

УНИВЕРЗИТЕТ СИНГИДУМУМ
БЕОГРАД
ДЕПАРТМАН ЗА ПОСЛЕДИПЛОМСКЕ СТУДИЈЕ

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

МИКРОБИОЛОШКА ДЕКОНТАМИНАЦИЈА ПРИОБАЛНОГ
ЗЕМЉИШТА У СЛИВУ РЕКЕ КОЛУБАРЕ ПРИМЕНОМ
ВИСОКОЕНЕРГЕТСКОГ ЈОНИЗУЈУЋЕГ ЗРАЧЕЊА

МЕНТОР:

Проф. др Гордана Дражић

СТУДЕНТ:

MSc Вук Гајић

БРОЈ ИНДЕКСА:

485048/2019

БЕОГРАД, 2022. год.

Ментор:

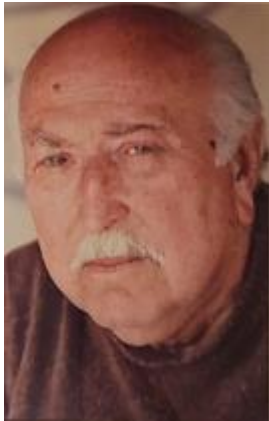
др Гордана Дражић, редовни професор Универзитета Сингидунум Београд

Чланови комисије:

др Јелена Миловановић, редовни професор Универзитета Сингидунум Београд

др Ивица Вујчић, научни сарадник Института за нуклеарне науке „Винча“ – Институт од националног значаја за Републику Србију – Универзитет у Београду

Датум одбране: _____, Београд.



Проф. др Миленко Ристић

Посвета

На прву лопту се увек чини да је нека препрека несавладива, но на крају се сваки проблем премости и савлада.

Зато сам срећан што си ме научио битним животним стварима које ме свакодневно воде кроз живот.

Заслужио си да овај мој успех буде посвећен баш Теби и надам се да си поносан на свог унука.

Захвалница

Докторска дисертација „Микробиолошка деконтаминација приобалног земљишта у сливу реке Колубаре применом високоенергетског јонизујућег зрачења“ представља врхунац мог досадашњег рада и труда.

Искористио бих прилику да се захвалим изузетним људима који су ми пружили помоћ и подршку на мом путу ка успеху.

Првенствено желим да се захвалим мом ментору, проф. др Гордани Дражић, која ме већ дуги низ година прати кроз моје усавршавање, што као професор, што кроз менторства, увек имајући стрпљења и добре савете.

Захваљујем се и коментору проф. др Јелени Миловановић, која је, такође, годинама радила и помагала ми да дођем до мог циља.

Велику захвалност дугујем др Ивици Вујчићу, научном сараднику на Институту за нуклеарне науке „Винча“, у Београду, и његовим колегама, који су ми помогли при испитивању свих узорака и при анализи добијених резултата.

Захвалност дугујем проф. др Борису Вакањцу и проф. др Весни Ристић Вакањац на помоћи и достављеним материјалима.

Захвалност дугујем проф. др Месуду Аџемовићу на подршци током целокупних студија.

Посебну захвалност дугујем Бранку Ђукелићу на сарадњи и пожртвованости приликом обиласка терена од интереса током истраживања и прикупљања узорака.

Овим путем бих се захвалио и осталим професорима и колегама са којима сам сарађивао кроз своје студије.

РЕЗИМЕ

Река Колубара, са својим притокама дуж целог слива, акумулира полутанте из различитих извора. Урбане средине са недостатком постројења за третмане отпадних вода и муља, као и индустрија, главни су извори загађења у сливу ове реке. Колубара својим протицањем транспортује полутанте, који потом контаминирају приобално земљиште чинећи га опасним по животну средину, здравље људи и животиња.

Различите методе се могу користити за деконтаминацију земљишта. Ове методе укључују биолошки третман/биоремедијацију, хемијску оксидацију, стабилизацију земљишта, физичке методе (као што је испирање земљишта) или третман високоенергетским јонизујућим зрачењем.

Гама зрачење је добро позната метода инхибиције микробне активности. У овој докторској дисертацији је испитан утицај различитих доза и брзина дозе гама зрачења на микробиолошку деконтаминацију на примеру приобалног земљишта у сливу реке Колубаре. Такође је испитана и хомогеност расподеле дозе апсорбованог зрачења озраченог материјала. Испитивани су ефекти зрачења на смањење укупног броја микроорганизама и уклањање плесни и патогених бактерија из узорака земљишта. Утврђено је да доза гама зрачења од 3 kGy неутралише све патогене бактерије, доза од 5 kGy деактивира плесни у узорцима земљишта, док је доза од 10 kGy оптимална за уклањање свих присутних микроорганизама у узорцима и за стерилизацију третираног земљишта. Истраживање је показало да брзина дозе гама зрачења не утиче значајно на микробиолошку деконтаминацију земљишта.

Одређен је садржај тешких метала у земљишту на неколико кључних локација дуж самог слива, а добијене вредности су упоређене са граничним максималним и ремедијационим вредностима загађујућих, штетних и опасних материја у земљишту које су прописане регулативом. Утврђено је да је присуство тешких метала у обрађеним узорцима земљишта испод ремедијационих прописаних вредности. Једини изузетак је незнатно повећан садржај бакра у једном узорку. Међутим, већина узорака премашује граничне максималне вредности тешких метала, што отвара потребу за

даљим испитивањем овог подручја ради идентификације загађивача и присуства тешких метала у земљишту.

Као резултат ове докторске дисертације утврђено је тренутно стање животне средине и степен контаминације приобалног земљишта микроорганизмима и плеснима на стратешки одабраним локацијама дуж слива реке Колубаре. Упоредивањем добијених података са 48 тачака узорковања дуж слива реке Колубаре и са просторним референцама урбаних и индустријских средина кроз које протиче Колубара и њене притоке, утврђено је да се повишене вредности микроорганизама и плесни поклапају са протоком реке кроз урбане и индустријске зоне.

Изведен је закључак да се контаминирано приобално земљиште из слива Колубаре може деконтаминирати гама зрачењем као једном иновативном методом ремедијације. Ова напредна технологија доступна је у Србији, јер у оквиру Института за нуклеарне науке „Винча“ у Београду постоји индустријско постројење за третман гама зрачењем.

ABSTRACT

The Kolubara River, with its tributaries along the entire basin, accumulates pollutants from various sources. Urban areas with a lack of wastewater and sludge treatment plants, as well as industry, are the main sources of pollution in the basin. By its flow, Kolubara transports pollutants, which then contaminate the coastal land, making it dangerous for the environment and human and animal health.

Different methods can be used to decontaminate the soil. These methods include biological treatment or bioremediation; chemical oxidation; soil stabilization; physical methods, such as soil leaching; or high-energy ionizing radiation treatment.

Gamma radiation is a well-known method of inhibiting microbial activity. In this doctoral dissertation, the influence of different doses and dose rates of gamma radiation on microbiological decontamination on the example of coastal soil in the Kolubara river basin was examined. The homogeneity of the dose distribution of the absorbed radiation of the irradiated material was also investigated. The effects of radiation on the reduction of the total number of microorganisms and the removal of mold and pathogenic bacteria from soil samples were investigated. A dose of gamma radiation of 3 kGy was found to neutralize all pathogenic bacteria, a dose of 5 kGy deactivates mold in soil samples, while a dose of 10 kGy is the optimal dose of 10 kGy for the introduction of bacteria and sterile organisms. The study showed that the dose rate of gamma radiation does not significantly affect the microbiological decontamination of the soil.

The content of heavy metals in the soil at a couple of key selected locations along the basin was determined, and the obtained values were compared with the maximum and remediation values of pollutants, harmful and dangerous substances in the soil as prescribed by the Regulation. It was determined that the presence of heavy metals in the investigated soil samples was below the remedial prescribed values. The only exception was the slightly increased copper content in one sample. But most of the samples exceed the limit values, which indicates the need for further testing of this area and the identification of pollutants as well as the presence of heavy metals in the soil.

As a result of this doctoral dissertation, the current state of the environment and the degree of contamination of the coastal land with microorganisms and molds at strategically selected

locations along the Kolubara river basin were determined. By comparing the obtained data from 48 sampling points along the Kolubara river basin and with spatial references of urban and industrial environments through which the Kolubara and its tributaries flow, we obtained the following results: Elevated values of microorganisms and molds coincide with river flow through urban and industrial zones. In this way, we connected pollution and its sources of pollution.

It was concluded that contaminated coastal land from the Kolubara basin can be decontaminated by gamma radiation treatment as an innovative method of remediation. This advanced soil treatment technology is available in Serbia because, within the Vinca Institute of Nuclear Sciences in Belgrade., there is an industrial plant for gamma radiation treatment.

Садржај:

УВОД	13
1. ЦИЉЕВИ И ХИПОТЕЗЕ ИСТРАЖИВАЊА	18
2. ПОДРУЧЈЕ И ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА	20
2.1. Основни подаци о сливу реке Колубаре	20
2.1.1. Географски положај истраживаног подручја	20
2.1.2. Климатске карактеристике истраживаног подручја	30
2.1.2.1. Режим падавина	31
2.1.2.2. Режим температуре ваздуха	36
2.1.2.2.1. Временски параметри за општину Обреновац у периоду истраживања	37
2.1.2.2.2. Временски параметри за општину Барајево у периоду истраживања	37
2.1.2.2.3. Временски параметри за општину Лазаревац у периоду истраживања	38
2.1.2.2.4. Временски параметри за општину Уб у периоду истраживања	38
2.1.2.2.5. Временски параметри за општину Лајковац у периоду истраживања	38
2.1.2.2.6. Временски параметри за општину Љиг у периоду истраживања	39
2.1.2.2.7. Временски параметри за општину Мионица у периоду истраживања	39
2.1.2.2.8. Временски параметри за град Ваљево у периоду истраживања	40
2.1.3. Геолошке и геоморфолошке карактеристике подручја истраживања	40
2.1.3.1. Геолошке карактеристике подручја истраживања	47
2.1.3.2. Рељеф терена и савремени морфолошки процеси	49
2.1.4. Хидрографске и хидролошке карактеристике истраженог подручја	52
2.2. Јонизујуће зрачење	58
2.2.1. Врсте јонизујућег зрачења	59
2.2.2. Извори јонизујућих зрачења	61
2.2.3. Примена јонизујућег зрачења	61
2.3. Примена јонизујућег зрачења у заштити животне средине	66
2.3.1. Третман димних гасова	69
2.3.2. Третман отпадних вода	70
2.3.3. Третман канализационог муља	72
2.3.4. Санација земљишта	78
2.3.5. Стерилизација земљишта	78
3. МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА	80
3.1. Прикупљање података, мерења и запажања	80
3.2. Извори просторних података	81
3.2.1. Просторни подаци	82
3.2.1.1. Векторски подаци	82
3.2.1.2. Растерски подаци	83
3.2.2. Растерске карте	83
3.2.2.1. Геореференцирање	83
3.2.2.2. Ортофото	84
3.2.2.3. Дигитални модел терена	84
3.3. Узorkовање	84
3.4. Озрачивање узорака гама зрацима	91
3.4.1. Метод калибрације и утврђивања хомогености расподеле дозе апсорбованог зрачења озраченог материјала	92
3.4.2. Методологија озрачења узорака у шаржном режиму	93

3.5. Микробиолошка анализа	95
3.5.1. Одређивање присуства плесни	95
3.5.2. Одређивање присуства <i>E. coli</i>	95
3.5.3. Одређивање присуства <i>S. aureus</i>	96
3.5.4. Одређивање присуства <i>P. aeruginosa</i>	96
3.5.5. Одређивање концентрације тешких метала у земљишту	96
3.6. Синтеза етанол-монохлоробензена	97
4. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА.....	98
4.1. Одређивање укупног броја микроорганизама у земљишту на различитим тачкама дуж тока реке Колубаре.....	98
4.2. Утицај гама зрачења на микробиолошку деконтаминацију.....	110
4.3. Ефекат различитих брзина доза гама зрачења на микробиолошку деконтаминацију	111
4.4. Резултати калибрација и утврђивања хомогености расподеле дозе апсорбованог зрачења озраченог материјала.....	112
4.4.2. Резултати озрачивања узорак у контејнеру за брзо озрачивање	116
4.5. Утврђивање утицаја гама зрачења на садржај патогених микроорганизама у узорцима земљишта.....	118
4.6. Садржај плесни у земљишту и утицај различитих доза гама зрачења на деконтаминацију	120
4.7. Концентрације тешких метала у земљишту	125
4.8. Поређење методе третмана земљишта употребом јонизујућег зрачења са осталим методама за стерилизацију земљишта.....	129
4.8.1 Поређење иновативних и старих технологија и метода за стерилизацију земљишта.....	129
4.8.2 Упоредивање оперативних трошкова и примена иновативних и старих технологија и метода	131
ЗАКЉУЧАК	133
ЛИТЕРАТУРА.....	136
ПРИЛОГ	153
Списак слика	153
Списак табела.....	154

УВОД

Приобални екосистеми могу бити изложени антропогеним утицајима, укључујући загађења услед људских активности (Ruiz-Fernández *et al.*, 2012). Последњих година, загађење река и приобалног земљишта је све већи проблем због брзог раста броја становника у урбаним срединама и самог индустријског развоја (Yang *et al.*, 2020). Све више се истражују полутанти који се испуштају у водотокове, након чијег транспорта и депоновања долази до њихове акумулације у приобалном земљишту (Islam *et al.*, 2015; Kalnejais *et al.*, 2010). Најчешћи полутанти су органске материје пропраћене патогеним микроорганизмима, пореклом из отпадних вода и муља, генерисаних у урбаним срединама, као и тешки метали у различитим облицима, пореклом из индустрије и активних индустријских зона, као и из пољопривредних активности (Förstner, Wittmann, 1981). Органска материја током разлагања троши кисеоник и новонастали анаеробни услови стварају водоник сулфид и метан, који негативно утичу на животну средину (Molamahmood *et al.*, 2020). Тешки метали се могу апсорбовати током разлагања органске материје и касније уклонити десорпцијом, растварањем, супституцијом, хидролизом или микробном активношћу. Тешки метали у земљишту могу негативно утицати на водене екосистеме и на сам квалитет вода (Håkanson, Jansson, 1983). Лако се могу растворити у води, где их апсорбују водени организми, као што су рибе и бескичмењаци, изазивајући многобројне негативне биолошке ефекте (Gheorghe *et al.*, 2017). Могу изазвати разне токсичне ефекте који ометају раст, метаболизам или репродукцију организама, са огромним последицама по цео ланац исхране, укључујући и људе (Stankovic *et al.*, 2013).

Река Колубара са својим сливом се налази у западној Србији, дуга је око 100 km и настаје спајањем две реке, Обнице и Јабланице, у близини града Ваљева. Сам слив реке Колубаре заузима површину од око 3650 km², а њен басен је богат лежиштима лигнита, која се активно експлоатишу. Рабас, Кладница, Тамнава, Градац, Бања, Лепеница, Рибница, Топлица, Љиг, Пештан, Турија, Уб, Лукавица и Бељаница су главне веће притоке реке Колубаре. Максимални проток Колубаре на ушћу у реку Саву износи око 28 m³·s⁻¹ (Drndarski *et al.*, 1993). Графички приказ реке Колубаре и њених главних притока дат је на Слици 1.



Слика 1. Графички приказ слива реке Колубаре (Substrate map: software SAS.Planet.Nightly.201020.10106, Basemap: Bing Maps-satellite zoom 15).

Дуж територије слива реке Колубаре налазе се многобројна лежишта разних минералних сировина (лигнита, камена, глине, шљунка и песка...). Слив реке Колубаре је једна од најугроженијих локација у Србији због степена и врсте деградације. Речна корита су драстично померана у доњем делу слива зарад експлоатације лигнита, и дужина саме Колубаре је због ових регулација скраћена за 20 km. Сама река Колубара дели рударски басен на источни и западни коп.

Развој индустрије у овом подручју је базиран на експлоатацији рудника лигнита, на близини каменолома, као и на експлоатацији осталих сировина (слика 2). Антропогени утицај је довео до морфолошке промене читавог подручја, као и до многобројних геоморфолошких процеса: промена корита речних токова, убрзана ерозија обала, таложење наноса и други еколошки проблеми који доводе до знатног загађења, што су показала ранија истраживања воде и ерозије земљишта на реци Колубари (Dragicevic *et al.*, 2012).

Истраживање вода реке Колубаре и њених притока је показало да рударство није једини извор полутаната и лошег квалитета воде. Директно испуштање комуналних отпадних вода у водотокове, депоније у близини речних корита и прекомерна употреба агрохемикалија у пољопривреди су међу водећим узроцима лошег квалитета воде узорковане узводно од површинских копова рудника угља. У периоду од 2012. до 2016. године ниједан од 46 испитана узорка воде на реци Колубари није одговарао другој класи квалитета површинских вода, као ни 9 испитаних узорака на њеним притокама Бељаници, Турији и Пештану (Samardzic, 2017).

Вода може бити загађена из више извора, од отпадних вода и муља, фабрика, рударских активности, испирања асфалтираних путева до пољопривредних отицања (слика 3). Контаминирана вода спира неопходне хранљиве материје и околно земљиште у водотокове. Полутанти из водотокова чине приобално земљиште киселим и негативно утичу на растворљивост и доступност хранљивих материја у овом подручју (Eugenio *et al.*, 2018). Такође, многи тешки метали и микроорганизми из река могу продрети у приобално земљиште и тамо се депоновати, чинећи зоне приобаља неподесним за експлоатацију у пољопривреди (Hillel, 2008). Микроорганизми из река доспевају у приобално земљиште и ту се задржавају на минералима глине или

једињењима органске материје. Ова једињења имају тенденцију да се биохемијски постепено разграђују у земљишту.

Тешки метали се акумулирају у земљишту и у већим концентрацијама постају токсични. Њихова растворљивост зависи од многобројних фактора средине у којој се налазе (Bose, Bhattacharya, 2008). На растворљивост тешких метала у земљишту највише утичу рН вредност раствора, укупан садржај метала, укупан садржај угљеника и садржај оксида у самом земљишту (Smolders *et al.*, 2009).



Слика 2. Каменолом у Марковој Цркви
Усликано: 11.08.2020. (лична архива)



Слика 3. Рудник угља Колубара
Усликано: 12.09.2020. (лична архива)

Микроорганизми се могу наћи у свим стаништима у животној средини. Већина микроорганизама није патогена и не узрокује болести. Напротив, микроорганизми имају важну улогу у одржавању плодности земљишта, разградњи биолошког отпада на депонијама и компостним гомилама. Само 1% укупних микроорганизама су патогене бактерије или бактерије које изазивају болести.

Escherichia coli (скраћено *E. coli*) је бактерија која се налази у животној средини, храни, у пробавном тракту животиња и људи. *E. coli* се, обично, користи као индикатор

фекалних вода. Прихватљиви ниво *E. coli* у земљишту је $1,26 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ (јединице које формирају колоније у једном граму) (Navab-Daneshmand *et al.*, 2018).

Staphylococcus aureus (скраћено *S. aureus*) је токсигени патоген (Haagsma *et al.*, 2013; Castro *et al.*, 2018), и значајан је узрочник бројних болести (Azara *et al.*, 2017; Fursova *et al.*, 2018), укључујући синдром токсичног шока, менингитис, а и изазивач је сепсе (Aguilar *et al.*, 2010). Присуство ове бактерије у пољопривредном земљишту није дозвољено (Ingham, 2020).

Pseudomonas aeruginosa (скраћено *P. aeruginosa*) је грам-негативна бактерија у облику штапа. Може изазвати болести биљака, животиња и људи (Diggle, Whiteley, 2020). Присуство ове бактерије у пољопривредном земљишту је забрањено (Deredjian *et al.*, 2014).

Током последње две деценије, високоенергетско јонизујуће зрачење се користи као иновативна метода за ремедијацију контаминираног земљишта (Wen *et al.*, 2010; Al-Bachir *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2015). Гама зрачење може уклонити патогене бактерије, плесни и укупне микроорганизме из земљишта (Lessel, 1990; Etzel *et al.*, 1969).

1. ЦИЉЕВИ И ХИПОТЕЗЕ ИСТРАЖИВАЊА

Циљ докторске дисертације је испитивање могућности третмана биолошки контаминираног земљишта у сливу реке Колубаре дејством високоенергетског јонизујућег зрачења (доза зрачења, јачина дозе), као и идентификација извора загађења. Такође, циљ истраживања је и испитивање садржаја тешких метала, са крајњим исходом у виду дефинисања мера ремедијације девастираног земљишта, као и креирање просторне расподеле проучаваних елемената у виду карата (дистрибуције констатованих и измерених елемената и насељених подручја у сливу реке Колубаре).

Дефинисани циљеви истраживања се реализују кроз следеће кораке:

- одредити садржај тешких метала у земљишту дуж реке Колубаре;
- одредити садржај микроорганизама у земљишту дуж реке Колубаре;
- генерисати просторну расподелу проучаваних елемената (дистрибуције констатованих и измерених елемената, загађивача, насељених и пољопривредних подручја, неискоришћених простора и водотокова);
- приказати хидрографску мрежу реке Колубаре и њених притока са аспекта загађења тешким металима и микроорганизмима;
- оптимизовати и дефинисати услове третмана земљишта применом високоенергетског јонизујућег зрачења, који ће дати најбоље резултате при уклањању загађујућих материја из земљишта.

Општа хипотеза је да су урбане, индустријске и експлоатационе активности у сливу реке Колубаре довеле до контаминације приобалног земљишта. Контаминирано земљиште може значајно угрозити здравље људи и животиња, а неподобно је и за развој пољопривреде у том крају. Постоји потреба за санацијом приобалног земљишта слива реке Колубара и њених притока, услед контаминације.

