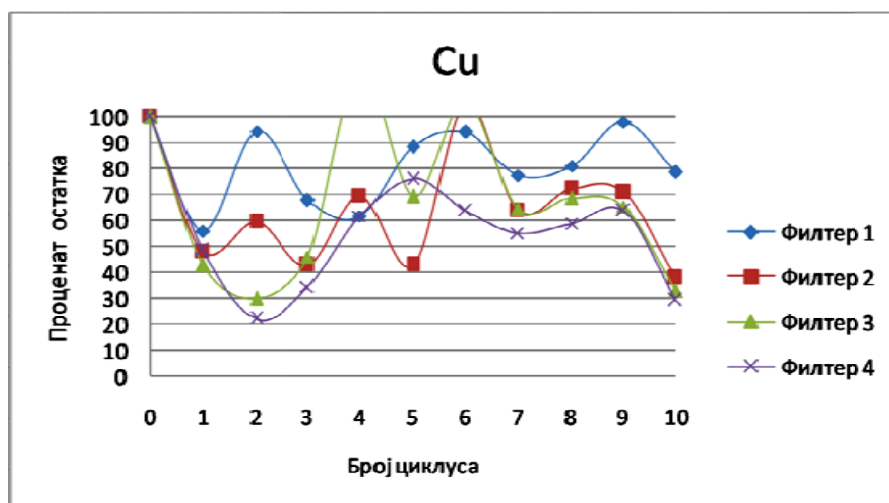
$\sum_{1}^{10}$ укупно дозирано	$127,34 + \underline{13,55}^* = 140,89$			
$\sum_{1}^{10}$ процеђена количина	120,18	120,70	124,89	118,57
$\sum_{1}^{10}$ остатак у филтеру	20,70	20,19	16,00	22,32

*количина кобалта (ppm) дозираног у посматраном циклусу испитивања

Након спроведених десет циклуса испитивања, утврђено је да је укупно по сваком од филтера било дозирано 140,89 ppm кобалта. Највише кобалта, око 16% укупне дозиране количине, је задржано у Филтеру 4 (22,32 ppm), а најмање у Филтеру 3 (16 ppm – око 11% дозиране количине). Филтер 1 и Филтер 2 дају приближне вредности када је количина задржаног кобалта у питању, 20,70 ppm и 20,19 ppm респективно, што је приближно 14,5% од укупне дозиране количине. Према изложеним резултатима и њиховој дискусији, константовано је да је Филтер 4 показао најбоље карактеристике у погледу задржавања кобалта, што је такође био случај и са кадмијумом, и то како појединачно по циклусима, тако и по завршетку десетог циклуса испитивања, са чак 16% задржаног кобалта у односу на укупну дозирану количину за тих десет циклуса.

5.6.3 БАКАР (Cu)

На основу вредности из Табеле 5.9, проценти смањења бакра у моделном раствору након проласка кроз карактеристичне филтер слојеве (Филтер 1, Филтер 2, Филтер 3 и Филтер 4), за десет циклуса испитивања, приказани су помоћу дијаграма на Слици 5.21.



Слика 5.21 Проценти остатка бакра у моделном раствору након проласка кроз карактеристичне филтер слојеве (Филтер 1, Филтер 2, Филтер 3 и Филтер 4) за десет циклуса испитивања

Анализом дијаграма са Слике 5.21, пре свега, запажена је изразита нестабилност бакра од циклуса до циклуса, у погледу испирања овог метала. Иако код првог циклуса, када је филтер још увек неконтаминиран, смањење бакра варира у опсегу од 40–60%, већ у другом циклусу код Филтера 1 и Филтера 2 буде задржана знатно мања количина. У том другом циклусу је код Филтера 1 примећено смањење за 5%, што умногоме одудара од претходног, првог циклуса. Иако су се Филтер 3 и Филтер 4 у том другом циклусу приближили смањењу од скоро 70% и 80%, респективно, у наредним циклусима су ипак показали нестабино понашање. Филтер 3 је код циклуса 4 и 6 премашао дозирану количину, када је дошло до испирања акумулираног бакра. Упоређујући положај и тренд крива свих филтера, јасно се уочава да је Филтер 4, иако са варијацијама, остварио најбољи резултат код задржавања бакра у филтеру, гледано по циклусима. Кумулативно гледано, понашање свих филтера у погледу задржавања, односно испирања бакра након десет циклуса испитивања, детаљно је прорачунато у Табели 5.12.

Табела 5.12 Расподела количине задржаног и процеђеног бакра по циклусима, са коначним односом након десет циклуса испитивања

Број циклуса		Концентрација за Cu (ppm)			
		Филтер 1	Филтер 2	Филтер 3	Филтер 4
1	процеђена количина	1,38	1,18	1,05	1,19
	остатак у филтеру	1,07	1,27	1,40	1,26
	укупно дозирано	2,45*			
2	процеђена количина	0,35	0,22	0,11	0,08
	остатак у филтеру	0,02	0,15	0,26	0,29
	$\sum_{i=1}^2$ укупно дозирано	$2,45 + 0,37* = 2,82$			
	$\sum_{i=1}^2$ процеђена количина	1,72	1,40	1,16	1,27
	$\sum_{i=1}^2$ остатак у филтеру	1,09	1,42	1,66	1,55
3	процеђена количина	0,71	0,45	0,48	0,36
	остатак у филтеру	0,33	0,59	0,56	0,68
	$\sum_{i=1}^3$ укупно дозирано	$2,82 + 1,04* = 3,86$			
	$\sum_{i=1}^3$ процеђена количина	2,44	1,85	1,64	1,63
	$\sum_{i=1}^3$ остатак у филтеру	1,42	2,01	2,22	2,23
4	процеђена количина	0,96	1,08	1,83	0,96
	остатак у филтеру	0,59	0,47	- 0,28	0,59
	$\sum_{i=1}^4$ укупно дозирано	$3,86 + 1,55* = 5,41$			
	$\sum_{i=1}^4$ процеђена количина	3,40	2,93	3,47	2,59
	$\sum_{i=1}^4$ остатак у филтеру	2,01	2,48	1,94	2,82
5	процеђена количина	0,64	0,31	0,50	0,55
	остатак у филтеру	0,09	0,42	0,23	0,18
	$\sum_{i=1}^5$ укупно дозирано	$5,41 + 0,73* = 6,14$			
	$\sum_{i=1}^5$ процеђена количина	4,04	3,24	3,97	3,14

	$\sum_1^5$ остатак у филтеру	2,10	2,90	2,17	3,00
6	процеђена количина	0,62	0,69	0,70	0,42
	остатак у филтеру	0,04	- 0,03	- 0,04	0,24
	$\sum_1^6$ укупно дозирано	$6,14 + \underline{0,66}^* = \mathbf{6,80}$			
	$\sum_1^6$ процеђена количина	4,66	3,93	4,67	3,56
	$\sum_1^6$ остатак у филтеру	2,15	2,87	2,13	3,24
7	процеђена количина	1,81	1,48	1,50	1,29
	остатак у филтеру	0,52	0,85	0,83	1,04
	$\sum_1^7$ укупно дозирано	$6,80 + \underline{2,33}^* = \mathbf{9,13}$			
	$\sum_1^7$ процеђена количина	6,47	5,41	6,17	4,85
	$\sum_1^7$ остатак у филтеру	2,66	3,72	2,96	4,28
8	процеђена количина	1,10	0,98	0,93	0,80
	остатак у филтеру	0,26	0,38	0,43	0,56
	$\sum_1^8$ укупно дозирано	$9,13 + \underline{1,36}^* = \mathbf{10,49}$			
	$\sum_1^8$ процеђена количина	7,57	6,38	7,10	5,65
	$\sum_1^8$ остатак у филтеру	2,92	4,11	3,39	4,84
9	процеђена количина	0,79	0,57	0,53	0,51
	остатак у филтеру	0,02	0,24	0,28	0,30
	$\sum_1^9$ укупно дозирано	$10,49 + \underline{0,81}^* = \mathbf{11,30}$			
	$\sum_1^9$ процеђена количина	8,36	6,95	7,63	6,16
	$\sum_1^9$ остатак у филтеру	2,94	4,35	3,67	5,14
10	процеђена количина	1,65	0,80	0,69	0,61
	остатак у филтеру	0,45	1,30	1,41	1,49

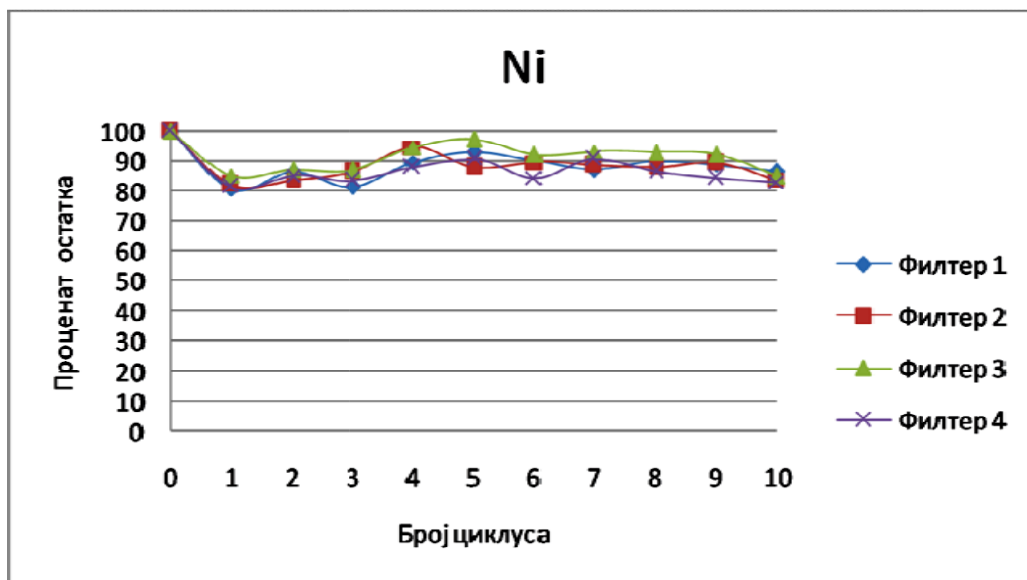
$\sum_{1}^{10}$ укупно дозирано	$11,30 + \underline{2,10}^* = 13,40$			
$\sum_{1}^{10}$ процеђена количина	10,01	7,75	8,32	6,77
$\sum_{1}^{10}$ остатак у филтеру	3,39	5,65	5,08	6,63

*количина бакра (ppm) дозираног у посматраном циклусу испитивања

Након спроведених десет циклуса испитивања, утврђено је да је укупно по сваком од филтера било дозирано 13,40 ppm бакра. Највише бакра, око 50% укупне дозиране количине, је задржано у Филтеру 4 (6,63 ppm), а најмање у Филтеру 1 (3,39 ppm – око 25% дозиране количине). Филтер 2 и Филтер 3 су остварили приближне вредности када је количина задржаног бакра у питању, 5,65 ppm (42% укупне дозиране количине) и 5,08 ppm (38% укупне дозиране количине) респективно. Према изложеним резултатима и њиховој дискусији, константовано је да је и у погледу задржавања бакра Филтер 4 показао најбоље карактеристике, како појединачно по циклусима, тако и по завршетку десетог циклуса испитивања са приближно 50% задржаног бакра у односу на укупну дозирану количину за тих десет циклуса. У случају бакра, као и код кадмијума, долази до појаве испирања веће количине метала од дозиране. Ово је запажено у 4. циклусу за Филтер 3 и у 6. циклусу на Филтерима 2 и 3.

5.6.4 НИКЛ (Ni)

На основу вредности из Табеле 5.9, проценти смањења никла у моделном раствору након проласка кроз карактеристичне филтер слојеве (Филтер 1, Филтер 2, Филтер 3 и Филтер 4), за десет циклуса испитивања, приказани су помоћу дијаграма на Слици 5.22.



Слика 5.22 Проценти остатка никла у моделном раствору након проласка кроз карактеристичне филтер слојеве (Филтер 1, Филтер 2, Филтер 3 и Филтер 4) за десет циклуса испитивања

На дијаграму са Слике 5.22, где су приказани проценти остатка никла у процеђеним узорцима, изражајна је сличност са дијаграмом за кобалт. И овде је уочен највећи проценат задржања никла у филтерима у прва три циклуса (циклуси 1, 2 и 3). Такође је примећена блага варијација у погледу смањења процента задржавања никла код четвртог и петог циклуса. Након 5. циклуса, дијаграми сва четири филтера попримају тренд константе. Крива која одговара Филтеру 3 се, идентично као код кобалта, издвојила смањењем задржане количине никла већ после 4 циклуса. У оквиру свих десет циклуса испитивања, а појединачно по циклусу за сваки од филтера није задржано више од 20% никла. Готово идентични изглед дијаграма посматрана четири филтера за кобалт и никл се може објаснити сличним хемијским понашањем ова два метала. Кумулативне количине задржаног, односно испраног никла након десет

циклуса испитивања у сва четири филтера, детаљно је прорачунато и приказано у Табели 5.13.

Табела 5.13 Расподела количине задржаног и процеђеног никла по циклусима, са коначним односом након десет циклуса испитивања

Број циклуса		Концентрација за Ni (ppm)			
		Филтер 1	Филтер 2	Филтер 3	Филтер 4
1	процеђена количина	17,90	18,24	18,96	18,08
	остатак у филтеру	4,35	4,01	3,29	4,17
	укупно дозирано	22,25*			
2	процеђена количина	17,60	17,1	17,77	17,4
	остатак у филтеру	2,80	3,30	2,63	3,00
	$\sum_{i=1}^2$ укупно дозирано	22,25 + 20,4* = 42,65			
	$\sum_{i=1}^2$ процеђена количина	35,50	35,34	36,73	35,48
	$\sum_{i=1}^2$ остатак у филтеру	7,15	7,31	5,92	7,17
3	процеђена количина	15,70	16,70	16,80	16,10
	остатак у филтеру	3,60	2,60	2,50	3,20
	$\sum_{i=1}^3$ укупно дозирано	42,65 + 19,3* = 61,95			
	$\sum_{i=1}^3$ процеђена количина	51,20	52,04	53,53	51,58
	$\sum_{i=1}^3$ остатак у филтеру	10,75	9,91	8,42	10,37
4	процеђена количина	18,94	19,98	19,99	18,51
	остатак у филтеру	2,19	1,15	1,14	2,62
	$\sum_{i=1}^4$ укупно дозирано	61,95 + 21,13* = 83,08			
	$\sum_{i=1}^4$ процеђена количина	70,14	72,02	73,52	70,09
	$\sum_{i=1}^4$ остатак у филтеру	12,94	11,06	9,56	12,99
5	процеђена количина	16,70	15,81	17,52	16,31
	остатак у филтеру	1,33	2,22	0,51	1,72

	$\sum_{1}^5$ укупно дозирано	$83,08 + \underline{18,03}^* = 101,11$			
	$\sum_{1}^5$ процеђена количина	86,84	87,83	91,04	86,4
	$\sum_{1}^5$ остатак у филтеру	14,27	13,28	10,07	14,71
6	процеђена количина	16,4	16,3	16,7	15,4
	остатак у филтеру	1,80	1,90	1,50	2,80
	$\sum_{1}^6$ укупно дозирано	$101,11 + \underline{18,20}^* = 119,31$			
	$\sum_{1}^6$ процеђена количина	103,24	104,13	107,74	101,80
	$\sum_{1}^6$ остатак у филтеру	16,07	15,18	11,57	17,51
7	процеђена количина	18,73	19,03	20,04	19,5
	остатак у филтеру	2,79	2,49	1,48	2,02
	$\sum_{1}^7$ укупно дозирано	$119,31 + \underline{21,52}^* = 140,83$			
	$\sum_{1}^7$ процеђена количина	121,97	123,16	127,78	121,30
	$\sum_{1}^7$ остатак у филтеру	18,86	17,67	13,05	19,53
8	процеђена количина	17,70	17,31	18,3	17,00
	остатак у филтеру	2,00	2,39	1,40	2,70
	$\sum_{1}^8$ укупно дозирано	$140,83 + \underline{19,7}^* = 160,53$			
	$\sum_{1}^8$ процеђена количина	139,67	140,47	146,08	138,30
	$\sum_{1}^8$ остатак у филтеру	20,86	20,06	14,45	22,23
9	процеђена количина	16,60	16,70	17,20	15,76
	остатак у филтеру	2,10	2,00	1,50	2,94
	$\sum_{1}^9$ укупно дозирано	$160,53 + \underline{18,7}^* = 179,23$			
	$\sum_{1}^9$ процеђена количина	156,27	157,17	163,28	154,06

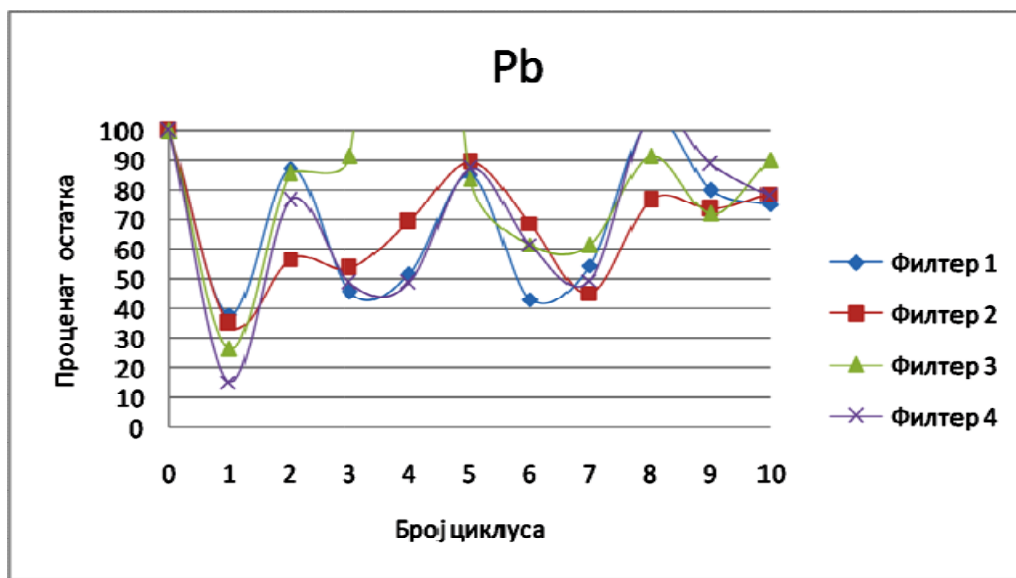
	$\sum_{1}^9$ остатак у филтеру	22,96	22,06	15,95	25,17
10	процеђена количина	17,60	17,06	17,29	16,92
	остатак у филтеру	2,78	3,32	3,09	3,46
	$\sum_{1}^{10}$ укупно дозирано	$179,23 + \underline{20,38^*} = 199,61$			
	$\sum_{1}^{10}$ процеђена количина	173,87	174,23	180,57	170,98
	$\sum_{1}^{10}$ остатак у филтеру	25,74	25,38	19,04	28,63

*количина никла (ppm) дозираног у посматраном циклусу испитивања

Након спроведених десет циклуса испитивања, утврђено је да је укупно по сваком од филтера било дозирано 199,61 ppm никла. Највише никла, око 14% укупне дозиране количине, је задржано у Филтеру 4 (28,63 ppm), а најмање у Филтеру 3 (19,04 ppm – око 9.5 % дозиране количине). Филтер 1 и Филтер 2 су остварили приближне вредности када је количина задржаног никла у питању, 25,74 ppm и 25,38 ppm респективно, што је приближно 13% укупне дозиране количине. Према изложеним резултатима и њиховој дискусији, константовано је да је и овога пута Филтер 4 био најефикаснији и показао најбоље карактеристике у погледу задржавања никла, како појединачно по циклусима, тако и по завршетку десетог циклуса испитивања са 14% задржаног никла у односу на укупну дозирану количину за тих десет циклуса.

5.6.5 ОЛОВО (Pb)

На основу вредности из Табеле 5.9, проценти смањења олова у моделном раствору након проласка кроз карактеристичне филтер слојеве (Филтер 1, Филтер 2, Филтер 3 и Филтер 4), за десет циклуса испитивања, приказани су помоћу дијаграма на Слици 5.23.



Слика 5.23 Проценти остатка олова у моделном раствору након проласка кроз карактеристичне филтер слојеве (Филтер 1, Филтер 2, Филтер 3 и Филтер 4) за десет циклуса испитивања

Анализом дијаграма са Сlike 5.23 запажена је варијабилност количине задржаног олова од циклуса до циклуса. Иако код првог циклуса, када је филтер још увек неконтаминиран, смањење олова варира у опсегу од 60–85%, већ је у другом циклусу задржана знатно мања количина овог метала. У тећем и четвртном циклусу се уочава скок дијаграма Филтера 3 преко 100%, када је очигледно дошло до испирања веће количине олова од дозиране у тим циклусима. Као и код бакра, облик кривих показује нестабилност када су проценти задржавања олова у питању. Посматрано по циклусима, најмање варијације су уочене код Филтера 2, чији се проценат задржања олова креће у опсегу од 10% до 65%. Кумулативне вредности испраног и задржаног олова код свих филтера приказано је по циклусима у Табели 5.14.

Табела 5.14 Расподела количине задржаног и процеђеног олова по циклусима, са коначним односом након десет циклуса испитивања

Број циклуса		Концентрација за Pb (ppm)			
		Филтер 1	Филтер 2	Филтер 3	Филтер 4
1	процеђена количина	0,11	0,15	0,11	0,06
	остатак у филтеру	0,31	0,27	0,31	0,36
	укупно дозирано	0,42*			
2	процеђена количина	0,06	0,04	0,06	0,06
	остатак у филтеру	0,01	0,03	0,01	0,01
	$\sum_{i=1}^2$ укупно дозирано	$0,42 + 0,07* = 0,49$			
	$\sum_{i=1}^2$ процеђена количина	0,17	0,19	0,17	0,12
	$\sum_{i=1}^2$ остатак у филтеру	0,32	0,30	0,32	0,37
3	процеђена количина	0,06	0,07	0,12	0,07
	остатак у филтеру	0,08	0,07	0,02	0,07
	$\sum_{i=1}^3$ укупно дозирано	$0,49 + 0,14* = 0,63$			
	$\sum_{i=1}^3$ процеђена количина	0,23	0,26	0,29	0,19
	$\sum_{i=1}^3$ остатак у филтеру	0,40	0,37	0,34	0,44
4	процеђена количина	0,07	0,10	0,40	0,07
	остатак у филтеру	0,07	0,04	- 0,26	0,07
	$\sum_{i=1}^4$ укупно дозирано	$0,63 + 0,14* = 0,77$			
	$\sum_{i=1}^4$ процеђена количина	0,30	0,36	0,69	0,26
	$\sum_{i=1}^4$ остатак у филтеру	0,47	0,41	0,08	0,51
5	процеђена количина	0,16	0,17	0,15	0,16
	остатак у филтеру	0,02	0,01	0,03	0,02
	$\sum_{i=1}^5$ укупно дозирано	$0,77 + 0,18* = 0,95$			
	$\sum_{i=1}^5$ процеђена количина	0,46	0,53	0,84	0,42

	$\sum_1^5$ остатак у филтеру	0,49	0,42	0,11	0,53
6	процеђена количина	0,10	0,17	0,15	0,15
	остатак у филтеру	0,14	0,07	0,09	0,09
	$\sum_1^6$ укупно дозирано	$0,95 + \underline{0,24^*} = 1,19$			
	$\sum_1^6$ процеђена количина	0,56	0,70	0,99	0,57
	$\sum_1^6$ остатак у филтеру	0,63	0,49	0,20	0,62
7	процеђена количина	0,20	0,16	0,22	0,18
	остатак у филтеру	0,16	0,20	0,14	0,18
	$\sum_1^7$ укупно дозирано	$1,19 + \underline{0,36^*} = 1,55$			
	$\sum_1^7$ процеђена количина	0,76	0,86	1,21	0,75
	$\sum_1^7$ остатак у филтеру	0,79	0,69	0,34	0,80
8	процеђена количина	0,30	0,22	0,27	0,31
	остатак у филтеру	- 0,01	0,07	0,02	- 0,02
	$\sum_1^8$ укупно дозирано	$1,55 + \underline{0,29^*} = 1,84$			
	$\sum_1^8$ процеђена количина	1,06	1,08	1,48	1,06
	$\sum_1^8$ остатак у филтеру	0,78	0,76	0,36	0,78
9	процеђена количина	0,26	0,24	0,23	0,28
	остатак у филтеру	0,06	0,08	0,09	0,04
	$\sum_1^9$ укупно дозирано	$1,84 + \underline{0,32^*} = 2,16$			
	$\sum_1^9$ процеђена количина	1,32	1,32	1,71	1,34
	$\sum_1^9$ остатак у филтеру	0,84	0,84	0,45	0,82
10	процеђена количина	0,20	0,21	0,24	0,21
	остатак у филтеру	0,07	0,06	0,03	0,06

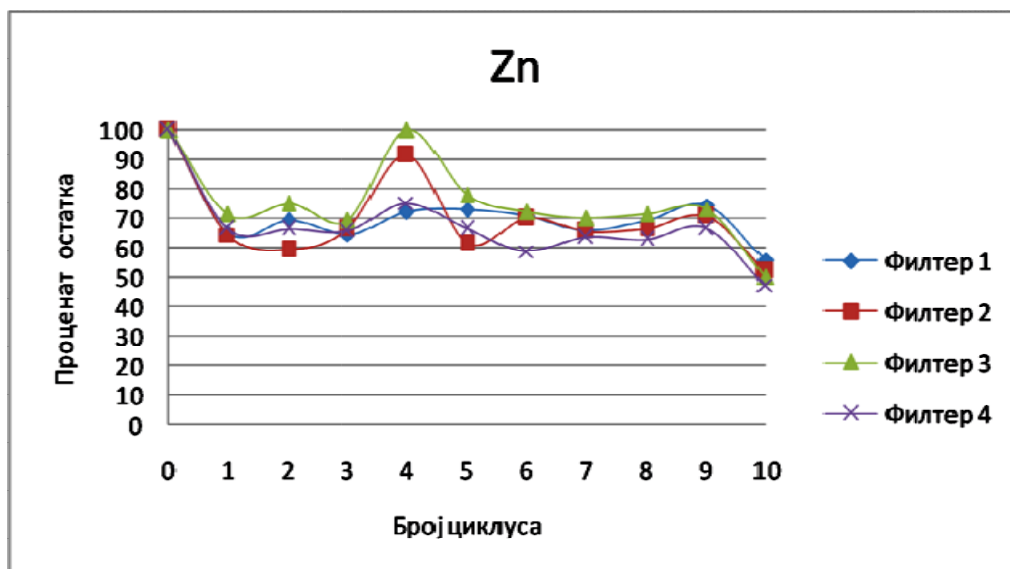
$\sum_{1}^{10}$ укупно дозирано	$2,16 + \underline{0,27^*} = \mathbf{2,43}$			
$\sum_{1}^{10}$ процеђена количина	1,52	1,53	1,95	1,55
$\sum_{1}^{10}$ остатак у филтеру	0,91	0,90	0,48	0,88

*количина олова (ppm) дозираног у посматраном циклусу испитивања

Након спроведених десет циклуса испитивања, утврђено је да је укупно по сваком од филтера било дозирано 2,43 ppm олова. Највише олова, око 38% укупне дозиране количине, је задржано у Филтеру 1 (0,91 ppm) и Филтеру 2 (0,90 ppm). Нешто слабије перформансе је показао Филтер 4 са 37% задржаног олова у филтеру (0,88 ppm). Филтер 3 се, због великих варијација и значајног испирања олова, није истакао у односу на остале филтере са само 20% задржаног олова (0,48 ppm). Према изложеним резултатима у Табели 5.15 и на основу анализе дијаграма са Сlike 5.23, константовано је да је, за разлику од свих претходно разматраних метала, Филтер 2 показао најбоље карактеристике у погледу задржавања олова, како појединачно по циклусима, тако и по завршетку десетог циклуса испитивања, са приближно 38% задржаног олова у односу на укупну дозирану количину за тих десет циклуса. У 4. циклусу код Филтера 3 и у 8. циклусу код Филтера 1 и 4 запажена је појава испирања олова, где је испрана количина олова премашила дозирану количину у том циклусу.

5.6.6 ЦИНК (Zn)

На основу вредности из Табеле 5.9, проценти смањења цинка у моделном раствору након проласка кроз карактеристичне филтер слојеве (Филтер 1, Филтер 2, Филтер 3 и Филтер 4), за десет циклуса испитивања, приказани су помоћу дијаграма на Слици 5.24.



Слика 5.24 Проценати остатка цинка у моделном раствору након проласка кроз карактеристичне филтер слојеве (Филтер 1, Филтер 2, Филтер 3 и Филтер 4) за десет циклуса испитивања

На Слици 5.24 су приказани проценти остатка никла у процеђеним узорцима кроз наведена четири филтера. Изузевши варијације Филтера 2 и Филтера 3 у циклусу број 4, могло би се рећи да филтери постижу приближно константан проценат задржавања цинка у опсегу од 25–40%. Гледано по циклусима, Филтер 4 континуирано има највећи проценат задржавања цинка. Неуобичајено је да је у 10. циклусу проценат задржавања цинка код свих филтера износио око 50%, што представља максималну вредност у оквиру свих циклуса. Кумулативне количине задржаног односно испраног цинка након десет циклуса испитивања у сва четири филтера детаљно су приказане у Табели 5.15.

Табела 5.15 Расподела количине задржаног и процеђеног цинка по циклусима, са коначним односом након десет циклуса испитивања

Број циклуса		Концентрација за Zn (ppm)			
		Филтер 1	Филтер 2	Филтер 3	Филтер 4
1	процеђена количина	12,26	12,19	13,45	12,57
	остатак у филтеру	6,64	6,71	5,45	6,33
	укупно дозирано	18,90*			
2	процеђена количина	11,90	10,22	12,90	11,4
	остатак у филтеру	5,30	6,98	4,30	5,80
	$\sum_{i=1}^2$ укупно дозирано	18,90 + 17,2* = 36,10			
	$\sum_{i=1}^2$ процеђена количина	24,16	22,41	26,35	23,97
	$\sum_{i=1}^2$ остатак у филтеру	11,94	13,69	9,75	12,13
3	процеђена количина	10,44	10,74	11,03	10,62
	остатак у филтеру	5,71	5,41	5,12	5,53
	$\sum_{i=1}^3$ укупно дозирано	36,10 + 16,15* = 52,25			
	$\sum_{i=1}^3$ процеђена количина	34,60	33,15	37,38	34,59
	$\sum_{i=1}^3$ остатак у филтеру	17,65	19,10	14,87	17,66
4	процеђена количина	10,82	13,78	15,11	11,32
	остатак у филтеру	4,23	1,27	- 0,06	3,73
	$\sum_{i=1}^4$ укупно дозирано	52,25 + 15,05* = 67,30			
	$\sum_{i=1}^4$ процеђена количина	45,42	46,93	52,49	45,91
	$\sum_{i=1}^4$ остатак у филтеру	21,88	20,37	14,81	21,39
5	процеђена количина	8,32	7,02	8,90	7,60
	остатак у филтеру	3,13	4,43	2,55	3,85
	$\sum_{i=1}^5$ укупно дозирано	67,3 + 11,45* = 78,75			
	$\sum_{i=1}^5$ процеђена количина	53,74	53,95	61,39	53,51

	$\sum_1^5$ остатак у филтеру	25,01	24,80	17,36	25,24
6	процеђена количина	6,61	6,50	6,74	5,50
	остатак у филтеру	2,72	2,83	2,59	3,83
	$\sum_1^6$ укупно дозирано	$78,75 + \underline{9,33}^* = 88,08$			
	$\sum_1^6$ процеђена количина	60,35	60,45	68,13	59,01
	$\sum_1^6$ остатак у филтеру	27,73	27,63	19,95	29,07
7	процеђена количина	11,53	11,47	12,27	11,10
	остатак у филтеру	5,99	6,05	5,25	6,42
	$\sum_1^7$ укупно дозирано	$88,08 + \underline{17,52}^* = 105,6$			
	$\sum_1^7$ процеђена количина	71,88	71,92	80,40	70,11
	$\sum_1^7$ остатак у филтеру	33,72	33,68	25,2	35,49
8	процеђена количина	10,34	10,01	10,70	9,40
	остатак у филтеру	4,66	4,99	4,30	5,60
	$\sum_1^8$ укупно дозирано	$105,6 + \underline{15,00}^* = 120,6$			
	$\sum_1^8$ процеђена количина	82,22	81,93	91,10	79,51
	$\sum_1^8$ остатак у филтеру	38,38	38,67	29,50	41,09
9	процеђена количина	7,30	6,90	7,16	6,50
	остатак у филтеру	2,48	2,88	2,62	3,28
	$\sum_1^9$ укупно дозирано	$120,6 + \underline{9,78}^* = 130,38$			
	$\sum_1^9$ процеђена количина	89,52	88,83	98,26	86,01
	$\sum_1^9$ остатак у филтеру	40,86	41,55	32,12	44,37
10	процеђена количина	6,13	5,71	5,46	5,19
	остатак у филтеру	4,82	5,24	5,49	5,76

$\sum_{1}^{10}$ укупно дозирано	$130,38 + 10,95^* = 141,33$			
$\sum_{1}^{10}$ процеђена количина	95,65	94,54	103,72	91,20
$\sum_{1}^{10}$ остатак у филтеру	45,68	46,79	37,61	50,13

*количина цинка (ppm) дозираног у посматраном циклусу испитивања

Након спроведених десет циклуса испитивања, утврђено је да је укупно по сваком од филтера било дозирано 141,33 ppm цинка. Највише цинка, око 35% укупне дозирање количине, је задржано у Филтеру 4 (50,13 ppm). По способности задржавања цинка, након Филтера 4 следе Филтер 1 и Филтер 2 са око 33% задржавања цинка у филтеру. Филтер 3 је остварио најмањи проценат задржавања цинка са око 27% (37,61 ppm). Посматрано по циклусима, али и кумулативно, највише се су се истакли Филтер 1 и Филтер 4.

5.7 ЗАКЉУЧАК

У овом поглављу су изложени резултати испитивања четири филтера, чије су детаљне карактеристике описане у Поглављу 5.2, у погледу отклањања тешких метала, тачније њиховог задржавања у наведеним филтерима. Анализом ових резултата појединачно за сваки од испитиваних тешких а потенцијално токсичних метала (кадмијум, кобалт, бакар, никл, олово и цинк), у оквиру сваког од десет изведених циклуса испитивања, али и према кумулативним резултатима, изведени су одређени општи закључци.

Пре свега, запажене су велике разлике у проценту задржавања наведених тешких метала, што вероватно има везе са физичко-хемијским особинама како метала, тако и самих чинилаца филтер слојева. Убедљиво најчешће се Филтер 3 у случају сваког од разматраних тешких метала истакао као филтер са најмањим учинком, како по сваком циклусу понаособ, тако и по кумулативним вредностима након извршених десет цилуса. Овај филтер, подсећања ради, садржи фракције 16–32 mm у висини од 20 cm при самом дну филтера. Иако у горњим слојевима има и ситнијих фракција, очигледно је да крупна фракција погодује лакшем испирању метала. Случај испирања

Филтера 3 нарочито је изражен код кадмијума, бакра и олова, док је у случају цинка у једном од циклуса дошло до испирања комплетно дозиране количине овог метала. Филтер 1 и Филтер 2 су се по питању способности задржавања тешких метала доста преплитали, али је уочена блага предност Филтера 1 у погледу отпорности на испирање, нарочито код кадмијума и бакра, а нешто блаже код цинка. По свим параметрима, упоређујући посматране филтере, најбољи резултати су постигнути применом Филтера 4, који уједно представља и најједноставнију варијанту филтера сачињеног од речног агрегата фракције 4–8 mm. Једино одступање које је уочено код Филтера 4 је у случају олова за циклус 8, када је испрана количина овог метала премашила дозирану количину у осмом циклусу.

Анализирајући кумулативно смањење посматраних метала, најбољи резултат је постигнут у случају кадмијума са 67% задржаног метала, затим бакра са 50% задржавања. Након њих су олово и цинк са 38%, односно 35%. Најслабији учинак је забележен код кобалта и никла, са 16% односно 14% задржавања ових метала. Филтер 4 се у случају чак 5 од 6 разматраних тешких метала (кадмијума, кобалта, бакра, никла и цинка) показао као филтер са највећом укупном количином задржаног метала, што га у овом испитивању чини најуспешнијим.

Узевши у обзир да је положај филтера вертикалан, као неповољнија околност у испитивању, може се закључити да је остварено значајно смањење концентрације тешких метала, али би требало размислити о комбинацији Филтера 4 са подлогом у виду зеолита, у случају инфилтрационог канала. Не треба занемарити бенефите које сама седиментација у оквиру канала може да пружи, а које у случају овог испитивања нема због вертикалног положаја филтера. У том случају се може очекивати да зеолит додатно веже за себе одређене метале и на тај начин увећа проценат задржавања тешких метала у канал.

6 STORM WATER MANAGEMENT MODEL (SWMM)

Storm Water Management Model (SWMM) представља динамички модел за симулацију падавина и отицања тих падавина. Може се користити за појединачни догађај или за дуготрајну симулацију количине и квалитета отицања атмосферских падавина. Функционише на основу скупа подсливова неког сливног подручја, где се пажљивим рутирањем дефинише пут отицаја преко површина, система цеви, канала, уређаја за складиштење и осталих елемената до крајњег реципијента. Помоћу SWMM модела је могуће пратити количину и квалитет воде у свакој цеви или каналу током трајања симулације [Rossman, 2015]. Овај софтвер се користи широм света за планирање, анализу и пројектовање у вези са отицањем атмосферских вода, комбинованом канализацијом, санитарном канализацијом и других система за одводњавање у урбаним и ванградским срединама [Behrouz et al., 2020]. SWMM модел пружа могућност сагледавања проблема одводњавања у погледу одређивања количине отицања, контроле интензитета вршног отицаја и квалитета воде која се одводи [van der Sterren et al., 2014; Luan et al., 2019; Taghizadeh et al., 2021]. Модел је адекватан, како за новопроектована решења, тако и за постојеће системе за одводњавање. Код новопроектованих решења служи код израде студија оправданости, а код постојећих система за проверу могућности прихватања падавина много већих интензитета од пројектованих. Овај проблем се јавља често, јер се услед климатских промена често премашују интензитети падавина према којима су системи за одводњавање пројектовани. Анализом временских промена за неко подручје и предвиђањем могућих падавина за одређени временски период, могуће је предвидети потребу за евентуалном реконструкцијом саме мреже како би се спречиле озбиљније хаварије и спречили непотребни трошкови за санацију после колапса система за одводњавање [Weathers et al., 2023].

Прву верзију овог софтвера је 1971. године развила Агенција за заштиту животне средине Сједињених Америчких Држава (U. S. Environmental Protection Agency). Софтвер SWMM је од настанка јавно доступан и могуће га је бесплатно користити широм света. Прве верзија је написана у програмском језику FORTRAN и обухватала је отицај, транспорт, складиштење и пријем воде. Њена примена је била ограничена на величину сливних површина у распону од 4 ha до 2000 ha. Надоградњом прве верзије 1975. године, развијена је новија варијанта софтвера којом је тада обухваћена могућност предвиђања ерозије са обухватом и већих сливних површина,

него што је то био случај код прве варијанте софтвера. Надоградња је пружила могућност моделирања материја које представљају загађиваче. Трећа верзија, објављена 1981. године, имала је додатну могућност планирања и дизајна. По први пут је са трећом верзијом софтвера обухваћена инфилтрација површинских вода и додате су процедуре чишћења и таложења. Ограничавајући услови ове верзије софтвера су се огледали у броју елемената за моделирање. Већ 1988. године, са четвртом верзијом, направљен је значајан помак у погледу ближег дефинисања параметара у вези са падавинама, температуром, подземним водама и каналима нестандардних димензија. Најновију верзију SWMM модела (Storm Water Management Model, Version 5.1) је израдио Одсек за водоснабдевање и водне ресурсе из Националне истраживачке лабораторије за управљање ризицима Агенције за заштиту животне средине Сједињених Америчких Држава (Water Supply and Water Resources Division of the U.S. Environmental Protection Agency's National Risk Management Research Laboratory) уз помоћ консултантске фирме CDM-Smith [Rossman, 2015]. Софтвер је испрограмиран у програмском језику C. У овој верзији софтвера не постоје ограничења у погледу величине сливних површина, нити у броју елемената укључених у модел. Моделирање елемената LID технологија је додато у верзију SWMM 5 из 2010. године.

Када је реч о елементима LID технологија, провера ефикасности може бити вршена за појединачне елементе или комбинацију више елемената. Проучавањем доступне литературе у погледу моделирања у софтверу SWMM, закључено је да је велики број LID елемената обухваћен софтвером, попут биоретензионих јединица, кишних буради, кишних башти, инфилтрационих и дренажних ровова, затрављених канала, пропусних површина и можда најпопуларнијих зелених кровова. У већини анализираних радова аутори се најчешће баве контролом запремине отицаја (*runoff volume*, [m^3]), вршним отицајем (*pick flow*, [m^3/s]) и квалитетом отицаја (*runoff quality*). Осим ове три важне карактеристике, примећен је одређени број радова на тему утицаја LID елемената на подземне воде [Zhang et al., 2018; Kim et al., 2019; Trajkovic et al., 2020]. Као додатни аспект код најновијих верзија софтвера SWMM укључена је и анализа трошкова у погледу смањења цене уклањања загађивача са површина урбаних средина употребом елемената LID технологија [Heidari et al., 2022].

Контрола запремине отицаја спада у можда најважније факторе који утичу на појаву засићења система за одводњавање, а уједно и појаву поплава. Велика заинтересованост за истраживање ове карактеристике огледа се и у великом броју

радова у којима је помоћу програма SWMM извршена провера функционалности биоретензионих јединица [Kim et al., 2019; Luan et al., 2019; Trajkovic et al., 2020; Baek et al., 2020; Bibi, 2020; Wang et al., 2022; Lisenbee et al., 2022; Yu et al., 2022; Chuang et al., 2023; Yang et al., 2023], пропусних површина [Luan et al., 2019; Randall et al., 2019; Bibi, 2020; Wang et al., 2022; Yu et al., 2022; Li et al., 2022; Yang et al., 2023; Chuang et al., 2023], кишних буради [Macro et al., 2019; Hamouz and Muthanna, 2019; Akter et al., 2020; Li et al., 2022; Wang et al., 2022; Chuang et al., 2023] и зелених кровова [Cipolla et al., 2016; Luan et al., 2019; Hamouz and Muthanna, 2019; Randall et al., 2019; Baek and Yoon et al., 2020; Wang et al., 2022; Yu et al., 2022; Li et al., 2022; Yang et al., 2023; Mantilla et al., 2023]. Нешто ређе су вршене провере запремине отицаја код кишних башти [Baek et al., 2020; Wang et al., 2022; Yu et al., 2022], инфилтрационих канала [Baek et al., 2020] и затрављених канала [Luan et al., 2019].

Појава **вршног отицаја** код екстремних метеоролошких услова, који су све чешћи, у новије време такође привлачи пажњу научне и стручне јавности. Истичу се радови у вези одређивања вршног отицаја за случај биоретензионих јединица, пропусних површина и зелених кровова [Luan et al., 2019; Yu et al., 2022; Yang et al., 2023]. Мањи број истраживања је везан за кишне баште [Yu et al., 2022], затрављене канале [Luan et al., 2019] и кишну бурад [van der Sterren et al., 2014]. Забележени су и случајеви смањења вршног отицаја комбинацијом више елемената LID технологија [Bibi, 2020]. Најмањим бројем радова је обухваћен квалитет отицаја.

Известан број студија бавио се **квалитетом отицаја** код биоретензија [Luan et al., 2019; Baek et al., 2020], кишних башти [Tang et al., 2021; Heidari et al., 2022], зелених појасева [Tang et al., 2021], кишне буради [van der Sterren et al., 2014; Tang et al., 2021], зелених кровова [Luan et al., 2019; Tang et al., 2021], пропусних површина [Luan et al., 2019; Heidari et al., 2022], инфилтрационих канала [Baek et al., 2020] и затрављених канала [Luan et al., 2019].

Најкомпликованији случајеви симулација у програму SWMM су свакако комбинације сва три претходно наведена индикатора (запремина отицаја, вршни отицај и квалитет отицаја) за различите комбинације LID елемената [Stojaizadeh et al., 2021; Taghizadeh et al., 2021; Yang et al., 2021; Zhang et al., 2022].

SWMM модел је подједнако применљив код класичних система за одводњавање, класичних система за одводњавање са елементима LID технологија и

код појединачних или комбинованих елемената LID технологија. Овај модел се врло често користи као алат за упоређење функционалности система за одвођавање пре и после употребе LID елемената у поступцима који обухватају планирање и изградњу, претежно урбаних подручја.

6.1 МОДЕЛИРАЊЕ ТРУПА ПРУГЕ И ПАДАВИНА

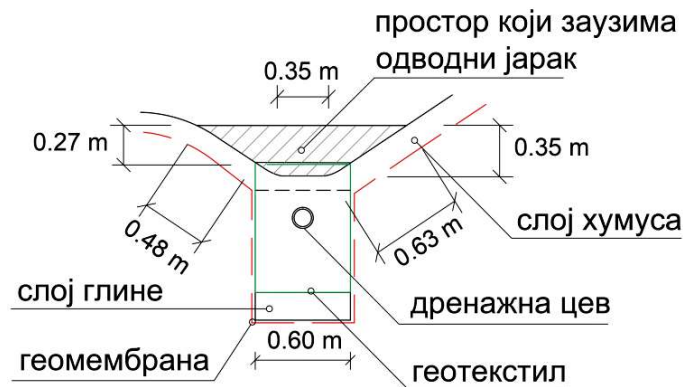
У овом поглављу докторске дисертације је извршено поређење хидрауличких особина класичних одводних јаркова и новопредложених инфилтрационих канала, као саставних елемената доњег строја железничке пруге, у софтверу SWMM (Storm Water Management Model).

Формирани су одговарајући модели пруге обухвативши насип/усек са одводним јарковима, односно са инфилтрационим каналима. Испитивана дужина колосека на свим моделима је износила 100 m, како у насипу, тако и у усеку. За потребе моделирања димензије висине насипа, дубине усека и околних површина су претпостављене. Косине насипа и усека су пројектоване у нагибу 1:1,5. Попречни нагиб планума је 5% и испуњен је услов за минималну ширину планума ($B_{pl,min} = 5,80$ m). Висина насипа је константна на дужини од 100 m и прати подужни нагиб канала. У случају усека, а за потребе моделирања, усвојено је да једна страна усека (десна) задржи константну висину, док друга страна линеарно смањује своју висину до нивоа канала. Ову промену рељефа терена је било неопходно предвидети због попречног пропуштања воде кроз труп пруге. Као олакшавајућа околност за моделирање усвојено је да посматране деонице пруге, како у насипу, тако и у усеку, буду у правцу.

На моделима су димензије одводних јаркова усвојене у складу са прописаним димензијама (Поглавље 2). Иако је у техничким условима, описаним у Поглављу 2, дефинисано да минимални подужни нагиб одводних јаркова треба да буде 2–3%, за моделирање је усвојено да пад одводних јаркова буде 1% како би се максимално испратио нагиб нивелете, који не би требало да прелази 12,5‰ (1,25%).

На моделима са инфилтрационим каналима је задржан један део одводних јаркова. Предложено решење за изглед инфилтрационог канала (Слика 5.2) предвиђа смањење првобитне дубине одводног јарка (0,35 m). Ако би се задржала дубина јарка од 0,35 m, било би неопходно засецање терена, нарочито на делу усека, па је одабрано

да се симулације спроведу са мањом дубином одводног јарка. Уколико би у неком тренутку дошло до презасићења инфилтрационог канала, остаје резервни трапезоидни канал (односно, одводни јарак) ширине дна 60 см, нагиба страница 1:1,5 и дубине 27 см (Слика 6.1). Најважнији разлог за проверу хидрауличких особина инфилтрационих канала на предложеним решењима (Слике 5.1 и 5.2) јесте водонепропусност читавог трупa пруге, па и самих инфилтрационих канала. Оваквим решењем се онемогућава инфилтрација тешких метала у дубље слојеве трупa пруге, чиме се инфилтрациони канали за одводњавање додатно оптерећују. У којој мери ће инфилтрациони канал успети да надомести недостатак инфилтрације у труп пруге, и одржи или смањи вршни и укупни отицај, проверено је у софтверу SWMM. Предвиђено је да ширина инфилтрационог канала износи 0,60 m. Ширина је одабрана према ширини кашике механизације за ископ земље, како би овакво решење и практично било применљиво. Дебљина филтер слоја износи 0,60 m са дренажном цеву на висини 0,40 m од врха слоја глине, тј. дна инфилтрационог слоја. Слој глине у филтер слоју је третиран као водонепропусан слој, док су филтер слој и застор на колосеку третиран као водопрпусни слојеви.



Слика 6.1 Приказ начина уклапања инфилтрационог канала на месту постојећег одводног јарка

Ради провере хидрауличких особина предложених решења за пројектовање елемената доњег строја пруге, помоћу софтвера SWMM је испитано укупно четири модела.

У првом моделу (Модел 1), испитан је укупни отицај и искоришћење капацитета елемената за одводњавање упоређивањем класичних одводних јаркова са новопредложеним инфилтрационим каналима, само у оквиру трупа пруге минимално захтеваних димензија које су одређене Правилником о техничким условима подсистема инфраструктура. Овај први случај обухвата труп пруге са минималним димензијама заштитног и прелазног слоја и одводне јаркове/инфилтрационе канале са једне и друге стране трупа пруге.

У другом моделу (Модел 2), извршена је провера хидрауличких особина за труп пруге у насипу, такође са упоређењем одводних јаркова, са једне стране, и инфилтрационих канала, са друге стране.

Трећи модел (Модел 3) се односи на пругу у усеку са претпостављеним димензијама косина усека.

Четврти Модел (Модел 4) је обухватио испитивање пруге у насипу, али са додатком утицаја околног терена (околне површине) у ширини од 50,0 m са једне (леве) стране насипа.

За потребе моделирања, све сливне површине са којих се отицај прихвата одводним јарковима/инфилтрационим каналима су подељене на 10 трака дужине 10 m. У софтверу SWMM одабрана је метода HORTON за прорачун инфилтрације. Параметри инфилтрације за прорачун према Хортоновој једначини су максимална стопа инфилтрације 3,0, минимална стопа инфилтрације 0,50, константа пропадања 4,0, и време сушења 7 дана. За моделирање је коришћена верзија 5.2 примењеног софтвера.

Све симулације су рађене према Параметрима кишних епизода са максималном годишњом сумом падавина за плувиографску станицу Ниш [Prohaska and Bartoš-Divac, 2014]. Доступни подаци обухватају период од 1951. до 2008. године. Код одабира релевантних падавина, кључна је била количина падавина и време трајања. С тим у вези, одабране су краткотрајне падавине максималног интензитета забележене за 2001. годину (Табела 6.1) и период од 14.06.–15.06. Забележено је трајање падавина од 18h, а укупна висина кише је износила 94,3 mm. Са овом кишном епизодом су рађене симулације на свим моделима. Подаци наведене кишне епизоде у софтвер су унети као кумулативне вредности по сату, као што је наведено у Табели 6.1 за 2001. годину.

Табела 6.1 Параметри кишних епизода са максималном годишњом сумом падавина за плувиографску станицу Ниш, период од 1951. до 2008. године [Prohaska and Bartoš-Divac, 2014]

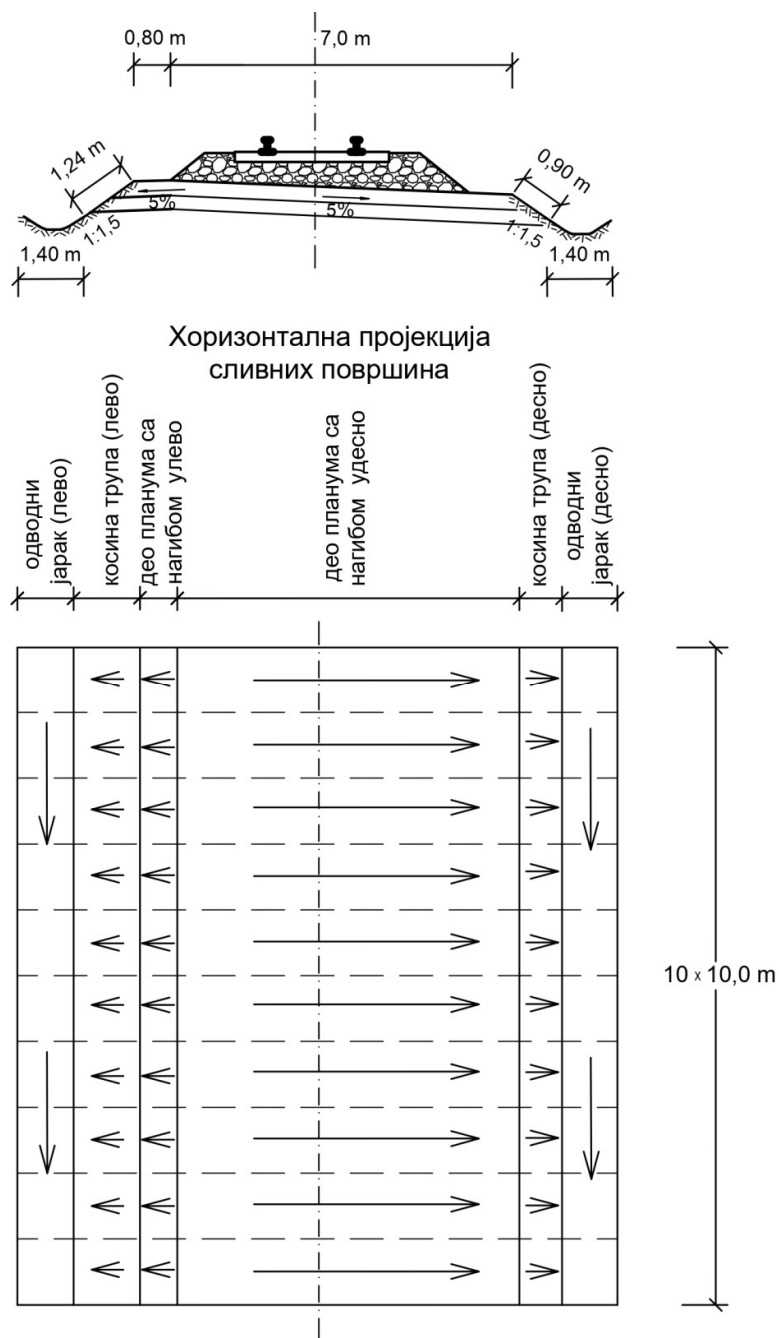
година	датум	Висина кише (mm)			Трајање кише				укупна висина
		Трајање кише			од - до (h:min - h:min)	укупно (h, min)	сати (h)	минути (min)	
		1h	2h	3h					
1951	09.06.	18,2	21,5	22	00:00 - 03:25	03h 25'	3,4	205	23,0
1953	01-02.07.	20,3	29,5	30,2	23:00 - 02:55	03h 55'	3,9	235	30,4
1954	17-18.08.	5,4	8,3	9,9	17:00 - 04:10	11h 10'	12,2	670	23,8
1955	16-17.09.	7,2	10,9	13,0	12:00 - 05:45	17h 45'	17,8	1065	35,7
1956	26.05.	27,3	27,4	27,4	14:00 - 15:15	01h 15'	1,3	75	27,4
1957	26-27.05.	10,7	14,5	16,2	09:30 - 06:35	21h 05'	21,1	1265	37,8
1958	29-30.04.	2,3	4,4	5,0	07:00 - 00:00	18h 00'	18,0	1080	12,5
1959	04.07.	23,7	26,7	28,6	16:30 - 20:30	04h 00'	4,0	240	29,4
1960	19-20.04.	5,7	9,7	11,00	15:30 - 03:50	12h 00'	12,0	720	22,9
1961	20-21.05.	4,0	5,7	7,3	14:00 - 06:10	16h 10'	16,2	970	16,8
1962	17-18.07.	27,6	41,7	43,5	20:00 - 04:35	08h 35'	8,6	515	47,7
1963	31.08.-01.09.	15,4	17,2	17,5	11:55 - 18:00	06h 05'	6,1	365	36,9
1964	19.06.	19,7	25,8	25,9	19:10 - 22:35	03h 25'	3,4	205	26,2
1965	17-18.06.	11,0	17,7	22,5	18:20 - 06:50	12h 30'	12,5	750	36,3
1966	29.04.	13,0	26,0	26,7	14:10 - 17:00	02h 50'	2,8	170	26,7
1967	10-11.07.	12,7	13,4	14,2	16:00 - 06:10	14h 10'	14,2	850	25,7
1968	24-25.06.	3,7	7,2	10,7	18:35 - 03:10	08h 35'	8,6	515	24,9
1969	07-08.06.	11,0	17,1	20,5	20:00 - 07:00	11h 00'	11,0	660	36,6
1970	22-23.05.	10,7	10,7	10,7	13:15 - 14:00	00h 45'	0,8	45	10,7
1971	18-19.09.	4,6	8,2	10,7	07:00 - 05:50	22h 50'	22,8	1370	29,3
1972	16-17.09.	7,2	11,6	16,8	09:20 - 06:10	20h 50'	20,8	1250	49,5
1973	08-09.06.	27,3	38,7	38,7	15:50 - 19:00	03h 10'	3,2	190	40,4
1974	30.05.	18,5	23,3	25,5	13:00 - 16:10	03h 10'	3,2	190	25,6
1975	13-14.06.	19,0	23,0	29,2	17:00 - 03:20	10h 20'	10,3	620	38,2
1976	06-07.06.	7,1	10,3	11,5	16:00 - 04:30	12h 30'	12,5	750	28,8
1977	08.08.	26,4	32,9	32,9	14:20 - 15:50	01h 30'	1,5	90	32,9
1978	31.08.-01.09.	8,8	12,2	16,0	17:00 - 04:50	11h 50'	11,8	710	30,4
1979	06-07.10.	5,6	9,4	13,4	12:50 - 06:30	17h 40'	17,7	1060	47,3
1980	17-18.08	7,3	12,1	15,2	18:35 - 06:10	11h 35'	11,6	695	29,7
1981	27-28.07.	3,0	4,5	4,6	16:00 - 07:00	15h 00'	15,0	900	17,4
1982	30.04.-01.05.	5,1	8,9	12,4	07:00 - 17:20	10h 20'	10,3	620	26,1
1983	14.07.	10,4	14,2	17,4	19:00 - 01:30	06h 30'	6,5	390	21,3
1984	27.08.	15,3	18,2	21,3	14:00 - 20:30	06h 30'	6,5	390	25,8
1985	27-28.08.	9,2	17,4	21,4	15:50 - 00:00	08h 10'	8,2	490	30,9
1986	20-21.07.	7,3	9,2	10,9	19:40 - 07:00	11h 20'	11,3	680	29,6
1987	21-22.05.	6,5	12,0	14,3	09:50 - 05:55	21h 05'	21,1	1265	55,2
1988	01.02.06.	5,3	8,6	11,0	11:50 - 01:00	13h 10'	13,2	790	16,0
1990	15.06.	15,7	23,4	25,0	17:25 - 23:40	06h 15'	6,3	375	26,3
1991	19-20.10.	6,7	9,0	10,8	12:40 - 04:10	15h 30'	15,5	930	39,6
1992	07.06.	22,3	33,8	33,8	15:40 - 16:40	01h 00'	1,0	60	33,8
1993	11.09.	57,4	58,0	58,0	18:00 - 19:20	01h 20'	1,3	80	58,0
1994	16.09.	6,8	9,4	10,6	07:00 - 10:00	03h 00'	3,0	180	10,6
1995	11.06.	43,6	43,8	44,0	14:35 - 16:25	01h 50'	1,8	110	44,0
1996	03-04.08.	20,7	23,4	25,4	02:00 - 04:40	02h 40'	2,7	160	25,4
1997	20.06.	7,0	13,4	13,8	20:10 - 03:30	07h 20'	7,3	440	17,6
1998	04-05.05.	7,2	13,8	18,2	07:00 - 15:00	08h 00'	8,0	480	27,2
2000	11-12.07.	6,1	7,2	7,9	00:00 - 04:10	04h 10'	4,2	250	10,5
2001	14-15.06.	14,1	24,4	35,1	07:00 - 01:00	18h 00'	18,0	1080	94,3
2002	28-29.05.	7,2	9,2	9,4	13:55 - 03:50	13h 55'	13,9	835	32,9
2003	10-11.09.	5,3	6,5	9,0	07:00 - 17:00	10h 00'	10,0	600	20,4
2004	26-27.07.	19,0	19,0	19,2	18:00 - 06:50	12h 50'	12,8	770	46,9
2005	02-03.07.	12,1	23,1	27,1	07:00 - 02:40	19h 40'	19,7	1180	51,3
2006	02-03.07.	12,7	19,5	21,6	15:45 - 21:00	05h 15'	5,3	315	37,4
2007	06-07.05.	9,2	13,3	17,4	11:15 - 06:50	19h 35'	19,6	1175	50,2
2008	05-06.06.	23,8	32,7	33,0	04:00 - 07:00	03h 00'	3,0	180	33,0

6.2 МОДЕЛ 1 - МОДЕЛ ТРУПА ПРУГЕ МИНИМАЛНО ЗАХТЕВАНИХ ДИМЕНЗИЈА

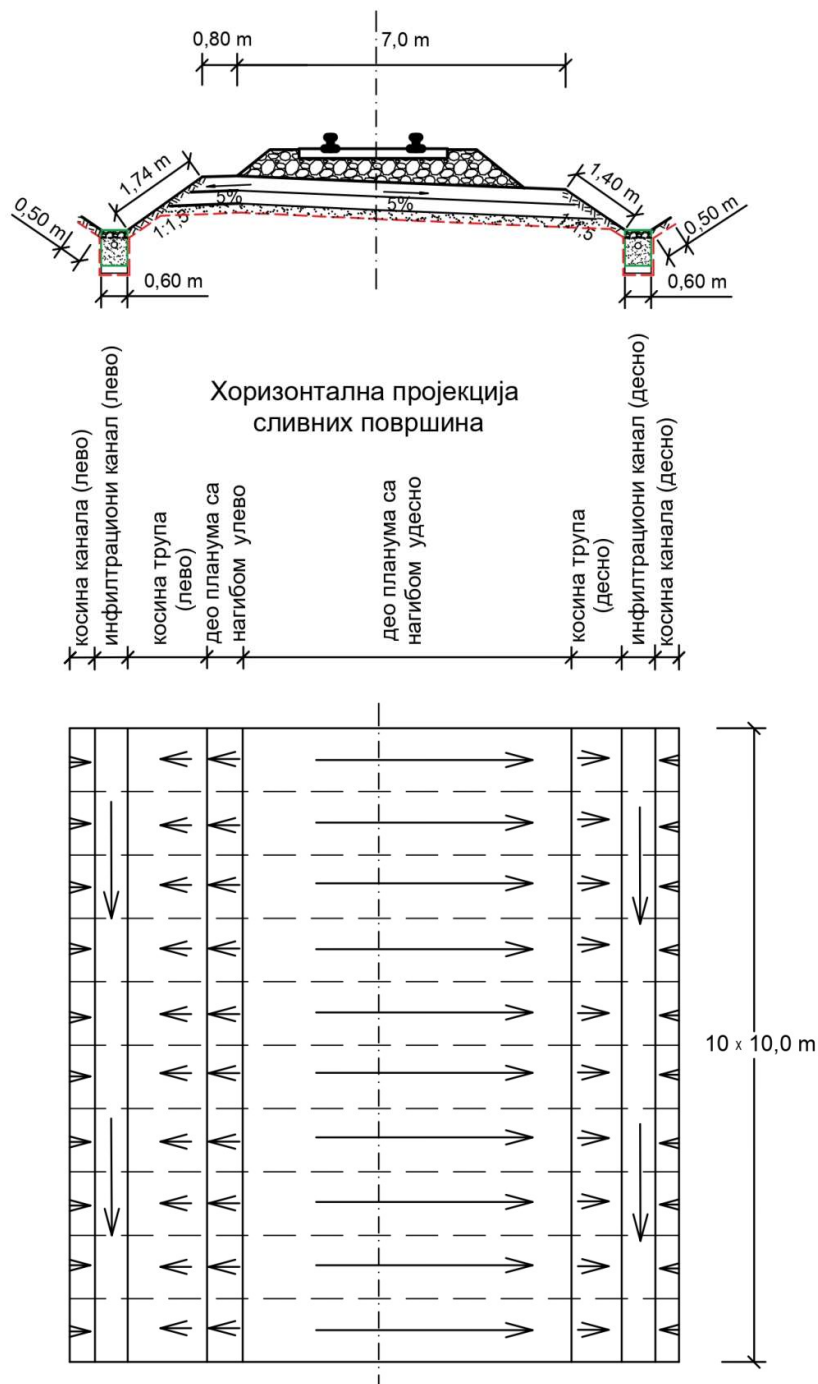
У оквиру првог модела (Модел 1 - Модел трупа пруге минимално захтеваних димензија), испитан је укупни отицај са трупа пруге у случају пројектовања трупа пруге са класичним одводним јарковима (Модел 1.1) и отицаја када су уместо одводних јаркова употребљени новопредложени инфилтрациони канали (Модел 1.2). Овај први модел се односи на минималну захтевану димензију трупа пруге према Правилнику подсистема инфраструктуре железница. Изглед трупа пруге за разматране варијанте, Модела 1.1 и Модела 1.2, приказан је на Сликама 6.2 и 6.3. Такође, извршена је провера капацитета цевастог пропуста у трупу пруге и цевовода који води до реципијента.