Посебне хипотезе:

- досадашња истраживања спроведена на подручју од интереса указују да постоји контаминација полутантима;
- контаминација није једнака на целој површини слива реке Колубаре;
- присуство тешких метала изнад граничне максималне и ремедијационе вредности загађујућих, штетних и опасних материја у земљишту прописаних регулативом;
- третман високоенергетским јонизујућим зрачењем може бити погодна метода за микробиолошку деконтаминацију земљишта и воде;
- примарни извор загађења полутантима су урбане средине (отпадне воде и муљ) и индустрија (копови угља и каменоломи).

2. ПОДРУЧЈЕ И ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА

Предмет докторске дисертације је приобално земљиште слива реке Колубаре, са циљем испитивања могућности коришћења нове методе за деконтаминацију земљишта (Матић *et al.*, 2017). Подручје истраживања обухвата простор приобаља реке Колубаре, од њеног формирања у граду Ваљеву, пратећи њен ток кроз општине Лајковац, Мионица, Љиг, Уб, Лазаревац, Барајево и Обреновац – све до уливања у реку Саву. С обзиром на постојање већих урбаних средина и развијену индустрију у читавом истраживаном подручју, ова тема је посебно релевантна за процену квалитета животне средине (Поповић *et al.*, 2013). Ширење урбаних подручја, стварање отпадних вода и муља, површинско ископавање угља, камена и других сировина, као и пољопривредне активности дуж плавних зона у поменутом сливу доприносе загађењу приобалног земљишта (Vakanjac *et al.*, 2014).

Подручје истраживања обухвата стратешки одабране локације дуж појаса уз саме обале реке Колубаре, почевши од града Ваљева и настављајући кроз општине Лајковац, Мионица, Љиг, Уб, Лазаревац, Барајево и Обреновац, па све до ушћа реке Колубаре у реку Саву. Присуство великих и малих индустријских загађивача дуж слива Колубаре оправдава опсежна истраживања присуства и концентрације полутаната, пре свега патогених микроорганизама и тешких метала који се транспортују, и то не само водотоковима, већ и оцедним и подземним водама кроз земљиште дуж слива реке Колубаре (Vuhač *et al.*, 2012).

2.1. Основни подаци о сливу реке Колубаре

2.1.1. Географски положај истраживаног подручја

Математичко-географски и физичко-географски положаји чине апсолутни положај, који је скоро непроменљив.

Просторни координатни систем (географска ширина и дужина) одређује математичко-географски положај. Колубарски басен се налази у средишњем делу северне умерене

температурне зоне Србије и покрива 4,12% укупне површине земље. На југу се граничи са Ваљевским планинама (Медведник, Јабланик, Повлен, Маљен и Суворор), на истоку са Шумадијом (Букуља, Космај), а на западу и северу са планинама Влашић и Цер. Слив има облик неправилног четвороугла у морфографско-територијалном погледу, а растојање између најзападније тачке на североисточним падинама Влашића и најисточније тачке на Космају у правцу запад-исток износи 81,2 километра. У правцу север-југ, растојање између најсеверније тачке слива на ушћу Колубаре у Саву и његове најјужније тачке код Накучана износи 64 километра. Слив реке Колубаре се на северној страни граничи са Добравом и десним кратким притокама реке Саве. Слив Великог Луга, Кубршнице и Јасенице, леве притоке Велике Мораве, чини источну границу. Сливови Дичине, Чемернице и Скрапежа, притоке Западне Мораве, чине јужну границу. Десне притоке Дрине чине границу на југозападу. Слив Јадра је са запада омеђен сливом реке Колубаре (Драгићевић, 2002).

Физичко-географски положај слива Колубаре је сложен и шаролик. Налази се на крајњем северу југоисточне Европе, на граници са Централном Европом, према европској макрорегионалној категоризацији. Колубарски басен се налази у самом центру умереног климатског појаса, са веома повољним условима за живот, за насељавање и за пословање, што резултира високо развијеном саобраћајном инфраструктуром. Положај Колубарског басена у регионално-географској подели је контактни на граници панонске и перипанонске Србије. Колубарски басен припада перипанонској Србији, ако се река Сава сматра границом између низије и обода Панонског басена.

Релативни положај се може мењати, а његове промене су углавном одређене природом и брзином социоекономских, геополитичких и геостратешких дешавања, која се директно или индиректно одражавају на промене. Општине Обреновац, Барајево, Сопот, Лазаревац, Коцељева, Уб, Ваљево, Лајковац, Мионица, Љиг, Аранђеловац, Горњи Милановац и Косјерић су део слива Колубаре. Слив се налази на подручју Колубарског, Мачванског, Моравичког, Шумадијског и Златиборског округа, као и дела града Београда – према регионалној подели.

Слив реке Колубаре је по природним карактеристикама сличан осталим сливовима у окружењу. У прошлости су тектонски процеси утицали на морфолошки развој речне

мреже. Мали залив Панонског мора познат као Колубарски залив настао је у близини слива реке Колубаре током палеогена и раног неогена. Флувијална ерозија је настала у овом заливу када се море повукло, и тако формирала садашњу хидролошку мрежу реке Колубаре. На формирање хидролошке мреже у сливу реке Колубаре утицале су тектонске карактеристике овог подручја, посебно Колубарско-пештански расед и Посавски расед. Највиша тачка слива је 1346 m надморске висине, док је најнижа тачка 73 m. Река Колубара је последња велика десна притока реке Саве и због дужине тока је класификована као река средње величине у Србији (око 90 km) и површине слива (око 3650 km²). Формира се од две реке саставнице: Обнице и Јабланице, које се спајају у близини града Ваљева. Са леве стране, веће притоке су Рабас, Кладница и Тамнава, док су са десне стране њене веће притоке – Градац, Бања, Лепеница, Рибница, Топлица, Љиг, Пештан, Турија и Бељаница. Ушће Колубаре у Саву налази се на територији општине Обреновац. Дуж слива реке Колубаре наилазимо на бројна урбана насеља која су највећи извори загађења. Недостатак третмана отпадних вода и муља пореклом из многобројних урбаних средина дуж слива реке Колубаре, највише доприносе контаминацији приобалног земљишта патогеним микроорганизмима. Путна инфраструктура је, такође, развијена дуж сливе реке Колубаре. Два највећа путна правца у сливу су Ибарска магистрала, дуж које су развијена урбана насеља целом трасом пута кроз Колубарски слив, као и нов ауто-пут Милош Велики, који на више места пресеца реку Колубару и њене притоке. Такође, треба споменути и железнички саобраћај и пругу Београд–Бар, која већим делом прати ток реке Колубаре и њене притоке. Река Колубара је подељена на два дела: горњи ток Колубаре и средњи ток Колубаре (Гавриловић, Дукић, 2002) (слика 4).



Слика 4. Графички приказ слива реке Колубаре, урбаних средина, важних саобраћајница и Рударског басена Колубара (Substrate map: software SAS.Planet.Nightly.201020.10106, Basemap: Bing Maps-satellite zoom 15).

Табела 1. Подаци о броју становника и општинама Колубарског слива (извор: Републички завод за статистику)

Општина	Округ	Површина [km ²]	Површина у сливу [km ²]	Процент општине у сливу [%]	Удео у укупној повр. слива [%]	Број становника 2011. год.	Број становника у сливу
Младеновац	Београд	343.5	0.2	0.1	0.01	53096	0
Сопот	Београд	273.2	144.1	52.8	4.0	20367	4885
Вождовац	Београд	147.4	1.2	0.8	0.03	158213	0
Чукарица	Београд	157.2	2.1	1.3	0.1	181231	339
Барајево	Београд	215.3	210.0	97.6	5.8	27110	27110
Лазаревац	Београд	382.7	382.7	100.0	10.5	58622	58622
Обреновац	Београд	411.1	161.7	39.3	4.4	72534	23336
Осечина	Колубарски	316.4	17.6	5.6	0.5	12536	543
Ваљево	Колубарски	903.9	829.5	91.8	22.8	90312	90312
Мионица	Колубарски	330.0	321.5	97.4	8.8	14335	14335
Љиг	Колубарски	278.0	276.2	99.3	7.6	12754	12754
Лајковац	Колубарски	193.3	193.3	100.0	5.3	15475	15475
Уб	Колубарски	452.4	420.8	93.0	11.446	29101	28201
Шабац	Мачвански	792.5	21.2	2.7	0.6	115884	813
Лозница	Мачвански	617.9	0.1	0.02	0.003	79327	0
Коцељева	Мачвански	255.1	221.3	86.7	6.1	13129	13369
Владимирци	Мачвански	337.5	6.4	1.9	0.2	17462	210
Г.Милановац	Мачвански	838.9	163.1	19.4	4.5	44406	3886
Топола	Шумадијски	347.9	4.1	1.2	0.1	22329	5
Аранђеловац	Шумадијски	377.2	222.4	59.0	6.1	46225	11852
Б. Башта	Златиборски	676.0	0.4	0.1	0.01	26022	0
Косјерић	Златиборски	357.9	38.5	10.8	1.1	12090	523
Пожега	Златиборски	429.0	0.02	0.004	0.001	29638	4
Укупно						1152198	306574

У табели 1 су обрађени подаци о општинама и броју становника Колубарског слива по попису из 2011. године. Неке општине које територијално припадају Колубарском сливу, а које у мањим процентима и са малим бројем људи насељавају овај простор, неће бити детаљније обрађене у овом раду.

У самом сливу Колубаре, по попису из 2011. године, живи око 300 хиљада људи, од којих око две трећине насељавају веће урбане средине: Ваљево, Лазаревац, Барајево и

Обреновац. Услед недостатка постројења за прераду отпадних вода и муљева, као и канализационих мрежа у неким насељима, већина отпадних вода се директно испушта како у саму Колубару, тако и у њене притоке. Урбане средине, са својим нерегулисаним отпадним водама, врше велики притисак на животну средину, како самих река тако и околног земљишта, које је контаминирано микроорганизмима дуж целог слива.

Горњи ток реке Колубаре

Колубару чине две саставне реке: десна саставница Јабланица (21.5 km) и лева саставница Обница (40 km), које се састају на 193 m надморске висине испред града Ваљева (слика 5). Саме долине ове две реке су уске, и на неким местима дубоке до 200 m. Река Сушица, притока реке Јабланице са њене десне стране, урезала је долину кањона у Лелићком красу, која је дубока око 300 m, а дуга 7.5 km. Долина саме реке Колубаре се код Ваљева нагло шири, протиче кроз Ваљевску котлину и, у виду лакта, завија долином са смера југ-север ка смеру запад-исток. Због бујичастих одлика својих саставних делова и притока, корито је вијугаво и широко. Пре регулације корита Колубаре, долина је била склона честом плављењу.



*Слика 5. Ушће река Јабланице и Обнице и формирање реке Колубаре код Ваљева
Усликано: 13.08.2020. (лична архива)*

Река Градац, која се са десне стране улива у Колубару у граду Ваљеву, прва је већа притока. Градац је водом најбогатија притока Колубаре. Градачки ток усекао је клисурасто-кањонску долину дужине 22.7 km. Градац има дужину од 28 km и укупан пад од 187 m, од ушћа Буковске реке и реке Забаве, где се формира, па све до ушћа у Колубару (Докмановић *et al.*, 2013).

У горњем току реке Колубаре постоји неколико већих урбаних целина: Ваљево, Мионица, Бања Врујци.

Ваљево је град у западној Србији који важи за административни центар Колубарског округа. Према попису из 2011. године, административно подручје Ваљева има 90312 становника, а 59073 живи у урбаној средини. Град поседује постројење за третман отпадних вода „Горић“, али је потребна његова технолошка модернизација како би се рад постројења ускладио са стандардима Европске уније. Град је окружен Ваљевским

планинским венцем (Медведник, Јабланик, Повлен, Маљен, Сувобор) са благо нагнутих падинама. Дивчибаре су висораван у Маљенском планинском венцу. Налазе се на 1000 метара надморске висине. У близини центра Ваљева завршава се кањон реке Градац, а на 15 km од центра налази се вештачко језеро Ровни.

Мионица је варош и општина у западној Србији, у округу Колубара. Варош има 1571 становника, док општина има 14335 становника и не поседује постројење за третман отпадних вода и муља. Варош се налази на 92 km југозападно од Београда. Са површином од 329 km², са јужне стране граница су јој планине Маљен и Сувобор, а на западној и северној страни границе су јој реке Колубара и Топлица.

Бања Врујци је бањска варош у северозападном региону Србије, смештена између планинског венца Сувобора и слива реке Топлице. Варош не поседује постројење за третман отпадних вода и муља. Најпознатија је по својој термалној води, која се дистрибуира у разним земљама широм света под брендом „Voda Voda“.

Средњи ток реке Колубаре

Долина Колубаре се на свега 120–150 m низводно од Ваљевске котлине сужава у малу клисуру у близини села Словца, смештену између брда Јеринин град и брда Оштриковац. Долина је првенствено широка низводно од Словца, са огромном алувијалном равни која се протеже до 3 km према Лисо Пољу.

Притичу јој река Љиг (дужине 29 km) и Пештан, са Туријом (дужине 28 km), са њене десне стране, док река Тамнава, са Убом, притиче са њене леве стране (дужине 89.8 km). Колубара је дуга око 90 km (126.5 km са Обницом) од ушћа река Јабланице у Обницу до ушћа у Саву код општине Обреновац, са просечном надморском висином од свега 206 m. Према овим подацима, низије доминирају у већем делу слива Колубаре, а побрђа, ниске планине (до 1000 m висине) и средње високе планине (до 1500 m висине) су присутне у самом изворишном пределу слива и дуж притоке реке Љиг.

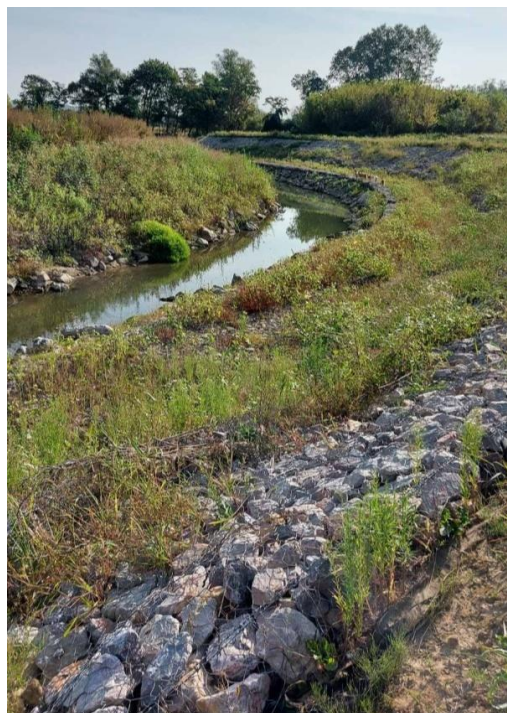
Колубара је код Лајковца широка око 30 m, а дубина јој варира од 0.5 до 3 m, а код Обреновца достиже ширину од 45 m, док јој дубина варира од 1 до 2 m, па за време

високог водостаја на Сави мањи бродови могу пловити узводно, до самог Обреновачког моста, на око 3 km од места уливања реке Колубаре у реку Саву.

Нагле и велике флукуације водостаја и токова у сливу Колубаре важна су карактеристика водног режима. Отежавају потенцијално решавање и регулисање главних проблема управљања сливом – снабдевање водом самих насеља и индустрије, па се посебна пажња мора поклонити заштити од поплава, заштити од бујица и водне ерозије (слике 6 и 7). Колубара спада у категорију река са израженим режимом циклуса кише и снега (Јовановић, 1956). Дobar део Колубарског слива у сушним периодима има проблем са снабдевањем пијаћом водом.



Слика 6. Регулација водотока реке Колубаре у граду Ваљевоу Усликано: 14.08.2020. (лична архива)



Слика 7. Регулација водотока реке Љиг Усликано: 20.09.2020. (лична архива)

На овом простору је развијен већи број урбаних целина: Љиг, Лајковац, Лазаревац, Барајево, Уб, Коцељева и Обреновац.

Лајковац је град и општина у Колубарском округу, у западној Србији. По попису из 2011. године, има 3249 становника, док општина има 15475 становника. Насеље не поседује постројење за третман отпадних вода и муља. Налази се у долини реке Колубаре, у близини Ибарске магистрале.

Љиг је град у Србији, који се налази у Колубарском округу. Број становника је 3226, док општина има 12754 становника, према попису из 2011. године. Град не поседује постројење за третман отпадних вода и муља. Планина Рајац се налази 8 km јужно од Љига, а планина Рудник 27 km југоисточно. Кроз Љиг протиче истоимена река Љиг, која је притока реке Колубаре и дуга је 48.9 km.

Општина Лазаревац је у саставу града Београда. У урбаној средини живи 25526 становника, са укупно 58622 становника на подручју општине, по попису из 2011. године. Општина не поседује постројење за третман отпадних вода и муља. Рудник РБ Колубара, који се налази у Лазаревцу, највећи је коп лигнита у Србији.

Општина Барајево је у саставу града Београда. Има 27110 становника, према подацима пописа из 2011. године. Општина поседује постројење за третман отпадних вода, у насељу Гај. Са надморском висином од 140 до 364 m, општина се налази у доњем северном делу Шумадије, југоисточно од Београда. Највећи део општинског земљишта налази се у сливу реке Турије, десне притоке Пештана, која се улива у Колубару, чиме цео простор географски припада Колубарском сливу. Вештачко језеро „Дубоки поток” налази се у близини Барајева и има велико викенд насеље. Језеро се налази 30 km јужно од Београда и 2 km североисточно од Барајева. Језеро је дугачко 800 m, широко 100 m, велико је 7.2 ha и има просечну дубину од 6 m. Језеро је са једне стране окружено густом шумом, а са друге пашњацима.

Уб је град и општина у западној Србији, која се налази у Колубарском округу. У граду живи 6164 становника, а у општини 29101 становник, према попису из 2011. године. Град не поседује постројење за третман отпадних вода и муља. Кроз насеље протиче истоимена река Уб, десна притока реке Тамнаве. У близини града постоје разни рудници и ресурсни центри. Радљево поље има залихе од 344 милиона тона угља, Звиздарско поље има залихе од 280 милиона тона угља. Такође постоје и рудници глине, песка, камена и кречњака. На овом простору се налази највећи произвођач кварцног песка у Србији, са годишњом производњом од око 400 хиљада тона. Глинене јаме налазе се испод слојева песка и кварцног песка. Општина Уб поседује највећи извор висококвалитетне глине у Србији. Процењене су залихе са више од 1.8 милиона тона глине.

Коцељева је насеље у Србији у Мачванском округу. У општини Коцељева број становника је 4182, док општина има 13129 становника, према попису из 2011. године. Насеље нема постројење за третман отпадних вода и муља. Кроз насеље протиче река Тамнава.

Општина Обреновац је у саставу града Београда. Општина има 72524 становника, док градско подручје има 24568 становника, према подацима из пописа из 2011. године. Општина нема постројење за третман отпадних вода и муља. На рубу општине налази се највећа термоелектрана у земљи, ТЕ Никола Тесла. Током поплава 2014. године, Обреновац је био потпуно поплавлjen и евакуисан. Обреновац се налази 30 km јужно од Београда, уз окуке реке Саве на северу. На свом путу ка Сави, река Колубара тече источно од града. Обреновац је општина са површином од 411 km².

Све поменуте урбане средине у горњем и средњем току реке Колубаре планирају ремонт и унапређење постојећих и изградњу једног или више нових постројења за прераду отпадних вода и муља, у зависности од потреба и броја становника. Током 2021. године, отпочела је реализација пројекта „Чистија Србија“, који има за циљ да у наредних пет година унапреди старе и изгради нове канализационе мреже и постројења за третман отпадних вода и муља.

2.1.2. Климатске карактеристике истраживаног подручја

Србија припада појасу са умерено континенталном климом, где су лета топла, па и врела, а зиме хладне на северу, док су благе на југу, јер су територијално ближе Јадранском мору. На нашим просторима се смењују четири годишња доба. У зависности од географске ширине, температура варира од 6.1 °C до 11.1 °C. Лета су топла, чак и врела, са просечним температурама током дана од 26.7 °C до 32.2 °C. У августу месецу је врхунац летње сезоне. Дешава се да у току лета, наше пределе погоде топли таласи који долазе из Сахаре. Зиме на нашим просторима су прилично хладне, са доста снега на северу. На југу су зиме мање сурове због близине Медитерана и његовог утицаја. Поларне ваздушне масе често могу да продру на наше подручје, при чему доносе хладноћу и температуре знатно испод нуле. Током пролећа има доста падавина

и углавном је прохладно, са могућом снежним падавинама. Током јесењег периода, нарочито током новембра, има пуно влаге и периода са маглом (Ђукановић, 2000). Према подацима метеоролошке станице најближе Обреновцу, клима на подручју од интереса је умерено континенталног типа, са просечном температуром од 11°C и просечном годишњом количином падавина од 722 mm за период од 1925. до 2010. године, док је просечна годишња количина падавина за период од 2011. до 2020. године износила 660 mm, са просечном температуром од 14°C . У периоду од 1961. до 2005. године, просечни годишњи протицај реке Колубаре (на мерној станици Дражевац) износио је 21,8 m³/s, док је просечни годишњи протицај реке Колубаре (на мерној станици Дражевац) за период од 2011. до 2020. године износио 25,9 m³/s.

Прегледом података видимо да је у последњих 10 година дошло до повећања просечне температуре у односу на претходни период са 11°C на 14°C, док се смањила просечна годишња количина падавина са 722 mm на 660 mm. Просечни годишњи протицај реке Колубаре, код мерне станице Дражевац, се у последњих 10 година повећао на 25,9 m³/s, (у претходном периоду је износио 21,8 m³/s). Појаве просечно мањих количина падавина и повишене просечне температуре са повећаним просечним годишњим протицајем реке Колубаре можемо објаснити климатским променама, и ако су количине падавина мање и температуре више – све су чешћи екстремни попут великих суша или поплава.

2.1.2.1. Режим падавина

Водни биланс одређеног предела директно зависи од самог режима падавина. Од количине падавина на неком простору зависи разноврсност флоре и фауне. Саме падавине чине улазну компоненту водног биланса, па их зато сматрамо најбитнијим климатолошким елементом при изради водног биланса. Но, падавине такође представљају најнестабилнији метеоролошки елемент који је неравномерно распоређен по простору и времену. На количину падавина утичу рељеф, географска ширина, ваздушне масе, надморска висина, итд.

Река Колубара, са својим притокама, се карактерише честим и обилним поплавама. Излива се једном до два пута годишње. Услед антропогеног утицаја на хидролошки

систем у доњем делу слива, овај простор око Колубаре је у великој опасности од поплава. Током пролећа 1937. године, катастрофалне поплаве су погодиле овај простор, тј. простор око Колубаре и њених притока у доњој половини слива, које су трајале скоро два месеца (од марта до маја). Поплаве већих размера догађају се све чешће на овом подручју: 1965, 1975, 1981, 1996, 1998, 1999, 2001, 2004, 2006, 2008, 2010. и 2014. године.

Познавање количине и интензитета падавина на делу топографске површине је полазна основа за сва наредна хидролошка и геоморфолошка проучавања. Досадашња истраживања су показала да укупне годишње падавине нису важне за интензитет ерозивних процеса и поплава у сливу Колубаре, већ распоред падавина током целе године, односно плувиометријски режим (Драгићевић *et al.* 2007).

На основу проучавања месечних и годишњих падавина од 1961. до 1990. године, за 40 кишомernih места у сливу Колубаре (табела 2), добијени су подаци неопходни да би се донели тачнији закључци о њиховом утицају на ниво вода у сливу (Ruml, *et al.*, 2016). Када се посматра просторна дистрибуција падавина у сливу Колубаре, јасно је да су највлажнији делови на југозападу, док их је најмање у северним и источним деловима. Од североистока ка југозападу слива количина падавина је у постепеном порасту. Изохипсе у северним и источним пределима басена су ретко раштркане, што указује на генерално уједначену топографију. Сложена топографија у западним и јужним регионима басена резултирала је густо раштрканим изохипсама. Поред рељефа, удаљеност од извора влаге је важна климатска компонента (Јадранско море, Средоземно море и Атлантски океан). Хладни фронт и пљускови које доносе хладне ваздушне масе са Атлантика и западне Европе заслужни су за већу количину падавина у западном делу басена. Ове ваздушне масе падају након што пређу планине, загревају се и постају суве. Као резултат тога, постоје знатне разлике у количини падавина између станица у које долазе ваздушне масе и оних које су у заветрини на истој или приближно истој висини (Unkašević, Тошић, 2011).

Табела 2. Средње месечне вредности падавина (у mm) за период од 1961. до 1990. године (извор: Републички хидрометеоролошки завод Србије)

Станице	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год.
Бањани	52,0	47,5	47,6	57,3	67,8	96,9	59,1	60,1	50,4	42,6	60,3	58,1	699,7
Барајево	56,0	44,2	53,4	59,9	81,2	90,3	72,6	62,6	55,4	43,9	51,7	60,8	732,1
Белановица	55,7	55,2	59,1	64,2	93,6	113,6	77,1	66,7	56,9	50,3	62,0	64,8	819,2
Божаревац	48,5	43,8	51,1	54,1	72,9	90,2	65,3	60,0	53,2	41,8	52,0	57,7	690,5
Бранковина	51,5	51,4	59,1	62,7	89,1	104,9	75,3	68,0	59,6	53,5	67,4	59,9	802,4
Брежђе	66,7	60,1	75,3	78,5	117,0	129,7	90,7	83,3	75,4	55,5	78,8	78,7	989,7
Ваљево	48,9	45,6	55,8	63,5	88,1	108,5	77,0	68,0	59,6	48,8	61,6	83,8	809,3
Венчане	56,5	49,0	55,7	57,4	82,0	91,5	66,3	56,0	51,5	47,4	58,0	62,8	734,2
Вранић	51,5	46,7	53,1	59,5	76,8	97,7	66,5	62,0	54,7	43,6	58,9	61,8	733,0
Вукосавци	61,2	55,6	63,6	70,7	103,0	124,5	79,7	70,9	56,4	47,8	66,4	66,9	866,6
Дивчибаре	61,3	58,1	67,5	88,2	139,0	135,6	97,5	77,7	74,5	61,1	72,4	70,2	1003,1
Доње Црниљево	61,3	55,8	65,1	70,4	86,0	107,5	77,7	72,5	61,7	54,1	69,0	72,9	843,8
Доње Лесковце	59,8	58,3	65,7	79,0	107,4	134,2	88,9	83,6	73,7	61,0	73,7	67,6	952,9
Доњи Мушић	55,4	52,0	63,2	64,4	98,4	113,2	82,2	70,9	57,4	50,7	69,1	66,3	843,2
Дудовица	55,6	50,2	58,0	64,1	95,1	106,2	72,1	69,2	53,5	47,2	64,0	66,2	801,4
Каленић	52,1	45,9	54,3	57,2	75,4	97,9	66,2	60,1	52,5	43,7	60,6	60,2	726,1
Каменица (Ваљ.)	63,4	63,6	72,5	78,0	110,4	123,3	88,6	79,1	70,6	61,4	75,5	78,5	964,9
Коцељева	52,3	49,9	56,0	58,8	79,7	103,2	67,7	58,4	58,5	45,3	63,9	63,8	757,5
Крива река	55,9	50,7	56,5	57,1	83,7	101,5	67,4	54,6	53,8	43,6	50,0	63,2	738,0
Лајковац	53,8	41,6	52,9	56,6	78,8	85,8	65,3	58,1	45,4	42,3	54,9	56,6	692,1
Лазаревац	57,6	50,7	55,2	60,2	85,1	97,0	69,7	63,6	54,5	45,0	59,4	65,0	763,0
Луковац	61,1	48,0	60,3	60,9	87,9	102,1	71,9	61,8	54,3	46,7	64,5	64,7	784,2
Љиг	53,8	52,4	59,4	63,7	87,6	107,7	76,5	72,3	56,5	48,2	64,9	67,1	810,1
Мајиновићи	64,0	57,5	66,5	80,1	112,2	109,6	76,6	68,1	60,4	57,3	76,7	72,0	901,0
Мионица	57,5	50,8	61,5	65,4	95,2	102,7	78,8	70,5	59,8	48,4	67,3	65,8	823,9
Мратишић	53,6	49,5	62,7	70,2	104,1	117,5	87,2	82,9	67,1	54,0	70,2	60,8	879,8
Обреновац	46,4	40,2	46,6	52,1	66,5	84,4	58,5	55,3	50,4	40,5	50,3	56,2	647,2
Памбуковица	49,4	50,6	58,3	59,6	76,2	103,2	71,1	60,6	50,8	45,1	64,3	56,1	745,3
Партизани	56,3	47,7	53,0	59,3	87,6	105,0	71,1	53,2	50,3	41,9	60,9	61,7	748,0
Пођута	69,6	67,3	75,4	80,5	123,1	125,8	94,6	86,1	77,0	66,4	90,1	81,9	1037,8
Рајац	50,3	48,5	59,2	70,4	115,9	122,2	90,8	80,5	65,5	55,6	66,6	59,0	884,5
Рудовци	52,7	49,3	59,2	57,2	91,7	106,0	75,5	66,7	54,6	47,2	60,2	60,6	781,1
Рудник (насеље)	63,5	57,5	69,2	70,2	102,9	120,4	80,8	67,1	61,9	45,9	68,5	77,0	884,8
Рудник (планина)	72,1	63,5	71,8	81,9	107,2	131,4	88,9	73,0	67,4	50,3	70,1	79,3	956,9
Сибница	52,6	43,5	50,9	60,5	83,5	99,9	72,4	60,8	52,3	43,6	58,0	60,6	738,7
Степање	61,8	50,6	60,9	63,2	86,3	99,3	74,0	65,9	56,7	50,2	68,0	68,8	805,7
Степојевац	45,7	38,8	49,4	53,7	68,6	87,5	60,3	51,2	50,6	42,7	55,9	52,0	656,4
Стублине	44,3	39,5	55,2	58,6	71,7	88,7	69,0	58,8	51,9	44,8	58,8	53,6	694,9
Уб	50,8	45,0	52,7	56,6	78,6	101,2	60,7	63,9	52,1	46,9	61,3	61,2	731,0
Штавица	54,1	47,7	59,2	67,3	95,7	117,9	83,0	71,3	58,6	47,6	66,7	63,0	832,1

Досадашњим истраживањима утврђено је да је у јуну забележен максимум падавина на већини кишомерних станица у сливу Колубаре, са изузетком Дивчибара и Мајиновићима, где је максимум био у мају. Разлика у падавинама између маја и јуна на ове две станице је незнатна, у просеку око 3 mm, што је у потпуности у складу са тим да је оваква расподела падавина узрокована барометарским депресијама, које се крећу од Ђеновског залива ка истоку, односно долинама Саве и Дунава. Минималне падавине су у октобру забележене на 28 кишомерних локација, док су у фебруару забележене на осталих 12 станица. На основу израчунатих вредности падавина за ових 40 станица, подаци показују да се највећа просечна месечна количина падавина креће од 66,4 mm у Поћути, током октобра месеца, до 139 mm, на Дивчибарама, што је и тридесетогодишњи просек јулских падавина на овом простору. Најмања просечна дугорочна месечна количина падавина креће се од 38,8 mm у фебруару (Степојевац) до 84,4 mm у јуну (Дивчибаре) (Живковић, Драгићевић, 2003).

Израчунавање релативне годишње флукуације падавина је кључно. То је резултат плувиометријског режима, који указује на то да ако је месечна расподела падавина уједначена, релативна флукуација падавина је нула. Вредност релативне флукуације већа је ако су падавине неравномерно распоређене по месецима током године. Најмања релативна вишегодишња колебања падавина од испитиваних станица имала је Поћута (5,7%), а највећа Вукосавци (8,9%). Просечна дуготрајна колебања падавина, за све ове станице у сливу Колубаре, износе 7,3%, што указује на знатну неуједначеност током целе године.

Највише падавина има током летње сезоне (јун, јул, август) на свим анализираним кишним станицама у сливу Колубаре (249,4 mm), а најмање током јесење сезоне (септембар, октобар, новембар) (171,4 mm). Количина падавина које се излуче током пролећне сезоне је 215,5 mm и знатно је већа него током јесење сезоне (171,7 mm). Знатна колебања у висини падавина карактеришу дистрибуцију падавина у топлијој половини године (мај-октобар). На свим локацијама у летње доба године има много више падавина него у хладнијој половини године (новембар-април). Годишњи образац падавина подудар се са подунавским (средњоевропским) плувиометријским режимом. Приликом анализе количине и распореда падавина мора се узети у обзир топографија слива Колубаре. За кишомерне станице које се налазе у западној Србији, на надморској висини од 1000 m, просечна годишња количина падавина је преко 1000 mm. Долине

Дрине и Колубаре имају значајан утицај на расподелу падавина у овом делу Србије. Правац Динарида углавном прате влажне ваздушне масе које потичу са северозапада. Бројни огранци главног тока ваздушних маса се увлаче у долине десних притока реке Саве, које су типично оријентисане у правцу север-југ (Дуцић, Радовановић, 2005).

Падавине могу бити обилне, како на ветровитим падинама, тако и на знатно нижим надморским висинама. Поћута је, на пример, на 450 метара надморске висине, примила око 1038 mm падавина. Каналисање поменутих ваздушних маса има значајан утицај на овако високе вредности. Приметан је утицај изложености терена на висину падавина. Брдско-планински терени се могу наћи у југозападним, јужним и југоисточним пределима Колубарског басена, са доминантним нагибом од југа до севера. Дубоко усецање долине Колубаре и њених притока ка југу омогућава ваздушним масама са севера да продру до јужних граница слива, повећавајући облачност и падавине у овом правцу. Вода се на овај начин генерише у овим регионима слива, што узрокује развој плавних таласа.

Према истраживањима, познавање дистрибуције појединачних пљускова, посебно оних са висином преко 25 mm, знатно је релевантније од познавања целокупне годишње количине падавина. До сада је проучавано неколико појава, а посебно су индикативни јун 1996. и јул 1999. године, цела 2010. година и мај 2014. године. Приликом малих количина просечних годишњих падавина на неком подручју, кад се та количина излучи у облику неколико великих киша, може доћи до интензивне ерозије и поплава, а ова појава је детаљно анализирана како би се представио ниво опасности од екстремних климатских и хидролошких догађаја (Драгићевић *et al.*, 2016).

Први дан са падавинама у виду снега јавља се око 20. новембра (стандардна девијација и коефицијент варијације: $\pm 17,3$ дана и 5,4%), а последњи 31. марта (стандардна девијација и коефицијент варијације: $\pm 19,2$ дана и 21,3%). Најмање снежних дана током године имају северозападни, северни и североисточни делови проучаваног терена (доњи ток Колубаре и Тамнаве), док највише снежних дана током године имају планински предели – јужни делови истраживаног подручја (Бобија, Медведник, Јабланик, Повлен).

Подаци са осам станица коришћени су за испитивање кретања количина падавина у сливу Колубаре, као и фактора производње великих вода и могућих промена и померања хидрографске мреже од 1961. до 2010. године (Ruml, *et al.*, 2016). Ово су подаци Републичког хидрометеоролошког завода Србије и односе се на месечне и годишње количине падавина. Највише падавина у басену Колубаре са 107,7 mm забележено је у јуну, док је минимум на већини локалитета забележен у октобру са 52,2 mm. Низак садржај водене паре у ваздуху и ниске температуре ваздуха резултирају малим количинама падавина током зиме.

У посматраном периоду највећа годишња количина падавина износила је 1836,8 mm, што је забележено на станици Штавице 2010. године. 2009. и 2010. година су биле влажне – знатна количина падавина је идентификована на практично свим станицама у басену Колубаре. Станица Партизани је 1973. године забележила најмању висину падавина од 281,2 mm (Ђукановић, 2000).

2.1.2.2. Режим температуре ваздуха

Колубарски слив прима највећу количину топлоте са јужне стране, јер се на њој јавља најјаче загревање површине. Током пролећних и јесењих месеци сунчеви зраци обасјавају овај простор под упадним углом од 90° , а зими мерења показују да камените површине јужне експозиције поподне могу достићи температуру од 50° , док су северне падине око 0° . Северне падине са великим углом нагиба и приближно истом надморском висином могу лети, у време највишег положаја Сунца, да имају температуру која је за више од 20° нижа од јужних падина (Шибалић, 1986). Западне експозиције су топлије од источних, према истраживањима, а на разлике утичу дневна времена осунчавања. Ујутро, источне експозиције добијају директну сунчеву светлост, а већина топлотне енергије се троши на испаравање влаге са топографске површине. Сунце на западним експозицијама сија тек у поподневним часовима, када је због повећања температуре ваздуха испарио велики део земљишне влаге. Топлотна енергија се одмах троши на загревање топографске површине, а самим тим и ваздуха приликом њиховог излагања сунчевим зрацима. Летњи месеци на сличним висинама могу бити за $5-6^{\circ}$ топлији на сунчаној страни него на засенченој. Велики нагиби северне експозиције дају најнеповољније околности за добијање соларне топлотне енергије. Сунчеви зраци

до њих допиру само током топлих месеци у години, и то само кратко два пута дневно, непосредно после изласка и непосредно пре заласка сунца. Северне експозиције имају већу влажност него јужне, што утиче на добро пошумљавање и дебљину земљишног покривача, а самим тим и на густину речне мреже. Јачина денудације је, на основу ових карактеристика, на северним падинама нижа него на јужним (Радовановић, 2001).

2.1.2.2.1. Временски параметри за општину Обреновац у периоду истраживања

Приликом узорковања земљишта на територији општине Обреновац забележени су основни временски параметри у датом периоду. Просечна минимална температура ваздуха у месецима приликом теренског истраживања на територији општине Обреновац износила је 15.15°C, док је максимална просечна температура ваздуха на поменутој општини износила је 27.4°C. Просечна релативна влажност ваздуха за поменуту општину у периоду теренског истраживања износила је 58%. Просечне кишне падавине на територији општине Обреновац у периоду теренског истраживања износиле су 26 mm, док је број просечних кишних дана износио 8.55. Просечна дневна светлост у периоду теренског истраживања износила је 13.25 h, док је сунчаних сати просечно било 10.55. Просечан UV индекс у периоду теренског испитивања износио је 5.5.

2.1.2.2.2. Временски параметри за општину Барајево у периоду истраживања

Приликом узорковања земљишта на територији општине Барајево забележени су основни временски елементи у датом периоду. Просечна минимална температура ваздуха у месецима приликом теренског истраживања на територији општине Барајево износила је 15.3°C, док је максимална просечна температура ваздуха износила 27.45°C. Просечна релативна влажност ваздуха за поменуту општину у периоду теренског истраживања износила је 57.5%. Просечне кишне падавине на територији општине Барајево у периоду теренског истраживања износиле су 26 mm, док је број просечних кишних дана износио 8.6. Просечна дневна светлост у периоду теренског истраживања износила је 13.25 h, док је сунчаних сати просечно било 10.45. Просечан UV индекс у периоду теренског испитивања износио је 5.5.

2.1.2.2.3. Временски параметри за општину Лазаревац у периоду истраживања

Приликом узорковања земљишта на територији општине Лазаревац забележени су основни временски елементи у датом периоду. Просечна минимална температура ваздуха у месецима приликом теренског истраживања на територији општине Лазаревац износила је 13.2°C, док је максимална просечна температура ваздуха на поменутој општини износила је 25.8°C. Просечна релативна влажност ваздуха за поменуту општину у периоду теренског истраживања износила је 64%. Просечне кишне падавине на територији општине Лазаревац у периоду теренског истраживања износиле су 36 mm, док је број просечних кишних дана износио 11.3. Просечна дневна светлост у периоду теренског истраживања износила је 13.25 h, док је сунчаних сати било просечно 10.4. Просечан UV индекс у периоду теренског испитивања износио је 5.

2.1.2.2.4. Временски параметри за општину Уб у периоду истраживања

Приликом узорковања земљишта на територији општине Уб забележени су основни временски елементи у датом периоду. Просечна минимална температура ваздуха у месецима теренског истраживања на територији општине Уб износила је 13.2°C, док је максимална просечна температура ваздуха на поменутој општини износила 25.8°C. Просечна релативна влажност ваздуха за поменуту општину у периоду теренског истраживања износила је 64%. Просечне кишне падавине на територији општине Уб у периоду теренског истраживања износиле су 36 mm, док је број просечних кишних дана износио 11.3. Просечна дневна светлост у периоду теренског истраживања износила је 13.25 h, док је сунчаних сати просечно било 10.4. Просечан UV индекс у периоду теренског испитивања износио је 5.

2.1.2.2.5. Временски параметри за општину Лајковац у периоду истраживања

Приликом узорковања земљишта на територији општине Лајковац забележени су основни временски елементи у датом временском периоду. Просечна минимална температура ваздуха у месецима приликом теренског истраживања на територији

општине Лајковац износила је 13.2°C, док је максимална просечна температура ваздуха на поменутој општини износила 25.8 °C. Просечна релативна влажност за поменуто општину у периоду теренског истраживања износила је 64%. Просечне кишне падавине на територији општине Лајковац у периоду теренског истраживања износиле су 36 mm, док је број просечних кишних дана износио 11.3. Просечна дневна светлост у периоду теренског истраживања износила је 13.25 h, док је сунчаних сати просечно било 10.4 h. Просечан UV индекс у периоду теренског испитивања износио је 5.

2.1.2.2.6. Временски параметри за општину Љиг у периоду истраживања

Приликом узорковања земљишта на територији општине Љиг забележени су основни временски елементи у датом периоду. Просечна минимална температура ваздуха у месецима приликом теренског истраживања на територији општине Љиг износила је 13.2°C, док је максимална просечна температура ваздуха на поменутој општини износила 25.8°C. Просечна релативна влажност ваздуха за поменуто општину у периоду теренског истраживања износила је 64%. Просечне кишне падавине на територији општине Љиг у периоду теренског истраживања износиле су 36 mm, док је број просечних кишних дана износио 11.3. Просечна дневна светлост у периоду теренског истраживања износила је 13.25 h, док је сунчаних сати просечно било 10.4. Просечан UV индекс у периоду теренског испитивања износио је 5.

2.1.2.2.7. Временски параметри за општину Мионица у периоду истраживања

Приликом узорковања земљишта на територији општине Мионица забележени су основни временски елементи у датом периоду. Просечна минимална температура ваздуха у месецима приликом теренског истраживања на територији општине Мионица износила је 13.2°C, док је максимална просечна температура ваздуха на поменутој општини износила 25.8°C. Просечна релативна влажност ваздуха за поменуто општину у периоду теренског истраживања износила је 64%. Просечне кишне падавине на територији општине Мионица у периоду теренског истраживања износиле су 36 mm, док је број просечних кишних дана износио 11.3. Просечна дневна светлост у периоду теренског истраживања износила је 13.25 h, док је сунчаних сати просечно било 10.4. Просечан UV индекс у периоду теренског испитивања износио је 5.

2.1.2.2.8. Временски параметри за град Ваљево у периоду истраживања

Приликом узорковања земљишта на територији града Ваљева забележени су основни временски елементи у датом периоду. Просечна минимална температура ваздуха у месецима приликом теренског истраживања на територији града Ваљева износила је 13.2°C, док је максимална просечна температура ваздуха у поменутом граду износила 25.8°C. Просечна релативна влажност ваздуха за поменути град у периоду теренског истраживања износила је 64%. Просечне кишне падавине на територији града Ваљева у периоду теренског истраживања износиле су 36 mm, док је број просечних кишних дана износио 11.3. Просечна дневна светлост у периоду теренског истраживања износила је 13.25 h, док је сунчаних сати просечно било 10.4. Просечан UV индекс у периоду теренског испитивања износио је 5.