Модел који обухвата труп пруге са елементима за одводњавање у облику одводних јаркова (у даљем тексту Модел 1.1), према карактеристикама пруге приказаним на Слици 6.2, садржи следеће сливне површине: део планума са нагибом улево ($PL_1, PL_2, \dots, PL_{10}$), део планума са нагибом удесно ($PD_1, PD_2, \dots, PD_{10}$) и косине трупа (лево ($KTL_1, KTL_2, \dots, KTL_{10}$) и десно ($KTD_1, KTD_2, \dots, KTD_{10}$)).

Модел који обухвата труп пруге са елементима за одводњавање у виду инфилтрационих канала (у даљем тексту Модел 1.2), према карактеристикама пруге приказаним на Слици 6.3, садржи следеће сливне површине: део планума са нагибом улево ($PL_1, PL_2, \dots, PL_{10}$), део планума са нагибом удесно ($PD_1, PD_2, \dots, PD_{10}$), косине трупа (лево ($KTL_1, KTL_2, \dots, KTL_{10}$) и десно ($KTD_1, KTD_2, \dots, KTD_{10}$)), косине канала (лево ($KKL_1, KKL_2, \dots, KKL_{10}$) и десно ($KKD_1, KKD_2, \dots, KKD_{10}$)) и саме инфилтрационе канале (лево ($IKL_1, IKL_2, \dots, IKL_{10}$) и десно ($IKD_1, IKD_2, \dots, IKD_{10}$)).



Слика 6.2 Репрезентативни попречни пресек трупа пруге са одводним јарковима и хоризонталном пројекцијом сливних површина (Модел 1.1)



Слика 6.3 Репрезентативни попречни пресек трупа пруге са инфилтрационим каналима и хоризонталном пројекцијом сливних површина (Модел 1.2)

За потребе формирања Модела 1.1 и Модела 1.2 дефинисани су улазни подаци у виду елементарних карактеристика горе наведених површина. Предвиђено је да површине, које су означене као део планума са нагибом улево ($PL_1, PL_2, \dots, PL_{10}$) и део планума са нагибом удесно ($PD_1, PD_2, \dots, PD_{10}$) у софтверу буду дефинисане као површине сачињене од песковитог шљунка. Део планума са нагибом у лево је ширине 0,80 m док је ширина планума са нагибом у десно 7,00 m. Нагиби ових површина су супротно оријентисани и износе 5%. У оквиру софтвера, осим геометријских карактеристика, тип површине је дефинисан и Манинговим коефицијентом (Manning's coefficient) [Rossman, 2015]. Вредност овог коефицијента за оба дела планума износи 0,04.

У случају Модела 1.1 је планум у софтверу дефинисан као пропусна површина. Косине трупа пруге (лево ($KTL_1, KTL_2, \dots, KTL_{10}$) и десно ($KTD_1, KTD_2, \dots, KTD_{10}$)) су одређене као затрављене косине нагиба 1:1,5. За Манингов коефицијент у корист ових површина је усвојена вредност 0,24 а површине су третиране као пропусне.

За Модел 1.1, ширине леве и десне косине трупа пруге су дате на Слици 6.2. Одводни јаркови, који се као елемент за одводњавање трупа пруге јављају у Моделу 1.1, у софтверу SWMM се дефинишу као линковани елементи ограничени чворовима. Број линкова са једне и друге стране трупа износи по 10. Одводни јаркови су облика трапеца ширине дна 0,35 m и дубине канала 0,35 m. Канали су затрављени и ближе одређени Манинговим коефицијентом за отворене канале, чија вредност у моделу износи 0,035. Канали су разматрани са подужним нагибом од 1.0%, а сам нагиб је дефинисан висинским положајем чворова.

За разлику од Модела 1.1, у Моделу 1.2 су све површине третиране као водонепропусне, укључујући: планум (део планума са нагибом у лево и део планума са нагибом у десно), косине трупа, косине канала и инфилтрационе канале. Карактеристике планума и косина трупа наведене код Модела 1.1 важе и код Модела 1.2. Канали за одводњавање који се код Модела 1.2 јављају у облику инфилтрационих канала у софтверу се третирају као површине. Предвиђено је да инфилтрациони канали (лево ($IKL_1, IKL_2, \dots, IKL_{10}$) и десно ($IKD_1, IKD_2, \dots, IKD_{10}$)) буду ширине 0,60 m, дубине 0,60 m и подужног нагиба 1%. Дренажна цев је на висини 0,40 m од дна канала. Једна од најважнијих особина код дефинисања материјала у инфилтрационом каналу јесте да се јавља однос шупљина и агрегата дефинисан као коефицијент порозности (*void ratio*).

За случај Модела 1.2 и материјал којим је испуњен инфилтрациони канал, усвојено је да је вредност коефицијента порозности 0,4, док је вредност Манинговог коефицијента материјала 0,035. Остатак површине која припада одводном јарку код Модела 1.1, у случају Модела 1.2 дефинисан је као косина канала (лево ($KKL_1, KKL_2, \dots, KKL_{10}$) и десно ($KKD_1, KKD_2, \dots, KKD_{10}$)) ширине 0,50 m и нагиба 1:1,5. Овај део јарка у софтверу је дефинисан као затрављена површина са Манинговим коефицијентом 0,240. Остатак до пуне ширине профила на име одводног јарка, који постоји у Моделу 1.1, у Моделу 1.2 се додаје косини трупа пруге са једне и друге стране. На овај начин је гарантована идентична ширина испитиваног пружног појаса у Моделу 1.1 и Моделу 1.2.

Моделу су формирану на основу хоризонталних пројекција диференцираних сливних површина приказаних на Сликама 6.2 и 6.3. Геометријске карактеристике диференцираних поља сливних површина дужине 10 m су приказане у Табели 6.2 (за Модел 1.1) и Табели 6.3 (за Модел 1.2). Табеле такође садрже податке о материјалу од кога је одређена површина сачињена (чије су карактеристике изражене преко Манинговог коефицијента). Сливне површине, попут планума, косина трупа, косина канала и инфилтрационих канала, обухваћене Моделом 1.1 и Моделом 1.2, у софтверу су шематски приказане шрафираним правоугаоником. Површине су на шеми симболично повезане испрекиданим линијама које представљају пут сливања воде са једне на другу површину, па све до чворова који повезују канале. Канали за одводњавање у виду одводних јаркова, цевастих пропуста и цевовода су приказани линијама, чији је положај утврђен чворовима у виду тачака. Изглед одговарајућих шема модела преузетих из софтвера SWMM приказани су на Сликама 6.4 и 6.5.

Табела 6.2 Карактеристике сливних површина Модела 1.1

Сливно подручје		Површина сливног подручја (m ²)	Ширина сливног подручја (m)	Нагиб сливног подручја (%)	Манингов коефицијент	Позиција испуста
Део планума са нагибом удесно	PD ₁	70,0	7,00	5	0,04	KTD ₁
	PD ₂	70,0	7,00	5	0,04	KTD ₂
	PD ₃	70,0	7,00	5	0,04	KTD ₃
	PD ₄	70,0	7,00	5	0,04	KTD ₄
	PD ₅	70,0	7,00	5	0,04	KTD ₅
	PD ₆	70,0	7,00	5	0,04	KTD ₆
	PD ₇	70,0	7,00	5	0,04	KTD ₇
	PD ₈	70,0	7,00	5	0,04	KTD ₈
	PD ₉	70,0	7,00	5	0,04	KTD ₉
	PD ₁₀	70,0	7,00	5	0,04	KTD ₁₀
Део планума са нагибом улево	PL ₁	8,0	0.80	5	0,04	KTL ₁
	PL ₂	8,0	0.80	5	0,04	KTL ₂
	PL ₃	8,0	0.80	5	0,04	KTL ₃
	PL ₄	8,0	0.80	5	0,04	KTL ₄
	PL ₅	8,0	0.80	5	0,04	KTL ₅
	PL ₆	8,0	0.80	5	0,04	KTL ₆
	PL ₇	8,0	0.80	5	0,04	KTL ₇
	PL ₈	8,0	0.80	5	0,04	KTL ₈
	PL ₉	8,0	0.80	5	0,04	KTL ₉
	PL ₁₀	8,0	0.80	5	0,04	KTL ₁₀
Косина трупа на левој страни пруге	KTL ₁	12,4	1,24	67	0,24	OJL ₁
	KTL ₂	12,4	1,24	67	0,24	OJL ₂
	KTL ₃	12,4	1,24	67	0,24	OJL ₃
	KTL ₄	12,4	1,24	67	0,24	OJL ₄
	KTL ₅	12,4	1,24	67	0,24	OJL ₅
	KTL ₆	12,4	1,24	67	0,24	OJL ₆
	KTL ₇	12,4	1,24	67	0,24	OJL ₇
	KTL ₈	12,4	1,24	67	0,24	OJL ₈
	KTL ₉	12,4	1,24	67	0,24	OJL ₉
	KTL ₁₀	12,4	1,24	67	0,24	OJL ₁₀
Косина трупа на десној страни пруге	KTD ₁	9,0	0,90	67	0,24	OJD ₁
	KTD ₂	9,0	0,90	67	0,24	OJD ₂
	KTD ₃	9,0	0,90	67	0,24	OJD ₃
	KTD ₄	9,0	0,90	67	0,24	OJD ₄
	KTD ₅	9,0	0,90	67	0,24	OJD ₅
	KTD ₆	9,0	0,90	67	0,24	OJD ₆
	KTD ₇	9,0	0,90	67	0,24	OJD ₇
	KTD ₈	9,0	0,90	67	0,24	OJD ₈
	KTD ₉	9,0	0,90	67	0,24	OJD ₉
	KTD ₁₀	9,0	0,90	67	0,24	OJD ₁₀

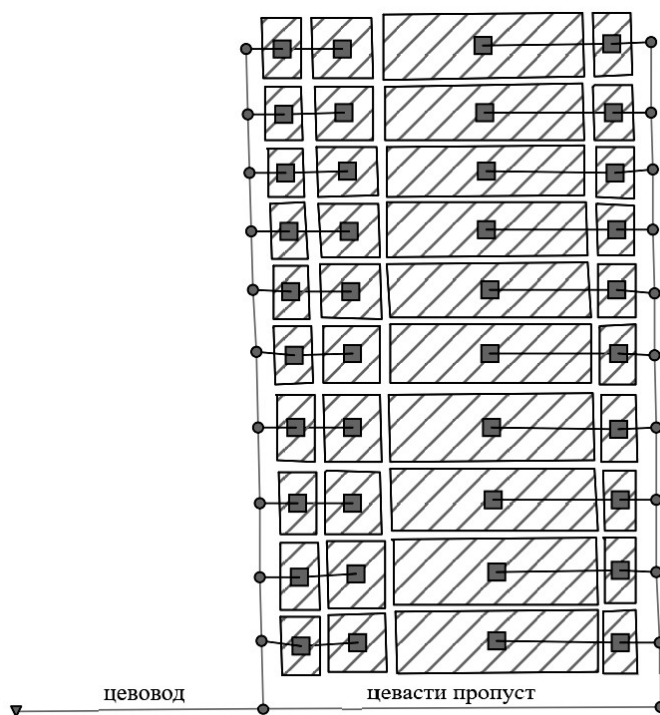
*PL – део планума са нагибом улево; PD – део планума са нагибом удесно; KTL – косина трупа лево; KTD – косина трупа десно; OJL – одводни јарак лево; OJD – одводни јарак десно

Табела 6.3 Карактеристике сливних површина Модела 1.2

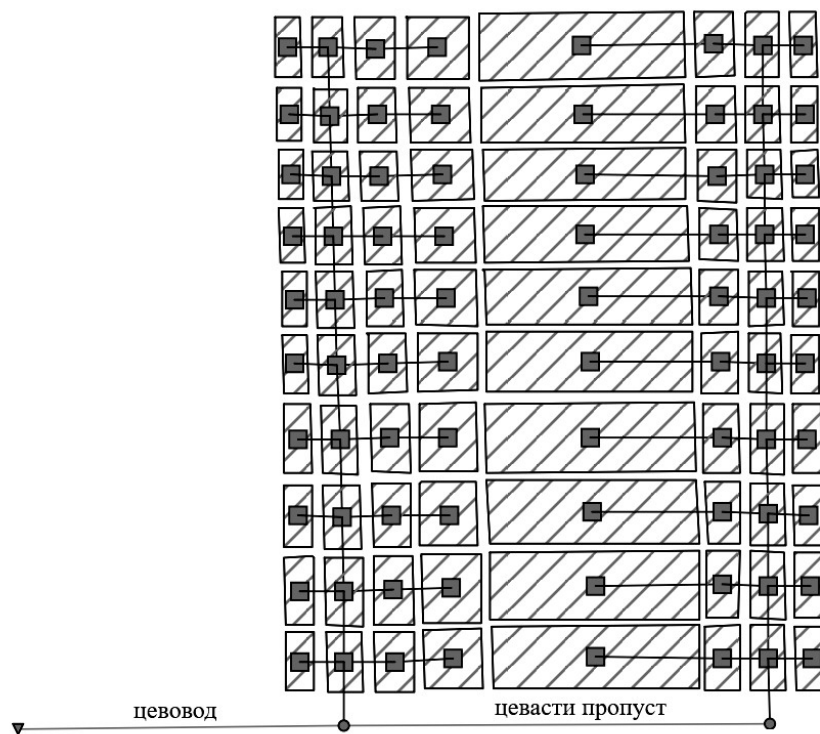
Сливно подручје		Површина сливног подручја (m ²)	Ширина сливног подручја (m)	Нагиб сливног подручја (%)	Манингов коефицијент	Позиција испуста
Део планума са нагибом удесно	PD ₁	70,0	7,00	5	0,040	KTD ₁
	PD ₂	70,0	7,00	5	0,040	KTD ₂
	PD ₃	70,0	7,00	5	0,040	KTD ₃
	PD ₄	70,0	7,00	5	0,040	KTD ₄
	PD ₅	70,0	7,00	5	0,040	KTD ₅
	PD ₆	70,0	7,00	5	0,040	KTD ₆
	PD ₇	70,0	7,00	5	0,040	KTD ₇
	PD ₈	70,0	7,00	5	0,040	KTD ₈
	PD ₉	70,0	7,00	5	0,040	KTD ₉
	PD ₁₀	70,0	7,00	5	0,040	KTD ₁₀
Део планума са нагибом улево	PL ₁	8,0	0,80	5	0,040	KTL ₁
	PL ₂	8,0	0,80	5	0,040	KTL ₂
	PL ₃	8,0	0,80	5	0,040	KTL ₃
	PL ₄	8,0	0,80	5	0,040	KTL ₄
	PL ₅	8,0	0,80	5	0,040	KTL ₅
	PL ₆	8,0	0,80	5	0,040	KTL ₆
	PL ₇	8,0	0,80	5	0,040	KTL ₇
	PL ₈	8,0	0,80	5	0,040	KTL ₈
	PL ₉	8,0	0,80	5	0,040	KTL ₉
	PL ₁₀	8,0	0,80	5	0,040	KTL ₁₀
Косина трупа на левој страни пруге	KTL ₁	17,4	1,74	67	0,240	IKL ₁
	KTL ₂	17,4	1,74	67	0,240	IKL ₂
	KTL ₃	17,4	1,74	67	0,240	IKL ₃
	KTL ₄	17,4	1,74	67	0,240	IKL ₄
	KTL ₅	17,4	1,74	67	0,240	IKL ₅
	KTL ₆	17,4	1,74	67	0,240	IKL ₆
	KTL ₇	17,4	1,74	67	0,240	IKL ₇
	KTL ₈	17,4	1,74	67	0,240	IKL ₈
	KTL ₉	17,4	1,74	67	0,240	IKL ₉
	KTL ₁₀	17,4	1,74	67	0,240	IKL ₁₀
Косина трупа на десној страни пруге	KTD ₁	14,0	1,40	67	0,240	IKD ₁
	KTD ₂	14,0	1,40	67	0,240	IKD ₂
	KTD ₃	14,0	1,40	67	0,240	IKD ₃
	KTD ₄	14,0	1,40	67	0,240	IKD ₄
	KTD ₅	14,0	1,40	67	0,240	IKD ₅
	KTD ₆	14,0	1,40	67	0,240	IKD ₆
	KTD ₇	14,0	1,40	67	0,240	IKD ₇
	KTD ₈	14,0	1,40	67	0,240	IKD ₈
	KTD ₉	14,0	1,40	67	0,240	IKD ₉
	KTD ₁₀	14,0	1,40	67	0,240	IKD ₁₀
Косина канала лево од трупа пруге	KKL ₁	5,0	0,50	67	0,240	IKL ₁
	KKL ₂	5,0	0,50	67	0,240	IKL ₂
	KKL ₃	5,0	0,50	67	0,240	IKL ₃
	KKL ₄	5,0	0,50	67	0,240	IKL ₄
	KKL ₅	5,0	0,50	67	0,240	IKL ₅
	KKL ₆	5,0	0,50	67	0,240	IKL ₆
	KKL ₇	5,0	0,50	67	0,240	IKL ₇

Косина канала десно од трупа пруге	KKL ₈	5,0	0,50	67	0,240	IKL ₈
	KKL ₉	5,0	0,50	67	0,240	IKL ₉
	KKL ₁₀	5,0	0,50	67	0,240	IKL ₁₀
	KKD ₁	5,0	0,50	67	0,240	IKD ₁
	KKD ₂	5,0	0,50	67	0,240	IKD ₂
	KKD ₃	5,0	0,50	67	0,240	IKD ₃
	KKD ₄	5,0	0,50	67	0,240	IKD ₄
	KKD ₅	5,0	0,50	67	0,240	IKD ₅
	KKD ₆	5,0	0,50	67	0,240	IKD ₆
	KKD ₇	5,0	0,50	67	0,240	IKD ₇
	KKD ₈	5,0	0,50	67	0,240	IKD ₈
Инфилтрациони канал са леве стране трупа пруге	IKL ₁	6,0	0,60	1	0,035	IKL ₂
	IKL ₂	6,0	0,60	1	0,035	IKL ₃
	IKL ₃	6,0	0,60	1	0,035	IKL ₄
	IKL ₄	6,0	0,60	1	0,035	IKL ₅
	IKL ₅	6,0	0,60	1	0,035	IKL ₆
	IKL ₆	6,0	0,60	1	0,035	IKL ₇
	IKL ₇	6,0	0,60	1	0,035	IKL ₈
	IKL ₈	6,0	0,60	1	0,035	IKL ₉
	IKL ₉	6,0	0,60	1	0,035	IKL ₁₀
	IKL ₁₀	6,0	0,60	1	0,035	Верт.окно-лево
Инфилтрациони канал са десне стране трупа пруге	IKD ₁	6,0	0,60	1	0,035	IKD ₂
	IKD ₂	6,0	0,60	1	0,035	IKD ₃
	IKD ₃	6,0	0,60	1	0,035	IKD ₄
	IKD ₄	6,0	0,60	1	0,035	IKD ₅
	IKD ₅	6,0	0,60	1	0,035	IKD ₆
	IKD ₆	6,0	0,60	1	0,035	IKD ₇
	IKD ₇	6,0	0,60	1	0,035	IKD ₈
	IKD ₈	6,0	0,60	1	0,035	IKD ₉
	IKD ₉	6,0	0,60	1	0,035	IKD ₁₀
	IKD ₁₀	6,0	0,60	1	0,035	Верт.окно-десно

* PL – део планума са нагибом улево; PD – део планума са нагибом удесно; KTL – косина трупа лево; KTD – косина трупа десно; KKL – косина канала лево; KKD – косина канала десно; IKL – инфилтрациони канал лево; IKD – инфилтрациони канал десно



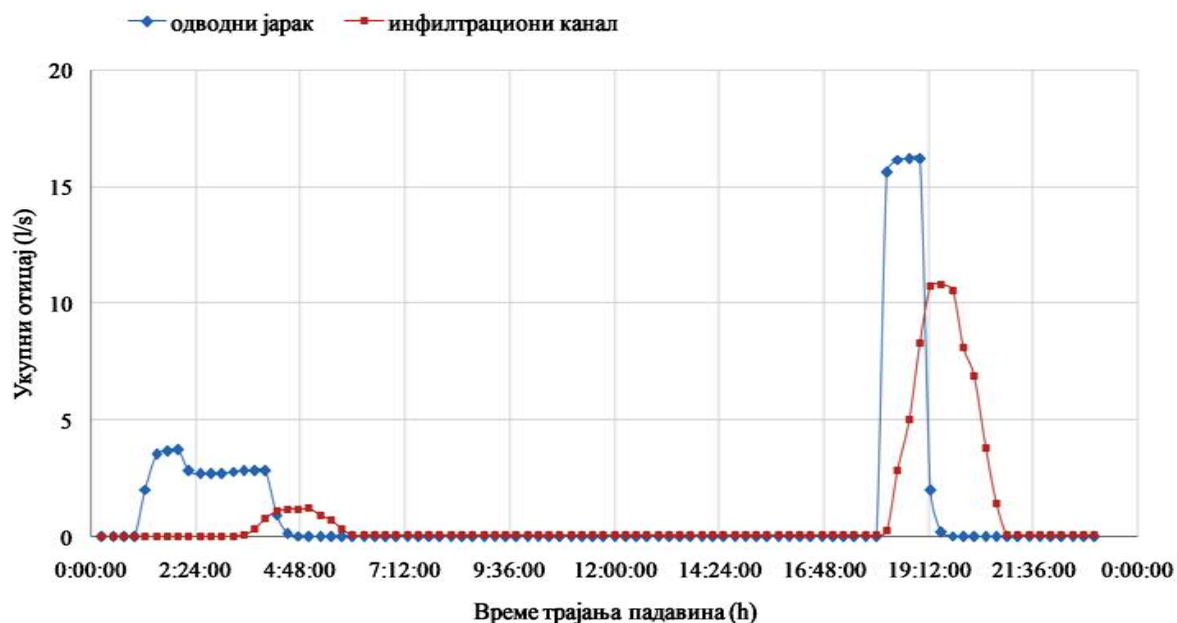
Слика 6.4 Изглед шеме Модела 1.1



Слика 6.5 Изглед шеме Модела 1.2

Симулацијом горе наведених падавина, добијени су дијаграми укупног отицаја за посматрано подручје трупа пруге и оба начина одводњавања, тј. за Модел 1.1 и Модел 1.2 (Слика 6.6). У софтверу SWMM је проверен и капацитет искоришћења цевастог пропуста у трупу пруге (Слика 6.7) и цевовода (Слика 6.8) који од вертикалног окна одводи воду до реципијента у случају Модела 1.1 и Модела 1.2.

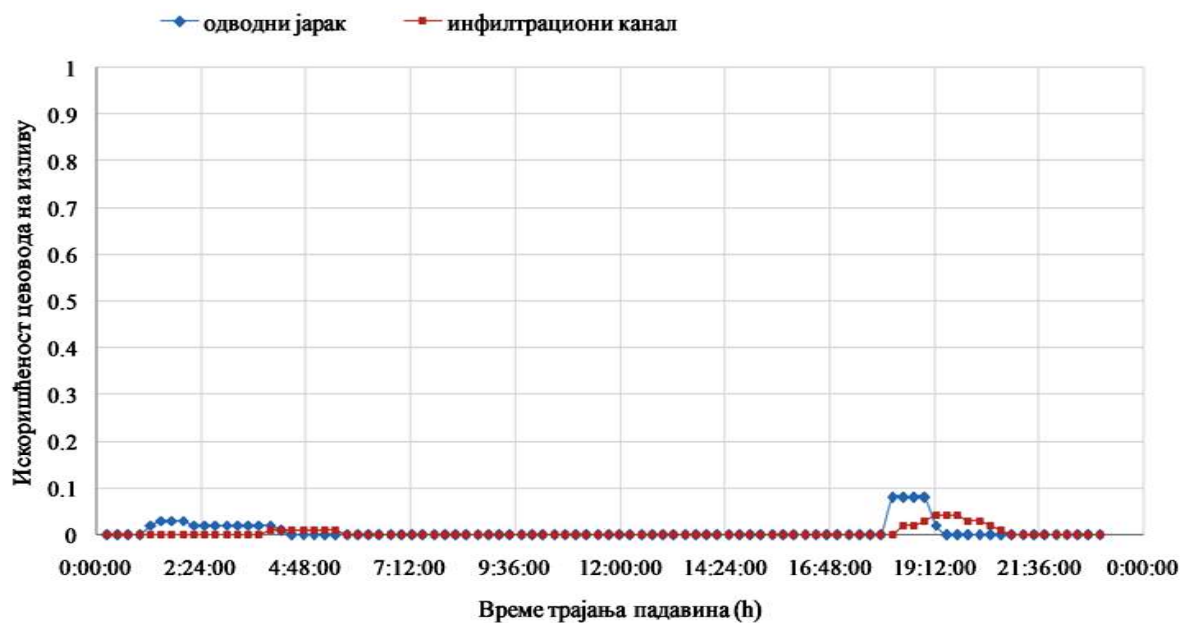
Анализом резултата добијених применом Модела 1, утврђено је да је у случају Модела 1.2 (са новопредложеним инфилтрационим каналима) укупни отицај мањи за око 30% у поређењу са укупним отицајем у Моделу 1.1 (са класичним одводним јарковима). У случају Модела 1.2 је приметно смањење количине вршног отицаја и одлагање времена истог (Слика 6.6) Овакав резултат указује на то да нема повећања количине отицаја у Моделу 1.2, без обзира што је цео труп моделиран као водонепропустан. Ово је неповољнији сценарио, пошто би у реалним условима труп до водонепропусне фолије у заштитном и прелазном слоју инфилтрирао одређену количину воде. Капацитет искоришћења цевастог пропуста у трупу пруге и цевовода на изливу не прелази 10% у случају оба модела (Слике 6.7 и 6.8).



Слика 6.6 Поређење количине укупног отицаја при одводњавању одводним јарковима (Модел 1.1) и количине при одводњавању инфилтрационим каналима (Модел 1.2)



Слика 6.7 Искоришћеност капацитета цевастог пропуста при одводњавању одводним јарковима (Модел 1.1) и при одводњавању инфилтрационим каналима (Модел 1.2)



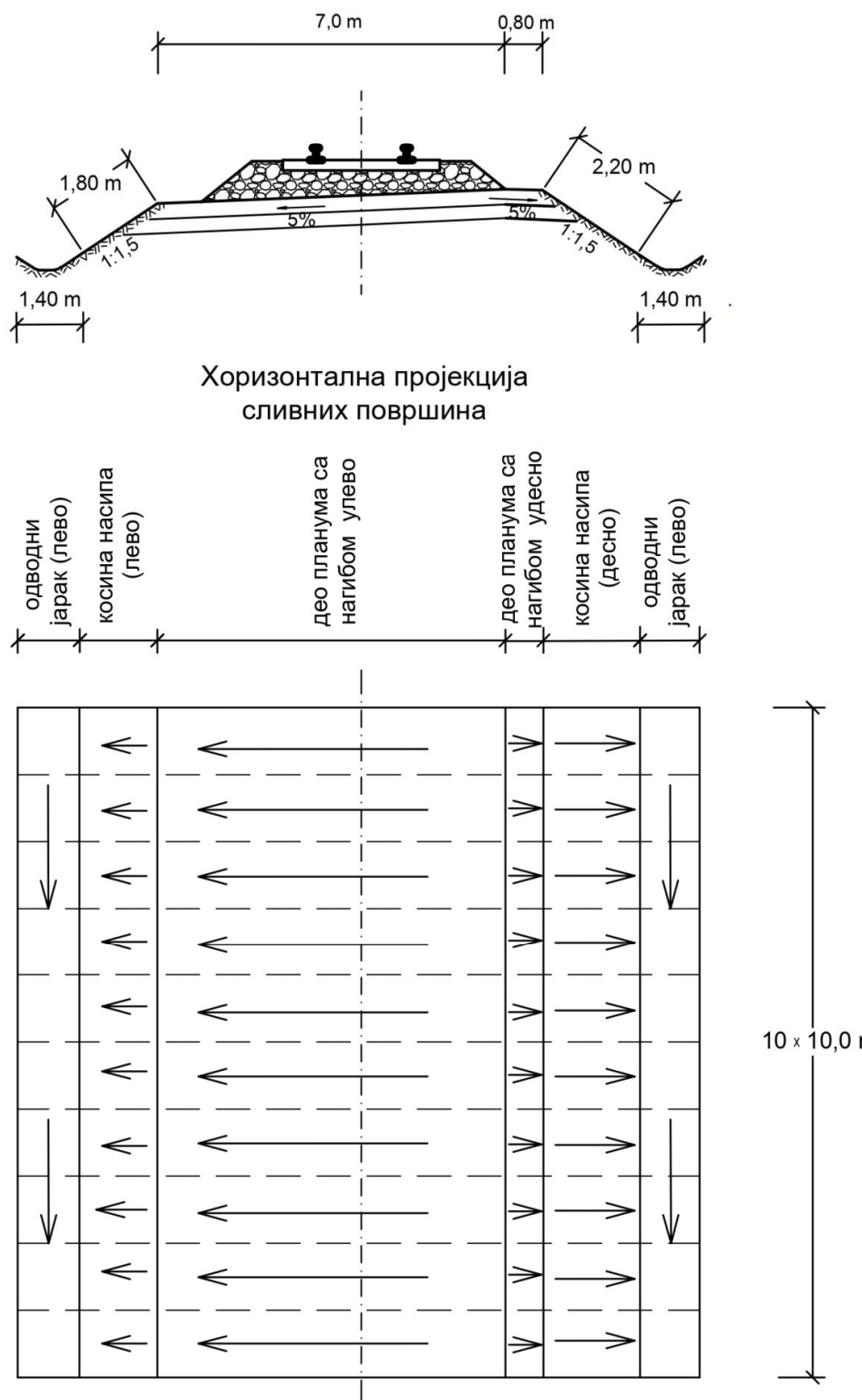
Слика 6.8 Искоришћеност капацитета ценовода на изливу при одводњавању одводним јарковима (Модел 1.1) и при одводњавању инфилтрационим каналима (Модел 1.2)

6.3 МОДЕЛ 2 - МОДЕЛ ТРУПА ПРУГЕ У НАСИПУ

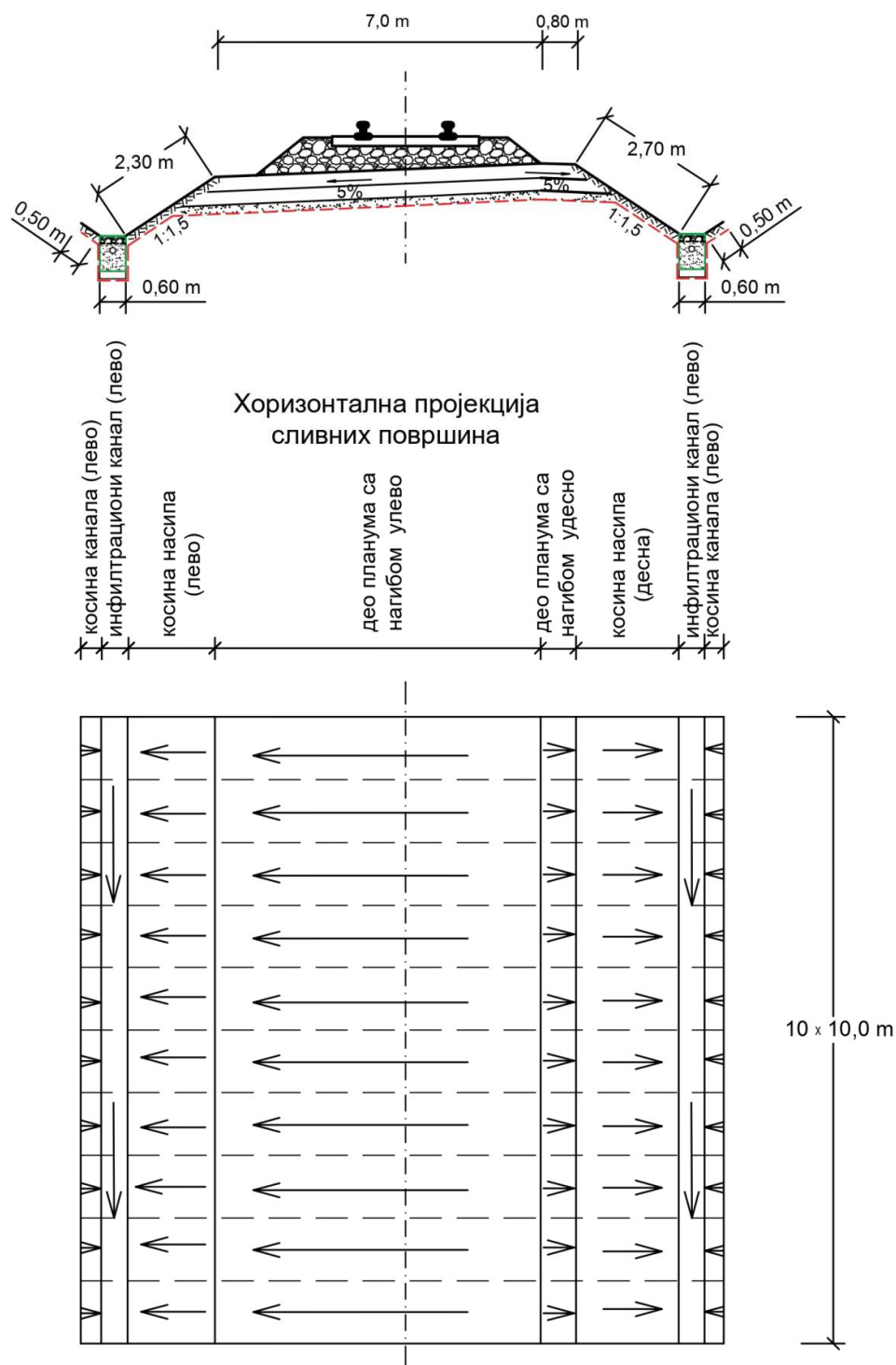
У оквиру другог модела (Модел 2 - Модел трупа пруге у насипу), испитан је укупни отицај са трупа пруге у случају пројектовања трупа пруге са класичним одводним јарковима (Модел 2.1) и отицаја када су уместо одводних јаркова употребљени новопредложени инфилтрациони канали (Модел 2.2). Изглед трупа пруге за разматране варијанте, Модел 2.1 и Модел 2.2, приказан је на Сликама 6.9 и 6.10. Такође, извршена је провера капацитета цевастог пропуста у трупу пруге и цевовода који води до реципијента.