2.1.3. Геолошке и геоморфолошке карактеристике подручја истраживања

У палеогеографском погледу, басен Колубаре је првенствено већим пределом део Динарског палеогеографског подручја, а мањим источним делом припада Шумадијском палеогеографском подручју. Да би се у потпуности сагледала палеогеографска развијања Колубарског басена, треба почети са проучавањем палеотектонског развијања већег подручја од граница слива. С обзиром на то да се проучавано подручје налази на пресеку више тектонских и палеогеографских целина, одређене тектонске фазе су се на један начин манифестовале у једном палеогеографском подручју, а на сасвим другачији начин у другом. Другим речима, развој басена и акумулација басенских формација су се одвијали на једној локацији, док су се подизања и набирања одвијали на другој. Панониди су сакупљени и консолидовани током бајкалског тектогенетског циклуса, а тада су постојали као панонска маса и постојала је предиспозиција да се истовремено крене у стварање Шумадијског и Динарског палеогеографског подручја (Група аутора, 1989). Сложено Динарско палеогеографско подручје настало је током каледонско-херцинске тектогенезе и развило се и издиференцирало у целине нижег ранга, као што су басен Јадра и Ибра. Старији палеозоик се развија у Шумадијском палеогеографском подручју, а затим се појачава тренд набирања у правцу североисток-југозапад.

Шумадијско-динарска дислокација настала је почетком палеозоика, одвајајући Шумадијско од Динарског палеогеографског подручја. За време силурског и девонског периода стварају се најстарији делови који су откривени у Јадранском региону. Важно је напоменути да девон има веома развијену, богату и разноврсну фауну, што омогућава детаљнију палеогеографску реконструкцију овог подручја, док то није случај у Шумадијском и Моравском палеогеографском подручју, где је фауна врло мало развијена. Влашић и Ваљево, две депозиционе поставке на Јадарском подручју, настале су током девона. Депозиционо окружење Влашића било је представљено у целом девону плитким приобалним појасом који се налази на јужној ивици Панонског копна и карактерише га теригена седиментација. Теригенски материјал је долазио првенствено са панонског копна, али су се у таложном окружењу истицали и неки подморски лукови. Морско дно се спушта истовремено са седиментацијом, што је формирало теригене насlage велике дебљине. Ваљевско таложно подручје је током девона заузимало централни и јужни део Јадарског басена и у доњем девону представљало је плитко море, које је удаљено од копна са очигледном мирном седиментацијом. Ово подручје у средњем девону карактерише формирање подводних гребена и удубљења који су се протирали од Дрине на западу, преко Јадарске долине и северних падина Соколских планина, Повлена, Маљена, па све до Љишко-милановачке дислокације (Група аутора, 1989). Ваљевска таложна средина је претрпела додатну диференцијацију морског дна и стварање карбонатно-теригених стенских асоцијација током горњег девона. Сматра се да је теригени материјал испран са подводних гребена, док су карбонатне стене таложене у мирнијим условима. Претпоставља се да је палеогеографско подручје Шумадије у девону било плитководно топломорско окружење где су се карбонатне стене таложиле и метаморфозовале у венчачке мермере. На самој граници између горњег девона и доњег карбона долази до палеогеографских промена и диференцијације ваљевске депозиционе средине, чиме су формиране три депозиционе средине у доњем карбону у Јадарском басену: дружетићка, ваљевска и влашићка. Депозициона средина Дружетић која се налази у североисточном делу Јадарског басена, обухвата шире подручје долине Уба, као и околину насеља Дружетић. Карактеришу је творевине представљене карбонатним стенама. Круцијално је напоменути да се у оквиру депозиционих средина Дружетић и Ваљево формирају секундарне депозиционе средине, што знатно отежава одређивање палеогеографских услова у доњем карбону. У средини таложења Влашића владају исти услови настанка као и у девону. Између доњег и средњег карбона, тектонска кретања у

морском басену Јадра, изазивају значајне палеогеографске промене. Ваљевска и Влашићка депозициона станишта опстају у средњем карбону, док се Дружетићка средина спаја са ваљевском средином. У поређењу са доњим карбоном, ови системи се нису много променили. На граници између средњег и горњег карбона долази до великих геодинамичких промена, које за последицу имају значајне измене у динарском палеогеографском региону. Јадарски басен се издиже и потпуно прелази у копно, при чему се морски басени смањују. Јадарско копно је формирано на овај начин и спаја се са огромним Панонским копном, а море остаје у јужном делу Јадарског басена. Претпоставља се да је у Шумадијском басену, током доњег карбона, и даље постојало море, али се у средњем карбону уздигао Шумадијски басен, те је на његовом месту формирано копно Шумадије. Ово копно је било присутно и током периода горњег карбона, перма и тријаса и означава палеогеографску границу између моравске и динарске палеогеографске зоне (Група аутора, 1989). Климатске промене су један од фактора за палеогеографске промене на копну и у мору у време перма. Другим речима, топла и влажна карбонска клима уступа место топлој и сувој клими перма. Током већег дела перма, наставља се процес издизања, који је захватио Јадарски басен у горњем карбону, што за резултат има формирање огромног Јадарског копна, где се сада формирају слатководне површине, чија се генеза објашњава повременим изузетно обилним падавинама. Екстремно обилне кише су довеле до ерозије земљишта без вегетацијског покривача и таложења теригеног материјала у поморским подручјима. У горњем перму настаје велика трансгресија која се шири на север и плави читаво Јадарско копно, поново успостављајући режим карбонатног таложења на целом подручју. На простору који обухвата басен Колубаре, током почетка мезозоица, као и током палеозоица, постоје две палеогеографске области. Јадарски и Ибарски басени су јасно подељени у Динарском палеогеографском подручју током доњег тријаса. Јадарски басен је био плитак и приморске природе, са истим условима седиментације у целини. Слив Ибра се током доњег тријаса налазио између Јадарског басена, на северу и истоку, и Дринског басена, на западу и југозападу. Море је током средњег тријаса покривало цео динарски палеогеографски простор. Ваљевска депозициона средина у Јадарском тријаском басену је јасно диференцирана, са доломитима и доломитским кречњацима који се формирају у анизијском кату, а ладински кречњаци директно покривају доломите. Вулканско-седиментна серија везана за анизијски и ладински период је најистакнутија карактеристика средњетријаског басена Ибра. Јадарски басен има приближно исте обресе као средњи тријас током горњег тријаса, иако вулканска

активност престаје. Ваљевску депозициону средину карактерише таложење гребенских и субспрудских кречњака, а у копно прелази крајем тријаса. Ибарски басен горњег тријаса, за разлику од Јадарског басена, има дубоководни карактер (250-500 м) и умерене појаве метаморфизма. Током тријаса, копно Шумадије, које обухвата читаву област, још увек се налази у Шумадијском палеогеографском подручју. На проучаваном подручју, крајем тријаса и почетком јуре, настају значајне палеогеографске промене као резултат старокимријске тектогенезе, при чему је Јадарски басен прешао у копно, а басен Ибра, где се одвијао спорији процес издизања, задржава морски карактер са израженом седиментацијом карбоната. Јадарско копно обухвата цео простор бившег Јадарског басена у периоду доње јуре и спаја се са Панонским копном на северу. Процеси су настављени током средње јуре, што је резултирало формирањем брдског и брдско-планинског терена од равничарског предела. Ово доводи до екстензивне ерозије и денудације постојећег карбонатног тријаског копна, као и откривања палеозојске базе, која служи као извор формирања кластичног материјала у околним морским басенима. У овом периоду такође долази до понирања и континуираног повећања дубине у басену Ибра. Исти палеогеографски услови постојали су у горњој јури, током оксфорда и кимерица, као и у средњој јури. Басен Ибра, који је у то време био у саставу Тетиса, захватао је јужне делове проучаваног подручја, простирајући се од Зворника на западу, па ка истоку, преко Соколских планина, Медведника, Маљена, Суворора, све до копна око Дрине. Процес седиментације средње јуре опстао је током оксфорда и кимерица, а за време титона је створена вулканско-седиментна серија. Од копнених простора на овом подручју током оксфорда и химера, Јадарско копно још увек опстаје и обухвата подручје северно од линије Уб–Јадар. За то време Јадарско копно се навукло преко стена формираних у Ибарском басену. За време титона, у басену Ибра, формиране су три депозиционе средине Маљена, Повлена и Поћуте. Депозиционо окружење Маљена, које је обухватало његове северне и јужне падине и које се одликовало релативно дубоким морем, захватало је већи део басена Ибра. Повленско таложно станиште је било плитко морско окружење, идеално за развој гребенских организама, док је Поћутско таложно окружење било дубоко морско батијалско окружење. Јадарско копно задржава све карактеристике претходног периода на овом подручју (Група аутора, 1989).

Шумадијски морски басен се реконструише у Шумадијском палеогеографском подручју, на прелазу између тријаса и јуре, због кретања старокимријске тектогенезе.

Три велике меридијанске дислокације поново су се појавиле на почетку догера: Моравско-шумадијска (између Моравида и Динарида), Шумадијска (централни делови Шумадида) и Копаоничка (између Динарида и Шумадида). У том периоду долази до екстезивне вулканске активности. Као резултат тога, распад Шумадијске копнене масе почиње на почетку догера и наставља се за време титона. Басен Ибра и Јадарско копно још увек постоје на почетку доње креде. На Динарско палеогеографско подручје утицале су веома интензивне геодинамичке силе које су се изразиле у масивним палеогеографским променама за време валендинског и отривског века. Под деловањем Јадарског блока, који се превлачи преко басена Ибра, творевине се сакупљају и збијају, што доводи до издизања и повлачења мора из басена Ибра. Истовремено, Ибарски блок се повлачи преко блока Дрине, тако да се Јадарско копно налази у истраженом подручју, а Ибарско копно – у простору бившег басена Ибра. Интердинарикум се односи на ова два копна која постоје током барема и апта. Нове трансгресије са палеогеографског подручја Шумадије јављају се током албе и на прелазу између албе и ценомана, плавећи неке ниже источне делове Интердинарикума и резултирајући формирањем нових морских басена попут Љишког басена. Љишки басен се простирао од Љишко-милановачке руптуре на истоку и поплавио је северне падине Маљена и Суворора и простирао се на западу до Осечине (Анђелковић *et al.*, 1989).

Током доње креде на палеогеографском подручју Шумадије, формиран је Руднички басен, укључујући и источне делове испитиваног подручја. Карактерише га таложене флиша и развија се током барема, апта и албе. Морски басени покривају највећи простор у геолошкој историји током горње креде. Као што је наведено, између доње и горње креде, током аустријске фазе алпске орогенезе, као резултат трансгресије плаве се источне области Интердинарикума. Копно наставља да се спушта у турону и сенону, што за резултат има свеже области са продором мора и формирање Ваљевског басена. Флиш се током кампана генерише у басену Љига, који је посебно развијен у Љигу, Струганику и Рајцу. Струганички басен се појавио у кампан-мастрихту, обухватајући области око Струганика и Брежђа, и одатле настављајући на север и североисток. Током горње креде море се у целини повукло из Шумадије. Током кампана формира се депозициона средина Барајева. Море се из већег дела шире околине Београда повукло почетком палеогена, односно током ларамијске фазе алпске орогенезе (креда-палеоген), а пространи морски басени су замењени копном. Промене које су се десиле на проучаваном подручју током палеогена су палеогеографски најзначајније, јер

деловање ларамијске, пиринејске и савске фазе алпске орогенезе реактивира палеозојско-мезозојске дислокације дуж којих се дешавају диференцијална померања блокова. Ово дејство има за последицу спуштање блокова и формирање слатководних међупланинских увала с једне стране, и формирање копнених средина. Савска и Ваљевска међупланинска депресија настале су у олигоцену, а од копнених површина – Савско и Маљенско копно. Флиш и данас заузима знатан простор у шумадијској области, а завршни слојеви су настали током најстаријег палеогена. Шумадијска језерска депресија и копно Рудник, који покривају западни део овог подручја, развијени су у олигоцену. Олигоценске депресије у Колубарском басену се издижу почетком неогена (олигомиоцена) током савске фазе алпске орогенезе и прелазе у копнену средину. Штајерска фаза (средњи миоцен) оживљава циклус седиментације, а за то време се јављају Ваљевска и Савска депресија. Ваљевско-мионичко језеро се простире правцем северозапад-југоисток кроз Ваљевску депресију, а Тамнавско језеро се простире кроз Савску депресију. Међу копненим срединама проучаваним у овом раду издвајају се копна Савско, Јадарско и Маљенско. Јадарско копно се простире између Савске и Ваљевске депресије, а Савско копно се са севера граничи са Панонидима и Савском депресијом. Шумадијски копнени простор постоји између моравског и динарског копна током читавог олигомиоцена, доњег и средњег миоцена. Шумадијска депресија садржи Аранђеловачко језеро, а Милановачко-белановичка депресија садржи Белановичко језеро на западним и југозападним падинама Рудника. Тектонско спуштање дуж старих и нових раседа ствара услове за трансгресију Паратетиса на ово подручје током баденског ката (тортона), међутим она је у почетку покривала ниже терене где су постојала плитка језера (Анђелковић *et al.*, 1989). Као резултат ових процеса, на почетку баденског ката, појавили су се морски пејзажи, који нису били присутни током палеогена и старог неогена. У Колубарском басену откривено је присуство баденског ката, које је у то време представљало плитко море нормалног салинитета у заливу Панонског басена. Дакле, подручје истраживања за време бадена садржавало је копнене и морске просторе. Копнени региони обухватили су регион између колубарског залива и Ваљевско-мионичког језера, као и јужнији део језера. Током бадена одржава се Ваљевско-мионичко језеро на овом простору, које је у пребаденском периоду имало карактеристике међупланинске депресије. За време сармата континент је обухватао садашње планинске венце Венчац, Букуљу, Словачке висоравни и Влашић, као и делове Ваљевско-мионичког језера. Током ове епохе, на главном делу Ваљевско-мионичког језера, развијено је ниско, равничарско земљиште,

а на земљишту „Високе Шумадије” нема значајнијих висинских промена. У погледу морских вода, спуштање појединих блокова у сармату довело је до плавлeња нових површина. Поред Колубарско-тамнавског залива, настао је и горњи колубарски залив који је плавио мање (централне) делове некадашњег Ваљевско-мионичког језера са обе стране реке Колубаре, јужно од Словца. У овом младо формираном заливу вода је имала слабу покретљивост и низак ниво салинитета, а у најјужнијим пределима била је скоро слатководна. Колубарско-тамнавски залив сарматске етапе простира се од Мачве и Поцерине, на запад, у до мезозојско-серпентинске греде и планина Влашић, Словачки висови и Букуље, на истоку. У басенима левих притока Тамнаве простирали су се плитки делови мора са екстензивним издавањем теригеног материјала, што указује на присуство развијене хидрографске мреже. У источном делу Колубарског басена и даље постоји канал Венчанско-аранђеловачки (за време бадена је повезивао Колубарско-тамнавски и Великоморавски залив Паратетис), али је сада нешто ужи због коте Букуље и Венчаца. Климатски услови сарматског стадијума испитиваног подручја одговарају тропско-субтропском појасу, са веома развијеном флором. Почетком панона дошло је до колебања нивоа мора услед епирогених кретања и аридизација климе. Као резултат атичке фазе алпске орогенезе, Карпати се уздижу и прекида се веза између панонског и дакијског дела Паратетиса. Осим сарматског копна, практично сви терени Ваљевско-мионичког језера спадају у панонске копнене регионе, укључујући и средишњи део, који је у сарматском периоду припадао горњоколубарском заливу. Током панона је, међутим, већи део проучаваног подручја био покривен плитким морским водама. Колубарски басен се простирао на два залива: Горњоколубарски и Колубарско-тамнавски, прво у горњем, а потом у доњем току данашње Колубаре. У овом периоду, Горњоколубарски залив захватао је знатно мањи простор него у сарматском периоду. Колубарско-тамнавски залив имао је већу површину од данашњег лежишта лигнита. Острво Космај се умањује на рачун проширења Венчанског канала. На прелазу између панона и понта јављају се снажна тектонска кретања, што доводи до поновног успостављања везе између панонског и дакијског дела Паратетиса. За време понта, на простору данашњег слива Колубаре, постојали су и морски и копнени предели, али је битно напоменути да копнени простори постепено попримају свој савремени изглед. Колубарско-тамнавски залив Панонске марине има највећу морску површину. Међу копненим подручјима понтијске епохе издвајају се низијске, брдско-планинске и мочварне зоне, које су посебно рашчлањене. Равничарски терени обухватили су стари Горњоколубарски залив, као и претходне рејоне језерског басена.

Што се тиче ерозивних процеса у брдско-планинским пределима овог времена, сматра се да је материјал Колубарско-тамнавског басена допремљен денудацијом са обода палеозоица, као и праколубаром које се уливала у залив код Лазаревца (Анђелковић *et al.*, 1989). Мочваре понтиског ката су настале одвајањем и заслађивањем делова слива са сланом водом. Као последица тог процеса долази до раста бујне вегетације и акумулирају се огромне количине биљног материјала од којег се формира угаљ. Климату овог периода карактерише прекомерна влажност и високе температуре. Што се тиче климатских услова током кенозоика, може се рећи да се, услед глобалног захлађења током миоцена, а посебно плиоцена, смањују тропска и суптропска зона, а слив Колубаре погађају ниже температуре током Леденог доба. У геолошкој прошлости се на простору околине Београда некада дешавала смена копна и мора. Простор око Београда је од претходних 600 милиона година био под водом око 90 милиона година. У региону данашње Панонске низије, терен који је тонуо уступио је место формирању Панонског басена. Долази до пробоја воде из старог Средоземља (Тетиса) и ствара се Панонско море. Био је то део далеко већег мора које се протезало од Бечког басена на западу, преко Панонске низије и Влашке низије, до Црног мора на истоку. Више пута је ниво Панонског мора растао и тонуо због геолошке активности околне топографије и знатних варијација у падавинама. С обзиром на карактеристике копнене масе која је окруживала јужни руб Колубарско-тамнавског залива, може се, на основу карактеристика седимената у заливу који се простиру низ обалу, веровати да је био брдовит и да се у залив уливало неколико водотокова (Анђелковић *et al.*, 1989).

2.1.3.1. Геолошке карактеристике подручја истраживања

Колубарски слив је Придворичким сужавањем подељен на два различита басена: басен горње Колубаре, на југу, и басен доње Колубаре, на северу. Горња Колубара је виша и припада ваљевском крају, док је доња Колубара нижа и представља фосилни залив Паратетиса. Ваљевска, Топличка и Љишка котлина су три простора који се издвајају у сливу горње Колубаре. У Ваљевској котлини, која обухвата западни део горње Колубаре и део према њеном центру, уливају се Обница, Јабланица, Градац и Рибница. Долински систем Љига, који обухвата Драгобиљ, Бољковачку реку, Палежичку реку и Оњег, налази се у источном делу горње Колубаре. Топлички котлински систем се

налази у срцу слива горње Колубаре. Тамнава и њена притока Уб теку лево, док Пештан и Турија теку десно, ка сливу доње Колубаре.

Слив доње Колубаре, површине око 1800 km², налази се унутар Колубарског басена, површине око 3650 km². Слив доње Колубаре обухвата котлину доње Колубаре, као и сливове притока Колубаре: Пештан, Турија (са Бељаницом), Тамнава (са Убом) и Кладница. Предео басена доње Колубаре је полигенетско-полиморфан. Тектонски процеси су утицали на настанак и морфолошки развој хидрографске мреже у овом региону, док су речна ерозија и антропогене активности утицали на садашње стање хидрографске мреже. Услед директних људских утицаја повезаних са бројним хидротехничким захватима, изглед и својства хидрографске мреже у басену доње Колубаре драстично су се мењали током двадесетог века.

Утицај морфометријских особина рељефа на интензитет природних (посебно геоморфолошких) процеса, привредних и ванпривредних активности, као и услове и квалитет живота, дефинисан је основним карактеристикама рељефа израженим надморским висинама, експозицијама, нагибима, итд.

Примарни аспекти терена Колубарског басена који могу утицати на јачину ерозивних процеса су хипсометријске карактеристике, вертикална дезинтеграција, степени нагиба и експозиција. Подаци добијени анализама имају широк спектар примена и од суштинског су значаја за процену јачине ерозивних процеса, ефикасно планирање коришћења земљишта, пољопривредну географију, заштиту и унапређење животне средине.

Границе Колубарског басена се поклапају са границама терена Јадарског блока, а некада је простор басена био геолошки активан. Песак, песковите глине, песковити кречњаци и конгломерати заузимају више од половине површине у сливу реке Колубаре, док су лапорци, лапоровити кречњаци, лискунасти пешчари, глиновити пешчари и глине мање заступљени. Ове врсте геолошких наслага налазе се у котлинском подручју Колубарског басена. Западну и јужну ивицу слива, за разлику од нижележећих делова, карактерише масивни кречњак са дијабазним каменим формацијама и серпентинитом. Геолошке формације су више фрагментоване према

истоку, са великим бројем лапораца, глиновитих шкриљастих пешчара, дијабазних формација, харцбургита, лерзолита и серпентинита.

Главни извори металних минерала су формације дијабазног рога, са основним и ултрабазичним стенама које карактеришу ово подручје јуре.

Планине на ивици слива, попут Повлена, Маљена и Рудника, обликоване су разноврсношћу и мешањем геолошке подлоге (Геолис, 2010). Руде олова, цинка и бакра таложене суседне ултрамафичне стене, што је резултирало значајним концентрацијама никла, хрома и кобалта (Antić-Mladenović *et al.*, 2017), као и наслага лигнита у сливном подручју (Filipović, 2005). Ефекат таквог геолошког супстрата на земљиште је значајан услед водне ерозије, при чему су умерени и веома високи ерозиони процеси захватили око 30% слива реке Колубаре (Belanović-Simić *et al.*, 2013).