Модел који обухвата труп пруге са елементима за одводњавање у облику одводних јаркова (у даљем тексту Модел 2.1), према карактеристикама пруге приказаним на Слици 6.9, садржи следеће сливне површине: део планума са нагибом улево ($PL_1, PL_2, \dots, PL_{10}$), део планума са нагибом удесно ($PD_1, PD_2, \dots, PD_{10}$) и косине насипа (лево ($KNL_1, KNL_2, \dots, KNL_{10}$) и десно ($KND_1, KND_2, \dots, KND_{10}$)).

Модел који обухвата труп пруге са елементима за одводњавање у виду инфилтрационих канала (у даљем тексту Модел 2.2), према карактеристикама пруге приказаним на Слици 6.10, садржи следеће сливне површине: део планума са нагибом улево ($PL_1, PL_2, \dots, PL_{10}$), део планума са нагибом удесно ($PD_1, PD_2, \dots, PD_{10}$), косине насипа (лево ($KNL_1, KNL_2, \dots, KNL_{10}$) и десно ($KND_1, KND_2, \dots, KND_{10}$)), косине канала (лево ($KKL_1, KKL_2, \dots, KKL_{10}$) и десно ($KKD_1, KKD_2, \dots, KKD_{10}$)) и саме инфилтрационе канале (лево ($IKL_1, IKL_2, \dots, IKL_{10}$) и десно ($IKD_1, IKD_2, \dots, IKD_{10}$)).



Слика 6.9 Репрезентативни попречни пресек пруге у насипу са одводним јарковима и хоризонталном пројекцијом сливних површина (Модел 2.1)



Слика 6.10 Репрезентативни попречни пресек пруге у насипу са инфилтрационим каналима и хоризонталном пројекцијом сливних површина (Модел 2.2)

За потребе формирања Модела 2.1 и Модела 2.2 дефинисани су улазни подаци у виду елементарних карактеристика горе наведених површина. Предвиђено је да површине, које су означене као део планума са нагибом улево ($PL_1, PL_2, \dots, PL_{10}$) и део планума са нагибом удесно ($PD_1, PD_2, \dots, PD_{10}$) у софтверу буду дефинисане као површине сачињене од песковитог шљунка. Ширина дела планума са нагибом у лево износи 7,0 m, док је део планума са нагибом у десно ширине 0,80 m. Нагиби ових површина су супротно оријентисани и износе 5%. Вредност Манинговог коефицијента за оба дела планума износи 0,04.

У случају Модела 2.1 је планум у софтверу дефинисан као пропусна површина. Косине насипа пруге (лево ($KNL_1, KNL_2, \dots, KNL_{10}$) и десно ($KND_1, KND_2, \dots, KND_{10}$)) су одређене као затрављене косине нагиба 1:1,5. За Манингов коефицијент у корист ових површина је усвојена вредност 0,24 а површине су третиране као пропусне.

За Модел 2.1, ширине леве и десне косине насипа пруге су дате на Слици 6.9. Одводни јаркови, који се као елемент за одводњавање трупа пруге јављају у Моделу 2.1, у софтверу SWMM се дефинишу као линковани елементи ограничени чворовима. Број линкова са једне и друге стране трупа износи по 10. Одводни јаркови су облика трапеца ширине дна 0,35 m и дубине канала 0,35 m. Канали су затрављени и ближе одређени Манинговим коефицијентом за отворене канале, чија вредност у моделу износи 0,035. Канали су разматрани са подужним нагибом од 1.0%, а сам нагиб је дефинисан висинским положајем чворова.

У случају Модела 2.2 су све површине третиране као водонепропусне, укључујући: планум (део планума са нагибом у лево и део планума са нагибом у десно), косине насипа, косине канала и инфилтрационе канале. Карактеристике планума и косина насипа наведене код Модела 2.1 важе и код Модела 2.2. Канали за одводњавање који се код Модела 2.2 јављају у облику инфилтрационих канала у софтверу се третирају као површине. Предвиђено је да инфилтрациони канали (лево ($IKL_1, IKL_2, \dots, IKL_{10}$) и десно ($IKD_1, IKD_2, \dots, IKD_{10}$)) буду ширине 0,60 m, дубине 0,60 m и подужног нагиба 1%. Дренажна цев је на висини 0,40 m од дна канала. За случај Модела 2.2 и материјал којим је испуњен инфилтрациони канал, усвојено је да је вредност коефицијента порозности 0,4, док је вредност Манинговог коефицијента материјала 0,035. Остатак површине која припада одводном јарку код Модела 2.1, у

случају Модела 2.2 дефинисан је као косина канала (лево ($KKL_1, KKL_2, \dots, KKL_{10}$) и десно ($KKD_1, KKD_2, \dots, KKD_{10}$)) ширине 0,50 m и нагиба 1:1,5. Овај део јарка у софтверу је дефинисан као затрављена површина са Манинговим коефицијентом 0,240. Остатак до пуне ширине профила на име одводног јарка, који постоји у Моделу 2.1, у Моделу 2.2 се додаје косини насипа пруге са једне и друге стране. На овај начин је гарантована идентична ширина испитиваног пружног појаса у Моделу 2.1 и Моделу 2.2.

Модели су формиран на основу хоризонталних пројекција диференцираних сливних површина приказаних на Сликама 6.9 и 6.10. Геометријске карактеристике диференцираних поља сливних површина дужине 10 m су приказане у Табели 6.4 (за Модел 2.1) и Табели 6.5 (за Модел 2.2). Табеле такође садрже податке о материјалу од кога је одређена површина сачињена (чије су карактеристике изражене преко Манинговог коефицијента). Сливне површине, попут планума, косина насипа, косина канала и инфилтрационих канала, обухваћене Моделом 2.1 и Моделом 2.2, у софтверу су шематски приказане шрафираним правоугаоником. Површине су на шеми симболично повезане непрекинутим линијама које представљају пут сливања воде са једне на другу површину, па све до чворова који повезују канале. Канали за одводњавање у виду одводних јаркова, цевастих пропуста и цевовода су приказани линијама, чији је положај утврђен чворовима у виду тачака. Изглед одговарајућих шема модела преузетих из софтвера SWMM приказани су на Сликама 6.11 и 6.12.

Табела 6.4 Карактеристике сливних површина Модела 2.1

Сливно подручје		Површина сливног подручја (m ²)	Ширина сливног подручја (m)	Нагиб сливног подручја (%)	Манингов коефицијент	Позиција испуста
Део планума са нагибом улево	PL ₁	70,0	7,00	5	0,04	KNL ₁
	PL ₂	70,0	7,00	5	0,04	KNL ₂
	PL ₃	70,0	7,00	5	0,04	KNL ₃
	PL ₄	70,0	7,00	5	0,04	KNL ₄
	PL ₅	70,0	7,00	5	0,04	KNL ₅
	PL ₆	70,0	7,00	5	0,04	KNL ₆
	PL ₇	70,0	7,00	5	0,04	KNL ₇
	PL ₈	70,0	7,00	5	0,04	KNL ₈
	PL ₉	70,0	7,00	5	0,04	KNL ₉
	PL ₁₀	70,0	7,00	5	0,04	KNL ₁₀

Део планума са нагибом удесно	PD ₁	8,0	0,80	5	0,04	KND ₁
	PD ₂	8,0	0,80	5	0,04	KND ₂
	PD ₃	8,0	0,80	5	0,04	KND ₃
	PD ₄	8,0	0,80	5	0,04	KND ₄
	PD ₅	8,0	0,80	5	0,04	KND ₅
	PD ₆	8,0	0,80	5	0,04	KND ₆
	PD ₇	8,0	0,80	5	0,04	KND ₇
	PD ₈	8,0	0,80	5	0,04	KND ₈
	PD ₉	8,0	0,80	5	0,04	KND ₉
	PD ₁₀	8,0	0,80	5	0,04	KND ₁₀
Косина група на левој страни пруге	KNL ₁	12,4	1,24	67	0,24	OJL ₁
	KNL ₂	12,4	1,24	67	0,24	OJL ₂
	KNL ₃	12,4	1,24	67	0,24	OJL ₃
	KNL ₄	12,4	1,24	67	0,24	OJL ₄
	KNL ₅	12,4	1,24	67	0,24	OJL ₅
	KNL ₆	12,4	1,24	67	0,24	OJL ₆
	KNL ₇	12,4	1,24	67	0,24	OJL ₇
	KNL ₈	12,4	1,24	67	0,24	OJL ₈
	KNL ₉	12,4	1,24	67	0,24	OJL ₉
	KNL ₁₀	12,4	1,24	67	0,24	OJL ₁₀
Косина група на десној страни пруге	KND ₁	9,0	0,90	67	0,24	OJD ₁
	KND ₂	9,0	0,90	67	0,24	OJD ₂
	KND ₃	9,0	0,90	67	0,24	OJD ₃
	KND ₄	9,0	0,90	67	0,24	OJD ₄
	KND ₅	9,0	0,90	67	0,24	OJD ₅
	KND ₆	9,0	0,90	67	0,24	OJD ₆
	KND ₇	9,0	0,90	67	0,24	OJD ₇
	KND ₈	9,0	0,90	67	0,24	OJD ₈
	KND ₉	9,0	0,90	67	0,24	OJD ₉
	KND ₁₀	9,0	0,90	67	0,24	OJD ₁₀

**PL – део планума са нагибом улево; PD – део планума са нагибом удесно; KTL – косина насипа лево; KTD – косина насипа десно; OJL – одводни јарак лево; OJD – одводни јарак десно

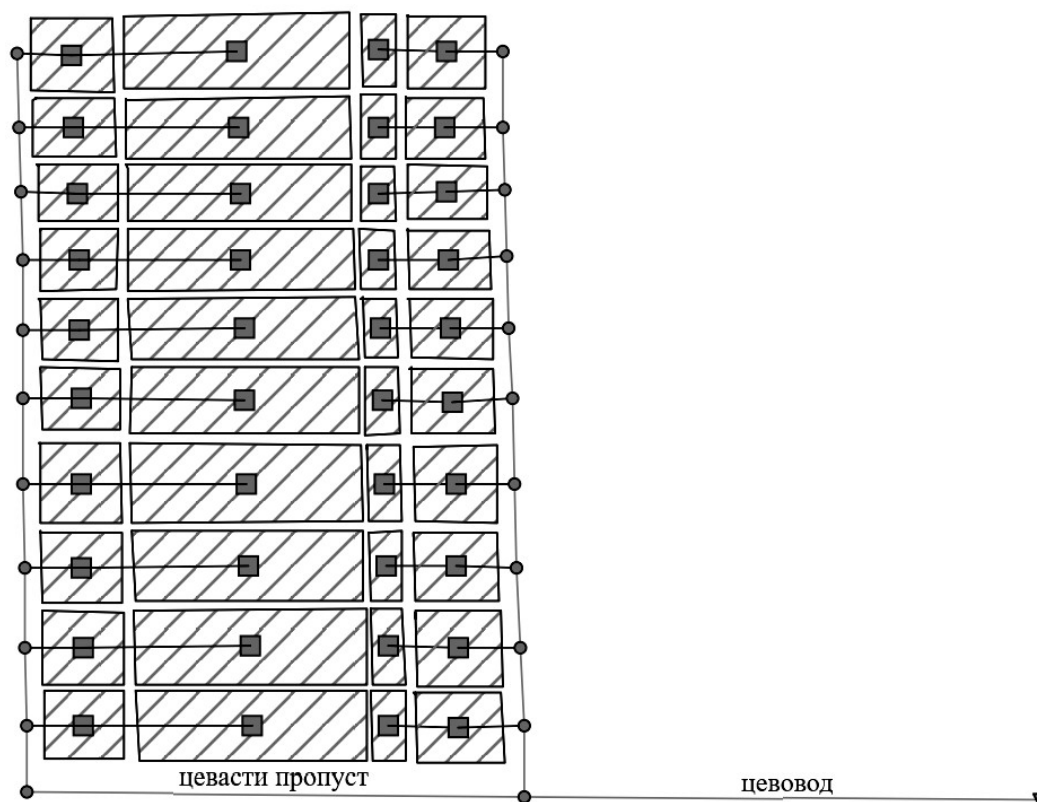
Табела 6.5 Карактеристике сливних површина Модела 2.2

Сливно подручје		Површина сливног подручја (m ²)	Ширина сливног подручја (m)	Нагиб сливног подручја (%)	Манингов коефицијент	Позиција испуста
Део планума са нагибом улево	PL ₁	70,0	7,0	5	0,04	KNL ₁
	PL ₂	70,0	7,0	5	0,04	KNL ₂
	PL ₃	70,0	7,0	5	0,04	KNL ₃
	PL ₄	70,0	7,0	5	0,04	KNL ₄
	PL ₅	70,0	7,0	5	0,04	KNL ₅
	PL ₆	70,0	7,0	5	0,04	KNL ₆
	PL ₇	70,0	7,0	5	0,04	KNL ₇
	PL ₈	70,0	7,0	5	0,04	KNL ₈
	PL ₉	70,0	7,0	5	0,04	KNL ₉
	PL ₁₀	70,0	7,0	5	0,04	KNL ₁₀

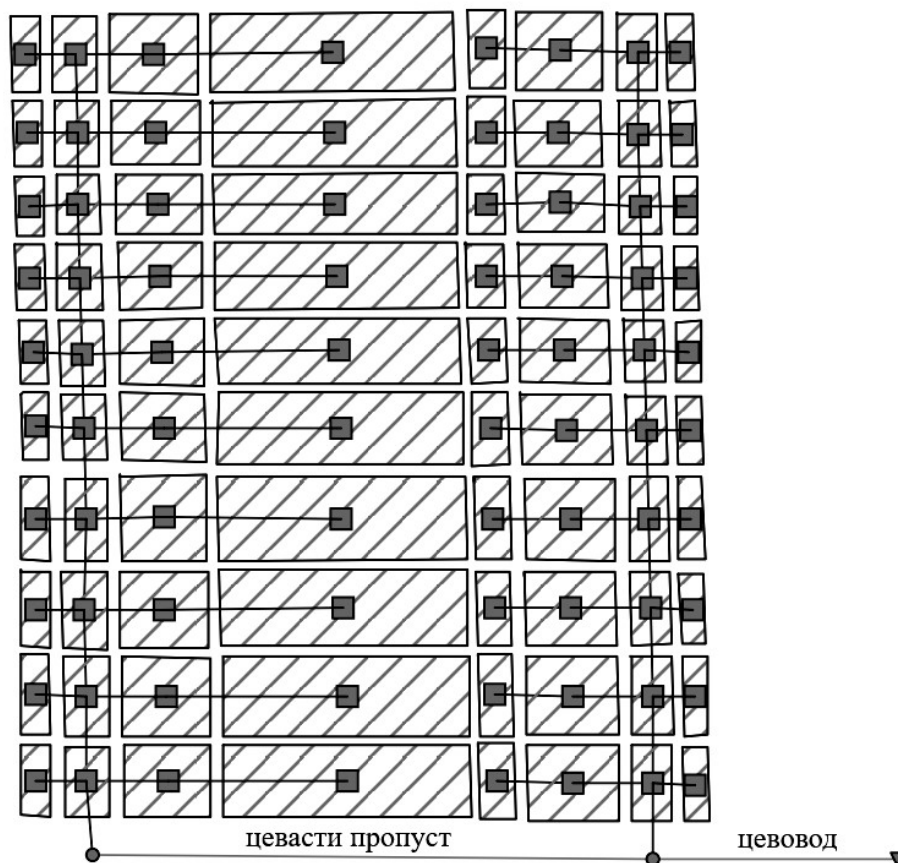
Инфилтрацион и канал са леве стране трупa пруге	Део планума са нагибом удесно	PD ₁	8,0	0,8	5	0,04	KND ₁
		PD ₂	8,0	0,8	5	0,04	KND ₂
		PD ₃	8,0	0,8	5	0,04	KND ₃
		PD ₄	8,0	0,8	5	0,04	KND ₄
		PD ₅	8,0	0,8	5	0,04	KND ₅
		PD ₆	8,0	0,8	5	0,04	KND ₆
		PD ₇	8,0	0,8	5	0,04	KND ₇
		PD ₈	8,0	0,8	5	0,04	KND ₈
		PD ₉	8,0	0,8	5	0,04	KND ₉
		PD ₁₀	8,0	0,8	5	0,04	KND ₁₀
	Косина насипа на левој страни трупa пруге	KNL ₁	23,0	2,3	67	0,24	IKL ₁
		KNL ₂	23,0	2,3	67	0,24	IKL ₂
		KNL ₃	23,0	2,3	67	0,24	IKL ₃
		KNL ₄	23,0	2,3	67	0,24	IKL ₄
		KNL ₅	23,0	2,3	67	0,24	IKL ₅
		KNL ₆	23,0	2,3	67	0,24	IKL ₆
		KNL ₇	23,0	2,3	67	0,24	IKL ₇
		KNL ₈	23,0	2,3	67	0,24	IKL ₈
		KNL ₉	23,0	2,3	67	0,24	IKL ₉
		KNL ₁₀	23,0	2,3	67	0,24	IKL ₁₀
	Косина насипа на десној страни трупa пруге	KND ₁	27,0	2,7	67	0,24	IKD ₁
		KND ₂	27,0	2,7	67	0,24	IKD ₂
		KND ₃	27,0	2,7	67	0,24	IKD ₃
		KND ₄	27,0	2,7	67	0,24	IKD ₄
		KND ₅	27,0	2,7	67	0,24	IKD ₅
		KND ₆	27,0	2,7	67	0,24	IKD ₆
		KND ₇	27,0	2,7	67	0,24	IKD ₇
		KND ₈	27,0	2,7	67	0,24	IKD ₈
		KND ₉	27,0	2,7	67	0,24	IKD ₉
		KND ₁₀	27,0	2,7	67	0,24	IKD ₁₀
	Косина канала са леве стране трупa пруге	KKL ₁	5,0	0,5	67	0,24	IKL ₁
		KKL ₂	5,0	0,5	67	0,24	IKL ₂
		KKL ₃	5,0	0,5	67	0,24	IKL ₃
		KKL ₄	5,0	0,5	67	0,24	IKL ₄
		KKL ₅	5,0	0,5	67	0,24	IKL ₅
		KKL ₆	5,0	0,5	67	0,24	IKL ₆
		KKL ₇	5,0	0,5	67	0,24	IKL ₇
		KKL ₈	5,0	0,5	67	0,24	IKL ₈
		KKL ₉	5,0	0,5	67	0,24	IKL ₉
		KKL ₁₀	5,0	0,5	67	0,24	IKL ₁₀
	Косина канала са десне стране трупa пруге	KKD ₁	5,0	0,5	67	0,24	IKD ₁
		KKD ₂	5,0	0,5	67	0,24	IKD ₂
		KKD ₃	5,0	0,5	67	0,24	IKD ₃
		KKD ₄	5,0	0,5	67	0,24	IKD ₄
		KKD ₅	5,0	0,5	67	0,24	IKD ₅
		KKD ₆	5,0	0,5	67	0,24	IKD ₆
		KKD ₇	5,0	0,5	67	0,24	IKD ₇
		KKD ₈	5,0	0,5	67	0,24	IKD ₈
		KKD ₉	5,0	0,5	67	0,24	IKD ₉
		KKD ₁₀	5,0	0,5	67	0,24	IKD ₁₀
	Инфилтрацион и канал са леве стране трупa пруге	IKL ₁	6,0	0,6	1	0,04	IKL ₂
		IKL ₂	6,0	0,6	1	0,04	IKL ₃
		IKL ₃	6,0	0,6	1	0,04	IKL ₄
		IKL ₄	6,0	0,6	1	0,04	IKL ₅
		IKL ₅	6,0	0,6	1	0,04	IKL ₆
		IKL ₆	6,0	0,6	1	0,04	IKL ₇
		IKL ₇	6,0	0,6	1	0,04	IKL ₈

Инфилтрациони канал са десне стране группе	IKL ₈	6,0	0,6	1	0,04	IKL ₉
	IKL ₉	6,0	0,6	1	0,04	IKL ₁₀
	IKL ₁₀	6,0	0,6	1	0,04	Вертикално окно-лево
	IKD ₁	6,0	0,6	1	0,04	IKD ₂
	IKD ₂	6,0	0,6	1	0,04	IKD ₃
	IKD ₃	6,0	0,6	1	0,04	IKD ₄
	IKD ₄	6,0	0,6	1	0,04	IKD ₅
	IKD ₅	6,0	0,6	1	0,04	IKD ₆
	IKD ₆	6,0	0,6	1	0,04	IKD ₇
	IKD ₇	6,0	0,6	1	0,04	IKD ₈
	IKD ₈	6,0	0,6	1	0,04	IKD ₉
	IKD ₉	6,0	0,6	1	0,04	IKD ₁₀
	IKD ₁₀	6,0	0,6	1	0,04	Верг. окно-десно

** PL – део планума са нагибом улево; PD – део планума са нагибом удесно; KNL – косина насипа лево; KND – косина насипа десно; KKL – косина канала лево; KKD – косина канала десно; IKL – инфилтрациони канал лево; IKD- инфилтрациони канал десно



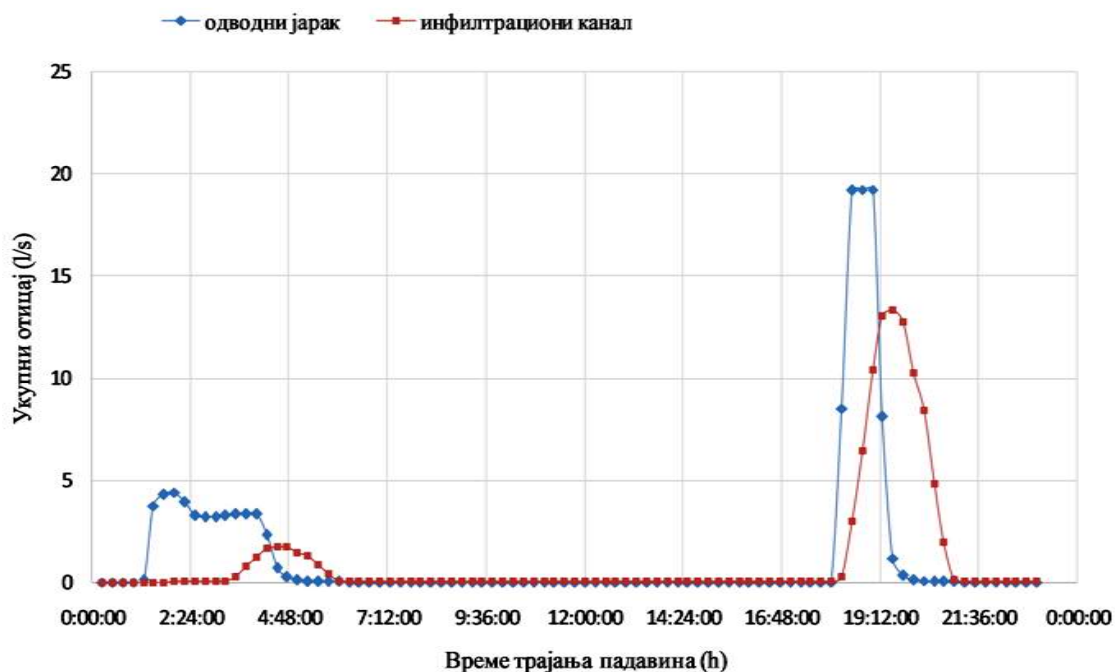
Слика 6.11 Изглед шеме Модела 2.1



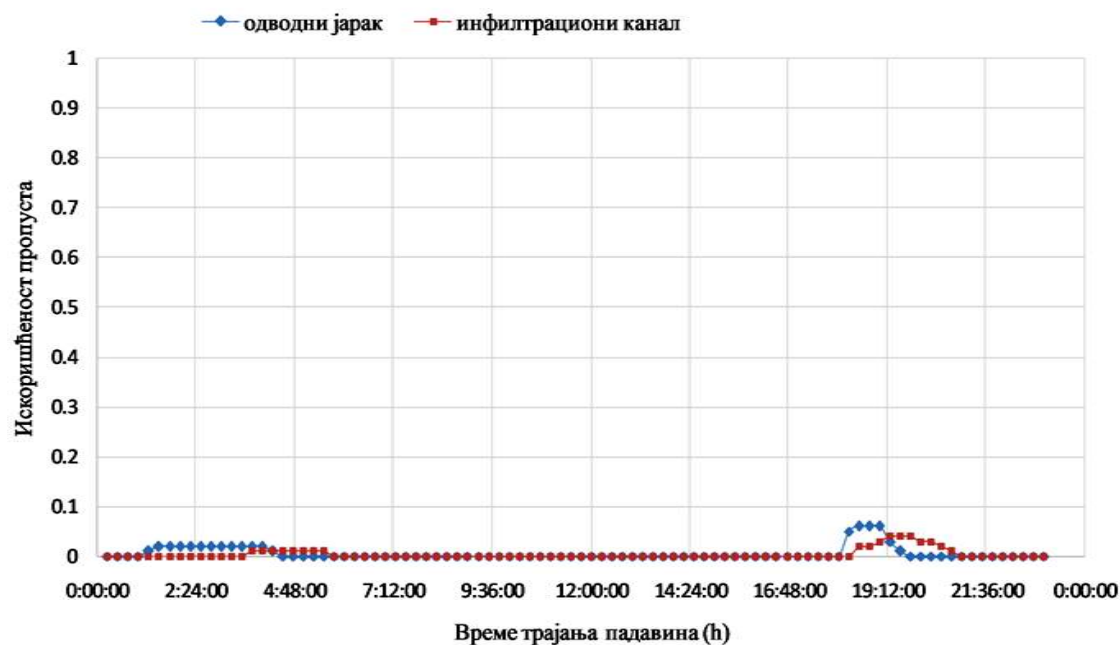
Слика 6.12 Изглед шеме Модела 2.2

Симулацијом горе наведених падавина, добијени су дијаграми укупног отицаја за посматрано подручје трупа пруге и оба начина одводњавања, тј. за Модел 2.1 и Модел 2.2 (Слика 6.13). У софтверу SWMM је проверен и капацитет искоришћења цевастог пропуста у трупу пруге (Слика 6.14) и цевовода (Слика 6.15) који од вертикалног окна одводи воду до реципијента у случају Модела 2.1 и Модела 2.2.

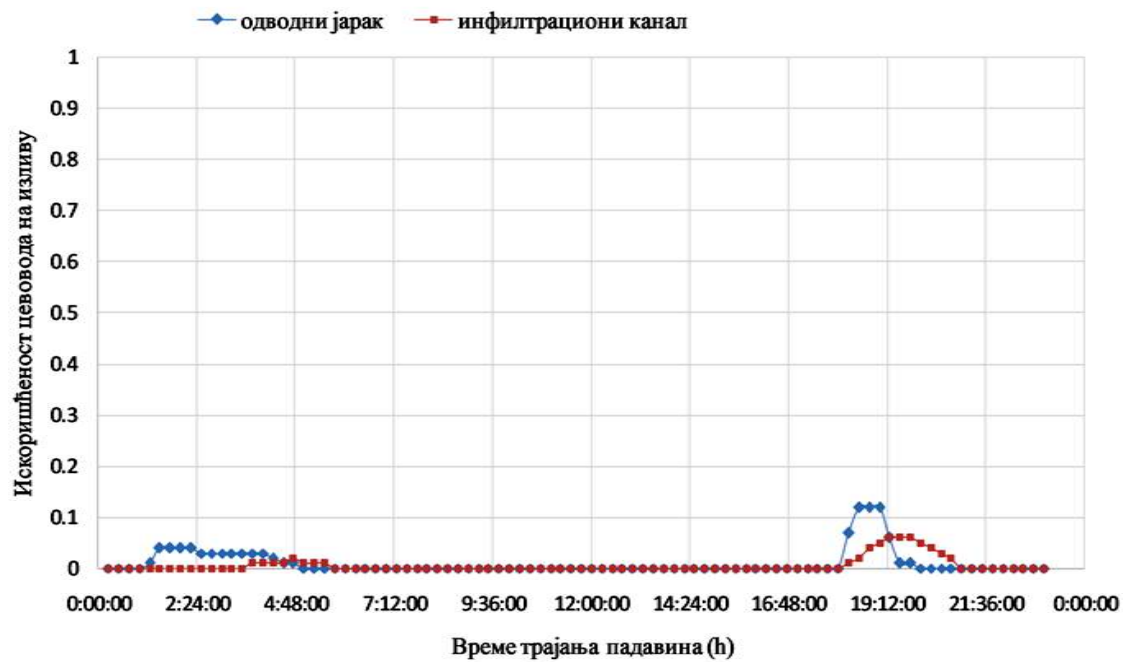
Анализом резултата добијених применом Модела 2, утврђено је да је у случају Модела 2.2 (са новопредложеним инфилтрационим каналима) укупни отицај мањи за око 30% у поређењу са укупним отицајем у Моделу 2.1 (са класичним одводним јарковима). У случају Модела 2.2 је приметно смањење количине вршног отицаја и одлагање времена истог (Слика 6.13) Овакав резултат указује на то да нема повећања количине отицаја у Моделу 2.2, без обзира што је цео труп моделиран као водонепропустан. Капацитет искоришћења цевастог пропуста у трупу пруге и цевовода на изливу не прелази 15% у случају оба модела (Слике 6.14 и 6.15).