2.1.3.2. Рељеф терена и савремени морфолошки процеси

Шире подручје Ваљева и околине спада у Колубарски слив, и одликује се присуством ваљевских планина дуж јужног дела испитаног подручја. Северно од Ваљева се пружа пространа заравњеност (Ваљевска подгорина), дуж које се налазе урезане клисуре, долине и котлине. Планински венац планина Суворор и Маљен пружају се смером од запада ка истоку, где се лучно савија ка југу и прислања уз саме огранке планине Рудник. Морфолошки најизраженији предео поменутог терена чине истовремено и вододелницу међу сливовима реке Колубаре, на северу, и реке Западне Мораве, на југу. Сама темена планине Маљен и планине Суворор чине пространу зараван која се постепено пење са 700 m код Суворора, па све до 1000 m код Маљена, и са које се уздижу многобројни флувиоденудациони висови, размештени међу извориштима и самих изворишних преседина. Овог порекла су најупечатљивија узвишења као што су: Рајац (848 mnnv), Суворор (864 mnnv), Велики Маљен (970 mnnv), Велико брдо (1061 mnnv), Црни врх (1098 mnnv) и Краљев сто (1103 mnnv) (Vasović, 2002). Маљен и Суворор су лимитирани низом стрмијих страна и отсека који раздвајају венац споменутих планина од северног подгорја. Северно од Суворора и Маљена пружа се брежуљкаст и брдовит терен са многобројним узвишењима, ртовима и развијеном мрежом котлина,

клисура и долина. Према југу, падине Сувобора и Маљена карактерише постепено опадање апсолутних висина и континуирана разуђеност рељефа. Према истоку, једним делом су укључени предели северозападних и западних огранака саме планине Рудник, дуж којих се уздижу врхови Касамовац (684 mnnv), Стражевица (622 mnnv), Островица (758 mnnv) и др. Рељеф је дуж овог простора интензивно разуђен, као и на Маљену. Дуж североисточног дела пружа се Вагански повијарац, који се везује за планину Букуљу – у правцу запада. Северозападни део испитиваног терена обухвата Горњоколубарски басен, тј пространи равничарски комплекс дуж горњег тока саме реке Колубаре (Цвијић, 1924).

Река Рибница, као алогени ток Ваљевског краса, нема изражену кањонску долину, већ је формирана од клисурастих и кањонских потеза, а ту и тамо и од ерозивних проширења. Дужина саме клисуре-кањона је око 10 km, од њених саставница Манастирице и Паклешнице па до села Паштрић. Рибница је усекла преко 200 m дубоку клисурасту долину меандарског карактера. Формирана је у доњокредним, средњокредним и доњотријаским кречњацима. Зависно од локалних геоморфолошких и геолошких услова долина је ужа или шира, а њене стране имају блажи или стрмији нагиб. У клисурасто-кањонској долини основну одлику крашког рељефа чине пећине изворског типа. Сама Рибница дуж свог тока има 12 пећина, док са Манастирицом има укупно 19. Позициониране су на различитим висинама и разних су величина. По дужини се издваја Велика Врбичка пећина, а по површини издваја се Рибничка пећина са 1130 m² (слика 8). Осим споменутих, постоје још Пландиште, Шалитрена пећина, Пећина на раседу, Милијина, Козја, Хајдучка, Бошковића пећина, Говедара, Шупља и др. Пећине се налазе са обе долиנסке стране, но бројније су а и дуже са леве стране, јер се дуж те стране шири појас типичног краса. Углавном, пећине припадају млађој геоморфолошкој фази. Дуж целе клисурасто- кањонске долине са пећинама формирано је специфично станиште животињских и биљних врста које су створиле своје ареале (Група аутора, 1984; Жеж, Калуђеровић, 1985). У доњем току Рибнице у долини реке се налази варошица Мионица.



Слика 8. Рибничка пећина у долини реке Рибнице Усликано: 11.08.2020. (лична архива)

Предео Ваљева и шире околине припада Колубарском сливу, и одликује се присуством ланаца Ваљевских планина у јужном делу испитиваног подручја, док се северно од ње простире заравњеност (Ваљевска подгорина), дуж које се налазе урезане клисуре, котлине и долине. Ваљевске планине се пружају правцем Динарида, смер северозапад-југоисток (неколико десетина километара), у које спадају Медведник, Јабланик, Маљен и Повлен, а првенствено се пењу са површи од 600 метара надморске висине. Подгорина Ваљева, на северу, протеже се од 200 до 600 метара надморске висине, ширине неколико десетина километара, са разним надморским висинама и ртовима који су или компактни или су усамљени и удаљени. Горњоколубарски басен, који има три котлине усечене у његово дно, налази се у наведеној заравњеној подгорини. Поменуте котлине су Ваљевска, Топличка и Љишка.

Флувијални, падински и крашки геоморфолошки процеси могу се разликовати од геоморфолошких процеса присутних на терену. Имајући у виду геоморфолошке карактеристике терена и хидрографску мрежу, лако је закључити да су флувијални геоморфолошки облици настали деловањем река Колубаре, Градца, Рибнице, Топлице, Пештана, Уба и других.

Будући да комплекс крашких стена покрива велики део слива, у истраживачком подручју крашки геоморфолошки процес је најдоминантнији. Пре анализе површинских и подземних крашких облика на терену, потребно је разумети развој крашког процеса. Конкретно, процес карстификације почиње дејством воде и угљене киселине (из површинских речних токова или атмосферских падавина) на кречњак, који га лако раствара, узрокујући да вода носи калцит предредњеним путевима (шупљине, пукотине). Повећањем пукотина које спроводе воду заједно са калцитом, формирају се услови за стварање турбулентног режима протока подземних вода, што појачава механичку ерозију, а што доводи до повећаног растварања и временом, спушта базу карстификације на ниже нивое (Дукић, 1982).

Ваљевски крас је подељен на неколико секундарних целина речним долинама кањонског типа: Брезовачки, Баћевачки, Лелићки и Лепенички. Оријентисани су смером југ-север, односно у правцу нагиба топографске површине и постепено распоређених заравни. Цвијићев Лелићки карст (меро карст) је најпознатији, са својим изразитим надземним и подземним облицима (Цвијић, 1926).

2.1.4. Хидрографске и хидролошке карактеристике истраженог подручја

Река Колубара се на територији општине Обреновац улива у реку Саву, као њена последња велика притока. У близини града Ваљева, сама долина реке Колубаре се изненада шири и формира Ваљевску котлину. Колубара почиње да у виду лакта заокреће из смера југ-север према смеру запад-исток, након чега њено речно корито меандрира и шири се. Колубара се формира спајањем две реке – Обнице и Јабланице на око 1 km узводно од града Ваљева (на коти 193 mⁿv) и након деведесетак километара тока улива се у реку Саву. Сливна површина Колубаре износи око 3650 km², док је просечна надморска висина мала и износи свега 206 m. Сам слив Колубаре поседује карактеристике бујичног речног тока, што за последицу има да се у пролећном периоду неретко излива из корита. На територији Обреновца, Колубару одликује равничарски карактер са учесталим меандрирањем у зони близу ушћа у Саву. Урбане средине дуж слива реке Колубаре су неретко угрожене од стране бујичних поплава.

Просечна густина речне мреже у сливу реке Колубаре је мала и износи свега 410 m/km², а њена величина зависи од рељефа, падавина и литолошког састава, који нису баш идеални за формирање водотокова у поменутом сливу. Према неким подацима, постоји преко 700 водотокова који имају карактер активних бујица (Вајић, Ролмчић, 2012).

Хидролошка мерења и осматрања широм слива Колубаре започета су давне 1923. године, увођењем водомерне летве на територији Обреновца. Остале водомерне станице уведене су после 1950. године, док су две најмлађе – Теманов мост и Јунковац у функцији од 1970. године. У самом сливу Колубаре, водостај се прати широм слива на 14 водомерних станица. Дуж главног тока Колубаре, водостај се прати на 4 профила. Водомерна станица Ваљево лоцирана је на реци Колубари, на око 80 km од њеног ушћа у реку Саву. Поменута мерна станица основана је 1951. године, када је поред инсталације водомерне летве, инсталиран и лимниграф. Водомерна станица Словац позиционирана је на самој реци Колубари и налази се на око 55 km удаљености од њеног ушћа у реку Саву. Основана је 1953. године, док је лимниграф инсталиран 1958. године од када се активно прати и лебдећи нанос, док се температура воде прати од 1959. године. Водомерна станица Бели Брод, на самој реци Колубари, позициониран је на око 39 km од ушћа. Основана је 1950. године, а лимниграф је инсталиран 1976. године (Мијатовић, 1983).

Прва значајнија и већа притока Колубаре је река Градац, која се улива у њу са десне стране, у урбаном делу града Ваљева. Градац има дужину тока око 18 km, а његова површина слива износи 165 km². Градац од формирања, спајањем Буковске реке и реке Забаве, па све до самог ушћа у Колубару, има дужину од око 28 km са укупним падом од 187 m (слика 9).



Слика 9. Река Градац Усликано: 13.08.2020. (лична архива)

Наредне веће притоке дуж слива Колубаре са њене десне стране су реке Рибница и Љиг, са својим притокама.

Река Рибница је позиционирана дуж ваљевског краса и део је слива Колубаре у коју се улива код села Дивци, у близини вароши Мионица. Она целим својим током тече кроз територију општине Мионица, са површином свог слива од 115 km². Река Рибница настаје код Козомора, на територији села Брежђе, од две саставнице реке – Манастирице и Паклешнице, на надморској висини од 300 m. Дужина тока реке Рибнице је 22 km. Правац тока јој је у смеру југ-север и нема значајнијих притока, што је последица позиције и сужења њеног слива између реке Лепенице, ка западу, и реке Топлице, ка истоку. Узводно од Козомора, слив Рибнице се нагло шири преко њених саставница Манастирице и Паклешнице. Дужина речног тока Рибнице износи 36 km, ако рачунамо и ток Манастирице. Просечан пад од њеног формирања па до ушћа у Колубару износи 0,75%. Цео слив је сачињен из прелаза са планинског ка брдско-планинском рељефу. Већи део тока реке Рибнице је планински, изузев дела у околини села Паштрић, где река излази из клисуре, па до самог ушћа у Колубару (слика 10)

(Станојевић, 2009). Реке Рибница и Лепеница приликом свог протицаја кроз Мионицу примају отпадне воде и муљ из ове урбане средине и транспортују га даље у Колубару.



Слика 10. Река Рибница Усликано: 20.09.2020. (лична архива)

Река Љиг је већа притока Колубаре и њена дужина износи око 49 km. Река Љиг извире на простору територије општине Љиг и кроз саму општину протиче на дужини од око 30 km. Настаје сједињавањем више водотокова који се сливају низ обронке северне падине планине Сувобор. За главни извор реке Љиг узима се крашко врело на територији села Ба, јер за разлику од других изворишта која пресушују током летњег периода или им се знатно смањи протицај, поменуто врело код села Ба, има најстабилнију издашност и најбогатији је извор воде у овом крају. Само врело је позиционирано у подножју крашког облика код села Ба високог 250 до 300 m, на надморској висини од 395 m. Сама издашност врела је променљива и варира од минималних 8.1 l/s до максималних 2.1 m³/s, док просечна издашност износи око 67 l/s. Површина самог слива реке Љиг износи око 683 km², а на територији општине Љиг се простире на око 275 km², тј. на 39% укупне сливне површине.

Северне стране падина Сувобора се дренирају у реку Марицу, леву притоку Љига, као и у Славковачку реку, која дотиче са њене десне стране, конкретније са северних обронака планине Рајац. Веће притоке реке Љиг су поток Драгобиљ, са својом притоком Драгобиљицом (Лалиначком реком), који извиру испод западних и југозападних обронака планине Рудник, затим притичу потоци Жеравац и Годевац, који се уливају као леве притоке Љига, Качер (највећа притока Љига) са својом притоком Козељицом, који извиру испод северозападних обронака планине Рудника и западних обронака планине Букуље. Притока Качер улази на територију општине Љиг узводно од села Белановица, па се затим улива у реку Љиг 1 km низводно од самог насеља Љиг. Последња већа притока Љига на територији општине Љиг је река Отока са својом притоком Кацапом, која се у њу улива са њене леве стране. Ван саме општине Љиг, у реку притиче Оњег, чија се изворишта налазе у североисточном делу територије општине Љиг (слика 11). Сама река Љиг приликом свог протицаја кроз истоимено насеље прима отпадне воде и муљ из ове урбане средине и транспортује га даље у Колубару.



Слика 11. Река Љиг Усликано: 11.08.2020. (лична архива)

Река Тамнава је лева притока реке Колубаре, у коју се улива код Лисиног Поља.

Тамнава се формира на северним падинама планине Влашић од око 20 извора. Дугачка је 86.5 km, а кад јој придружимо притоку Тамнавицу има укупну дужину од 88.8 km. Првих 15 km протиче у смеру север-северозапад са правца југоистока и након што прими леву притоку Грешеву, мења свој правац са запада ка истоку до Темановог моста, а затим последњих 9 km ток протиче североисточно док се не улије у Колубару на коти од 81 mnnv. Упркос чињеници да је вредност средњег вишегодишњег протока Тамнаве 1.38 m³/s, по неким подацима ова вредност може да досегне и 3.45 m³/s на ушћу у Колубару. Тамнава често пресуши у касно лето и рану јесен када вода остане сачувана само у вировима. Слив Тамнаве покрива 729.2 km². Највиша тачка је сам врх планине Влашић, који дренира изворни део Тамнаве на око 450 mnnv. Будући да је кота Тамнаве на ушћу 81 mnnv, вреди напоменути да целокупни пад ове реке износи 40%. Тамнава улази у равницу код Коцељеве, и има тенденцију да често плави – у касно пролеће и рано лето. Тамнава тече меандрирајући и захваљујући градијентима у овој области има спор протицај (слика 12). Десна притока реке Тамнаве, река Уб је њена главна притока. Извор Уба је такође на падинама планине Влашић, али на обронцима на источној страни. Највиша тачка у овом пределу је врх Велики Белег, испод којег се може наћи извор реке Уб, на 452 mnnv. Река Уб тече кроз села Дружетић, Памбуковица и Чучуга у горњем делу свог тока, где јој притиче лева притока Буковица. Дуж свог средишњег тока протиче кроз Тврдојевац, Звиздар и Уб, који је по реци и добио име. Уб тече практично паралелно са Тамнавом до насеља Рупљани, који се налази на надморској висини од 84 mnnv, где се и улива у Тамнаву. Слив реке Уб има површину од 270 km² (слика 13).



Слика 12. Река Тамнава Усликано: 07.08.2020. (лична архива)



Слика 13. Река Уб Усликано: 13.09.2020. (лична архива)

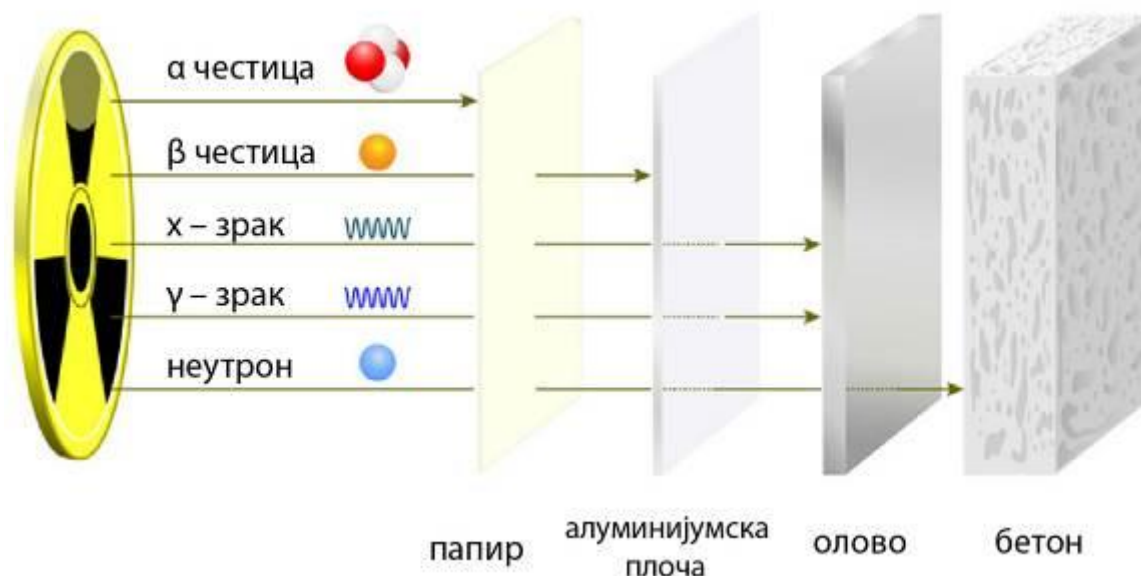
Изражен меандарски карактер реке Тамнаве резултирао је огромним бројем напуштених корита и изолованих меандара. Данас се углавном користе за бацање разног отпада, као и за истакање септичких јама из домова у чијем су поседу. Типичан пример је напуштено старо корито реке Тамнаве у близини самог центра општине Обреновац. Постоје велике резерве лигнита у сливу Тамнаве (Милојевић, 1959), које се данас експлоатишу у површинским коповима Колубара за потребе производње електричне енергије у термоелектрани Никола Тесла у Обреновцу. Реке Тамнава и Уб приликом својих протицаја кроз Коцељеву и Уб примају отпадне воде и муљ из ових урбаних средина и даље их транспортују у Колубару.

2.2. Јонизујуће зрачење

Јонизујуће зрачење је врста енергије коју ослобађају атоми и која путује у облику електромагнетних таласа (гама или рендгенски зраци) или честица (неутрони, бета или алфа). Спонтани распад атома назива се радиоактивност, а вишак емитоване енергије је облик јонизујућег зрачења (Claisse, 2016).

2.2.1. Врсте јонизујућег зрачења

Постоји више врста јонизујућег зрачења. На слици 14. приказане су врсте јонизујућег зрачења и њихова продорност кроз различите материјале (L'Annunziata, 2012). У наставку су наведене најбитније карактеристике појединих врста зрачења.



Слика 14. Врсте јонизујућег зрачења и њихова продорност кроз различите материјале (лична архива)

Алфа зрачење је облик зрачења честица. Алфа честице су заправо језгра хелијума He-4 (Rutherford, Royds, 1908). Алфа честице се веома брзо апсорбују у материји кроз коју продиру (нпр. кроз ваздух и воду) и из тог разлога имају веома кратак домет (неколико центиметара у ваздуху; мање од милиметра у води). Могу бити заустављене чак и листом папира (L'Annunziata, 2007). У случају спољашњег излагања алфа честицама, овај тип зрачења може продreti само у спољашње слојеве људске коже. Права опасност долази приликом удисања или гутања алфа емитера, тј. радиоактивних супстанци које емитују алфа честице током распадања у телу (инкорпорација), где може довести до значајног излагања зрачењу. Алфа честице путују брзином од око $1/20$ брзине светлости. Као резултат тога, имају снажан јонизујући ефекат. Због своје величине, сударају се са неким од атома и брзо губе енергију, па им је самим тим продирање мало (неколико центиметара) и могу их зауставити кожа или папир. Због

свог снажног јонизујућег ефекта, штетни су ако доспеју у организам конзумицијом или удисањем јер долази до тешких оштећења ткива. Типичан и важан пример инкорпорације алфа емитера је унос радона, природног племенитог гаса, путем удахнутог ваздуха (Pierce *et al.* 1998; Qaim *et al.*, 2016).

Бета зрачење је зрачење честица које се јавља када радиоактивна атомска језгра емитују (негативно наелектрисане) електроне или ређе позитроне (позитивно наелектрисане честице исте масе као електрони) док се распадају. Бета зрачење се слабије апсорбује у материји него алфа зрачење и стога има већи домет: моћ продирања бета честица се креће од неколико центиметара до неколико метара у ваздуху и неколико милиметара до неколико центиметара у меким ткивима и пластици. Од бета зрачења се може прилично лако заштитити, на пример, алуминијумским лимом дебљине неколико милиметара. Радиоактивне честице које емитују бета зрачење, такође, могу довести до значајних последица излагања зрачењу када их тело преузме (угради) путем удахнутог ваздуха или хране. У случају спољашње изложености, бета зрачење може оштетити ткиво, јер може продрети у тело, мада не веома дубоко. Међутим, овај вид зрачења губи знатно мање енергије од алфа зрачења на одређеној удаљености. Зато се каже да бета зрачење има нижу биолошку ефикасност од алфа зрачења (Belyaev, Ross, 2021).

У случају гама зрачења, енергија се преноси као електромагнетни талас. Електромагнетно зрачење се може описати у смислу његове фреквенције или таласне дужине: што је већа фреквенција и краћа таласна дужина, то зрачење поседује већу енергију. Гама зрачење се налази на крају електромагнетног спектра, са високом фреквенцијом или кратком таласном дужином (Shamos, 1959). Гама зрачење настаје радиоактивним распадом атомских језгара, често поред алфа или бета зрачења. Врло лако продире у материју. За заштиту се користе тешки материјали као што су олово или бетон. И спољашње излагање и инкорпорација гама зрачења су штетни за живе организме, јер продире дубоко у ткиво. Међутим, његова биолошка ефикасност је нижа од алфа зрачења, пошто преноси мање енергије ткиву на одређеној удаљености.

X-зрачење је такође облик електромагнетног зрачења. За разлику од гама зрачења, оно се генерише вештачки када се брзи електрони успоравају на аноди (позитивно наелектрисаној електроди) рендгенске цеви. Што је примењен већи напон цеви при

којем се убрзавају електрони у рендгенској цеви, то је краћа таласна дужина и већа је енергија резултујућег X-зрачења. Када је рендгенски апарат искључен, не генерише се рендгенско зрачење (Gräfe, 2021).

Неутронско зрачење се састоји од ненаелектрисаних честица (неутрона). Неутрони се углавном ослобађају током нуклеарне фисије. Неутронско зрачење се једва апсорбује ваздухом. Материјали са највећим могућим садржајем водоника (нпр. парафин, полиетилен, вода) се користе за иницијално успоравање неутрона. Успорени (топлотни) неутрони морају бити ухваћени апсорбером (као што је бор или кадмијум). Гама зрачење се емитује истовремено уз неутронско зрачење и мора бити заштићено оловом. Неутронско зрачење има снажну интеракцију са биолошким ткивом (посебно молекулима воде које садржи) и стога има високу релативну биолошку ефикасност (Little, 2003).

2.2.2. Извори јонизујућих зрачења

Радиоактивни материјали могу бити природни (као што су уранијум и радијум који се налазе у земљишту) или их је човек направио у акцелератору или реактору. Машине које генеришу зрачење, као што су медицински рендгенски апарати, електронски производе јонизујуће зрачење и престају да производе зрачење када су искључени. Опрема која садржи радиоактивни материјал, као што је нека индустријска радиографска опрема, не може се искључити, јер радиоактивни извор емитује јонизујуће зрачење. Ови извори морају бити заштићени, тј. окружени материјалом који може блокирати зрачење, како би се спречило или смањило излагање радијацији (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2012).

2.2.3. Примена јонизујућег зрачења

Радиоактивност је откривена деведесетих година XIX века и до сада је развијена широка лепеза употребе ове природне енергије. Данас се зрачење користи у медицини, образовању и индустрији, као и за производњу електричне енергије. Поред тога, зрачење има корисне примене у областима као што су пољопривреда, археологија

(датирање угљеника), истраживање свемира, геологија (укључујући рударство) и многе друге области.

Болнице, лекари и стоматолози користе различите нуклеарне материјале и процедуре за дијагнозу, праћење и лечење широког спектра метаболичких процеса и медицинских стања код људи. Најчешћа од ових медицинских процедура укључује употребу рендгенских зрака – врсте зрачења које може проћи кроз нашу кожу. Када се рендгенски снимају, наше кости и друге структуре бацају сенке јер су гушће од наше коже, а те сенке се могу детектовати на фотографском филму. Ово омогућава лекарима и стоматолозима да уоче сломљене кости и проблеме са зубима (слика 15).



Слика 15. Ортопан снимак Усликано: 28.10.2021. (лична архива)

Рендгенски зраци и други облици зрачења такође имају различите терапеутске намене. Најчешће су намењени уништавању канцерогеног ткива, смањењу величине тумора или смањењу бола. На пример, радиоактивни јод (посебно јод-131) се често користи за лечење рака штитне жлезде. Рендген машине су повезане са рачунарима и машинама које се називају скенери компјутеризоване аксијалне томографије (САТ) или компјутеризоване томографије (СТ) (Radiation and your patient, 2001). Ови инструменти пружају лекарима слике у боји које приказују облике и детаље унутрашњих органа.

Ово помаже лекарима да лоцирају и идентификују туморе, величину аномалије или друге физиолошке или функционалне проблеме органа. Поред тога, болнице и радиолошки центри широм света сваке године обављају десетине милиона нуклеарних медицинских процедура. Лекари дају малу количину радиоактивне супстанце пацијентима, које одређени унутрашњи органи привлаче, попут панкреаса, бубрега, штитне жлезде, јетре или мозга, како би дијагностфиковали клиничка стања (Baley *et al.*, 2014).

Образовне установе и друге академске и научне институције користе нуклеарне материјале у раду на курсевима, лабораторијским демонстрацијама, експерименталним истраживањима и разним применама здравствене физике. Ово омогућава истраживачима да проучавају путеве којима се различите врсте загађења крећу кроз животну средину. Радијација нам је помогла да сазнамо више о врстама земљишта у којима различите биљне врсте треба да се развијају, величинама новооткривених нафтних поља и правцима кретања океанских струја. Истраживачи користе нискоенергетске радиоактивне изворе у гасној хроматографији да идентификују компоненте нафтних деривата, смога или дима цигарета, па чак и сложених протеина и ензима који се користе у медицинским истраживањима. Археолози користе радиоактивност за одређивање старости фосила и других објеката методом радиоактивног угљеника. У горњим нивоима наше атмосфере, космички зраци ударају атоме азота и формирају природни радиоактивни изотоп угљеника који се зове угљеник C-14. Од угљеника који се иначе налази у свим живим бићима – мали проценат је угљеник C-14 (Paterne *et al.*, 2020). Када биљка или животиња умре, више не преузима нови угљеник, а угљеник C-14, који је акумулирала током свог живота, почиње процес радиоактивног распада. Резултат тога радиоактивног распадања, након неколико година, има за последицу да стари објекат има мањи проценат радиоактивности од новијег, млађег објекта. Мерењем ове разлике, археолози су у могућности да одреде приближну старост објекта.

Електрична енергија произведена нуклеарном фисијом (цепањем атома) – једна је од најпознатијих и највише коришћених употреба зрачења. Како становништво на планети постаје све више зависно од електричне енергије, потребан нам је поуздан, богат, чист и приступачан извор електричне енергије.

Електране (укључујући и оне које користе нуклеарну фисију) загревају воду да би произвеле пару, која окреће лопатице турбине налик пропелеру која окреће осовину генератора (ИАЕА, 2017). У овим постројењима, енергија потребна за кључање воде и претварања у пару, производи се или сагоревањем угља, нафте или гаса (фосилна горива) у пећи, или цепањем атома уранијума у нуклеарној електрани. Уранијумско гориво генерише топлоту кроз процес који се назива фисија. Уранијум је примарно гориво за нуклеарне реакторе и експлоатише се широм света. Након копања руде, потребно је да се уранијум рафинише пре него што почне да се користи као гориво у нуклеарним реакторима. Уранијум-233, уранијум-235 и плутонијум-239 су три најважнија фисиона изотопа. Када неутрон који се споро креће удари у нестабилна језгра ових атома, они се цепају на два језгра и два или три додатна неутрона. Након тога, неутрони разбијају још језгара. У нуклеарном реактору ово резултира самоодрживом ланчаном реакцијом која се може регулисати.

Не производе све врсте нуклеарних горива електричну енергију нуклеарном фисијом. Радиоизотопни термоелектрични генератори и друге врсте атомских батерија користе плутонијум-238 и друге елементе за производњу скромних количина нуклеарне енергије путем радиоактивног распада.

Третман зрачењем је контролисана примена енергије краткоталасног зрачења електромагнетног спектра познатог као јонизујуће зрачење и укључује гама зраке, убрзане електроне и рендгенске зраке како би се постигао жељени ефекат на производ.

Храна, медицинска опрема и друге супстанце су изложене одређеним врстама зрачења (као што су гама или рендгенски зраци) како би се уклонили микроорганизми без оштећења супстанце која се дезинфикује. Када се третира на овај начин, храна остаје свежа много дуже, а медицинска опрема (као што су завоји, шприцеви и хируршки инструменти) се стерилише без излагања токсичним хемикалијама или екстремној топлоти. Резултат тога, тамо где се сада користи хлор, хемикалија која је токсична и са којом је тешко руковати, је могућност да се зрачење убудуће користи за дезинфекцију воде за пиће и уништавање микроорганизама у канализацији. Ултраљубичасто светло (облик зрачења) се већ користи за дезинфекцију воде за пиће.

Слично томе, радијација се користи за уклањање токсичних полутаната из електрана на угља и из индустрије. Полутанти животне средине као што су сумпор диоксид (SO_2) и азотни оксиди (NO_x) емитују се у атмосферу као резултат индустријских активности, посебно сагоревањем фосилних горива за потребе производње електричне енергије. Источна и централна Европа припадају региону света који је највише погођен киселим кишама. Загађењу доприноси сагоревање угља лошег квалитета, са високим садржајем сумпора. Многе владе широм света увеле су ограничења индустријске емисије, што је поново подстакло интересовање за откривање изводљивих и исплативих система за управљање загађењем SO_2 и NO_x . Влажно испирање за SO_2 и селективна каталитичка редукција за NO_x су две традиционалне методе које су достигле технолошку зрелост. Свакодневно се откривају нове технологије које се користе у комерцијалне сврхе и доприносе ефикаснијој производњи у индустрији. Једна од њих је техника сувог прочишћавања електронским снопом, која истовремено уклања SO_2 и NO_x из индустријских димних гасова. Последњих деценија процес обраде димних гасова електронским снопом проучаван је на Институту за нуклеарну хемију и технологију (INCT). Изграђена је лабораторијска јединица са протоком гаса од $400 \text{ Nm}^3/\text{h}$, као и пилот-постројење са протоком гаса од $20000 \text{ Nm}^3/\text{h}$. У лабораторији се користи акцелератор од 20 kW , 2 MeV , док се у пилот-постројењу користе два акцелератора од 50 kW , 700 keV . Тренутно се развија и гради индустријско постројење са протоком гаса од $270000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ и снагом зрака од 1200 kW . Током испитивања, показана је висока ефикасност уклањања SO_2 (до 98%) и NO_x (до 80%). Такође је приказано континуирано функционисање пилот-постројења. Ова технологија се у поређењу са традиционалним технологијама показала као конкуретна, и у економском и у технолошком смислу (Chmielewski *et al.*, 1999).

Зрачење електронског снопа може уклонити опасне сумпор-диоксиде и азотне оксиде из нашег окружења. Многе тканине које се користе за израду одеће биле су озрачене (третиране зрачењем) пре него што су биле изложене хемикалијама. Овај третман чини да се хемикалије везују за тканину, како би одећа остала свежа и отпорна на гужвање током целог дана, али је битно нагласити да одећа не постаје радиоактивна. Слично томе, непријањајуће посуђе се третира гама зрацима како се храна не би лепила за металну површину. Пољопривредна индустрија користи зрачење за побољшање производње и паковања хране (Gracheva *et al.*, 2016). Семе биљака, на пример, може се изложити зрачењу како би се створиле нове и отпорније врсте биљака. Студије

показују да зрачење биљака има позитиван утицај на њихов раст и производњу метаболита (Marlise *et al.*, 2019). Такође, зрачење се може користити за контролу популација инсеката, чиме се смањује употреба опасних пестицида.

Радиоактивни материјал се, такође, користи у мерилима која мере дебљину љуске јајета како би се издвојила танка, ломљива јаја пре него што се пакују у картоне и пласирају на тржиште. Поред тога, многе намирнице су упаковане у полиетиленску скупљајућу фолију која је озрачена, тако да је она променила своје карактеристике и може се загрејати изнад своје уобичајене тачке топљења и умотати око хране како би се обезбедио херметички заштитни омотач.

Свуда око нас видимо рефлектирајуће знакове који су третирани радиоактивним трицијумом и фосфоресцентном бојом. Јонизујући детектори дима користе мали део америцијума-241, док, на пример, мерачи који садрже радиоизотопе мере количину ваздуха умућеног у сладолед.

2.3. Примена јонизујућег зрачења у заштити животне средине

Последњих година услед научног напретка у пољу нуклеарних наука, развијен је велики број технологија. Такође, развијена је и сама примена радијационих технологија, које имају за циљ да остваре што већу безбедност приликом испуштања гасовитих и течних ефлуената у природу и смањење негативног утицаја на животну средину и здравље људи и животиња (Ali Mussad, 2004). Пилот-постројења и индустријске инсталације показале су да технологије засноване на зрачењу пружају завидне резултате приликом третмана димних гасова (уклањање SO_x и NO_x), пречишћавања отпадних вода (Hashimoto, Kawakami, 1979) и третмана муља (Borrely *et al.*, 1998), и могу у великој мери помоћи да се ублаже антропогени утицаји урбаних и индустријских подручја на деградацију животне средине. Земље широм света, укључујући многе земље у развоју, изразиле су велико интересовање за коришћење и увођење иновативних технологија зрачења за третман отпадних вода које су као продукт индустријског деловања настале у урбаним срединама.

Зрачење је добро успостављена метода за смањење микробне контаминације у храни и лековима. Користе се како гама зраци, тако и електрони високе енергије, а њихов примарни ефекат је оштећење ДНК опасних микроба. Технологија се примењује за унапређење еколошких стандарда, као што је уклањање токсина из индустријских димњака и деконтаминација отпадних вода и канализационог муља. Комерцијална примена у индустријским условима у прошлости није била тако успешна, као што је била у областима стерилизације медицинских залиха и хране.

Због високог садржаја органске материје – азота, фосфора и многих метала у траговима, који су неопходни за биљке, муљ из комуналних канализационих система може да се употребљава као ђубриво, што представља велики потенцијал за примену у пољопривреди. Међутим, муљ садржи и високу концентрацију патогених микроорганизама, паразита и паразитских јаја који врше притисак на животну средину и изазивају болести. Пре него што се канализациони муљ као ђубриво може користити у пољопривреди на безбедан начин, односно без негативних утицаја на животну средину и здравље људи, неопходно га је дезинфиковати. За потребе стерилизације муља у прошлости су се користиле методе попут спаљивања, док су данас доступне нове технологије, попут гама зрачења (Sameh *et al.*, 2022).

Озрачивање за потребе дезинфекције муља почело је 1973. године, када је индустријска фабрика гама зрака у Гајзелбулаху у Немачкој, користила за изворе гама зрака Co-60 и Cs-137 (Lessel, Suess, 1984). Постројење је третирало до 180 m³/дан муља са 90000 Ci од Cs-60 и 570000 Ci од Cs-137. Слично истраживање је у Сједињеним Америчким Државама спровео „Department of Energy Sandia National Laboratories“ САД, користећи Cs-137 и имао максимални капацитет од 7250 kg/дан (Sivinski, Ahlstrom, 1984).

Током седамдесетих година прошлог века, Трамп и сарадници (Trump, 1981), у Кембриџу, САД, били су пионири у употреби електронских акцелератора за стерилизацију муља. Систем, који је првобитно конструисан 1976. године у постројењу за пречишћавање отпадних вода „Deer Island Wastewater Treatment Plant“ у Бостону, састојао се од акцелератор електрона од 50 kW High Voltage Engineering (HVE) који је могао да озрачи до 375000 l/дан (100000 gpd) муља при дози од 4 kGy. Систем је значајно реконструисан 1980. године како би се повећао капацитет фабрике на 637500

l/дан (170000 gpd). Године 1982. у Мајамију на Флориди, конструисан је упоредив систем са акцелератором од 1,5 MeV, 50 mA за третман муља при протоку од 645 m³/дан. Сличан систем са акцелератором од 1,5 MeV, 37,5 kW и максималном пропусношћу од 45 l/мин инсталиран је у Бразилу (Bogrely *et al.*, 1998). Јапански институт за истраживање атомске енергије „Japan Atomic Energy Research Institute“ (JAERI) ради сличне експерименте од седамдесетих година прошлог века. Васхино (Washino, 1981) је упоредио третман отпадних вода електронским и гама зрацима како би утврдио њихов бактерицидни ефекат. Откривено је веће смањење концентрације микроорганизама код употребе гама зрачења.

Као део сарадње између округа Арлингтон у Вирџинији и Kent State универзитета у Кенту, Охајо, узорак муља је озрачен 2014. године – како би се демонстрирала одрживост и економска корисност методе. Користећи електроне од 3 MeV које обезбеђује „Dynamitron“ акцелератор и брзину протока од 184 l/мин, узорак од 33750 l муља је озрачен при 6,7 kGy и 25,7 kGy, у типичним производним условима, показујући да је процес ефикасан у смањењу концентрације микроорганизама и исплативији од конвенционалних техника дезинфекције (Jean *et al.*, 2015).

Раст становништва у урбаним срединама, виши животни стандард, повећан ниво урбанизације и појачане индустријске активности свеукупно доприносе деградацији животне средине. На пример, фосилна горива – укључујући угаљ, природни гас, нафту, нафту из шкриљаца и битумен – главни су примарни извори енергената који се користе у производњи топлотне и електричне енергије и одговорни су за велики број загађивача и количину полутаната који се емитују у атмосферу преко издувних гасова из индустрије, електрана, система грејања стамбених објеката и возила. Приликом процеса сагоревања, емитују се различити полутанти, као што су летећи пепео (који садржи различите елементе у траговима (тешки метали), SO_x (укључујући SO₂ и SO₃), NO_x (укључујући NO₂ и NO) и испарљива органска једињења (Person, Nam, 1988). Загађење ваздуха узроковано честицама и другим полутантима не само да директно утиче на квалитет ваздуха већ контаминира воду и земљиште, што доводи до њихове деградације. Мокро и суво таложје неорганских полутаната доводи до закишељавања медијума животне средине. Ове појаве имају изузетно негативан утицај на животну средину и здравље људи, животиња и вегетацију. Услед последица високог атмосферског загађења пријављена су широко распрострањена оштећења шума у

Европи и Северној Америци. Многе култивисане биљке су, такође, погођене овом врстом загађења, посебно у својим раним фазама раста. Механизми трансформације полутаната у атмосфери описани су хемијом животне средине. Фотохемија игра важну улогу у овим трансформацијама. У присуству водене паре, SO_x и NO_x се оксидују и том приликом формирају сумпорну и азотну киселину. Стварањем магле и формирањем капљица долази до стварања тзв. киселих киша (тј. киселих падавина). Последњих деценија, истраживања су показала да емисије испарљивих органских једињења у атмосферу могу изазвати оштећење стратосферског озонског омотача и формирање фотохемијског озона на нивоу земље, који за последицу може имати токсичне или канцерогене ефекте на здравље људи и животиња. Ове емисије полутаната у атмосферу доприносе глобалном ефекту стаклене баште, додајући нову димензију деградацији животне средине која је резултат сагоревања поменутих фосилних горива (Tokunaga, Suzuki, 1984). Очекује се да ће угљ, као најпрљавије гориво међу природним угљоводоницима, остати приоритетно главно фосилно гориво и у наредна два века. Уколико не дође до промене правца политике на глобалном нивоу у односима према фосилним горивима, потреба за повећањем експлоатације угља и његова употреба засигурно ће бити неопходна, да би се задовољиле растуће енергетске потребе већег броја становника, ширења урбаних средина и индустрија, како развијених земаља, тако и земаља у развоју. Дакле, постоји хитна потреба за развојем технологија које смањују или минимизирају загађење које је повезано са фосилним горивима и употребом угља. Очекује се да ће драстично повећање светске популације, у комбинацији са индустријализацијом, урбанизацијом, интензивирањем пољопривреде и досадашњим начином живота, довести до глобалне кризе водоснабдевања и додатног загађења питке воде, као ресурса у ком већ данас оскудевамо.

2.3.1. Третман димних гасова

Технологија електронских зрака која се користи за третман димних гасова развијена је у Јапану раних седамдесетих година XX века. Процес је касније коришћен у пилот-постројењима широм света: Немачкој, Јапану, Републици Кореји и Сједињеним Америчким Државама. У Пољској је процес демонстриран у електрани Кавęszyn. Пилот-инсталација са пропусношћу од 20000 Nm³/h, користила је два електронска

акцелератора (50 kW и 700 keV, сваки) (Iller *et al.*, 2002). Недавно је пуштена у рад пилот-инсталација са пропусношћу од 10000 Nm³/h и три акцелератора (30 kW и 800 keV, сваки) изграђена у термоелектрани Marica East 2, у Бугарској, за третман SOx гасова сагоревањем лигнита ниског квалитета, са високим садржајем сумпора. Постројење је показало веома добре процесне параметре, а ефикасност уклањања полутаната креће се од 87 до 97% за SOx и од 85 до 90% за NOx. Принос нуспроизвода је доброг квалитета, са садржајем влаге мањим од 1%. Садржај азота је приближно 21% или више, што је вредност препоручена за употребу у комерцијалном ђубриву. Амонијум сулфат чини 96–97% нуспроизвода, док амонијум нитрат чини још 2% (Chmielewski *et al.*, 1993). Индустијске инсталације за пречишћавање димних гасова електронским снопом су тренутно у функцији у постројењима на угаљ у Пољској и Кини. Убрзивачи инсталирани у електрани Pomorzany у Пољској имају капацитет већи од 1 MW, што је чини највећим објектом за зрачење икада изграђеним. Фабрика Pomorzany третира приближно 270000 Nm³ димних гасова на сат. Уклањање SOx и NOx је веома ефикасно (до 95% за SOx и до 70% за NOx), а нуспроизвод је висококвалитетно ђубриво. Укупни инвестициони трошкови инсталације Pomorzany били су око 20 милиона долара. Капитални трошкови инсталације у фабрици у Џенгдуи, Кина, која је пројектована за третирање CO₂ (користећи акцелераторе са снагом малог капацитета), износили су приближно 11 милиона долара. Друга могућа примена технологије је за уклањање полицикличних ароматичних угљоводоника (ПАН) у постројењима за третман димних гасова и за спаљивање комуналног отпада (Doi *et al.*, 2000). У самом сливу реке Колубаре, поред експлоатације и обраде угља у Рударском басену Колубара, налазе се и постројења за производњу електричне енергије: Термоелектрана „Колубара“, у Великим Црљенима, надомак Лазаревца и Термоелектранае „Никола Тесла А и Б“, у близини Обреновца. Поменуте технологије би могле да се инсталирају и у наведеним постројењима у сливу реке Колубаре, како би се смањило загађење и утицај на животну средину и здравље људи.

2.3.2. Третман отпадних вода

Радијациони третман отпадних вода је нехемијска метода и користи се брзим стварањем краткотрајних реактивних честица које могу да ступе у интеракцију са широким спектром полутаната (Pikaev, 1998). Такви реактивни радикали су јаки

оксидациони или редукциони агенси који могу да трансформишу полутанте у течном отпаду. У Daegu, Република Кореја, изграђено је пилот-постројење опремљено акцелератором електронског зрака за пречишћавање 1000 m³ отпадне воде на дневном нивоу из индустрије бојења текстила (Han *et al.*, 2002; Samra, 2004; Solpan *et al.*, 2004). Његов успешан рад довео је до изградње индустријског постројења за пречишћавање 10000 m³/дан на истој локацији. На основу података добијених у лабораторијским и пилот-експериментима, одређене су дозе од приближно 1-2 kGy за проток од 10000 m³/дан. Због тога је уграђен акцелератор снаге 400 kW, чиме је повећана исплативост и компактност постројења. Цена овог акцелератора велике снаге износила је приближно 2–2.5 милиона долара; а трошкови грађевинског материјала, цевовода, друге опреме и изградње процењени су на 1–1.5 милион долара. Узимајући у обзир додатне трошкове пореза, осигурања и документације (приближно 0.5 милиона долара), укупни трошкови фабрике су били приближно 4–4.5 милиона долара (Lee *et al.*, 2015). Инсталацијом технологије јонизујућег зрачења (Војановска-Сзајка, 2021) на локацијама са развијеном индустријом, укључујући и веће урбане средине дуж слива реке Колубаре, може се решити проблем генерисања контаминираних отпадних вода, које се данас без третмана испуштају у Колубару и њене притоке.