Слика 6.13 Поређење количине укупног отицаја при одводњавању одводним јарковима (Модел 2.1) и количине при одводњавању инфилтрационим каналима (Модел 2.2)



Слика 6.14 Искоришћеност капацитета цевастог пропуста при одводњавању одводним јарковима (Модел 2.1) и при одводњавању инфилтрационим каналима (Модел 2.2)



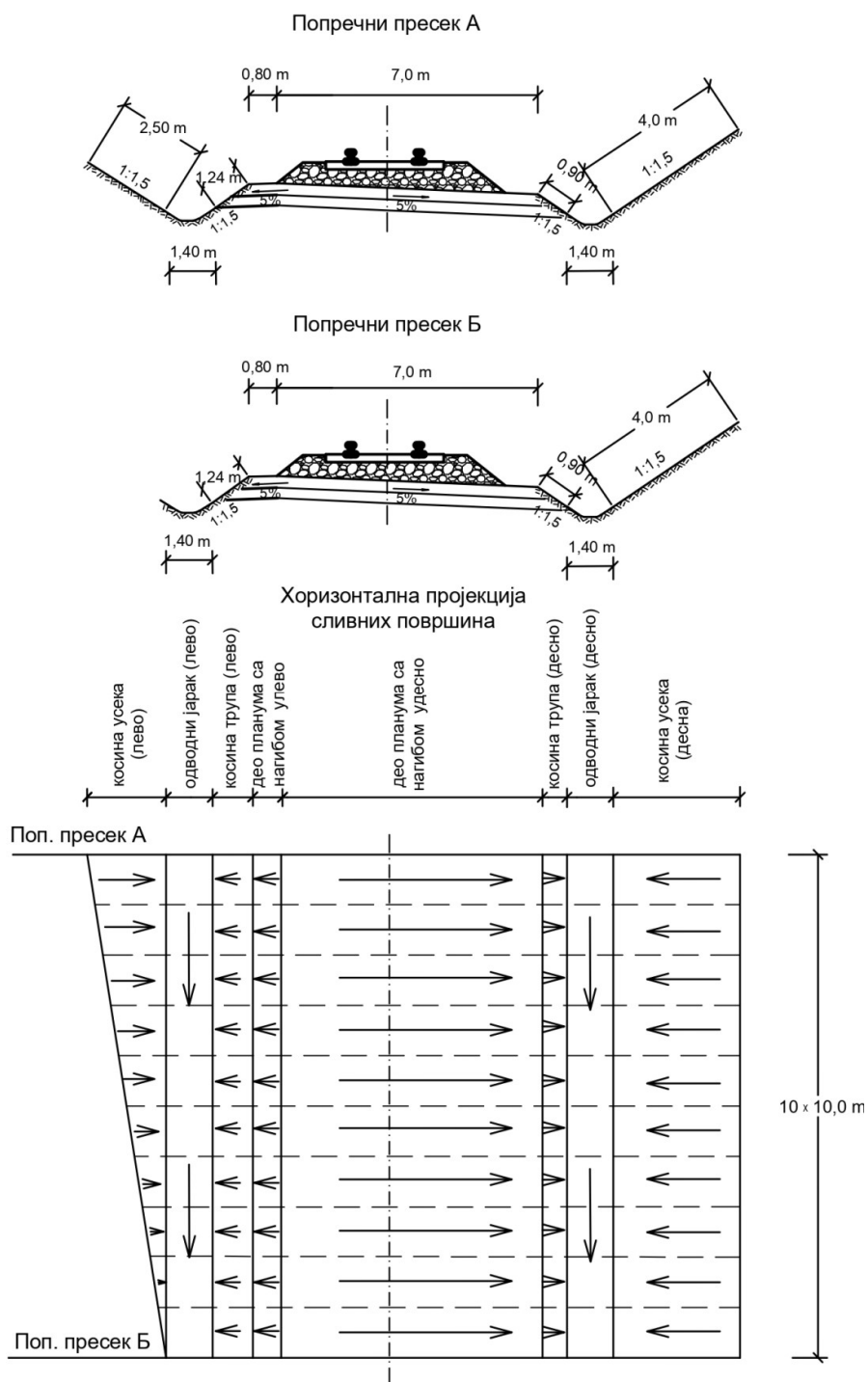
Слика 6.15 Искоришћеност капацитета ценовода на изливу при одводњавању одводним јарковима (Модел 2.1) и при одводњавању инфилтрационим каналима (Модел 2.2)

6.4 МОДЕЛ 3 – МОДЕЛ ТРУПА ПРУГЕ У УСЕКУ

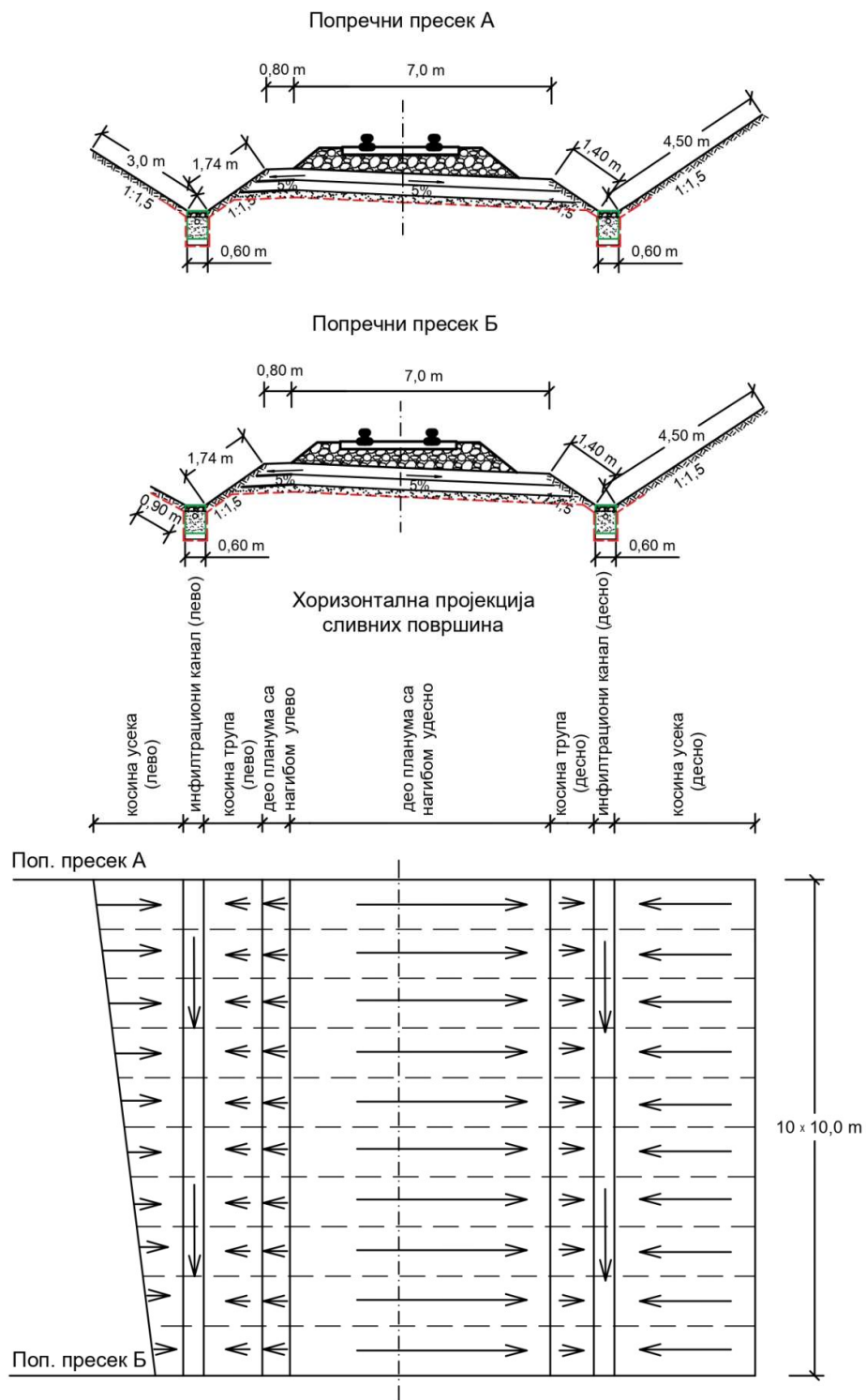
У оквиру трећег модела (Модел 3 - Модел трупа пруге у усеку), испитан је укупни отицај са трупа пруге у случају пројектовања трупа пруге са класичним одводним јарковима (Модел 3.1) и отицаја када су уместо одводних јаркова употребљени новопредложени инфилтрациони канали (Модел 3.2). Изглед трупа пруге за разматране варијанте, Модел 3.1 и Модела 3.2, приказан је на Сликама 6.16 и 6.17. Такође, извршена је провера капацитета цевастог пропуста у трупу пруге и цевовода који води до реципијента.

Модел који обухвата труп пруге са елементима за одводњавање у облику одводних јаркова (у даљем тексту Модел 3.1), према карактеристикама пруге приказаним на Слици 6.16, садржи следеће сливне површине: део планума са нагибом улево ($PL_1, PL_2, \dots, PL_{10}$), део планума са нагибом удесно ($PD_1, PD_2, \dots, PD_{10}$), косине трупа (лево ($KTL_1, KTL_2, \dots, KTL_{10}$) и десно ($KTD_1, KTD_2, \dots, KTD_{10}$)) и косине усека (лево ($KUL_1, KUL_2, \dots, KUL_{10}$) и десно ($KUD_1, KUD_2, \dots, KUD_{10}$)).

Модел који обухвата труп пруге са елементима за одводњавање у виду инфилтрационих канала (у даљем тексту Модел 3.2), према карактеристикама пруге приказаним на Слици 6.17, садржи следеће сливне површине: део планума са нагибом улево ($PL_1, PL_2, \dots, PL_{10}$), део планума са нагибом удесно ($PD_1, PD_2, \dots, PD_{10}$), косине трупа (лево ($KTL_1, KTL_2, \dots, KTL_{10}$) и десно ($KTD_1, KTD_2, \dots, KTD_{10}$)), косине усека (лево ($KUL_1, KUL_2, \dots, KUL_{10}$) и десно ($KUD_1, KUD_2, \dots, KUD_{10}$)) и саме инфилтрационе канале (лево ($IKL_1, IKL_2, \dots, IKL_{10}$) и десно ($IKD_1, IKD_2, \dots, IKD_{10}$)).



Слика 6.16 Репрезентативни попречни пресек пруге у усеку са одводним јарковима и хоризонталном пројекцијом сливних површина (Модел 3.1)



Слика 6.17 Репрезентативни попречни пресек пруге у усеку са инфилтрационим каналима и хоризонталном пројекцијом сливних површина (Модел 3.2)

За потребе формирања Модела 3.1 и Модела 3.2 дефинисани су улазни подаци горе наведених површина. Предвиђено је да површине, које су означене као део планума са нагибом улево ($PL_1, PL_2, \dots, PL_{10}$) и део планума са нагибом удесно ($PD_1, PD_2, \dots, PD_{10}$) у софтверу буду дефинисане као површине сачињене од песковитог шљунка. Ширина дела планума са нагибом у лево је 0,80 m док је ширина планума са нагибом у десно 7,00 m. Нагиби ових површина су супротно оријентисани и износе 5%. Вредност Манинговог коефицијента за планум износи 0,04.

У случају Модела 3.1 планум је дефинисан као пропусна површина. На истом моделу су косине трупа пруге (лево ($KTL_1, KTL_2, \dots, KTL_{10}$) и десно ($KTD_1, KTD_2, \dots, KTD_{10}$)) и косине усека (лево ($KUL_1, KUL_2, \dots, KUL_{10}$) и десно ($KUD_1, KUD_2, \dots, KUD_{10}$)) одређене као затрављене површине нагиба 1:1,5. За Манингов коефицијент у корист ових површина је усвојена вредност 0,24 а површине су третиране као пропусне. За Модел 3.1, ширине леве и десне косине усека пруге, као и косина трупа, су дате на Слици 6.16. Одводни јаркови, који се као елемент за одводњавање трупа пруге јављају у Моделу 3.1, у софтверу SWMM се дефинишу као линковани елементи ограничени чворовима. Број линкова са једне и друге стране трупа износи по 10. Одводни јаркови су облика трапеза ширине дна 0,35 m и дубине канала 0,35 m. Канали су затрављени и ближе одређени Манинговим коефицијентом за отворене канале, чија вредност у моделу износи 0,035. Канали су разматрани са подужним нагибом од 1.0%, а сам нагиб је дефинисан висинским положајем чворова.

За разлику од Модела 3.1, у Моделу 3.2 су све површине у оквиру трупа пруге третиране као водонепропусне, укључујући: планум (део планума са нагибом у лево и део планума са нагибом у десно), косине трупа и инфилтрационе канале. Косине усека се у случају Модела 3.2 третирају као водопропусне. Остале карактеристике свих површина наведених код Модела 3.1 важе и код Модела 3.2. Канали за одводњавање који се код Модела 3.2 јављају у облику инфилтрационих канала у софтверу се третирају као површине. Предвиђено је да инфилтрациони канали (лево ($IKL_1, IKL_2, \dots, IKL_{10}$) и десно ($IKD_1, IKD_2, \dots, IKD_{10}$)) буду ширине 0,60 m, дубине 0,60 m и подужног нагиба 1%. Дренажна цев је на висини 0,40 m од дна канала. За случај Модела 3.2 и материјал којим је испуњен инфилтрациони канал, усвојено је да је вредност коефицијента порозности 0,4, док је вредност Манинговог коефицијента материјала 0,035. Остатак површине која припада одводном јарку код Модела 3.1 (са стране усека лево и десно), у случају Модела 2.2 придружује се косини усека са једне и друге стране

пруге. Као и косина усека, овај део јарка је у софтверу дефинисан као затрављена површина са Манинговим коефицијентом 0,240. Остатак до пуне ширине профила на име одводног јарка (део оријентисан ка трупуге), који постоји у Моделу 3.1, у Моделу 3.2 се додаје косини трупа пруге са једне и друге стране. На овај начин је гарантована идентична ширина испитиваног пружног појаса у Моделу 3.1 и Моделу 3.2.

Моделу су формирану на основу хоризонталних пројекција диференцираних сливних површина приказаних на Сликама 6.16 и 6.17. Геометријске карактеристике диференцираних поља сливних површина дужине 10 m су приказане у Табели 6.6 (за Модел 3.1) и Табели 6.7 (за Модел 3.2). Табеле такође садрже податке о материјалу од кога је одређена површина сачињена (чије су карактеристике изражене преко Манинговог коефицијента). Сливне површине, попут планума, косина трупа, косина усека и инфилтрационих канала, обухваћене Моделом 3.1 и Моделом 3.2, у софтверу су шематски приказане шрафираним правоугаоником. Површине су на шеми симболично повезане непрекинутим линијама које представљају пут сливања воде са једне на другу површину, па све до чворова који повезују канале. Канали за одводњавање у виду одводних јаркова, цевастих пропуста и цевовода су приказани линијама, чији је положај утврђен чворовима у виду тачака. Изглед одговарајућих шема модела преузетих из софтвера SWMM приказани су на Сликама 6.18 и 6.19.

Табела 6.6 Карактеристике сливних површина Модела 3.1

Сливно подручје		Површина сливног подручја (m ²)	Ширина сливног подручја (m)	Нагиб сливног подручја (%)	Манингов коэффициент	Позиција испуста
Део плануума са нагибом удесно	PD ₁	70,00	7,000	5	0,04	KTD ₁
	PD ₂	70,00	7,000	5	0,04	KTD ₂
	PD ₃	70,00	7,000	5	0,04	KTD ₃
	PD ₄	70,00	7,000	5	0,04	KTD ₄
	PD ₅	70,00	7,000	5	0,04	KTD ₅
	PD ₆	70,00	7,000	5	0,04	KTD ₆
	PD ₇	70,00	7,000	5	0,04	KTD ₇
	PD ₈	70,00	7,000	5	0,04	KTD ₈
	PD ₉	70,00	7,000	5	0,04	KTD ₉
	PD ₁₀	70,00	7,000	5	0,04	KTD ₁₀
Део плануума са нагибом улево	PL ₁	8,00	0,800	5	0,04	KTL ₁
	PL ₂	8,00	0,800	5	0,04	KTL ₂
	PL ₃	8,00	0,800	5	0,04	KTL ₃
	PL ₄	8,00	0,800	5	0,04	KTL ₄
	PL ₅	8,00	0,800	5	0,04	KTL ₅
	PL ₆	8,00	0,800	5	0,04	KTL ₆
	PL ₇	8,00	0,800	5	0,04	KTL ₇
	PL ₈	8,00	0,800	5	0,04	KTL ₈
	PL ₉	8,00	0,800	5	0,04	KTL ₉
	PL ₁₀	8,00	0,800	5	0,04	KTL ₁₀
Косина трупа на левој страни пруге	KTL ₁	12,40	1,240	67	0,24	OJL ₁
	KTL ₂	12,40	1,240	67	0,24	OJL ₂
	KTL ₃	12,40	1,240	67	0,24	OJL ₃
	KTL ₄	12,40	1,240	67	0,24	OJL ₄
	KTL ₅	12,40	1,240	67	0,24	OJL ₅
	KTL ₆	12,40	1,240	67	0,24	OJL ₆
	KTL ₇	12,40	1,240	67	0,24	OJL ₇
	KTL ₈	12,40	1,240	67	0,24	OJL ₈
	KTL ₉	12,40	1,240	67	0,24	OJL ₉
	KTL ₁₀	12,40	1,240	67	0,24	OJL ₁₀
Косина трупа на десној страни пруге	KTD ₁	9,00	0,900	67	0,24	OJD ₁
	KTD ₂	9,00	0,900	67	0,24	OJD ₂
	KTD ₃	9,00	0,900	67	0,24	OJD ₃
	KTD ₄	9,00	0,900	67	0,24	OJD ₄
	KTD ₅	9,00	0,900	67	0,24	OJD ₅
	KTD ₆	9,00	0,900	67	0,24	OJD ₆
	KTD ₇	9,00	0,900	67	0,24	OJD ₇
	KTD ₈	9,00	0,900	67	0,24	OJD ₈
	KTD ₉	9,00	0,900	67	0,24	OJD ₉
	KTD ₁₀	9,00	0,900	67	0,24	OJD ₁₀
Косина усека лево од трупа пруге	KUL ₁	23,75	2,375	67	0,24	OJL ₁
	KUL ₂	21,25	2,125	67	0,24	OJL ₂
	KUL ₃	18,75	1,875	67	0,24	OJL ₃
	KUL ₄	16,25	1,625	67	0,24	OJL ₄
	KUL ₅	13,75	1,375	67	0,24	OJL ₅
	KUL ₆	11,25	1,125	67	0,24	OJL ₆
	KUL ₇	8,75	0,875	67	0,24	OJL ₇

Косина усека десно од трупа пруге	KUL ₈	6,25	0,625	67	0,24	OJL ₈
	KUL ₉	3,75	0,375	67	0,24	OJL ₉
	KUL ₁₀	1,25	0,125	67	0,24	OJL ₁₀
	KUD ₁	40,00	4,000	67	0,24	OJD ₁
	KUD ₂	40,00	4,000	67	0,24	OJD ₂
	KUD ₃	40,00	4,000	67	0,24	OJD ₃
	KUD ₄	40,00	4,000	67	0,24	OJD ₄
	KUD ₅	40,00	4,000	67	0,24	OJD ₅
	KUD ₆	40,00	4,000	67	0,24	OJD ₆
	KUD ₇	40,00	4,000	67	0,24	OJD ₇
	KUD ₈	40,00	4,000	67	0,24	OJD ₈
	KUD ₉	40,00	4,000	67	0,24	OJD ₉
	KUD ₁₀	40,00	4,000	67	0,24	OJD ₁₀

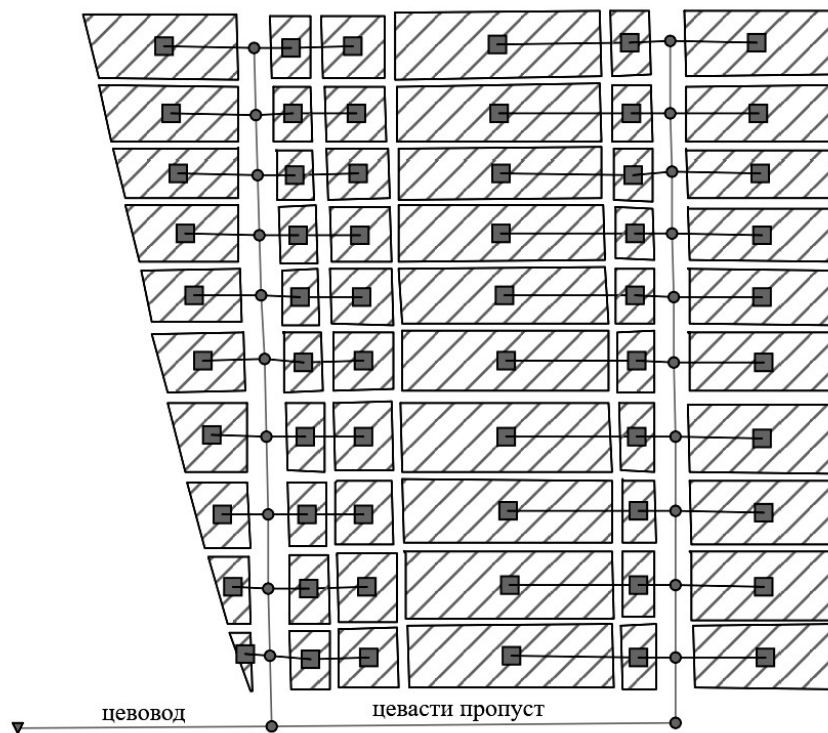
** PL – део планума са нагибом улево; PD – део планума са нагибом удесно; KTL – косина трупа лево; KTD – косина трупа десно; KUL – косина усека лево; KUD – косина усека десно; OJL – одводни јарак лево; OJD – одводни јарак десно

Табела 6.7 Карактеристике сливних површина Модела 3.2

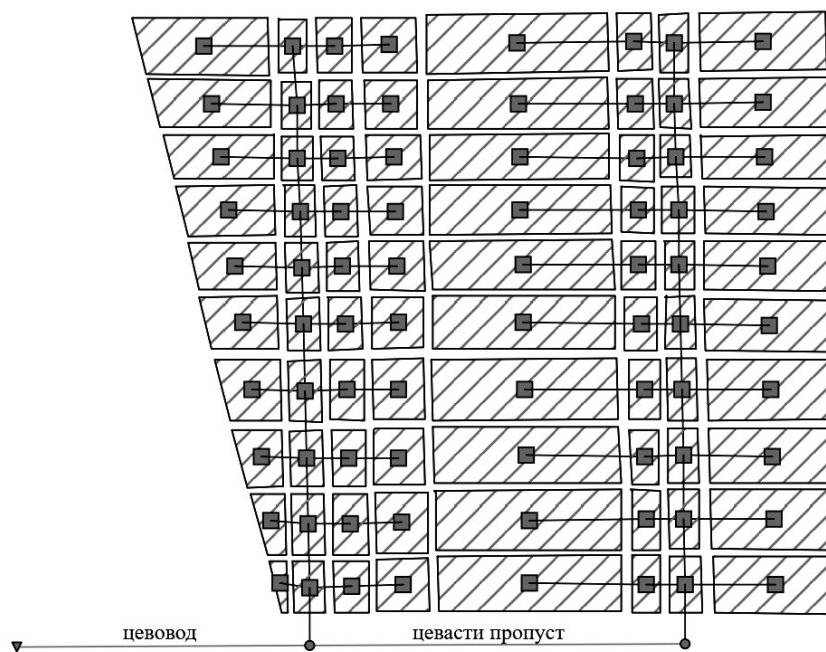
Сливно подручје		Површина сливног подручја (m ²)	Ширина сливног подручја (m)	Нагиб сливног подручја (%)	Манингов коэффициент	Позиција испуста
Део планума са нагибом удесно	PD ₁	70,0	7,00	5	0,04	KTD ₁
	PD ₂	70,0	7,00	5	0,04	KTD ₂
	PD ₃	70,0	7,00	5	0,04	KTD ₃
	PD ₄	70,0	7,00	5	0,04	KTD ₄
	PD ₅	70,0	7,00	5	0,04	KTD ₅
	PD ₆	70,0	7,00	5	0,04	KTD ₆
	PD ₇	70,0	7,00	5	0,04	KTD ₇
	PD ₈	70,0	7,00	5	0,04	KTD ₈
	PD ₉	70,0	7,00	5	0,04	KTD ₉
	PD ₁₀	70,0	7,00	5	0,04	KTD ₁₀
Део планума са нагибом улево	PL ₁	8,0	0,80	5	0,04	KTL ₁
	PL ₂	8,0	0,80	5	0,04	KTL ₂
	PL ₃	8,0	0,80	5	0,04	KTL ₃
	PL ₄	8,0	0,80	5	0,04	KTL ₄
	PL ₅	8,0	0,80	5	0,04	KTL ₅
	PL ₆	8,0	0,80	5	0,04	KTL ₆
	PL ₇	8,0	0,80	5	0,04	KTL ₇
	PL ₈	8,0	0,80	5	0,04	KTL ₈
	PL ₉	8,0	0,80	5	0,04	KTL ₉
	PL ₁₀	8,0	0,80	5	0,04	KTL ₁₀
Косина трупа на левој страни пруге	KTL ₁	17,4	1,74	67	0,24	IKL ₁
	KTL ₂	17,4	1,74	67	0,24	IKL ₂
	KTL ₃	17,4	1,74	67	0,24	IKL ₃
	KTL ₄	17,4	1,74	67	0,24	IKL ₄
	KTL ₅	17,4	1,74	67	0,24	IKL ₅
	KTL ₆	17,4	1,74	67	0,24	IKL ₆
	KTL ₇	17,4	1,74	67	0,24	IKL ₇
	KTL ₈	17,4	1,74	67	0,24	IKL ₈
	KTL ₉	17,4	1,74	67	0,24	IKL ₉

Косина тупа на десној страни пруге	KTL ₁₀	17,4	1,74	67	0,24	IKL ₁₀
	KTD ₁	14,0	1,40	67	0,24	IKD ₁
	KTD ₂	14,0	1,40	67	0,24	IKD ₂
	KTD ₃	14,0	1,40	67	0,24	IKD ₃
	KTD ₄	14,0	1,40	67	0,24	IKD ₄
	KTD ₅	14,0	1,40	67	0,24	IKD ₅
	KTD ₆	14,0	1,40	67	0,24	IKD ₆
	KTD ₇	14,0	1,40	67	0,24	IKD ₇
	KTD ₈	14,0	1,40	67	0,24	IKD ₈
	KTD ₉	14,0	1,40	67	0,24	IKD ₉
	KTD ₁₀	14,0	1,40	67	0,24	IKD ₁₀
Косина усека лево од тупа пруге	KUL ₁	29,0	2,90	67	0,24	IKL ₁
	KUL ₂	27,0	2,70	67	0,24	IKL ₂
	KUL ₃	25,0	2,50	67	0,24	IKL ₃
	KUL ₄	23,0	2,30	67	0,24	IKL ₄
	KUL ₅	20,5	2,05	67	0,24	IKL ₅
	KUL ₆	18,5	1,85	67	0,24	IKL ₆
	KUL ₇	16,4	1,64	67	0,24	IKL ₇
	KUL ₈	14,0	1,40	67	0,24	IKL ₈
	KUL ₉	12,1	1,21	67	0,24	IKL ₉
	KUL ₁₀	10,0	1,00	67	0,24	IKL ₁₀
Косина усека десно од тупа пруге	KUD ₁	45,0	4,50	67	0,24	IKD ₁
	KUD ₂	45,0	4,50	67	0,24	IKD ₂
	KUD ₃	45,0	4,50	67	0,24	IKD ₃
	KUD ₄	45,0	4,50	67	0,24	IKD ₄
	KUD ₅	45,0	4,50	67	0,24	IKD ₅
	KUD ₆	45,0	4,50	67	0,24	IKD ₆
	KUD ₇	45,0	4,50	67	0,24	IKD ₇
	KUD ₈	45,0	4,50	67	0,24	IKD ₈
	KUD ₉	45,0	4,50	67	0,24	IKD ₉
	KUD ₁₀	45,0	4,50	67	0,24	IKD ₁₀
Инфилтрациони канал са леве стране тупа пруге	IKL ₁	6,0	0,60	1	0,04	IKL ₂
	IKL ₂	6,0	0,60	1	0,04	IKL ₃
	IKL ₃	6,0	0,60	1	0,04	IKL ₄
	IKL ₄	6,0	0,60	1	0,04	IKL ₅
	IKL ₅	6,0	0,60	1	0,04	IKL ₆
	IKL ₆	6,0	0,60	1	0,04	IKL ₇
	IKL ₇	6,0	0,60	1	0,04	IKL ₈
	IKL ₈	6,0	0,60	1	0,04	IKL ₉
	IKL ₉	6,0	0,60	1	0,04	IKL ₁₀
	IKL ₁₀	6,0	0,60	1	0,04	Верт.окно-лево
Инфилтрациони канал са десне стране тупа пруге	IKD ₁	6,0	0,60	1	0,04	IKD ₂
	IKD ₂	6,0	0,60	1	0,04	IKD ₃
	IKD ₃	6,0	0,60	1	0,04	IKD ₄
	IKD ₄	6,0	0,60	1	0,04	IKD ₅
	IKD ₅	6,0	0,60	1	0,04	IKD ₆
	IKD ₆	6,0	0,60	1	0,04	IKD ₇
	IKD ₇	6,0	0,60	1	0,04	IKD ₈
	IKD ₈	6,0	0,60	1	0,04	IKD ₉
	IKD ₉	6,0	0,60	1	0,04	IKD ₁₀
	IKD ₁₀	6,0	0,60	1	0,04	Верт.окно-десно

* PL – део планума са нагибом улево; PD – део планума са нагибом удесно; KTL – косина тупа лево; KTD – косина тупа десно; KUL – косина усека лево; KUD – косина усека десно; IKL – инфилтрациони канал лево; IKD – инфилтрациони канал десно