Према Директиви Савета 91/271/ЕЕС од 21. маја 1991. године о третману градских отпадних вода, потреба и свакодневни захтеви за увођењем секундарних постројења за третман градских отпадних вода је све већа, како би се ублажио или тотално избегао штетан утицај на животну средину приликом испуштања лоше третираних или нетретираних градских отпадних вода. У осетљивим областима потребно је увођење строжих мера и третмана, међутим, на неким мање осетљивим местима примарни третман отпадних вода може бити довољан. Опште норме или закони, као и посебна овлашћења треба да важе за индустријске отпадне воде које улазе у системе сакупљања, као и за испуштање отпадних вода и одлагање муља из комуналних постројења за пречишћавање отпадних вода. Биоразградиве индустријске отпадне воде из одређених индустријских сектора, које не пролазе кроз постројења за пречишћавање градских отпадних вода пре испуштања у пријемне воде, треба да буду предмет одговарајућих прописа. Рециклирање муља из третмана отпадних вода треба подстицати, пошто би се испуштање муља у површинске воде требало постепено укинути. Да би се обезбедила заштита животне средине од штетних утицаја испуштања отпадних вода, потребно је правити постројења за пречишћавање, пријем воде и

одлагање муља. Од кључне је важности да се гарантује јавни приступ информацијама о отпадним водама и одлагању муља (форма периодичних извештаја) (CD, 1991).

2.3.3. Третман канализационог муља

Канализација укључује отпадне воде из домаћинства, индустрије или малих предузећа, кишницу и површинске воде. Када се комуналне отпадне воде пречисте, ствара се муљ који садржи велику количину воде и значајну количину контаминације из отпадних вода, као што су бактерије и вируси. Муљеви садрже већу количину воде између 96% и 99%, док је преостали сув део материје, углавном, сачињен од органских материја – око 75%. Концентрације тешких метала и загађења органског порекла укључујући и патогене микроорганизме, потичу из отпадних индустријских и комуналних вода које се испуштају у канализацију. Муљеви садрже и нутријенте – око 3% фосфора, 1,5% азота и калијум.

Канализациони муљ се дефинише као течност са око 4% чврсте материје, која има специфичан мирис (Карловић, 2010). Сами муљеви се третирају и у сировом стању депонују или рециклирају. Рециклирани муљ се у виду пелета користи у пољопривреди као ђубриво.

Пошто се отпадне воде обично испуштају у водотокове или у велике акумулације, муљеви су још већи проблем, јер је њихов утицај мање очигледан. Муљеви се таложе углавном на одређеним локацијама где су у контакту са земљиштем, а због тога што су загађења у муљевима у концентрисанијем облику, очигледнији су и штетни утицаји на животну средину. Велики градови представљају јединствену опасност, јер генеришу значајне количине отпадних вода и муљева, који се на јединственој локацији акумулирају у великим количинама.

Основна сврха термичких поступака је да се искористе калоричне вредности муљева на начин којим емисије имају минималан негативан утицај на животну средину. Ако се муљеви не могу користити у пољопривреди, онда се:

– претварају у чврсти филтерски „колач“, који се затим одлаже на депонију;

– компресују и сагоревају, након чега се одлажу на депонију.

Неопходно је да се у обзир узму сви параметри приликом коришћења термичких процеса и потребе за додатном енергијом неопходном за генерисање високих температура, високи трошкови рада и одржавања постројења за сагоревање, потреба за постројењем за пречишћавање гасова генерисаних сагоревањем, као и додатна контрола загађења из емисија које потичу од алтернативних горива (Пиуковић-Бабичковић *et al.*, 2016).

Канализациони муљ, као носилац фекалног отпада, представља извор разних патогена које треба контролисати и деконтаминирати пре фазе безбедног одлагања. Чишћење и одржавање канализационих система је вишестепени процес који укључује примарни и секундарни третман канализационог муља.

Примарни третман врши сепарацију и уклања најтеже чврсте материје, док секундарни третман укључује процес одвајања активног муља. Активни муљ се састоји од флокула органске материје и бактерија. То је пахуљаста комбинација биолошке масе (микроорганизама) и нераспаднутих органских и неорганских једињења добијених из отпадних вода. Микроорганизми пречишћавају отпадну воду хранећи се органским супстанцама у њој. Бактерије у љуспицама муља су слојевите и могу бити обложене слузавим штитом. Пахуље имају сунђерасту структуру, што објашњава њихову велику површину, где 1 грам сувог муља има површину од око 100 m². Пахуљице муља имају висок капацитет апсорпције због свог негативног наелектрисања.

Филтрација отпадних вода се одвија на три начина: пешчаним филтерима, хемијским третманом и дезинфекцијом.

Муљ се дезинфикује на следеће начине: дозирањем натријум хипохлорита (Жавелова вода), хлорисањем гасом хлора или УВ дезинфекцијом. УВ дезинфекција има ограничавајуће факторе попут трошкова изградње и оперативног одржавања, а супериорна је у погледу технологије.

Канализациони муљ је принос чврстог отпада након завршетка секундарне фазе третмана отпадних вода. Годишња производња муља из канализације се повећава са

бројем становништва у урбаним просторима широм света. Са повећањем генерисања ове врсте отпада из године у годину све строжи закони о квалитету отпадне воде ступају на снагу. Сједињене Америчке Државе и земље Европе заједно генеришу приближно 13800 Mt сувог канализационог муља годишње. Третиран муљ је богат извор многих микронутријената и вредан извор фиксног азота, што га чини вредним ђубривом и ресурсом. Тренутно се око 41% генерисаног муља у Сједињеним Америчким Државама користи за примену на земљишту, док се у европским земљама, искоришћеност за примену на земљишту креће од 13% у Аустрији до приближно 80% у Луксембургу и Португалији. Уједињено Краљевство користи око 55%, а Француска око 50% генерисаног муља за примену на пољопривредном земљишту (UNEP, 1999). Забрињавајуће је присуство патогених микроорганизама у канализационом муљу у погледу његове употребе у пољопривреди. Тренутно, топлотна обрада и третирање кречном водом су методе које се најчешће користе за прераду канализационог муља, међутим, други процеси су у фази истраживања. Зрачење канализационог муља је обећавајућа технологија за третман муља. Одобрена је од стране америчке Агенције за заштиту животне средине као метод за генерисање муља 'класе А' који је безбедан за пољопривредну употребу. Постројење за третман течног муља коришћењем гама зрачења из радиоактивног извора ^{60}Co је у функцији у Vadodari, Индија, од 1992. (Rawat *et al.* 1997; Sabharwal *et al.*, 2004; Gautam *et al.*, 2005). Постројење је пројектовано за третман 110 m³ муља из конвенционалног постројења за пречишћавање на дневном нивоу. Оперативно искуство постројења показало је да је процес једноставан, ефикасан и лако се интегрише у постојеће постројење за пречишћавање отпадних вода, а муљ третиран зрачењем може се користити као ђубриво у пољопривреди. Слично, акцелератор електронског снопа се такође може користити за третирање исушеног муља (Podzorova *et al.*, 1992). По карактеристикама и резултатима, поменута технологија би била идеална за третман отпадног муља генерисаног у урбаним срединама Колубарског слива. Као што је наведено у раду, муљ је богат микронутријентима и вредан је извор фиксног азота. Након што је третиран зрачењем, безбедан је за употребу као ђубриво у пољопривреди.

Количина енергије коју апсорбује муљ одређује ефекат зрачења на смањење бактеријског оптерећења и пречишћавање муља. Ова енергија се користи за нарушавање структурног интегритета ДНК у бактеријама, паразитима и вирусима, што резултира њиховом делимичном или трајном инактивацијом и смрћу. Количина

енергије апсорбоване у запремини муља подељена са масом те запремине мери се у килограмима (kGy). Доза од неколико kGy може бити довољна да разбије молекуле ДНК и инактивира или убије вирус или бактерију.

До недавно, ефекти зрачења на оптерећење бактеријама и уклањање штетних хемијских једињења у муљу су проучавани само у малим узорцима муља озраченим у лабораторијским условима, при чему се већина студија фокусира на микробиолошке или хемијске ефекте зрачења (Reinthal et al., 2013; Young et al., 2013; Kotowska et al., 2012). Прерада и одлагање муља из отпадних вода је велики проблем широм света, посебно у великим градовима, као што су Вашингтон и Токио. За ове потребе се развијају нова технолошка решења ради безбедног одлагања канализационог муља. Међутим, муљ се прво мора претворити у биочврсту материју класе А, која је врста прерађеног муља који се сматра прихватљивим за људе и животиње. Последњих година, технологија електронског снопа се показала као исплатива опција за испуњавање ових прописа, са значајним смањењем броја потенцијално штетних бактерија, попут фекалних колиформних бактерија и јајних ћелија хелминта (*Ascaris*), а обе су уобичајени полутанти у канализационом муљу.

Фекалне колиформне бактерије су врста бактерија које у животну средину испуштају људи, дивље животиње и говеда, у виду измета. Људи и топлокрвне животиње у свом дигестивном тракту поседују ове бактерије. Они су симптоматични за присуство људских и животињских патогена у канализационом муљу, укључујући неке сојеве *Escherichia coli*, *Shigella flexneri* и *Salmonella typhimurium*. Међу фекалним колиформима, сој *E. coli*, који је повезан са бројним епидемијама, последњих година привукао је пажњу јавности. *E. coli* је откривена у води за пиће и поврћу, што је довело до тога да пацијенти доживе грчеве у стомаку, повраћање и кржаву дијареју. У већини случајева, међутим, инфекције сојем *E. coli* биле су умерене или асимптоматске. Већина особа заражених *S. typhimurium* има дијареју, грчеве у стомаку и грозницу, што може довести до исцрпљености и дехидрације. Јак бол у стомаку, дехидрација, тешка дијареја и грозница су сви симптоми инфекције *S. flexneri*. Пацијенти са шигелозом се лоше осећају и остају у кревету током трајања инфекције. У пољопривредним областима где се узгаја стока, поред присуства фекалних колиформа, могуће је постојање и јајних ћелија *Ascaris* које се, када их човек или животиња прогутају – излегу и развију у одрасле глисте *Ascaris lumbricoides* које изазивају болове у стомаку,

мучнину, повраћање и исцрпљеност. Паразити се могу излучити путем измета и/или повраћања код пацијената који су у великој мери заражени црвима *Ascaris*.

Технологија електронских зрака могла би се користити за смањење концентрације испарљивих органских сулфида и других испарљивих органских једињења у канализационом муљу, који су одговорни за непријатан мирис. Третман муља електронским снопом није енергетски интензиван процес и он има компактан отисак и типично кратке периоде обраде. Главни ефекат зрачења на канализациони муљ је радиолиза воде.

Ефекат зрачења електронским снопом на смањење бројности микроба у муљу постиже се двоструким дејством зрачења на муљ (Wang, Wang, 2007). Први је директан ефекат зрачења на микроорганизме, који нарушава структурни интегритет молекула ДНК, убијајући их. Други је поменути индиректни ефекат настао радиолизом воде. Резултат зрачења изазива оксидативно оштећење нуклеинских киселина, протеина и липида у микроорганизмима, што доводи до смрти. Како се доза зрачења повећава, повећава се ефикасност убијања микробиолошких популација, укључујући и бактерије.

Вредност D10 представља дозу зрачења неопходну да се убије 90% популације микроорганизама присутних у узорку муља и даје бољу представу о ефикасности зрачења снопа електрона у неутралисању микроорганизама. Нивои D10 могу се драматично разликовати од микроба до микроба због разлика у структурној сложености. Као резултат, процењена је вредност D10 за *Ascaris* у опсегу од 0,38 kGy (Shamma, Al-Adawi, 2002). Ове вредности D10 су утврђене на 0,31 и 0,35 kGy за додатне микробиолошке загађиваче муља, укључујући *S. Typhimurium* и *E. coli*. Engohang-Ndong и његови истраживачи сарадници су недавно показали да би се технологија електронских зрака могла користити за искорењивање могућих микробних патогена из канализационог муља у индустријском обиму (Jean *et al.*, 2015). Истраживачки тим из Сједињених Америчких Држава је открио да је доза од 25,6 kGy била довољна да се искорене јајне ћелије *Ascaris*-а до нивоа који се не може детектовати постојећим методама за бројање јаја хелминта у канализационом муљу. При таквој дози зрачења електронског снопа, могуће је створити муљ класе А. Да би муљ био класификован као биочврста материја класе А, муљ из канализације мора да садржи мање од једне јајне ћелије *Ascaris*-а на четири грама тежине сувог муља, према

правилима америчке Агенције за заштиту животне средине „US EPA“. Доза потребна за претварање муља из канализације у биочврсте материје класе А за уклањање фекалних колиформа је знатно нижа од стандарда „US EPA“. Engohang-Ndong и колеге су израчунали експерименталну дозу од 6,8 kGu. Претварањем муља из канализације у биочврсту материју класе А смањује се ризик да јаја хелминта контаминирају канализациони муљ из густо насељених области. Ови муљеви се потом могу користити у пољопривреди, са великом корисношћу и енергетском ефикасношћу.

Директива Савета 86/278/ЕЕС од 12. јуна 1986. године о заштити животне средине, а посебно земљишта, прописује када се отпадни муљ може користити у пољопривреди. Употреба канализационог муља је регулисана како би се избегао штетни утицај на земљиште, вегетацију, животиње и људе, а истовремено се подстиче његово адекватно одлагање. Пошто присуство неких тешких метала у усевима може бити опасно како за биљке, тако и за људе, неопходно је утврдити потребне граничне вредности ових елемената у земљишту. Када концентрација ових метала у земљишту пређе граничне вредности, захтева се забрана употребе муља. У том циљу је неопходно ограничити количину тешких метала која се додаје у култивисано земљиште, постављањем максималних дозвољених концентрација за годишње количине муља које се користе. Такође је потребно обезбедити да граничне вредности за концентрацију тешких метала, које могу бити придодате земљишту, не прелазе десетогодишњи просек. Пре употребе у пољопривредне сврхе, муљ мора проћи кроз постројење за третман. Адекватним руковањем и поштовањем прописаних норми приликом примене, необрађени муљ под одговарајућим условима не представља опасност по здравље људи и животиња. Између употребе муља и стављања залиха на пашњак, жетве крмних усева или одређених усева који су обично у директном додиру са земљиштем и који се нормално конзумирају сирови – обавезно мора проћи одређени временски период. Осим у случају узгоја воћарских и повртарских култура, забрањена је употреба муља током саме вегетације. Муљ би требало да се користи само у окружењима која врше мониторинг квалитета земљишта, површинских и подземних вода. Муљ из малих постројења за пречишћавање отпадних вода, која првенствено пречишћавају отпадне воде из домаћинства, представља низак ризик по здравље људи, животиња и биљака или животну средину. Технички и научни напредак може довести до измене неких захтева Директиве (CD, 1986).

2.3.4. Санација земљишта

Агенција за заштиту животне средине је утврдила да полихлоровани дибензодиоксини (PCDD) (Hirota *et al.*, 2003) и полихлоровани дибензофурани (PCDF) представљају озбиљан ризик по јавно здравље и успоставила је ограничења за складиштење, транспорт и одлагање отпадних материјала који садрже диоксине. Утврђена је граница од 1 ppb за 2,3,7,8-тетрахлородибензо-п-диоксина (TCDD), који је најтоксичнији члан ове породице једињења. Студије су показале да се TCDD може трансформисати у производе занемарљиве токсичности радиолизом гама зрацима из ^{60}Co . Уништавање више од 98% полутанта постигнуто је дозом од 800 kGy у земљишту које садржи 100 ppb TCDD. Додатак полутаната као што су дихло-робензен и хексахлоробензен није утицао на резултат. Додатак 25% воде и 2.5% неонског сурфактанта био је користан за проучавање земљиште (Hilarides *et al.*, 1994; Cooper *et al.*, 1998; Станојковић-Себић *et al.*, 2015).

2.3.5. Стерилизација земљишта

Употреба гама зрачења као метода за стерилизацију земљишта у лабораторијским условима је препоручена пре свих других техника стерилизације из разлога што овај метод након примене не оставља штетне последице на третирано земљиште. Типично гама зрачење од 10 kGy ће елиминисати све микроорганизме, плесни и бескичмењаке у већини третираних земљишта. Већина бактерија у земљишту се елиминише дозом од 20 kGy, међутим, доза већа од 70 kGy је неопходна да би се елиминисале одређене бактерије које су отпорне на зрачење (McNamara *et al.*, 2003).

Поред стерилизације земљишта у експерименталним условима, све више се примењује метода излагања земљишта гама зрачењу у циљу неутрализације микроорганизама и у индустријским условима.

Стерилизација земљишта употребом гама зрачења се користи за елиминисање или смањење биолошке активности, на пример у студијама поновне колонизације (Coleman, MacFayden, 1966; Degrange *et al.*, 1997), ензимским тестовима земљишта

(Okazaki *et al.*, 1983) и одређивању хемијске деградације, сорпције и мобилности (Tebbe, Reber, 1991; Sandoli *et al.*, 1996; Luo *et al.*, 2001).

Доступан је широк спектар метода стерилизације и свака има свој секундарни ефекат на земљиште, посебно на његова хемијска и физичка својства. Идеална метода стерилизације је она која је довољна за постизање потпуне елиминације организама без негативног утицаја на својства земљишта. Liegel (1986), Wolf и Skipper (1994) и Trevors (1996) анализирали су различите методе стерилизације, укључујући гама зрачење. Један број ових студија сугерише да је гама зрачење веома ефикасна метода (Ramsay, Bawden, 1983; Stroetmann *et al.*, 1994). Гама зрачење може да има мањи утицај на хемијска и физичка својства земљишта, иако је ефикасан биоцид. Главна алтернатива гама зрачењу је употреба фумиганата (нпр. метил бромид), и док су ефикасни, они могу да остављају токсичне остатке за собом (Епо, Рорепое, 1964). Алтернативно, аутоклавирање је широко коришћено, међутим, ова метода ремети физичка својства земљишта (Lotrario *et al.*, 1995).

Са повлачењем метил бромида и других фумиганата широм света од 2015. године (Bell, 2000), само гама зрачење се чини као практично решење за стерилизацију великих количина земље. Присуство комерцијалних постројења за стерилизацију широм света чини овај процес доступним.

Последњих година третман земљишта гама зрачењем се примењује у низу различитих области. Тренутно се стерилизација заснована на гама-зрачењу користи у експериментима биоакумулације и сорпције (Clegg *et al.*, 2014; Kelsey *et al.*, 2010; IPE, 2011), јер се генерално сматра да је мање деструктивна у поређењу са аутоклавирањем или коришћењем хемијских средстава (McNamara *et al.*, 2003).

3. МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА

3.1. Прикупљање података, мерења и запажања

Прикупљање података обухвата следеће елементе:

- опште податке о сливу;
- информације о квалитету земљишта;
- информације о концентрацијама загађујућих материја у сливу;
- информације о могућим изворима контаминације дуж тока.

Коришћене су следеће методе: даљинска детекција, картографска идентификација, моделовање припремних карата, методе процене и мерења, географски информациони систем (ГИС) и картирање. Истраживање почиње употребом програма SASPlanet, који се користи за лоцирање Републике Србије и подручја интересовања помоћу сателитских снимака (Josimović, 2003).

Подручје истраживања је приказано на референцираном сателитском снимку, који се затим може користити у ГИС програмима (Joksić, Vajat, 2004).

У ГИС програм ArcMap се уносе сачувани референцирани сателитски снимци. Координатни систем је одређен пре додавања сателитских референтних снимака у софтвер (UTM, WGS 1984, зона N34). Тада почиње рад са снимцима и формирање карата. Након тога, апликација ArcCatalog се користи за прављење shapefile-ова. За сваку локацију или објекат се креира посебан shapefile. Shapefile-ови се чувају у фолдерима, сваки са посебним именом. Назив, тип, експлоатација, област, обим и координате X и Y су атрибути фајлова облика, који имају карактер полигона. Координатни систем shapefile-ова идентичан је координатном систему (UTM, WGS 1984, зона N34).

Након креирања shapefile-ова, они се поново убацују у ArcMap, где почиње цртање shapefile-ова, мери се површина жељене области, израчунава се њена величина, а

жељени подаци се уносе и снимају. Све прикупљене информације помоћи ће да се добије просторни приказ истраживаног подручја (Вакањац, Ристић Вакањац, 2015).

3.2. Извори просторних података

Коришћене су различите методе за прикупљање просторних података у зависности од врсте и квалитета података који су потребни, односно од тога који подаци тренутно постоје:

- скениране су аналогне карте за добијање растерских података;
- дигитализоване су аналогне карте за добијање векторских података;
- претварани су дигитални подаци из једног формата у други;
- прикупљани су нови подаци путем картирања.

Пошто различите организације користе различите формате података, припремљен је пренос података како би ГИС база правилно функционисала. У ове сврхе коришћен је интерфејс за експортовање просторних података из једног система у други. Пошто не постоји стандардизација формата, не постоји ни начин да се подаци пренесу, а да се неки не изгубе (Томић, 2012).

Коришћени параметри који карактеришу квалитет података су:

- степен усклађености података у бази података са постојећим стањем на терену;
- растерски подаци (тачност се односи на количину детаља који се могу видети, док се резолуција односи на количину детаља који се може посматрати; како ниједан мерни уређај није бесконачно прецизан и како се подаци генерализују да би конструисали базе података, резолуција је била ограничена).

Цела зона која се обрађује, као и сви објекти и њихова својства и вредности су покривени. Тачност података је проверена коришћењем ГИС софтвера. Остали елементи квалитета су брзо процењени на мањем узорку података. Такође су инсталирани програми који раде у позадини и проверавају процесе ГИС софтвера (Вакањац *et al.*, 2016).