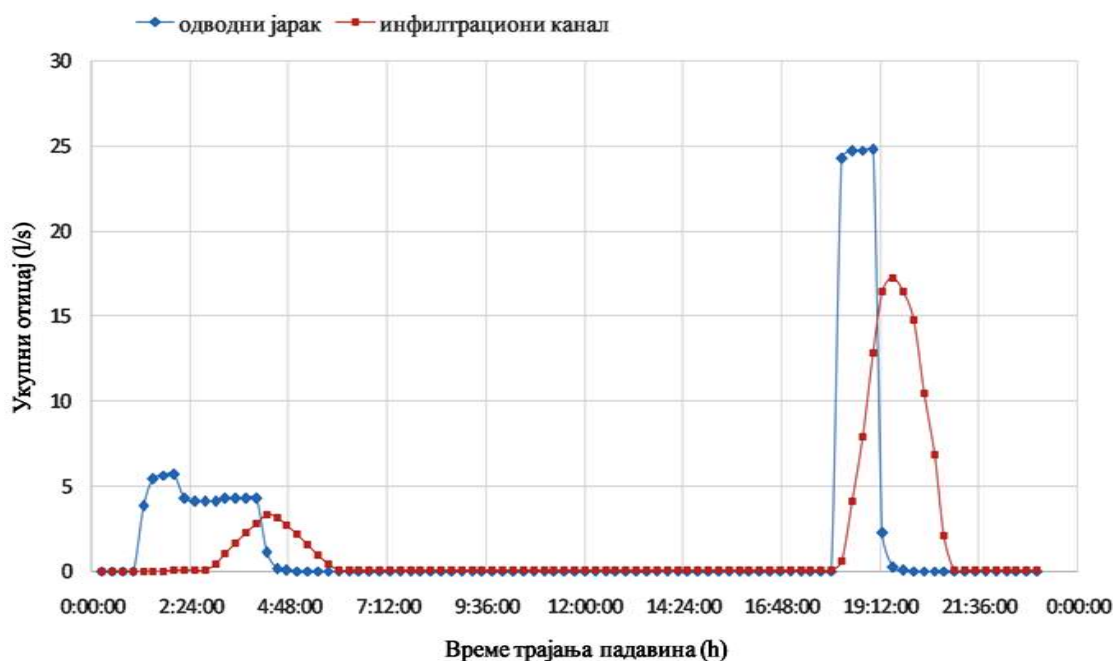


Слика 6.18 Изглед шеме Модела 3.1

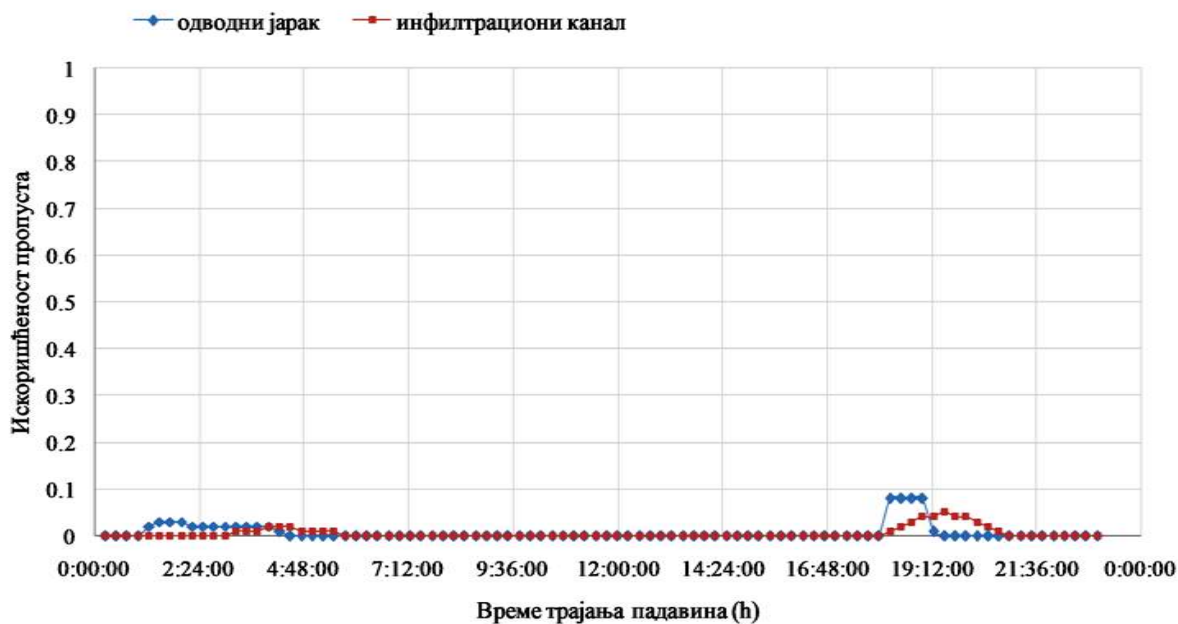


Слика 6.19 Изглед шеме Модела 3.2

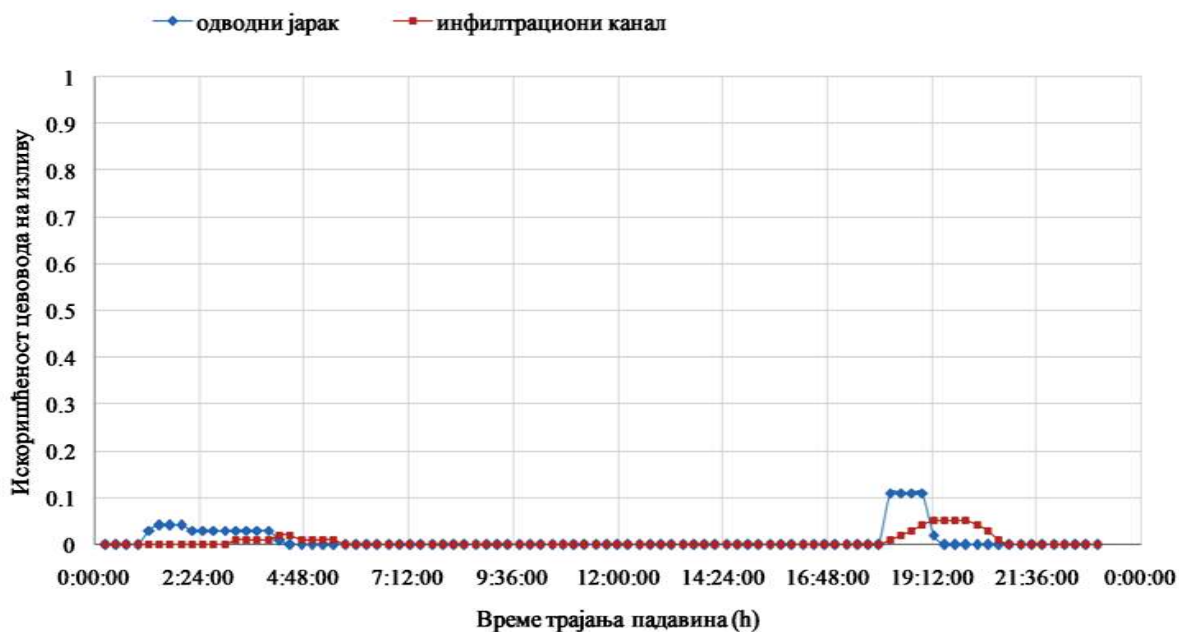
Симулацијом горе наведених падавина, добијени су дијаграми укупног отицаја за посматрано подручје трупа пруге и оба начина одводњавања, тј. за Модел 3.1 и Модел 3.2 (Слика 6.20). У софтверу SWMM је проверен и капацитет искоришћења цевастог пропуста у трупку пруге (Слика 6.21) и цевовода (Слика 6.22) који од вертикалног окна одводи воду до реципијента у случају Модела 3.1 и Модела 3.2. Анализом резултата добијених применом Модела 3, утврђено је да је у случају Модела 3.2 (са новопредложеним инфилтрационим каналима) укупни отицај мањи за око 30% у поређењу са укупним отицајем у Моделу 3.1 (са класичним одводним јарковима). У случају Модела 3.2 је приметно смањење количине вршног отицаја и одлагање времена истог (Слика 6.20) Овакав резултат указује на то да нема повећања количине отицаја у Моделу 3.2, без обзира што је цео труп моделиран као водонепропустан. Капацитет искоришћења цевастог пропуста у трупку пруге и цевовода на изливу не прелази 10% у случају оба модела (Слике 6.21 и 6.22). На основу три до сада сагледана Модела, није могуће утврдити да ли би се применом инфилтрационих канала обезбедило смањење укупног отицаја у поређењу са случајем примене одводних јаркова како се површина сливног подручја трупа пруге буде повећавала. Управо из тог разлога је урађен и четврти случај моделирања за пругу у насипу са додатном околном површином ширине 50,0 m, позиционираном са леве стране пруге.



Слика 6.20 Поређење количине укупног отицаја при одводњавању одводним јарковима (Модел 3.1) и количине при одводњавању инфилтрационим каналима (Модел 3.2)



Слика 6.21 Искоришћеност капацитета цевастог пропуста при одводњавању одводним јарковима (Модел 3.1) и при одводњавању инфилтрационим каналима (Модел 3.2)



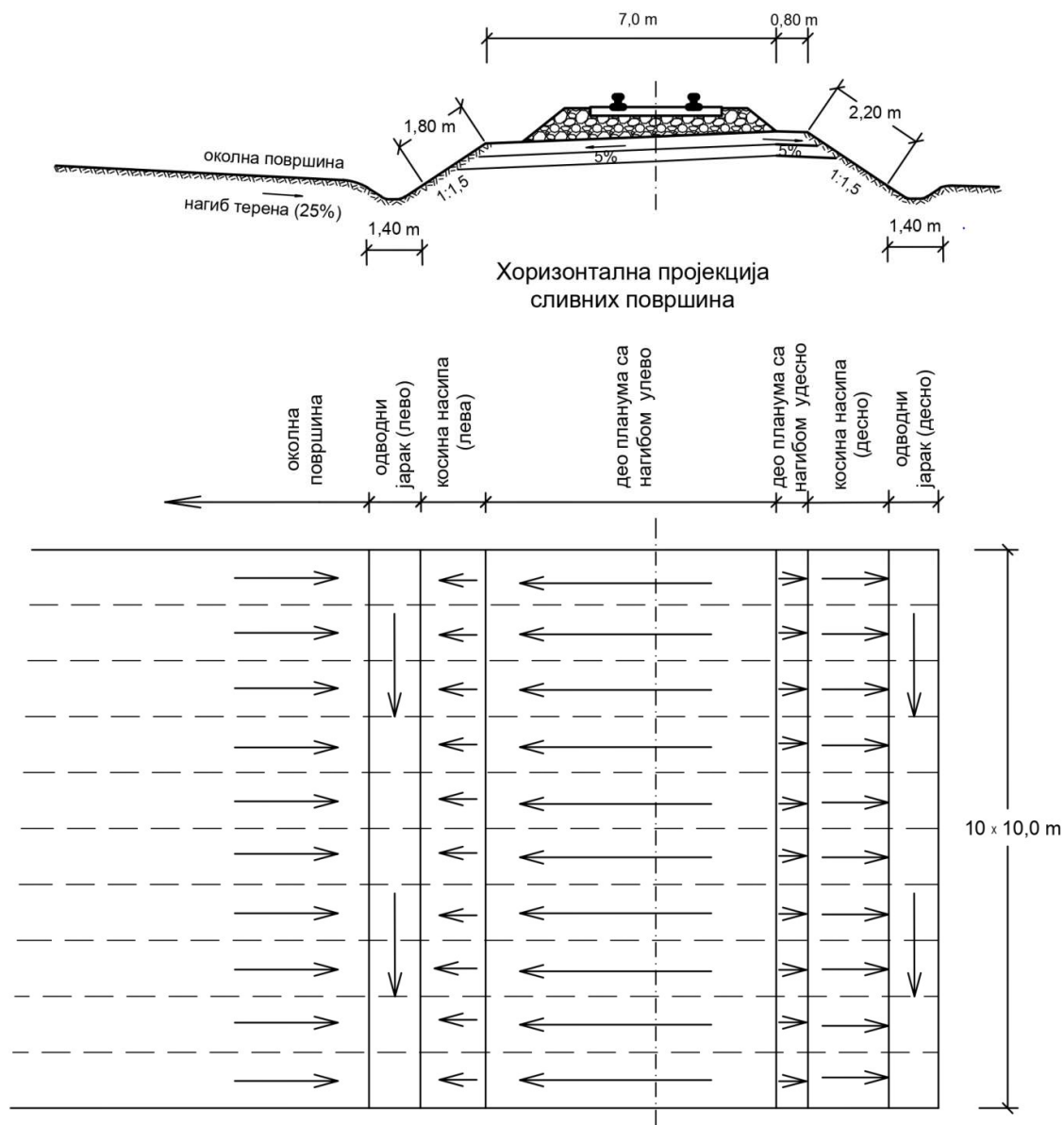
Слика 6.22 Искоришћеност капацитета ценовода на изливу при одводњавању одводним јарковима (Модел 3.1) и при одводњавању инфилтрационим каналима (Модел 3.2)

6.5 МОДЕЛ 4 - МОДЕЛ ТРУПА ПРУГЕ У НАСИПУ СА ОКОЛНОМ ПОВРШИНОМ

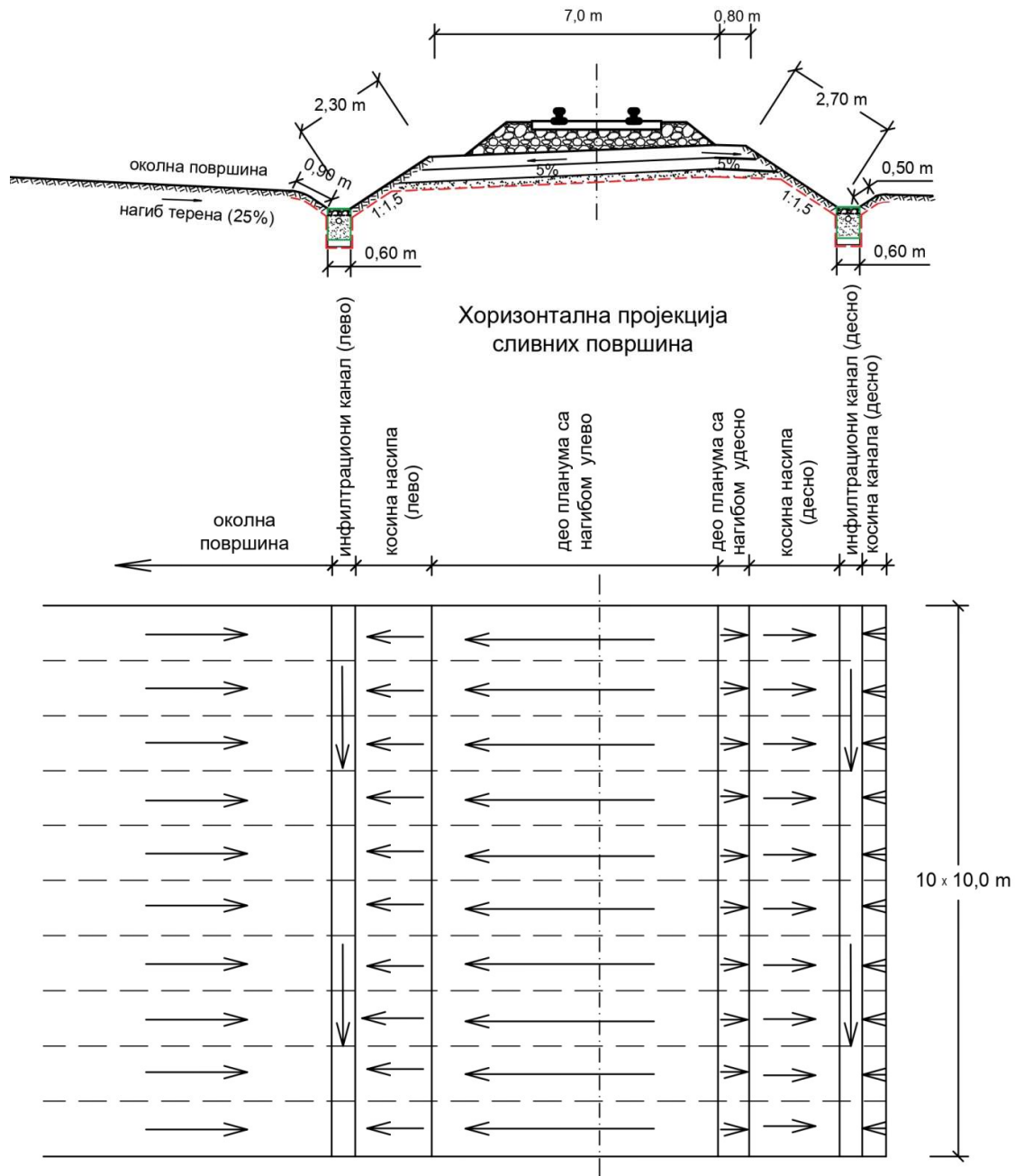
У оквиру четвртог модела (Модел 4 - Модел трупа пруге у насипу са околном површином), испитан је укупни отицај са трупа пруге у случају пројектовања трупа пруге са класичним одводним јарковима (Модел 4.1) и отицаја када су уместо одводних јаркова употребљени новопредложени инфилтрациони канали (Модел 4.2). Изглед трупа пруге за разматране варијанте, Модела 4.1 и Модела 4.2, приказан је на Сликама 6.23 и 6.24. Такође, извршена је провера капацитета цевастог пропуста у трупу пруге и цевовода који води до реципијента.

Модел који обухвата труп пруге са елементима за одводњавање у облику одводних јаркова (у даљем тексту Модел 4.1), према карактеристикама пруге приказаним на Слици 6.23, садржи следеће сливне површине: део планума са нагибом улево ($PL_1, PL_2, \dots, PL_{10}$), део планума са нагибом удесно ($PD_1, PD_2, \dots, PD_{10}$), косине насипа (лево ($KNL_1, KNL_2, \dots, KNL_{10}$) и десно ($KND_1, KND_2, \dots, KND_{10}$)) и околну површину ($O_1, O_2, \dots, O_{10}$) са леве стране трупа пруге.

Модел који обухвата труп пруге са елементима за одводњавање у виду инфилтрационих канала (у даљем тексту Модел 4.2), према карактеристикама пруге приказаним на Слици 6.24, садржи следеће сливне површине: део планума са нагибом улево ($PL_1, PL_2, \dots, PL_{10}$), део планума са нагибом удесно ($PD_1, PD_2, \dots, PD_{10}$), косине насипа (лево ($KNL_1, KNL_2, \dots, KNL_{10}$) и десно ($KND_1, KND_2, \dots, KND_{10}$)), косине канала десно ($KKD_1, KKD_2, \dots, KKD_{10}$), околну површину ($O_1, O_2, \dots, O_{10}$) и саме инфилтрационе канале (лево ($IKL_1, IKL_2, \dots, IKL_{10}$) и десно ($IKD_1, IKD_2, \dots, IKD_{10}$)).



Слика 6.23 Репрезентативни попречни пресек пруге у насипу и припадајуће околне површине са одводним јарковима и хоризонталном пројекцијом сливних површина (Модел 4.1)



Слика 6.24 Репрезентативни попречни пресек пруге у насипу и припадајуће околне површине са инфилтрационим каналима и хоризонталном пројекцијом сливних површина (Модел 4.2)

За потребе формирања Модела 4.1 и Модела 4.2 дефинисани су улазни подаци горе наведених површина. Предвиђено је да површине, које су означене као део планума са нагибом улево ($PL_1, PL_2, \dots, PL_{10}$) и део планума са нагибом удесно ($PD_1, PD_2, \dots, PD_{10}$) у софтверу буду дефинисане као површине сачињене од песковитог шљунка. Ширина дела планума са нагибом у лево је 7,0 m док је ширина дела планума са нагибом у десно 0,80 m. Нагиби ових површина су супротно оријентисани и износе 5%. Вредност Манинговог коефицијента за оба дела планума износи 0,04.

У случају Модела 4.1, планум је у софтверу дефинисан као пропусна површина. Косине насипа пруге (лево ($KNL_1, KNL_2, \dots, KNL_{10}$) и десно ($KND_1, KND_2, \dots, KND_{10}$)) су одређене као затрављене косине нагиба 1:1,5. За Манингов коефицијент у корист ових површина је усвојена вредност 0,24 а површине су третиране као пропусне. За Модел 4.1, ширине леве и десне косине насипа пруге су дате на Слици 6.23. Одводни јаркови, који се као елемент за одводњавање трупа пруге јављају у Моделу 4.1, у софтверу SWMM се дефинишу као линковани елементи ограничени чворовима. Број линкова са једне и друге стране трупа износи по 10. Одводни јаркови су облика трапеза ширине дна 0,35 m и дубине канала 0,35 m. Канали су затрављени и ближе одређени Манинговим коефицијентом за отворене канале, чија вредност у моделу износи 0,035. Канали су разматрани са подужним нагибом од 1.0%, а сам нагиб је дефинисан висинским положајем чворова. Околна површина је дефинисана као затрављена површина чија вредност Манинговог коефицијента износи 0,24.

За разлику од Модела 4.1, у Моделу 4.2 су све површине у оквиру трупа пруге третиране као водонепропусне, укључујући: планум (део планума са нагибом у лево и део планума са нагибом у десно), косине насипа, косине канала и инфилтрационе канале. Једина пропусна површина у случају Модела 4.2 јесте околна површина са истим карактеристикама као у случају Модела 4.1. Особине планума и косина насипа наведене код Модела 4.1 важе и код Модела 4.2. Канали за одводњавање који се код Модела 4.2 јављају у облику инфилтрационих канала у софтверу се третирају као површине. Предвиђено је да инфилтрациони канали (лево ($IKL_1, IKL_2, \dots, IKL_{10}$) и десно ($IKD_1, IKD_2, \dots, IKD_{10}$)) буду ширине 0,60 m, дубине 0,60 m и подужног нагиба 1%. Дренажна цев је на висини 0,40 m од дна канала. За случај Модела 4.2 и материјал којим је испуњен инфилтрациони канал, усвојено је да је вредност коефицијента порозности 0,4, док је вредност Манинговог коефицијента филтер материјала 0,035.

Остатак површине која припада левом одводном јарку код Модела 4.1 (са стране околне површине), у случају Модела 4.2 придружује се околној површини са леве стране пруге. Остатак површине која припада десном одводном јарку код Модела 4.1 (са стране супротно од трупа), у случају Модела 4.2 је дефинисан као затрављена површина у нагибу 1:1,5 и Манинговим коефицијентом 0,240. Остатак до пуне ширине профила на име одводног јарка (део оријентисан ка трупу пруге), који постоји у Моделу 4.1, у Моделу 4.2 се додаје косини насипа пруге са једне и друге стране колосека са карактеристикама идентичним карактеристикама косина насипа. На овај начин је гарантована идентична ширина испитиваног пружног појаса у Моделу 4.1 и Моделу 4.2.

Моделу су формирану на основу хоризонталних пројекција диференцираних сливних површина приказаних на Сликама 6.23 и 6.24. Геометријске карактеристике диференцираних поља сливних површина дужине 10 m су приказане у Табели 6.8 (за Модел 4.1) и Табели 6.9 (за Модел 4.2). Табеле такође садрже податке о материјалу од кога је одређена површина сачињена (чије су карактеристике изражене преко Манинговог коефицијента). Сливне површине, попут планума, косина насипа, косина канала, околне површине и инфилтрационих канала, обухваћене Моделом 4.1 и Моделом 4.2, у софтверу су шематски приказане шрафираним правоугаоницима. Површине су на шеми симболично повезане испрекиданим линијама које представљају пут сливања воде са једне на другу површину, па све до чворова који повезују канале. Канали за одводњавање у виду одводних јаркова, цевастих пропуста и цевовода су приказани линијама, чији је положај утврђен чворовима у виду тачака. Изглед одговарајућих шема модела преузетих из софтвера SWMM приказани су на Сликама 6.25 и 6.26.

Табела 6.8 Карактеристике сливних површина Модела 4.1

Сливно подручје		Површина сливног подручја (m ²)	Ширина сливног подручја (m)	Нагиб сливног подручја (%)	Манингов коефицијент	Позиција испуста
Део планаума са нагибом улево	PL ₁	70	7,0	5	0,04	KNL ₁
	PL ₂	70	7,0	5	0,04	KNL ₂
	PL ₃	70	7,0	5	0,04	KNL ₃
	PL ₄	70	7,0	5	0,04	KNL ₄
	PL ₅	70	7,0	5	0,04	KNL ₅
	PL ₆	70	7,0	5	0,04	KNL ₆
	PL ₇	70	7,0	5	0,04	KNL ₇
	PL ₈	70	7,0	5	0,04	KNL ₈
	PL ₉	70	7,0	5	0,04	KNL ₉
	PL ₁₀	70	7,0	5	0,04	KNL ₁₀
Део планаума са нагибом удесно	PD ₁	8	0,8	5	0,04	KND ₁
	PD ₂	8	0,8	5	0,04	KND ₂
	PD ₃	8	0,8	5	0,04	KND ₃
	PD ₄	8	0,8	5	0,04	KND ₄
	PD ₅	8	0,8	5	0,04	KND ₅
	PD ₆	8	0,8	5	0,04	KND ₆
	PD ₇	8	0,8	5	0,04	KND ₇
	PD ₈	8	0,8	5	0,04	KND ₈
	PD ₉	8	0,8	5	0,04	KND ₉
	PD ₁₀	8	0,8	5	0,04	KND ₁₀
Косина насапа на левој страни трупa пруге	KNL ₁	18	1,8	67	0,24	OJL ₁
	KNL ₂	18	1,8	67	0,24	OJL ₂
	KNL ₃	18	1,8	67	0,24	OJL ₃
	KNL ₄	18	1,8	67	0,24	OJL ₄
	KNL ₅	18	1,8	67	0,24	OJL ₅
	KNL ₆	18	1,8	67	0,24	OJL ₆
	KNL ₇	18	1,8	67	0,24	OJL ₇
	KNL ₈	18	1,8	67	0,24	OJL ₈
	KNL ₉	18	1,8	67	0,24	OJL ₉
	KNL ₁₀	18	1,8	67	0,24	OJL ₁₀
Косина насапа на десној страни трупa пруге	KND ₁	22	2,2	67	0,24	OJD ₁
	KND ₂	22	2,2	67	0,24	OJD ₂
	KND ₃	22	2,2	67	0,24	OJD ₃
	KND ₄	22	2,2	67	0,24	OJD ₄
	KND ₅	22	2,2	67	0,24	OJD ₅
	KND ₆	22	2,2	67	0,24	OJD ₆
	KND ₇	22	2,2	67	0,24	OJD ₇
	KND ₈	22	2,2	67	0,24	OJD ₈
	KND ₉	22	2,2	67	0,24	OJD ₉
	KND ₁₀	22	2,2	67	0,24	OJD ₁₀
Околина површина	O ₁	500	50,0	25	0,24	OJL ₁
	O ₂	500	50,0	25	0,24	OJL ₂
	O ₃	500	50,0	25	0,24	OJL ₃
	O ₄	500	50,0	25	0,24	OJL ₄
	O ₅	500	50,0	25	0,24	OJL ₅
	O ₆	500	50,0	25	0,24	OJL ₆

	O ₇	500	50,0	25	0,24	OJL ₇
	O ₈	500	50,0	25	0,24	OJL ₈
	O ₉	500	50,0	25	0,24	OJL ₉
	O ₁₀	500	50,0	25	0,24	OJL ₁₀

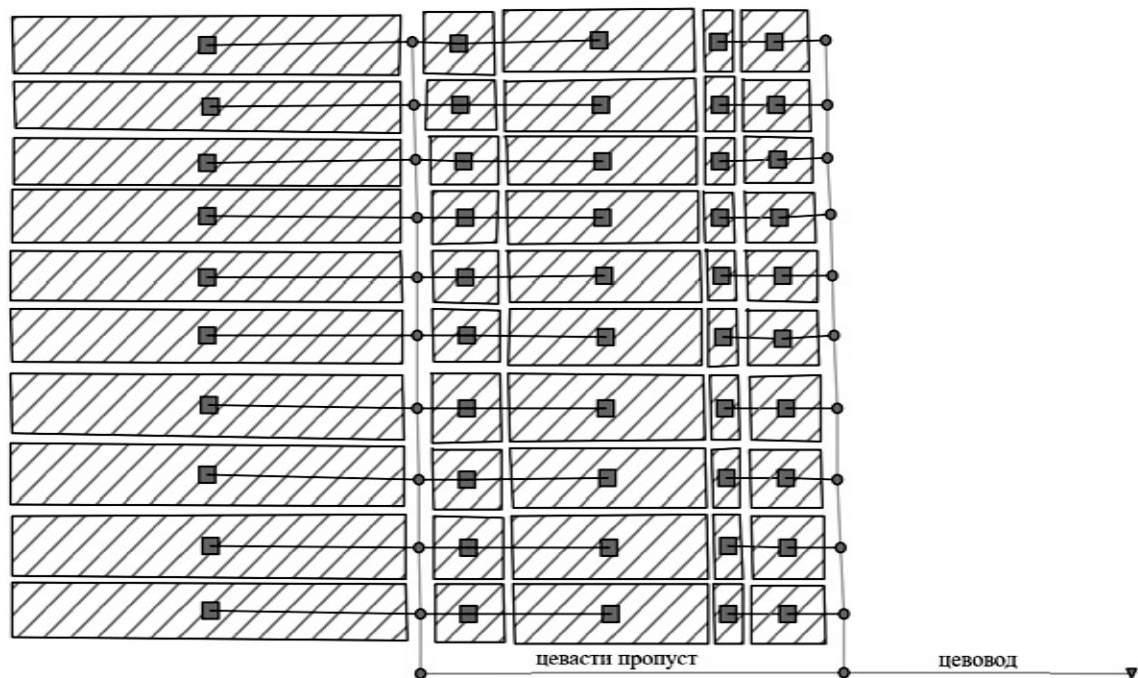
* PL – део планума са нагибом улево; PD – део планума са нагибом удесно; KNL – косина насипа лево; KND – косина насипа десно; OJL – одводни јарак лево; OJD – одводни јарак десно; O – околна површина

Табела 6.9 Карактеристике сливних површина Модела 4.2

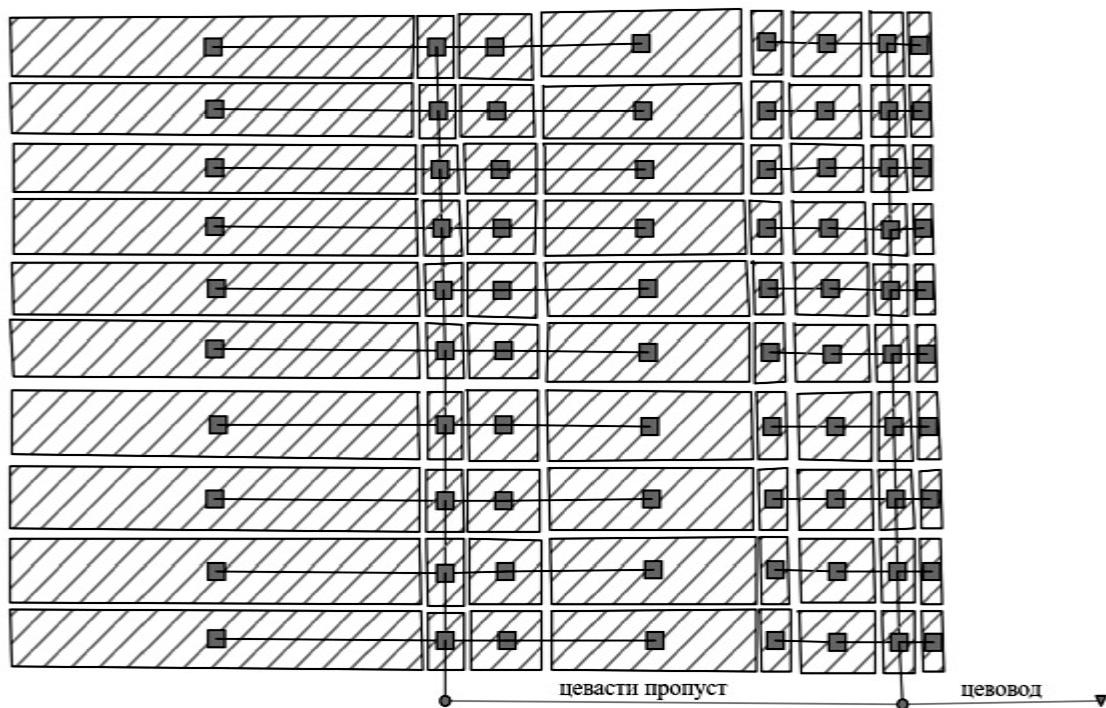
Сливно подручје		Површина сливног подручја (m ²)	Ширина сливног подручја (m)	Нагиб сливног подручја (%)	Манитов коэффициент	Позиција испуста
Део планума са нагибом улево	PL ₁	70,0	7,0	5	0,04	KNL ₁
	PL ₂	70,0	7,0	5	0,04	KNL ₂
	PL ₃	70,0	7,0	5	0,04	KNL ₃
	PL ₄	70,0	7,0	5	0,04	KNL ₄
	PL ₅	70,0	7,0	5	0,04	KNL ₅
	PL ₆	70,0	7,0	5	0,04	KNL ₆
	PL ₇	70,0	7,0	5	0,04	KNL ₇
	PL ₈	70,0	7,0	5	0,04	KNL ₈
	PL ₉	70,0	7,0	5	0,04	KNL ₉
	PL ₁₀	70,0	7,0	5	0,04	KNL ₁₀
Део планума са нагибом удесно	PD ₁	8,0	0,8	5	0,04	KND ₁
	PD ₂	8,0	0,8	5	0,04	KND ₂
	PD ₃	8,0	0,8	5	0,04	KND ₃
	PD ₄	8,0	0,8	5	0,04	KND ₄
	PD ₅	8,0	0,8	5	0,04	KND ₅
	PD ₆	8,0	0,8	5	0,04	KND ₆
	PD ₇	8,0	0,8	5	0,04	KND ₇
	PD ₈	8,0	0,8	5	0,04	KND ₈
	PD ₉	8,0	0,8	5	0,04	KND ₉
	PD ₁₀	8,0	0,8	5	0,04	KND ₁₀
Косина насипа на левој страни ткупа пруге	KNL ₁	23,0	2,3	67	0,24	IKL ₁
	KNL ₂	23,0	2,3	67	0,24	IKL ₂
	KNL ₃	23,0	2,3	67	0,24	IKL ₃
	KNL ₄	23,0	2,3	67	0,24	IKL ₄
	KNL ₅	23,0	2,3	67	0,24	IKL ₅
	KNL ₆	23,0	2,3	67	0,24	IKL ₆
	KNL ₇	23,0	2,3	67	0,24	IKL ₇
	KNL ₈	23,0	2,3	67	0,24	IKL ₈
	KNL ₉	23,0	2,3	67	0,24	IKL ₉
	KNL ₁₀	23,0	2,3	67	0,24	IKL ₁₀
Косина насипа на десној страни ткупа пруге	KND ₁	27,0	2,7	67	0,24	IKD ₁
	KND ₂	27,0	2,7	67	0,24	IKD ₂
	KND ₃	27,0	2,7	67	0,24	IKD ₃
	KND ₄	27,0	2,7	67	0,24	IKD ₄
	KND ₅	27,0	2,7	67	0,24	IKD ₅
	KND ₆	27,0	2,7	67	0,24	IKD ₆
	KND ₇	27,0	2,7	67	0,24	IKD ₇
	KND ₈	27,0	2,7	67	0,24	IKD ₈

Косина канала са десне стране трупна пруге	KND ₉	27,0	2,7	67	0,24	IKD ₉
	KND ₁₀	27,0	2,7	67	0,24	IKD ₁₀
	KKD ₁	6,0	0,6	67	0,24	IKD ₁
	KKD ₂	6,0	0,6	67	0,24	IKD ₂
	KKD ₃	6,0	0,6	67	0,24	IKD ₃
	KKD ₄	6,0	0,6	67	0,24	IKD ₄
	KKD ₅	6,0	0,6	67	0,24	IKD ₅
	KKD ₆	6,0	0,6	67	0,24	IKD ₆
	KKD ₇	6,0	0,6	67	0,24	IKD ₇
	KKD ₈	6,0	0,6	67	0,24	IKD ₈
	KKD ₉	6,0	0,6	67	0,24	IKD ₉
	KKD ₁₀	6,0	0,6	67	0,24	IKD ₁₀
Околна површина	O ₁	50,9	5,9	25	0,24	IKL ₁
	O ₂	50,9	5,9	25	0,24	IKL ₂
	O ₃	50,9	5,9	25	0,24	IKL ₃
	O ₄	50,9	5,9	25	0,24	IKL ₄
	O ₅	50,9	5,9	25	0,24	IKL ₅
	O ₆	50,9	5,9	25	0,24	IKL ₆
	O ₇	50,9	5,9	25	0,24	IKL ₇
	O ₈	50,9	5,9	25	0,24	IKL ₈
	O ₉	50,9	5,9	25	0,24	IKL ₉
	O ₁₀	50,9	5,9	25	0,24	IKL ₁₀
Инфилтрациони канал са леве стране трупна пруге	IKL ₁	6,0	0,6	1	0,04	IKL ₂
	IKL ₂	6,0	0,6	1	0,04	IKL ₃
	IKL ₃	6,0	0,6	1	0,04	IKL ₄
	IKL ₄	6,0	0,6	1	0,04	IKL ₅
	IKL ₅	6,0	0,6	1	0,04	IKL ₆
	IKL ₆	6,0	0,6	1	0,04	IKL ₇
	IKL ₇	6,0	0,6	1	0,04	IKL ₈
	IKL ₈	6,0	0,6	1	0,04	IKL ₉
	IKL ₉	6,0	0,6	1	0,04	IKL ₁₀
	IKL ₁₀	6,0	0,6	1	0,04	Вертикално окно - лево
Инфилтрациони канал са десне стране трупна пруге	IKD ₁	6,0	0,6	1	0,04	IKD ₂
	IKD ₂	6,0	0,6	1	0,04	IKD ₃
	IKD ₃	6,0	0,6	1	0,04	IKD ₄
	IKD ₄	6,0	0,6	1	0,04	IKD ₅
	IKD ₅	6,0	0,6	1	0,04	IKD ₆
	IKD ₆	6,0	0,6	1	0,04	IKD ₇
	IKD ₇	6,0	0,6	1	0,04	IKD ₈
	IKD ₈	6,0	0,6	1	0,04	IKD ₉
	IKD ₉	6,0	0,6	1	0,04	IKD ₁₀
	IKD ₁₀	6,0	0,6	1	0,04	Вертикално окно - десно

* PL – део планума са нагибом улево; PD – део планума са нагибом удесно; KNL – косина насипа лево; KND – косина насипа десно; KKD – косина канала десно; IKL – инфилтрациони канал лево; IKD – инфилтрациони канал десно; O – околна површина

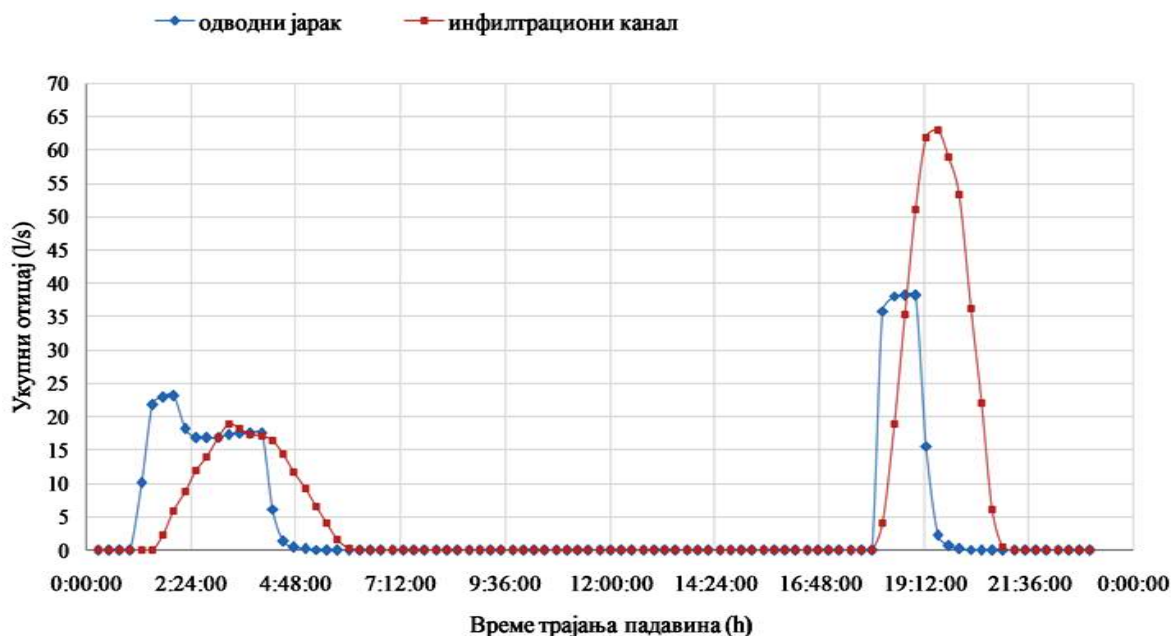


Слика 6.25 Изглед шеме Модела 4.1



Слика 6.26 Изглед шеме Модела 4.2

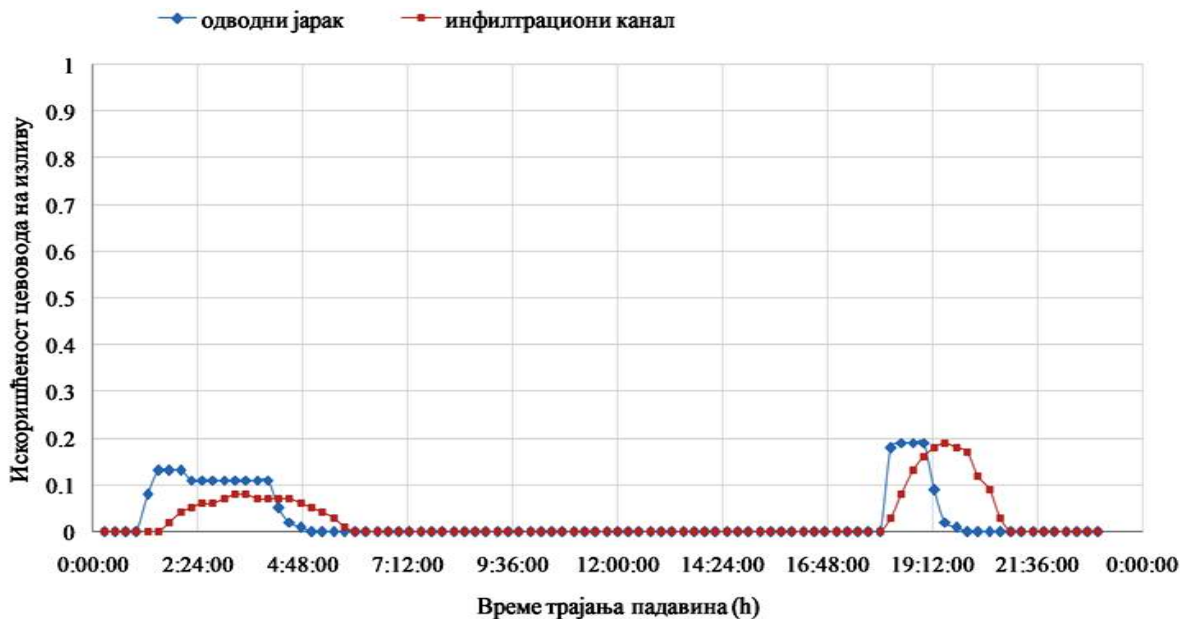
Симулацијом горе наведених падавина, добијени су дијаграми укупног отицаја за посматрано подручје пруге у насипу са додатном околном површином и оба начина одводњавања, тј. за Модел 4.1 и Модел 4.2 (Слика 6.27). У софтверу SWMM је проверен и капацитет искоришћења цевастог пропуста у трупку пруге (Слика 6.28) и цевовода (Слика 6.29) који од вертикалног окна одводи воду до реципијента у случају Модела 4.1 и Модела 4.2. Анализом резултата у случају Модела 4 је утврђено да је укупни отицај код инфилтрационих канала на другом пику у значајној мери премашио величину укупног отицаја за случај примене одводних јаркова. Међутим, чак и у случају прекорачења укупног отицаја на инфилтрационим каналима у односу на одводне јаркове, регистровано је временско одлагања појаве вршног отицаја (Слика 6.27), као што је то био случај и у претходно разматраним моделима. Капацитет искоришћења цевастих пропуста у трупку пруге и на изливу не прелази 20% (Слике 6.28 и 6.29). Искоришћење цевастог пропуста у трупку пруге је нешто веће код инфилтрационих канала неголи код одводних јаркова у интервалу времена који одговара другом пику отицаја, управо у тренутку када се јавља највећи отицај код инфилтрационих канала.



Слика 6.27 Поређење количине укупног отицаја при одводњавању одводним јарковима (Модел 4.1) и количине при одводњавању инфилтрационим каналима (Модел 4.2)



Слика 6.28 Искоришћеност капацитета цевастог пропуста при одводњавању одводним јарковима (Модел 4.1) и при одводњавању инфилтрационим каналима (Модел 4.2)



Слика 6.29 Искоришћеност капацитета цевовода на изливу при одводњавању одводним јарковима (Модел 4.1) и при одводњавању инфилтрационим каналима (Модел 4.2)

6.6 ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА МОДЕЛИРАЊА

У овом поглављу је вршено поређење хидрауличких особина класичних одводних јаркова и новопредложених инфилтрационих канала у софтверу SWMM за четири врсте модела (Модел 1 – модел трупа пруге са минималним прописаним димензијама, Модел 2 – модел пруге у насипу, Модел 3 – модел пруге у усеку и Модел 4 – модел пруге у насипу са околном површином). У оквиру сваког од модела је формирано по два случаја, од тога један случај посматраног модела је са каналима у виду одводних јаркова (Модел 1.1, Модел 2.1, Модел 3.1 и Модел 4.1), а други случај са каналима за одводњавање у виду новопредложених инфилтрационих канала (Модел 1.2, Модел 2.2, Модел 3.2 и Модел 4.2). Такође, вршена је провера искоришћености капацитета цевастог пропуста и цевовода на изливу за моделиране падавине.

Према резултатима моделирања, а у случају Модела 1 запажена је мања вредност укупног отицаја на Моделу 1.2 за око 30% у односу на укупни отицај у случају Модела 1.1. Осим тога, примећено је одлагање времена вршног отицаја и смањење вредности вршног отицаја на Моделу 1.2. У случају Модела 2 је ситуација у погледу односа вредности укупног отицаја на Моделу 2.1 и Моделу 2.2, слична као за Модел 1. Укупни отицај на Моделу 2.2 је мањи за око 30% него у случају Модела 2.1. Вредности вршног отицаја на Моделу 2.2 су мање него у случају Модела 2.1, а приметно је и временско одлагање појаве вршног отицаја у корист Модела 2.2. Исти тренд у погледу односа укупног отицаја, вредности вршног отицаја и времена одлагања појаве вршног отицаја је уочен и на Моделу 3, односно случајевима овог модела (Модел 3.1 и Модел 3.2).

Када је реч о Моделу 4, уочено је да је укупни отицај у случају Модела 4.2 већи од укупног отицаја на Моделу 4.1, што овај модел издваја у односу на претходна три. Иако је укупни отицај већи код инфилтрационих канала, задржан је тренд временског одлагања вршног отицаја.

Анализом резултата провере искоришћености цевастог пропуста и цевовода на изливу показано је да се искоришћеност креће у распону од 10 – 20%, што показује да на моделираној дужини (100 m) нема појаве плављења у подручју пруге. Иако је тако, осим обезбеђивања стабилности трупа пруге од нежељеног дејства воде услед презасићења канала за одводњавање, циљ овог истраживања је пречишћавање воде која са трупа пруге отиче у реципијент. С тим у вези, треба водити рачуна о величини

сливног подручја, како не би дошло до пребрзог отицања воде која се слива са трупа пруге услед налета воде са околних површина. Да би се ефикасно прочистила вода која отиче са трупа пруге, пре свега треба да се дуже задржи у филтер слоју инфилтрационог канала, па би евентуално за воду која долази са околних површина требало предвидети додатне канале који се директно уливају у реципијент. На тај начин се избегава уливање атмосферске воде која не мора да се пречишћава у инфилтрационом каналу а уједно се филтер растерећује.

7 ЗАВРШНЕ НАПОМЕНЕ

Проучавање утицаја железничког саобраћаја на животну средину представља новину у области пројектовања и експлоатације железничких пруга. Постоји велики број досадашњих студија о утицају железничког саобраћаја на околину у погледу буке и вибрација, док је јако мало резултата објављено са циљем сагледавања и евентуалног доказивања негативног утицаја железничког саобраћаја на квалитет околног земљишта, а индиректно и на квалитет подземних вода.

По угледу на постојећа, не тако бројна истраживања земљишта око трупа пруге, у овој дисертацији су приказани резултати сопственог истраживања у погледу присуства тешких метала по површини, али и по дубини трупа пруге. Пошто су спроведена истраживања указала на значајно присуство тешких метала у концентрацијама које прекорачују максималне вредности, прописане регулативом Републике Србије и одговарајућим документом Европске Уније, приступило се разматрању могућег и ефикасног решења за сузбијање или смањење емисије и инфилтрације тешких метала у труп пруге и околно земљиште услед одвијања железничког саобраћаја. У ту сврху предложена је промена појединих елемената доњег строја железничких пруга, попут замене класичних затрављених канала водонепропусним инфилтрационим каналима и употребом водонепропусних мембрана испод неизоставних слојева трупа пруге (заштитни и прелазни слој).

7.1 РЕКАПИТУЛАЦИЈА РЕЗУЛТАТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНЕ АНАЛИЗЕ

У оквиру експерименталног дела истраживања извршена је провера филтерске способности четири филтера (Филтер 1, Филтер 2, Филтер 3 и Филтер 4) за потребе задржавања шест одабраних тешких метала (кадмијум, кобалт, бакар, никл, олово и цинк). Посматрани су проценти смањења концентрације тешких метала у моделном раствору након проласка кроз формиране вертикалне филтере облика цеви, пречника основе $\varnothing 10$ cm и висине 50 cm. Филтер 1 је справљен од речног агрегата 4–8 mm и активног угља у гранулама приближне величине зрна гранула око 4 mm. Редослед слојева у Филтеру 1 је обухватио 30 cm речног агрегата 4–8 mm, 10 cm активног угља и 10 cm речног агрегата 4–8 mm, посматрано одоздо навише. Филтер 2 је сачињен од истих елемената идентичне количине као код Филтера 1, с тим што су речни агрегат и

активни угаљ помешани до хомогенизовања мешавине. Филтер 3 је формиран са 20 cm речног агрегата 16–32 mm, 20 cm речног агрегата 4–16 mm и 10 cm речног агрегата 2–4 mm, тако што је најкрупнија фракција постављена на дно филтерске цеви, а најситнија на врху. Филтер 4, уједно и контролни филтер, справљен је од речног агрегата фракције 4–8 mm у пуној висини филтер слоја од 50 cm. Моделни раствор је справљен мешањем воде из градског водовода и соли метала: цинк нитрата хексахидрата ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$), бакар сулфата пентахидрата ($\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$), олово (II) нитрата ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$), кадмијум нитрата тетрахидрата ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$), никл сулфата тетрахидрата ($\text{NiSO}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$) и кобалт хлорида хексахидрата ($\text{CoCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$). Испитивање је вршено за симулиране падавине интензитета 0,73 mm/min у трајању од 20 минута што одговара двогодишњим падавинама за територију града Ниша. Сprovedено је укупно десет циклуса испитивања, где је сваки од циклуса изведен са симулираним падавинама интензитета 0,73 mm/min. У сваком од циклуса испитивања, третирана су сва четири филтера. Концентрација метала у процеђеним узорцима је утврђена ICP-OES техником.

Посматрано по филтерима, прорачунат је проценат смањења наведених тешких метала, и то за:

- Филтер 1: око 61% кадмијума (108,83 ppm од дозираних 176,40 ppm), приближно 14,5% кобалта (20,70 ppm од дозираних 140,89 ppm), 25% бакра (3,39 ppm од дозираних 13,40 ppm), приближно 13% никла (25,74 ppm од дозираних 199,61 ppm), око 38% олова (0,91 ppm од дозираних 2,43 ppm) и око 33% цинка (45,68 ppm од дозираних 141,33 ppm);
- Филтер 2: око 61% кадмијума (106,13 ppm од дозираних 176,40 ppm), приближно 14,50% кобалта (20,19 ppm од дозираних 140,89 ppm), 42% бакра (5,65 ppm од дозираних 13,40 ppm), приближно 13% никла (25,38 ppm од дозираних 199,61 ppm), око 38% олова (0,90 ppm од дозираних 2,43 ppm) и око 33% цинка (46,79 ppm од дозираних 141,33 ppm);
- Филтер 3: око 48% кадмијума (85,00 ppm од дозираних 176,40 ppm), 11% кобалта (16,00 ppm од дозираних 140,89 ppm), 38% бакра (5,08 ppm од дозираних 13,40 ppm), 9,5% никла (19,04 ppm од дозираних 199,61 ppm), 20% олова (0,48 ppm од дозираних 2,43 ppm) и 27% цинка (37,61 ppm од дозираних 141,33 ppm);

- Филтер 4: 67% кадмијума (118,24 ppm од дозираних 176,40 ppm), 16% кобалта (22,32 ppm од дозираних 140,89 ppm), око 50% бакра (6,63 ppm од дозираних 13,40 ppm), 14% никла (28,63 ppm од дозираних 199,61 ppm), 37% олова (0,88 ppm од дозираних 2,43 ppm) и око 35% цинка (50,13 ppm од дозираних 141,33 ppm).

Посматрано по врсти метала, најбољи резултат је постигнут у случају кадмијума са 48% – 67% задржане количине овог метала у односу на укупну дозирану вредност кроз десет циклуса испитивања за све разматране филтере. У случају бакра, проценти задржане количине овог метала су у распону од 25% – 50%, затим олова од 20% – 38% и цинка од 27% – 35%. Најслабији ефекат филтрирања је запажен у случају кобалта (11% – 16%) и никла (9,5% – 14%).

Анализом кумулативних вредности количина задржаних метала у филтерима након десет циклуса испитивања за посматраних шест метала, Филтер 4 се показао као најефикасније решење. Упоредјујући Филтер 1 и Филтер 2, пошто су по саставу исти и разликују се једино у начину распоређивања састојака филтера, Филтер 1 се показао ефикаснијим. С тим у вези, могло би се рећи да једнослојно постављен активни угаљ у Филтеру 1, уместо активног угља помешаног са агрегатом у Филтеру 2, јесте боље решење, али ипак мање ефикасно у поређењу са ефектом који се постиже применом Филтера 4. Најмање количине задржаних тешких метала су измерене код Филтера 3.

7.2 РЕКАПИТУЛАЦИЈА РЕЗУЛТАТА МОДЕЛИРАЊА У СОФТВЕРУ SWMM

У Поглављу 6 ове дисертације је вршено поређење хидрауличких особина класичних одводних јаркова и новопредложених инфилтрационих канала у софтверу SWMM. Из тог разлога, формирано је четири модела: Модел 1, Модел 2, Модел 3 и Модел 4. У оквиру сваког од модела су предвиђена по два случаја, од тога, један случај са каналима за одводњавање у виду одводних јаркова, а други случај са каналима за одводњавање у виду новопредложених инфилтрационих канала. Осим поређења хидрауличких особина наведених случајева, извршена је провера капацитета цевастог пропуста у трупку пруге и цевовода на изливу у реципијент. Сви модели су рађени за дужину деонице пруге од 100 m.

Модел 1 је обухватио труп пруге минимално захтеваних димензија (према Правилнику подсистема инфраструктуре железница). У оквиру Модела 1, разматрани су случај са одводним јарковима (Модел 1.1) и случај са инфилтрационим каналима (Модел 1.2). Све површине на Моделу 1.1 попут дела планума са нагибом улево, дела планума са нагибом удесно и косине трупа су у софтверу дефинисане као водопрпусне, док се у случају Модела 1.2 све површине попут дела планума са нагибом улево, дела планума са нагибом удесно, косина трупа, косина канала и инфилтрационих канала, третирају као водонепропусне.

Моделом 2 је сагледан случај пруге у насипу. Једна варијанта Модела 2 је случај пруге у насипу са одводним јарковима (Модел 2.1). Други случај је Модел 2.2, и односи се на пругу у насипу са инфилтрационим каналима. Сливне површине на Моделу 2.1 које обухватају део планума са нагибом улево, део планума са нагибом удесно и косине насипа су моделиране као пропусне, док су површине код Модела 2.2 попут дела планума са нагибом улево, дела планума са нагибом удесно, косина насипа, косина канала и инфилтрационих канала дефинисане као водонепропусне.

Моделом 3 је обухваћен труп пруге у усеку. У оквиру Модела 3, разматрани су случај са одводним јарковима (Модел 3.1) и случај са инфилтрационим каналима (Модел 3.2). Све површине на Моделу 3.1 које обухватају део планума са нагибом улево, део планума са нагибом удесно, косине трупа и косине усека су моделиране као водопрпусне. У погледу водопрпусности, на Моделу 3.2, се јављају површине дефинисане као водонепропусне попут дела планума са нагибом улево, дела планума са нагибом удесно, косина трупа и инфилтрационих канала. У оквиру Модела 3.2 површине моделиране као водопрпусне су косине усека.

Моделом 4 је симулиран случај пруге у насипу са додатном околном површином. У оквиру Модела 4, разматран је случај са одводним јарковима (Модел 4.1) и случај са инфилтрационим каналима (Модел 4.2). Сливне површине на Моделу 4.1 које обухватају део планума са нагибом улево, део планума са нагибом удесно, косине насипа и околну површину са леве стране трупа пруге су моделиране као пропусне површине. На Моделу 4.2, површине у оквиру самог трупа попут дела планума са нагибом улево, дела планума са нагибом удесно, косина насипа, косина канала десно од трупа пруге и инфилтрационих канала, су у софтверу дефинисане као водонепропусне, осим околне површине која је третирана као водопрпусна.

Према новопредложеном решењу са инфилтрационим каналима и водонепропусном мембраном, све површине у овиру трупа пруге су дефинисане као водонепропусне, укључујући и инфилтрационе канале. Овакво решење, чији је циљ спречавање инфилтрације отицаја у ниже слојеве трупа пруге, може утицати на повећање укупне запремине отицаја, па је с тим у вези неопходно упоредити хидрауличке карактеристике новопредложеног решења и случаја када су канали за одводњавање у виду одводних јаркова.

Симулације у софтверу SWMM су рађене према Параметрима кишних епизода са максималном годишњом сумом падавина за плувиографску станицу Ниш. Као меродавне, одабране су падавине забележене за 2001. годину и период од 14.06.–15.06., у трајању од 18h са укупном висином кише 94,3 mm.

Анализом резултата добијених на основу Модела 1, Модела 2 и Модела 3 је утврђено да је применом новопредложених инфилтрационих канала (Модел 1.2, Модел 2.2. и Модел 3.2) укупни отицај мањи за око 30%, у поређењу са укупним отицајем применом одводних јаркова (Модел 1.1, Модел 2.1 и Модел 3.1, респективно). Осим у погледу смањења укупног отицаја, група модела са инфилтрационим каналима показује боље резултате и у погледу смањења вршног отицаја и његовог временског одлагања, што може бити од изузетне важности код обилних падавина када најлакше долази до плављења пруге и околине. У случају Модела 4, када је сливним површинама додата значајна површина у околини трупа пруге, уочено је повећање укупног отицаја у случају Модела 4.2 са инфилтрацијом каналима у односу на Модел 4.1 са конвенцијалним одводним јарковима за око 40%. Међутим, иако је укупни отицај већи, и у овом случају долази до временског одлагања вршног отицаја.

У погледу искоришћености капацитета цевастог пропуста и цевовода на изливу, за моделиране падавине, сви модели су показали искоришћеност не већу од 20%.

7.3 ЗАКЉУЧЦИ НА ОСНОВУ СПРОВЕДЕНИХ ИСТРАЖИВАЊА

На основу свега изложеног у овој дисертацији, изведени су одређени закључци. Пре свега, испитивање филтерских особина посматраних варијанти филтер слојева је генерално дало позитивне резултате у корист смањења концентрације потенцијално опасних метала.

Општи закључак у погледу способности задржавања кадмијума, кобалта, бакра, никла, олова и цинка, као потенцијално опасних метала по животну средину, јесте да је Филтер 4 показао најбоље резултате у погледу ефикасног задржавања тешких метала и превенирања загађења трупа пруге и околног земљишта, како појединачно по циклусима, тако и кумулативно након десет циклуса испитивања. Спроведеним експерименталним истраживањима показано је да се применом филтера сачињеног само од речног агрегата фракције 4–8 mm (Филтер 4) могу постићи значајни резултати у погледу задржавања метала, са чак 67% задржане количине кадмијума, 50% бакра, 37% олова и 35% цинка. Ови резултати су веома значајни имајући у виду, пре свега, састав филтера и велике могућности примене филтера у грађевинској пракси.

На основу овако изнетог закључка, извршено је моделирање у софтверу SWMM, где је као материјал за инфилтрациони канал одабран управо речни агрегат фракције 4–8 mm, који је сачињавао филтерски слој у оквиру Филтера 4.

Предложена решења за одводњавање трупа пруге у виду инфилтрационих канала су позитивно утицала на смањење количине отицаја, што је потврђено моделирањем у софтверу SWMM. Њиховом применом такође је регистровано смањење вршног отицаја, као и укупне запремине отицаја у реципијент за чак 30% у поређењу са одводним јарковима на истој испитиваној дужини колосека (100 m), исте ширине посматраних пружних појасева на моделу трупа пруге са минимално прописаним димензијама, моделу пруге у насипу и моделу пруге у усеку. За разлику од ова три модела, уочено је да је у случају модела пруге у насипу са околном површином вредност укупног отицаја у случају примене инфилтрационих канала већа него у случају примене одводних јаркова за око 40%. Када је реч о вршном отицају, у случају сваког од четири разматрана модела, уочено је одлагање времена вршног отицаја на варијантама модела са инфилтрационим каналима.

Из изложеног се може закључити да, уколико се инфилтрациони канали пројектују за прихватање и пречишћавање загађених вода које отичу са трупа пруге, треба водити рачуна да димензије ових канала омогуће што дуже задржавање падавина у оквиру канала ради пречишћавања отицаја и смањења вршног отицаја. Ово би можда захтевало планирање додатних канала за одводњавање по принципу заштитних јаркова за прихват воде са околних површина и њихов транспорт директно у реципијент. На тај начин би се инфилтрациони канали растеретили од додатне количине воде и тиме спречило нежељено испирање већ задржаних метала у филтеру у случају екстремних падавина. Ово може бити проблем код пруга у јако дубоким усецима или засецима у стенској маси, због великих сливних површина или чак ограниченог простора, па би пројектовање инфилтрационих и заштитних канала требало разматрати према рељефним карактеристикама подручја.

7.4 ПРЕПОРУКЕ ЗА БУДУЋА ИСТРАЖИВАЊА

У оквиру будућих истраживања, а на основу претходно изложених резултата експерименталног истраживања, корисно би било испитати још неке варијанте филтер слојева, пошто је уочено да је ефекат задржавања појединих метала у разматраним филтерима, попут кобалта и никла, нешто слабији у поређењу са осталим сагледаним металима. По питању речног агрегата, који је у саставу филтер слоја новопредложених инфилтрационих канала, требало би остати у оквиру фракције 4–8 mm, пошто су крупније фракције допринеле већем испирању метала. Корисно би било будућим експерименталним истраживањима сагледати варијанту са дробљеним агрегатом фракције 4–8 mm ради упоређивања са перформансама речног агрегата. Свакако, треба размислити и о могућим додацима за побољшање ефикасности филтера, попут неких секундарних сировина. Са аспекта екологије, употреба секундарних сировина са евентуалним филтерским особинама у погледу задржавања тешких метала би био вишеструки бенефит за очување животне средине. Један од могућих праваца будућих истраживања би било сагледавање ефекта додавања зеолита постојећим или модифованим варијантама филтера, из разлога његове доказане ефикасности са аспекта пречишћавања вода загађених тешким металима.

Када је реч о моделирању у неком од адекватних софтвера, требало би испитати хидрауличке особине система за одводњавање пруга поређењем класичних и

инфилтрационих канала уз сагледавање сливног подручја реалних геометријских и геомеханичких карактеристика и утврђивање утицаја величине сливног подручја на капацитете система за одводњавање.

ЛИТЕРАТУРА

- Akhtar M.N., Al-Shamrani A.M., Jameel M., Khan N.A., Ibrahim Z., Akhtar J.N., Stability and permeability characteristics of porous asphalt pavement: An experimental case study, *Case Studies in Construction Materials*, Vol.15, e00591, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00591>
- Akter A., Tanim A. H., Islam Md.K., Possibilities of urban flood reduction through distributed-scale rainwater harvesting, *Water Science and Engineering*, Vol.13(2), pp. 95-105, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2020.06.001>
- Ashley R.M., Nowell R., Gersonius B., Walker L., Surface water management and urban green infrastructure - A review of potential benefits and UK and international practices, Foundation for Water Research, London, UK, 2011.
- Baek S., Ligaray M., Pachepsky Y., Chun J. A., Yoon K.-S., Park Y., Cho K. H., Assessment of a green roof practice using the coupled SWMM and Hydrus models, *Journal of Environmental Management*, Vol.261, 109920, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109920>
- Baek S., Ligaray M., Pyo J., Park J.-P., Kank J.-H., Pachepsky Y., Chun J. A., Cho K. H., A novel water quality module of the SWMM model for assessing low impact development (LID) in urban watersheds, *Journal of Hydrology*, Vol.586, 124886, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124886>
- Becker L., Matuschek G., Lenoir D., Kettrup A., Leaching behaviour of wood treated with creosote, *Chemosphere*, Vol.42, pp.301-308, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00071-0](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00071-0)
- Behrouz M. S., Zhu Z., Matott L.S., Rabideau A. J., A new tool for automatic calibration of the Storm Water Management Model (SWMM), *Journal of Hydrology*, Vol.581, 124436, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124436>
- Best Management Practices GUIDANCE DOCUMENT, Environmental protection Agency Office of Water Enforcement and Permits NPDES Technical Support Branch, 1981.
- Best Management Practices, Environmental Encyclopedia, Retrieved October 27, 2022. From Encyclopedia.com: <https://www.encyclopedia.com/environment/encyclopedias-almanacs-transcripts-and-maps/best-management-practices>
- Bibi T. S., Modeling urban stormwater management in the town of Dodola based on landuse and climate change using SWMM 5.1, *Journal of Hidrology: Regional Studies*, Vol.44, 101267, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101267>
- Bouida L., Rafatullah, M., Kerrouche, A., Qutob, M., Alosaimi, A.M., Alorfi, H.S., Hussein, M.A., A review of cadmium and lead contamination: Sources, fate, mechanism, health effects and remediation methods, *Water*, 14, 3432, 2022.
<https://doi.org/10.3390/w14213432>

- Brtnický, M., Pecina, V., Juřička, D., Kowal, P., Galiová, M.V., Baltazár, T., Radziemska, M., Can rail transport-related contamination affect railway vegetation? A case study of a busy railway corridor in Poland, *Chemosphere*, 293, 133521, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133521>
- Burkhardt M., Rossi L., Boller M., Diffuse release of environmental hazards by railways, *Desalination*, Vol.226, pp.106-113, 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.02.102>
- Burkhardt M., Rossi L., Boller M., Release of various Substances to the Environment by Regular Railway Operations, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Dübendorf, Switzerland, 2014.
https://www.researchgate.net/publication/37457664_Release_of_various_substances_to_the_environment_by_regular_railway_operation
- Burkhardt M., Rossi L., Chèvre N., Boller M., Steidle L., Abrecht J., Gächter F., Knabl S., Kuppelwieser, Gewässerschutz an Bahnanlagen- Emittierte Stoffe im Normalbetrieb der SBB sowie Grundlagen zu deren Umweltverhalten (Water protection at railroads – emitted substances from regular operation of SBB and fundamentals of their environmental behavior), Report of the Eawag, Dübendorf, Switzerland, 2005.
<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.3012.0803>
- Chen Z., Ai Y., Fang C., Wang K., Li W., Liu S., Li C., Xiao J., Huang Z., Distribution and phytoavailability of heavy metal chemical fractions in artificial soil on rock cut slopes alongside railways, *Journal of Hazardous Materials*, Vol.273, pp.165–173, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.03.042>
- Chuang W.-K., Lin Z.-E., Lin T.-C., Lo S.-L., Chang C.-L., Chiueh P.-T., Spatial allocation of LID practices with a water footprint approach, *Science of the Total Environment*, Vol.859, 160201, 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160201>
- Cipolla S. S., Maglionico M., Stojkov I., A long-term hydrological modeling of an extensive green roof by means of SWMM, *Ecological Engineering*, Vol.95, pp. 876-887, 2016.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.07.009>
- Collivignarelli M.C., Abbà A., Frattarola A., Miino M.C., Padovani S., Katsoyiannis I., Torretta V., Legislation for the Reuse of Biosolids on Agricultural Land in Europe: Overview, *Sustainability*, Vol.11, 6015, 2019.
<https://doi.org/10.3390/su11216015>
- COUNCIL DIRECTIVE (86/278/EEC), 01986L0278-20220101, Directive on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture (ЕУ Директива), The Council of the European Communities, 1986.
- Davies C., Macfarlane R., McGloin C., Green infrastructure, United States Environmental Protection Agency, 2017. <https://www.epa.gov/green-infrastructure>
- Davis P.A., Stagge J.H., Jamil E., Kim H., Hydraulic performance of grass swales for managing highway runoff, *Water Research*, Vol.46, pp.6775-6786, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.10.017>

- Dean J.R., Practical Inductively Coupled Plasma Spectroscopy, Northumbria University. Newcastle, UK, 2005.
- DEFRA National Standards for sustainable drainage systems - Designing, constructing, operating and maintaining drainage for surface runoff, Department for Environment Food and Rural Affairs, London, 2011.
- Deletic A., McCarthy D., Chandrasena G., Li Y., Hatt B., Payne E., Zhang K., Henry R., Kolotelo P., Randjelovic A., Meng Z., Glaister B., Pham T, Ellerton J., Biofilters and wetlands for stormwater treatment and harvesting, Cooperative Research centre for Water Sensitive Cities, Monash University, Australia, 2014. ISBN:978-1-921912-22-1
- Dimitrijević J., Bonić Z., Zafirovski Z., Milićević D., Djordjević D.M., Zlatanović E., Mrmošanin J., Marinković N., LID Approach to Railway Track Drainage: Determination of Heavy Metal Content in the Embankment of Railway, Periodica Polytechnica Civil Engineering, Vol. 68, No. 3, pp. 872-882, 2024.
<https://doi.org/10.3311/PPci.23433>
- DIN 4262-1:2009-10, Pipes and fittings for subsoil drainage of trafficked areas and underground engineering - Part 1: Pipes, fittings and their joints made from PVC-U, PP and PE, German Institute for Standardisation, 2009.
- Du C. and Li Z., Contamination and health risks of heavy metals in the soil of a historical landfill in northern China, Chemosphere, Vol.313, 137349, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137349>
- Eckart K., McPhee Z., Bolisetti T., Performance and implementation of low impact development – A review, Science of the Total Environment 607-608, pp.413-432, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.254>
- Ekka S. and Hunt B., Swale Terminology for Urban Stormwater Treatment, Urban Waterway series, NC State University Cooperative Extension, Raleigh , North Carolina, 2020. Доступно на адреси:
https://www.researchgate.net/publication/342899063_Swale_Terminology_for_Urban_Stormwater_Treatment
- Ekka S.A., Rujner H., Leonhardt G., Blecken G.-T., Viklander M., Hunt W.F., Next generation swale design for stormwater runoff treatment: A comprehensive approach, Journal of Environmental Management, Vol.279, 111756, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111756>
- EPA SWMM 5.2, United States Environmental Protection Agency, 2023.
<https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>
- Fach S., Engelhard C., Wittke N., Rauch W., Performance of infiltration swales with regard to operation in winter times in an Alpine region, Water Science and Technology, 2011. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2011.153>

- Fardel A., Peyneau P.-E., Béchet B., Lakel A., Rodriguez F., Performance of two contrasting pilot swale designs for treating zinc, polycyclic aromatic hydrocarbons and glyphosate from stormwater runoff, *Science of the Total Environment*, Vol.743, 140503, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140503>
- Feng W., Liu Y., Gao L., Stormwater treatment for reuse: Current practice and future development- A review, *Journal of Environmental Management*, Vol.301, 113830, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113830>
- Fisher S., Eller B., Kada Z., Németh A., 2015, *Railway construction*, UNIVERSITAS-GYŐR NONPROFIT KFT, GYŐR, ISBN: 978-615-5298-69-1 (PDF)
- Flanagan K., Branchhu P., Boudahmane L., Caupos E., Demare D., Deshayes S., Dubois P., Meffray L., Partibane C., Saad M., Gromaire M.C., Field performans of two biofiltration systems treating micropollutants from road runoff, *Water Research*, 145, pp.562-578, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.08.064>
- Fletcher T.D., Shuster W., Hunt W.F., Ashley R., Butler D., Arthur S., Trowsdale S., Barraud S., Semadeni-Davies A., Bertrand-Krajewski J.-L., Mikkelsen P.S., Rivald G., Uhl M., Dagenais D., Viklander M., SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage, *Urban Water Journal*, Vol.12, No.7, pp.525-542, 2014. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
- Frahm, E., Monnier, G.F., Jelinski, N.A., Fleming, E.P., Barber, B.L., Lambon, J.B., Chemical soil surveys at the Bremer Site (Dakota country, Minnesota, USA): Measuring phosphorous content of sediment by portable XRF and ICP-OES, *Journal of Archeological Science*, 75, pp. 115-138, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2016.10.004>
- Gimenez-Maranges M, Breuste J., Hof A., Sustainable drainage systems for transitioning to sustainable urban flood management in the European Union: A review, *Journal of Cleaner Production*, 255, 120191, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120191>
- Gounder S., The potential contribution of railway corridors to the urban environment: Melbourne as a case study, *Faculty of Arhitecture, Building and Planning*, The University of Melbourne, 2008. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.2663.8327>
- Hamouz V. and Muthanna T. M., Hydrological modeling of green and grey roofs in cold climate with the SWMM model, *Journal of Environmental Management*, Vol.249, 109350, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109350>
- Hang, J.G., Dong, J.J., Feng, H., Huang, J.Z., Wang, Z., Shen, B., Nakayama, S.F., Kido, T., Jung, C.-R., Ma, C., Sun, X.L., Evaluating postnatal exposure to six heavy metals in a Chinese e-waste recycling area, *Chemosphere*, 308, 136444, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136444>

- Harris, A., Xanthos, S.J., Galiotos, J.K., Douvris, C., Investigation of the metal content of sediments around the historically polluted Potomac River basin in Washington D.C., United States by inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy (ICP-OES), *Microchemical Journal*, 142, pp. 140-143, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.06.033>
- Harvey, D., *Analytical Chemistry 2.1*, DePauw University, LibreTexts, 2023. Available at: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Analytical_Chemistry_2.1_\(Harvey\)](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Analytical_Chemistry_2.1_(Harvey))
- Heidari B., Schmidt A. R., Minsker B., Cost/benefit assessment of green infrastructure: Spatial scale effects on uncertainty and sensitivity, *Journal of Environmental Management*, Vol.302, 114009, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114009>
- Hermawan A. A., The K. L., Talei A., Chua L. H. C., Accumulation of heavy metals in stormwater biofiltration systems augmented with zeolite and fly ash, *Journal of Environmental Management*, Vol. 297, 113298, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113298>
- Hoban A., *Water Sensitive Urban Design Approaches and Their Description-Chapter 2, Potential, Design, Ecological Health, Urban Greening, Economics, Policies and Community Perceptions*, pp.25-47, Brisbane, Australia, 2019.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812843-5.00002-2>
- Hokura A., X-ray Fluorescence Spectrometry, *Analitical Sciences*, Vol. 37, pp.1-2, 2021.
<http://dx.doi.org/10.2116/analsci.highlights2101>
- Hoyer J., Dickhaut W., Kronawitter L., Weber B., *Water Sensitive Urban Design- Principles and Inspiration for Sustainable Stormwater Management in the City of Future-Manual*, Berlin, 2011. ISBN: 978-3-86859-106-4
- Kang S.-M., Morell J.J., Simonsen J., Lebow S., Creosote movement from treated wood immersed in fresh water, *Forest Products Journal*, Vol.55, No.12, pp.42-46, 2005.
https://www.researchgate.net/publication/237442654_Creosote_movement_from_treated_wood_immersed_in_fresh_water
- Khankhaje E., Kim T., Jang H., Rafieizonooz M., Laboratory evaluation of heavy metal removal from stormwater runoff by pervious concrete pavement containing seashell and oil palm kernel shell, *Construction and Building Materials*, 400, 132648, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132648>
- Kia A., Delens J.M.m Wong H.S., Cheeseman C.R., 2021, Structural and hydrological design of permeable concrete pavements, *Case Studies in Construction Materials*, Vol.15, e00564, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00564>
- Kim H., Mallari K. J. B., Baek J., Pak G., Choi H. II, Yoon J., Considering the effect of groundwater on bioretention using the Storm Water Management Model, *Journal of Environmental Management*, Vol.231, pp. 1270-1276, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.032>

- Li S., Wang Z., Wu X., Zeng Z., Shen P., Lai C., A novel spatial optimization approach for the cost-effectiveness improvement of LID practices based on SWMM-FTC, *Journal of Environmental Management*, Vol.307, 114574, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114574>
- Lim H.S., Lim W., Hu J.Y., Ziegler A., Ong S.L., Comparison of filter media materials for heavy metal removal from urban stormwater runoff using biofiltration systems, *Journal of Environmental Management*, 147, pp.24-33, 2015.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.04.042>
- Lisenbee W., Hathaway J.M., Winston R. J., Modeling bioretention hydrology: Quantifying the performance of DRAINMOD-Urban and the SWMM LID module, *Journal of Hydrology*, Vol.612, 128179, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128179>
- Liu H., Chen L.P., Ai Y.W., Yang X., Yu Y.H., Zuo Y.B., Fu G.Y., Heavy metal contamination in soil alongside mountain railway in Sichuan, China, *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol.152, pp.25-33, 2009.
<https://doi.org/10.1007/s10661-008-0293-7>
- Liu, H-I., Meng, Q., Zhao, X., Ye, Y.-I., Tong, H.-R., Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) and inductively coupled plasma optical emission spectrometer (ICP-OES) - based discrimination for the authentication of tea, *Food Control*, 123, 107735, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107735>
- Lohan D., Jain R., Srivastava A., Dutta S., Mohan D., Sharma R.K., Surface engineering approaches for the design of magnetic biochar-composites for removal of heavy metals: A comprehensive review, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol.11, 111448, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111448>
- Luan B., Yin R., Xu P., Wang X., Yang X., Zhang L., Tang X., Evaluating Green Stormwater Infrastructure strategies efficiencies in a rapidly urbanizing catchment using SWMM-based TOPSIS, *Journal of Cleaner Production*, Vol.223, pp. 680-691, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.028>
- Macro K., Matott L. S., Rabideau A., Ghodsi S. H., Zhu Z., OSTRICH-SWMM: A new multi-objective optimization toolfor green infrastructure planning with SWMM, *Environmental Modelling & Software*, Vol.113, pp. 42-47, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.12.004>
- Mak C.L., Linking sustainable drainage system (SuDS) together with ecosystem services and disservices: New connections in urban ecology, *Ecosystem and Environment Research Centre, School of Environment and Life Sciences, University of Salford, Salford, UK*, 2015. <https://salford-repository.worktribe.com/output/1406950/>
- Malawska M. and Wiłkomirski B., An analysis of soil and plant (*Taraxacum officinale*) contamination with heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the area of the railway junction Hława Główna, Poland, *Water, Air and Soil Pollution*, Vol. 127, pp.339–349, 2001. <https://doi.org/10.1023/A:1005236016074>

- Mantilla I., Flanagan K., Muthanna T. M., Blecken G.-T., Viklander M., Variability of green infrastructures performance due to climatic regimes across Sweden, *Journal of Environmental Management*, Vol.326, 116354, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116354>
- Marguí E., Queralt I., de Almeida E., X-ray fluorescence spectrometry for environmental analysis: Basic principals, instrumentation, applications and recent trends, *Chemosphere*, Vol. 303, 135006, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135006>
- Medykowska M., Wiśniewska M., Szewczuk-Karpisz K., Panek R., Interaction mechanism of heavy metal ions with the nanostructured zeolites surface – Adsorption, electrokinetic and XPS studies, *Journal of Molecular Liquids*, Vol.357, 119144, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119144>
- Meng X., Ai Y., Li R., Zhang W., Effects of heavy metal pollution on enzyme activities in railway cut slope soils, *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol.190 (4), 197, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6567-9>
- Metcalf & Eddy, Inc., University of Florida, Water Resources Engineers, Inc., Storm Water Management Model, Volume I – Final Report, 11024DOC07/71, Water Quality Office, Environmental Protection Agency, Washington, DC, 1971.
- Monrabal-Martinez C., Aberle J., Muthanna T.M., Orts-Zamorano M, Hydrological benefits of filtering swales for metal removal, *Water Research*, Vol.145, pp.509-517, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.08.051>
- Nagara V.N., Sarkar D., Boufadel M., Datta R., Green engineered mulch for phosphorus and metal removal from stormwater runoff in bioretention systems, *Chemosphere*, 331, 138779, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138779>
- Okem, A., Southway, C., Ndhlala, A.R., Van Staden, J., Determination of total and bioavailable heavy and trace metals in South African commercial herbal concoctions using ICP-OES, *South African Journal of Botany*, 82, pp. 75-82, 2012.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.sajb.2012.07.005>
- Payne E., Hatt B., Deletic A., Dobbie M., McCarthy D., Chandrasena G., Adoption Guidelines for Stormwater Biofiltration Systems, Cooperative Research Centre for Water Sensitive Cities, Monash University, Australia, 2015. ISBN: 978-1-921912-27-6
- Prohaska Stevan J., Bartoš Divac Vladislava I., Intenziteti jakih kiša u Srbiji, Institut za vodoprivedu Jaroslav Černi, Beograd, 2014. ISBN 978-86-82565-40-6
- Qi S., Li X, Luo J., Han R., Chen Q., Shen D., Shentu J., Soil heterogeneity influence on the distribution of heavy metals in soil during acid rain infiltration: Experimental and numerical modeling, *Journal of Environmental Management*, Vol.322, 116144, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116144>
- Randall M., Sun F., Zhang Y., Bergen J. M., Evaluating Sponge City volume capture ratio at the catchment scale using SWMM, *Journal of Environmental Management*, Vol.246, pp. 745-757, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.134>

- Reddy K.R., Xie T., Dastgheibi S., Removal of heavy metals from urban stormwater runoff using different filter materials, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol.2, pp.282-292, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2013.12.020>
- Rehan I., Gondal M.A., Reha K., Sultana S., Spectral diagnosis of health hazardous toxins in face foundation powders using laser induced breakdown spectroscopy and inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy (ICP-OES), *Talanta*, Vol.217, 121077, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121007>
- Rehan I., Gondal M.A., Rehan K., Determination of lead content in drilling fueled soil using laser induced spectral analysis and its cross validation using ICP/OES method, *Talanta*, Vol.182, pp.443-449, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.02.024>
- Revenko A.G. and Pashkova G.V., X-Ray Fluorescence Spectrometry: Current Status and Prospects of Development, *Journal of Analytical Chemistry*, Vol. 78, No. 11, pp. 1452-1468, 2023. <http://dx.doi.org/10.31857/S0044450223110130>
- Rijke J.S., De Graaf R.E., Van de Ven F.H.M., Brown R.R., Biron D.J., Comparative case studies towards mainstreaming water sensitive urban design in Australia and the Netherlands, 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK, 2008.
- Rossman L.A., Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1, United States Environmental Protection Agency, 2015.
https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-02/documents/epaswmm5_1_manual_master_8-2-15.pdf
- Samarska, A., Zelenko, Y., Kovrov, O., Investigation of heavy metal sources on railways: Ballast layer and herbicides, *Journal of Ecological Engineering*, 21(8), pp.32-46, 2020. <https://doi.org/10.12911/22998993/127393>
- Sañudo R., Miranda M., García C., García-Sánchez D., Drainage in railways, *Construction and Building Materials*, Vol.210, pp.391-412, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.104>
- Selbig W.R., Buer N., Danz M.E., Stormwater-quality performance of lined permeable pavements systems, *Journal of Environmental Management*, Vol.251, 109510, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109510>
- Spink T., Duncan I., Lawrance A., Todd A., Transport infrastructure drainage: condition appraisal and remedial treatment, CIRIA, CIRIA C714, London, 2014. ISBN: 978-0-86017-717-3
- SRPS EN 13242:2010, Агрегати за неvezане и хидраулички vezане материјале за употребу у грађевинским радовима и изградњи путева, Институт за стандардизацију Србије, Београд, 2010.

- SRPS EN 13250:2017, Геотекстил и геотекстилу сродни производи – Карактеристике које се захтевају за изградњу железничких пруга, Институт за стандардизацију Србије, Београд, 2017.
- SRPS EN 13251:2017, Геотекстил и геотекстилу сродни производи – Карактеристике које се захтевају за извођење земљаних радова, темеља и потпорних конструкција, Институт за стандардизацију Србије, Београд, 2017.
- SRPS EN 13253:2017, Геотекстил и геотекстилу сродни производи – Карактеристике које се захтевају за заштиту од ерозије (заштита обале, утврђење обале), Институт за стандардизацију Србије, Београд, 2017.
- SRPS EN 13256:2015, Геотекстил и геотекстилу сродни производи – Захтеване карактеристике које су потребне приликом изградње тунела и подземних конструкција, Институт за стандардизацију Србије, Београд, 2015.
- SRPS EN 13286:2022, Невезане и хидрауличким везивом везане мешавине – Део 47: Методе испитивања за одређивање калифорнијског индекса носивости, непосредног индекса носивости и линеарног бубрења, Институт за стандардизацију Србије, Београд, 2022.
- SRPS EN 13491:2018, Геомембране – Карактеристике које се захтевају за примену при изградњи тунела и сличних подземних конструкција, Институт за стандардизацију Србије, Београд, 2018.
- SRPS U.S4.064:1990, Типови осигурања косина насипа и усека и ножице насипа, Институт за стандардизацију Србије, Београд, 1990.
- SRPS EN ISO 17892:2015, Геотехничко истраживање и испитивање — Лабораторијско испитивање тла, Институт за стандардизацију Србије, Београд, 2015.
- SRPS U.B1.047:1997, Геомеханичка испитивања – Одређивање модула деформације помоћу оптерећења кружном плочом, Институт за стандардизацију Србије, Београд, 1997.
- SRPS EN 1997:2017, Еврокод 7 – Геотехничко пројектовање, Институт за стандардизацију Србије, Београд, 2017.
- SRPS EN 14475:2011, Извођење специјалних геотехничких радова – Испуне за армирање тла, Институт за стандардизацију Србије, Београд, 2011.
- Stagge J.H., Davis A.P., Jamil E., Kim H., Performance of grass swales for improving water quality from highway runoff, Water Research, Vol.46, pp.6731-6742, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.02.037>

- Stojaizadeh A., Geza M., Hogue T. S., GIP-SWMM: A new Green Infrastructure Placement Tool coupled with SWMM, *Journal of Environmental Management*, Vol.277, 111409, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111409>
- Stojić N., Pucarević M., Stojić G., Railway transportation as a source of soil pollution, *Transportation Research Part D*, Vol.57, pp.124-129, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2017.09.024>
- Stojić N., Štrbac S., Ćurčić Lj., Pucarević M., Prokić D., Stepanov J., Stojić G., Exploring the impact of transportation on heavy metal pollution: A comparative study of trains and cars, *Transportation Research Part D*, Vol.125, 103966, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103966>
- Støving, C., Jensen, H., Gammelgaard, B., Stürup, S., Development and validation of an ICP-OES method for quantification of elemental impurities in tablets according to coming US pharmacopeia chapters, *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 84, pp. 209-214, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2013.06.007>
- Taghizadeh S., Khani S., Rajaei T., Hybrid SWMM and particle swarm optimization model for urban runoff water quality control by using green infrastructures (LID-BMPs), *Urban Forestry & Urban Greening*, Vol.60, 127032, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127032>
- Tang S., Jiang J., Zheng Y., Hong Y., Chung E.-S., Shamseldin A. Y., Wei Y., Wang X., Robustness analysis of storm water quality modeling with LID infrastructures from natural event-based field monitoring, *Science of the Total Environment*, Vol.753, 142007, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142007>
- Tedoldi D., Chebbo G., Pierlot D., Branchu P., Kovacs Y., Gromaire M.-C., Spatial distribution of heavy metals in the surface soil of source-control stormwater infiltration devices – Inter-site comparison, *Science of the Total Environment*, Vol.579, pp.881-892, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.226>
- Trajkovic S., Milicevic D., Milanovic M., Gocic M., Comparative study of different LID technologies for drainage and protection of atmospheric stormwater quality in urban areas, *Arabian Journal of Geosciences*, Vol.13(20), 2020. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06093-0>
- Vaiškūnaitė R., Jasiūnienė V., The analysis of heavy metal pollutants emitted by railway transport, *Transport*, Vol.35(2), pp.213-223, 2020. <https://doi.org/10.3846/transport.2020.12751>
- van der Sterren M., Rahman A., Rayan G., Modeling of a lot scale rainwater tank system in XP-SWMM: A case study in Western Sydney, Australia, *Journal of Environmental Management*, Vol.141, pp. 177-189, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.02.013>
- Velarde L., Nabavi M.S., Escalera E., Antti M.-L., Adsorption of heavy metals on natural zeolites: A review, *Chemosphere*, Vol.328, 138508, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138508>

- Velimirović D., Oprimizacija, validacija i primena ICP-OES metoda određivanja sadržaja metala u realnim uzorcima - doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Prirodno matematički fakultet, 2013.
- Velimirović, D., Kaličanin, B., Stojković, M., Tošić, S., Determining the content of Cd, Cu, Pb and Zn in the leaves of dandelion (*taraxacum officiale webb.*) and in the soil by ICP-OES, *Acta Medica Medianae*, 59(1), pp. 23-30, 2020.
<http://dx.doi.org/10.5633/amm.2020.0103>
- Vijayaraghavan K., Biswal B.K., Adam M.G., Soh S.H., Tsen-Tieng D.L., Davis A.P., Chew S.H., Tan P.Y., Babovic V., Balasubramanian R., Bioretention systems for stormwater management: Recent advances and future prospects, *Journal of Environmental Management*, Vol.292, 112766, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112766>
- Vo P.T., Ngo H.H., Guo W., Zhou J.L., Listowski A., Du B., Wei Q., Bui X.T., Stormwater quality management in rail transportation – Past, present and future, *Science of the Total Environment*, 512-513, pp.353-363, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.072>
- Wang L.F., Bai Y.X., Gai S.N., Single-factor and nemerow multi-factor index to assess heavy metals contamination in soils on railway side of Harbin-Suifenhe Railway in Northeastern China, *Applied Mechanics and Materials*, vol. 71. Trans Tech Publications Ltd, pp. 3033–3036, 2011.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.71-78.3033>
- Wang Z., Li S., Wu X., Lin G., Li C., Impact of spatial discretization resolution on the hydrological performance of layout optimization of LID practices, *Journal of Hydrology*, Vol.612, 128113, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128113>
- Weathers M., Hathaway J. M., Tirpak R. A., Khojandi A., Evaluating the impact of climate change on future bioretention performance across the contiguous United States, *Journal of Hidrology*, Vol.616, 128771, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128771>
- Wierzbicka M., Bemowska-Kałabum O., Gworek B., Multidimensional evaluation of soil pollution from railway tracks, *Ecotoxicology*, Vol.24, pp.805-822, 2015.
<https://doi.org/10.1007/s10646-015-1426-8>
- Wijeyawardana P., Nanayakkara N., Gunasekara C., Karunarathna A., Law D., Pramanik B.K., Improvement of heavy metal removal from urban runoff using modified pervious concrete, *Science of the Total Environment*, 815, 152936, 2022.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.152936>
- Wilkomirski B., Sudnik-Wójcikowska, Galera H., Wierzbicka M., Malawska M., Railway transportation as a serious source of organic and inorganic pollution, *Water Air Soil Pollut*, Vol.218, pp.333-345, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0645-0>
- Woods-Ballard B., Kellagher R., Martin P., Jefferies C., Bray R., Shaffer P., *The SuDS manual*, CIRIA C697, CIRIA, London, 2007. ISBN: 978-0-86017-697-8

- Xie N., Akin M., Shi X., Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability, *Journal of Cleaner Production*, Vol.210, pp.1605-1621, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.134>
- Yang Y., Li J., Huang Q., Xia J., Li J., Liu D., Tan Q., Performance assessment of sponge city infrastructure on stormwater outflows using isochrone and SWMM models, *Journal of Hydrology*, Vol.597, 126151, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126151>
- Yang Y., Li Y., Huang Q., Xia J., Li J., Surrogate-based multiobjective optimization to rapidly size low impact development practices for outflow capture, *Journal of Hydrology*, Vol.616, 128848, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128848>
- Yu Y., Zhou Y., Guo Z., van Duin B., Zhang W., A new LID spatial allocation optimization system at neighborhood scale: Integrated SWMM with PICEA-g using MATLAB as the platform, *Science of the Total Environment*, Vol.831, 154843, 2022.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154843>
- Zhang H., Wang Z., Zhang Y., Hu Z., The effects of the Qinghai – Tibet railway on heavy metals enrichment in soils, *Science of the Total Environment*, vol.439, pp.240-248, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.09.027>
- Zhang H., Zhang Y., Wang Z., Ding M., Heavy metal enrichment in the soil along the Delhi–Ulan section of the Qinghai–Tibet railway in China. *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol.185 (7), pp.5435–5447, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2957-6>
- Zhang K., Chui T. F. M., Yang Y., Simulating the hydrological performance of low impact development in shallow groundwater via a modified SWMM, *Journal of Hydrology*, Vol.566, pp. 313-331, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.006>
- Zhang K., Randjelovic A., Page D., McCarthy D.T., Deletic A., The validation of stormwater biofilters for micropollutant removal using in situ challenge tests, *Ecological Engineering*, Vol.67, pp.1-10, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.004>
- Zhang Z., Hu W., Wang W., Zhou J., Liu D., Qi X., Zhao X., The hydrological effect and uncertainty assessment by runoff indicators based on SWMM for various LID facilities, *Journal of Hydrology*, Vol.613, 128418, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128418>
- Zhu Y., li H., Yang B., Zhang X., Mahmud S., Zhang X., Yu Bo., Zhu Y, Permeable pavement design framework for urban stormwater management considering multiple criteria and uncertainty, *Journal of Cleaner Production*, Vol.293, 126114, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126114>
- Поповић З., Основе пројектовања железничких пруга, Грађевински факултет, Универзитет у Београду, Београд, 2004. ISBN: 86-7518-045-4

ПРАВИЛНИК о техничким условима подсистема инфраструктура, Сл.Гласник РС, бр.39/2023 и 17/2024, Дирекција за железнице РС, Београд, Србија, 2024.
<https://www.paragraf.rs/propisi/pravilnik-o-tehnickim-uslovima-podsistema-infrastruktura.html>

Уредба о граничним вредностима загађујућих, штетних и опасних материја у земљишту (Уредба РС), Сл.Гласник РС, број 30/2018 и 64/19, Београд, Србија, 2019. <https://www.paragraf.rs/propisi/uredba-granicnim-vrednostima-zagadjujucih-stetnih-opasnih-materija-zemljistu.html>

<https://www.thermofisher.com/rs/en/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/spectroscopy-elemental-isotope-analysis-learning-center/trace-elemental-analysis-tea-information/icp-oes-information/icp-oes-system-technologies.html>

<http://www.ppf.rs/rs/projekti/ppf8>

КРАТКА БИОГРАФИЈА

Јелена (Аца) Димитријевић, дипл. инж. грађевинарства, рођена је у Пироту 07.09.1985. године. Основну школу „Иво Лола Рибар“ завршила је у Бабушници са одличним успехом (просечном оценом 5,00). Као добитник Вукове дипломе 2004. године завршава Гимназију „Вук Караџић“ у Бабушници и исте године уписује Грађевинско-архитектонски факултет у Нишу. На саобраћајно-конструктивном смеру, грађевинског одсека, стиче прва знања из области пројектовања објеката нискоградње, што се касније наставља и на Докторским студијама које уписује 2010.

Упоредо са похађањем докторских студија стиче прво радно искуство у Дирекцији за изградњу, путеве и комунални развој општине Бабушница у периоду од 2011. до 2012. године.

Од октобра 2013. године до данас је радно ангажована на Грађевинско-архитектонском факултету у Нишу као асистент на предметима Железничке пруге, Железничке станице, Горњи строј и станице, Железнички горњи строј и Одржавање железничких пруга.

Своју приврженост области која проучава Железницу као целину додатно изражава кроз израду докторске дисертације у вези са пројектовањем елемената трасе пруге у служби очувања животне средине. Већина научних и стручних радова Јелене Димитријевић објављених у часописима и оних изложених на научним конференцијама, а од којих је један објављен у часопису са импакт фактором, су у складу са темом њене докторске дисертације.

Удата је и мајка двоје деце.

У Нишу,
септембра 2024.

Јелена Димитријевић, дипл. инж. грађ.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом:

Прилог принципима пројектовања елемената доњег строја железничке пруге у складу са савременим захтевима очувања животне средине

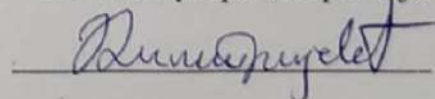
која је одбрањена на Грађевинско-архитектонском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивала на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредила ауторска права, нити злоупотребила интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, 17.10.2024

Потпис аутора дисертације:



(Име, средње слово и презиме)

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ ОБЛИКА
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

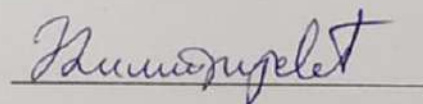
Наслов дисертације:

Прилог принципима пројектовања елемената доњег строја железничке пруге у складу са
савременим захтевима очувања животне средине

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предала за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**, истоветан штампаном облику.

У Нишу, 17.10.2024.

Потпис аутора дисертације:



(Име, средње слово и презиме)

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

Прилог принципима пројектовања елемената доњег строја железничке пруге у складу са савременим захтевима очувања животне средине

Дисертацију са свим прилозима предала сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучила.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)

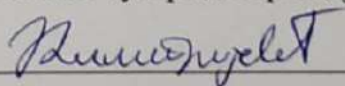
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

У Нишу, 17.10.2024.

Потпис аутора дисертације:



(Име, средње слово и презиме)