3.2.1. Просторни подаци

Коришћени су подаци из различитих извора који су одговарали различитим референтним системима и пројекцијама. Неки подаци су били пројектовани у UTM, док су други били у Gauss-Krieger пројекцији или референтно фиксирани на више меридијана унутар исте пројекције. Важно је превести или конвертовати податке у локални координатни систем пре него што се унесу у ГИС окружење (Вакањац, Чопорда Мاستиловић, 2010).

Коришћене су две врсте просторних података: векторски и растерски подаци. Главни коришћени графички елементи у векторским подацима су тачке, линије и површине са својим координатама. За потребе израде карата коришћен је референтни систем и пројекција (UTM,WGS84,34N).

3.2.1.1. Векторски подаци

У ГИС-у је коришћена тополошка структура података за формирање векторских података. Топологија графичког елемента описује његов однос према другим графичким елементима у његовој непосредној близини. Да би открили најбољи пут између две тачке, коришћене су тополошке информације. Векторски подаци заузимају мало простора за складиштење док нам омогућавају креирање тачних и занимљивих графичких приказа. Тачке, линије и полигони су три типа приказа графичких информација које су коришћене у ово раду. За потребе рада су коришћене тачке за представљање локација узорковања, линије за представљање речног слива, путева и пруга и полигони за представљање урбаних и индустријских површина.

3.2.1.2. Растерски подаци

Растерски подаци су коришћени у ГИС-у за креирање растерских карата, ортофото и сателитских снимака. Састоје се од редова и колона ћелија (пиксела). Свака ћелија има своје X-Y координате и вредност. За мање величине коришћене су растерске карте, посебно у области проучавања и планирања изласка на терен и израде пресека стања животне средине на изабраним локацијама у сливу. Сложени аналитички процеси су олакшани растерским подацима (нпр. просторне, геолошке и хидролошке анализе). Штампана верзија има лошији изглед него када се користе векторски подаци.

3.2.2. Растерске карте

Растерске карте су креиране скенирањем и геореференцирањем аналогних карата или трансформацијом векторских података. Коришћене су приликом приказа само једног типа класификације, попут представљања простора од интереса, хидрографске мреже, типа земљишта, текстуре земљишта, намене земљишта, типа водене масе, класе пута итд.

3.2.2.1. Геореференцирање

Положај геоподатака на земљи описан је референтним системом. Геодетски подаци (референтни елипсоид и локална фиксација на њему), координатни систем и пројекција су део система. Скенирање или растер је коришћен за претварање аналогних планова и карата у дигитални формат. Превод из растера у жељени координатни систем се користи за геореференцирање скенираних планова и карата. Софтвер за геореференцирање је коришћен за геореференцирање места чије су координате познате у жељеном координатном систему. Планови и карте су коришћени у ГИС сврхе, након што су геореференцирани.

3.2.2.2. Ортофото

Фотографије из ваздуха морају бити исправљене, јер немају уједначену величину. Диференцијална ректификација је метода која обезбеђује одличан геометријски квалитет. Као резултат, слике смо пројектовали у деловима на X-Y равни помоћу ове методе (ортопројекција). Ортофото нам је олакшао визуелну оријентацију, а истовремено пружио додатне топографске податке.

3.2.2.3. Дигитални модел терена

Са тродимензионалним тачкама, дигитални модели терена приказују површину терена (X, Y, Z координате). Тродимензионални приказ је коришћен помоћу софтвера за визуелизацију. Основни просторни подаци у ГИС-у су подаци које обезбеђује јавни геодетски орган и прописани су законом. Републички геодетски завод је надлежна институција у Републици Србији (РГЗ). Званичне податке које даје РГЗ треба користити за планирање и тематске податке у ГИС-у (Josimović, 2008).

3.3. Узорковање

Приликом узорковања земљишта вођен је теренски дневник са уносом свих релевантних информација везаних за сваку узорковану тачку, као и за временске прилике у периоду када је узорковање вршено. Приликом узорковања на свакој локацији је одмах прављена и интерактивна база података са уносом релевантних података и фотографија. Свака тачка узорковања добија своје име, координате узорковања, време узорковања и сет фотографија. Узорковање земљишта обављено је у сливу реке Колубаре, у периоду август–септембар 2020. године, са средњом дневном температуром од 20.2°C, просечном дневном светлошћу 11.75 h, просечном влажношћу ваздуха од 69% и просечном количином падавина од 32 mm. Узорци су прикупљени на 48 тачака: прва на изворишту реке Колубаре и последња на њеном ушћу у реку Саву, као и на 46 тачака дуж слива. Узорци земљишта су сакупљани на дубинама од 20 cm и 50 cm (слике 16 и 17). Маса узорака била је 2 kg. Након узорковања, узорци земљишта

су просејани кроз мрежу пречника 2 mm (Page *et al.*, 2009), и чувани на сувом и тамном месту.



Слика 16. Узорковање са Тачке 1 на дубини од 20 cm (лична архива)

Слика 17. Узорковање са Тачке 5 на дубини од 50 cm (лична архива)

Опис тачака узорковања (слика 18):

- Тачка узорковања 1 – Теренски назив Колубара 39 (UTM координате: E 409870 m, N 4901541 m, надморска висина 193 m) – узорак је узет на ушћу две саставне реке: Обнице и Јабланице, које чине реку Колубару у близини центра града Ваљева.
- Тачка узорковања 2 – Теренски назив Колубара 38 (UTM координате: E 411267 m, N 4902313 m, надморска висина 185 m) – узорак је узет на уређеном делу речне терасе Колубаре у центру Ваљева.
- Тачка узорковања 3 – Теренски назив Колубара 37 (E 413176 m, N 4902302 m, надморска висина 172 m) – узорак је узет на локацији урбаног дела града Ваљева.
- Тачка узорковања 4 – Теренски назив Колубара 36 (E 414809 m, N 4902869 m, надморска висина 164 m) – узорак је узет на локацији ушћа реке Љубостиње у реку Колубару, низводно од локалне депоније у центру Ваљева.
- Тачка узорковања 5 – Теренски назив Колубара 35.3 (E 415957 m, N 4903106 m, надморска висина 161 m) – узорак је узет на локацији Белошевац, низводно од урбаног дела Ваљева и уређеног корита реке Колубаре.

- Тачка узорковања 6 – Теренски назив Колубара 35.2 (E 417231 m, N 4903158 m, надморска висина 156 m) – узорак је узет на локацији Шушеока, у индустријском предграђу Ваљева.
- Тачка узорковања 7 – Теренски назив Колубара 35.1 (E 419073 m, N 4903407 m, надморска висина 150 m) – узорак је узет у близини ушћа реке Бање у реку Колубару.
- Тачка узорковања 8 – Теренски назив Колубара 35 (E 420402 m, N 4904172 m, надморска висина 145 m) – узорак је узет на локацији Шушеока, код срушеног моста на реци Колубари.
- Тачка узорковања 9 – Теренски назив Колубара 34 (E 422392 m, N 4904432 m, надморска висина 139 m) – узорак је узет на локацији Дивци, у руралном делу слива реке Колубаре.
- Тачка узорковања 10 – Теренски назив Колубара 33 (E 423969 m, N 4904412 m, надморска висина 136 m) – узорак је узет на локацији Радобић, у руралном делу слива реке Колубаре.
- Тачка узорковања 11 – Теренски назив Колубара 32 (E 425744 m, N 4906085 m, надморска висина 131 m) - узорак је узет на локацији Веселиновац, у руралном делу слива реке Колубаре, низводно од ушћа Лепенице и Рибнице у реку Колубару.
- Тачка узорковања 12 – Теренски назив Колубара 31 (E 425844 m, N 4906627 m, надморска висина 129 m) - узорак је узет на локацији Веселиновац, у руралном делу слива реке Колубаре.
- Тачка узорковања 13 – Теренски назив Колубара 30 (E 426017 m, N 4908709 m, надморска висина 129 m) – узорак је узет на локацији Лозница, у руралном делу слива реке Колубаре.
- Тачка узорковања 14 – Теренски назив Колубара 29 (E 427448 m, N 4909905 m, надморска висина 123 m) – узорак је узет на локацији Словац, код моста на реци Колубари, ушће реке Топлице у Колубару.
- Тачка узорковања 15 – Теренски назив Колубара 28.2 (E 428691 m, N 4910728 m, надморска висина 119 m) – узорак је узет на локацији Непричава, у руралном делу слива реке Колубаре.
- Тачка узорковања 16 – Теренски назив Колубара 28.1 (E 429063 m, N 4910222 m, надморска висина 117 m) – узорак је узет на локацији Непричава, у руралном делу слива реке Колубаре.

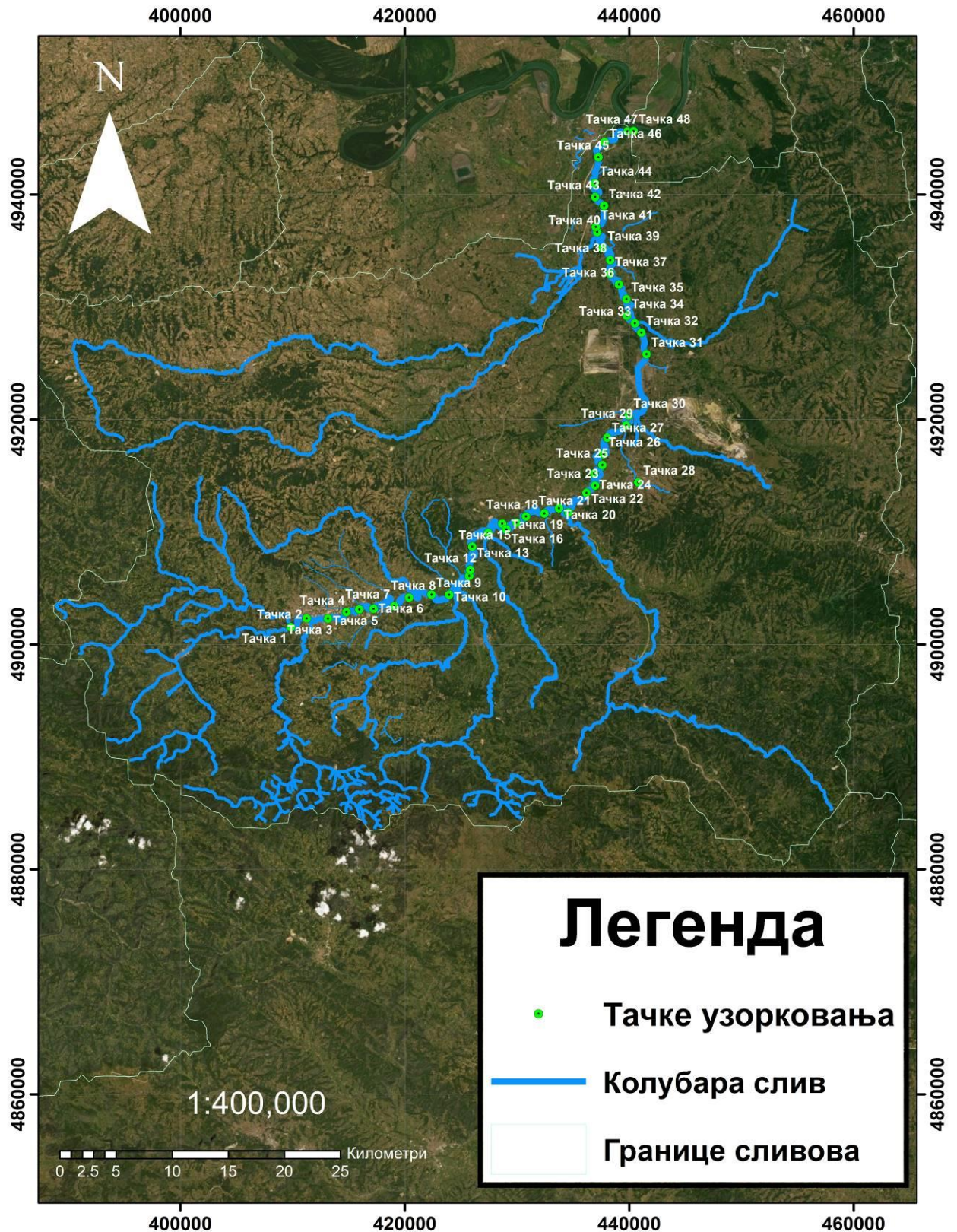
- Тачка узорковања 17 – Теренски назив Колубара 28 (E 429973 m, N 4910814 m, надморска висина 114 m) – узорак је узет на локацији Непричава, у руралном делу слива где се може прећи реке Колубаре.
- Тачка узорковања 18 – Теренски назив Колубара 27 (E 430811 m, N 4911380 m, надморска висина 112 m) – узорак је узет на локацији Лајковац, у урбаном делу слива где је у току уређивање тока реке Колубаре.
- Тачка узорковања 19 – Теренски назив Колубара 26 (E 432450 m, N 4911657 m, надморска висина 110 m) – узорак је узет на локацији Лајковац, код моста на реци Колубари, крај дела реке Колубаре уређеног као купалиште и викенд насеље.
- Тачка узорковања 20 – Теренски назив Колубара 25 (E 433753 m, N 4912103 m, надморска висина 106 m) – узорак је узет на локацији Лајковац, код моста на реци Колубари, на почетку дела реке Колубаре уређеног као купалиште и викенд насеље.
- Тачка узорковања 21 – Теренски назив Колубара 24.1 (E 434611 m, N 4911729 m, надморска висина 112 m) – узорак је узет на локацији Ћелије, код ушћа реке Љиг у реку Колубару.
- Тачка узорковања 22 – Теренски назив Колубара 24 (E 436200 m, N 4913471 m, надморска висина 102 m) – узорак је узет на локацији Петка, предграђу Лазареваца.
- Тачка узорковања 23 – Теренски назив Колубара 23 (E 436983 m, N 4914129 m, надморска висина 100 m) – узорак је узет на локацији Јабучје, предграђу Лазареваца.
- Тачка узорковања 24 – Теренски назив Колубара 22 (E 436902 m, N 4915180 m, надморска висина 100 m) – узорак је узет на локацији Јабучје, предграђу Лазареваца.
- Тачка узорковања 25 – Теренски назив Колубара 21 (E 437618 m, N 4915943 m, надморска висина 98 m) – узорак је узет на локацији Јабучје, предграђу Лазареваца.
- Тачка узорковања 26 – Теренски назив Колубара 20.1 (E 437726 m, N 4916923 m, надморска висина 98 m) – узорак је узет на локацији Јабучје, предграђу Лазареваца.
- Тачка узорковања 27 – Теренски назив Колубара 20 (E 438042 m, N 4918379 m, надморска висина 95 m) – узорак је узет на локацији Скобаљ, предграђу Лазареваца, на позицији пре проласка Колубаре кроз уређен део копова угља Колубара.
- Тачка узорковања 28 – Теренски назив Лукавица 4 (E 440828 m, N 4914415 m, надморска висина 99 m) – узорак је узет на локацији низводно од насеља Лазаревац. Кроз насеље Лазаревац протиче река Лукавица. Приметно је загађење (биолошки отпад, замућеност воде).
- Тачка узорковања 29 – Теренски назив Колубара 19 (E 439755 m, N 4919475 m, надморска висина 94 m) – узорак је узет недалеко од ушћа реке Лукавице на ушћу

реке Пештан у Колубару. Река Пештан и река Колубара су у протеклом периоду на овим просторима измештене из својих природних токова због потребе експлоатације лигнита.

- Тачка узорковања 30 – Теренски назив Колубара 18 (E 439973 m, N 4920354 m, надморска висина 94 m) – узорак је узет на локацији Вреоци, предграђу Лазаревца.
- Тачка узорковања 31 – Теренски назив Колубара 17 (E 441544 m, N 4925803 m, надморска висина 86 m) – узорак је узет на локацији Велики Црљени, предграђу Лазаревца, код моста на реци Колубари.
- Тачка узорковања 32 – Теренски назив Колубара 16 (E 441087 m, N 4927716 m, надморска висина 86 m) – узорак је узет на локацији низводно од Рударског басена Колубара (отворени копови на којима се експлоатише лигнит).
- Тачка узорковања 33 – Теренски назив Колубара 15 (E 440513 m, N 4928554 m, надморска висина 86 m) – узорак је узет на локацији где се река Бељаница улива у Колубару. Неколико километара узводно, налази се Термоелектрана Колубара.
- Тачка узорковања 34 – Теренски назив Колубара 14 (E 439805 m, N 4929213 m, надморска висина 83 m) – узорак је узет на локацији Степојевац, у руралном делу слива реке Колубаре.
- Тачка узорковања 35 – Теренски назив Колубара 13 (E 439767 m, N 4930692 m, надморска висина 83 m) – узорак је узет на локацији Пољане-Конатице, код моста у руралном делу слива реке Колубаре.
- Тачка узорковања 36 – Теренски назив Колубара 12 (E 439091 m, N 4932009 m, надморска висина 84 m) – узорак је узет на локацији Пољане, у руралном делу слива реке Колубаре.
- Тачка узорковања 37 – Теренски назив Колубара 11.1 (E 438299 m, N 4932954 m, надморска висина 81 m) – узорак је узет на локацији Лисо Поље, у руралном делу слива реке Колубаре.
- Тачка узорковања 38 – Теренски назив Колубара 11 (E 438318 m, N 4934179 m, надморска висина 81 m) – узорак је узет на локацији Лисо Поље, у руралном делу слива реке Колубаре. На локацији се налазе чека за лов на патке и место за риболов.
- Тачка узорковања 39 – Теренски назив Колубара 10 (E 437638 m, N 4935240 m, надморска висина 77 m) – узорак је узет на локацији Пољане, код моста у руралном делу слива реке Колубаре.

- Тачка узорковања 40 – Теренски назив Колубара 9 (E 437166 m, N 4936662 m, надморска висина 76 m) – узорак је узет на локацији Дражевац, у руралном делу слива реке Колубаре, недалеко од ушћа Тамнаве у Колубару.
- Тачка узорковања 41 – Теренски назив Колубара 8 (E 437052 m, N 4937122 m, надморска висина 76 m) - узорак је узет даље од саме обале због непроходног терена и отежаног прилаза обали Колубаре.
- Тачка узорковања 42 – Теренски назив Колубара 7 (E 437770 m, N 4938992 m, надморска висина 80 m) - узорак је узет у руралном делу Обреновца.
- Тачка узорковања 43 – Теренски назив Колубара 6 (E 436974 m, N 4939775 m, надморска висина 76 m) – узорак је узет недалеко од заштићеног природног добра Јозића колибе, на обали реке Колубаре.
- Тачка узорковања 44 – Теренски назив Колубара 5 (E 436965 m, N 4941019 m, надморска висина 77 m) – узорак је узет на обали реке Колубаре, прекопута депоније Обреновац, Гребача.
- Тачка узорковања 45 – Теренски назив Колубара 4 (E 437258 m, N 4943323 m, надморска висина 74 m) - узорак је узет на Белом Пољу, где магистрални пут Милош Велики пресеца реку Колубару, неколико километара северно од насеља Обреновац.
- Тачка узорковања 46 – Теренски назив Колубара 3 (E 437823 m, N 4944668 m, надморска висина 74 m) - узорак је узет на обали реке Колубаре, у близини моста на Обреновачком путу.
- Тачка узорковања 47 – Теренски назив Колубара 2 (E 439862 m, N 4945621 m, надморска висина 72 m) – узорак је узет на обали реке Колубаре у Баричу, код моста на ауто-путу Милош Велики.
- Тачка узорковања 48 – Теренски назив Колубара 1 (E 440398 m, N 4945644 m, надморска висина 70 m) – узорак је узет на ушћу реке Колубаре у реку Саву, где постоје индустријска зона и многе фабрике (Еко-Дунав, Меј Та Еуро, МТЕ Фабрика аутомобилских делова).

Карта приказа кључних тачака узорковања дуж слива реке Колубаре дата је на Слици 18.



Слика 18. Просторни распоред тачака узорковања у сливу реке Колубаре (Substrate map: software SAS.Planet.Nightly.201020.10106, Basemap: Bing Maps-satellite zoom 15).

3.4. Озрачивање узорака гама зрацима

Озрачивање узорака земљишта обављено је у Радијационој јединици Института за нуклеарне науке „Винча“, у Београду. Радијациона јединица је изграђена у оквиру реализације пројекта Програма Уједињених нација за развој (Пројекат UNDP YUG/74/025) и Међународне агенције за атомску енергију (IAEA) и пуштена у рад 1978. године. Радијационо постројење пројектовала је фирма ”Commission Energie Atomique and Conservatome”, из Француске, за активности извора ^{60}Co (вештачки радиоактивни изотоп кобалта) до 1 mCi. Намењена је првенствено за индустријску стерилизацију медицинске опреме за једнократну употребу. Објекат ове врсте је јединствен у Србији, и као незаобилазни део привреде обједињује процес производње и обезбеђује потпуну стерилизацију пре дистрибуције.

Озрачивање се обавља гама зрацима ^{60}Co . Извор зрачења је плочаст. У безбедном положају, он је на дну дубоког базена са водом. У радном положају, извор је изнад нивоа пода ћелије за озрачивање. Озрачивање производа се врши у циклусима од по 328 кутија, које систем конвејера и транспортних трака може аутоматски да транспортује и хомогено озрачује. Кутије се убацују у 82 кабине (по 4, вертикално распоређене), које у ћелији за озрачивање заузму три реда са сваке стране равни извора, који се из базена подиже помоћу механизма за дизање извора у радни положај за озрачивање. Кабине напуњене кутијама са производима, механизмом за вођење транспортују конвејер из магацинског дела за нестерилну робу лавиринтима до ћелије за озрачивање. Кутије се озрачују док пролазе око извора. Кретање кабина са кутијама кроз ћелију је аутоматизовано, тако да је време које кабина проведе стојећи на једном месту тачно одређено. Када кабине изађу из ћелије за озрачивање, врши се аутоматска замена нивоа кутија. Окретањем и променом нивоа кутија после проласка кроз ћелију за озрачивање постиже се хомогено озрачивање кутија, јер при сваком од 4 пролаза озраче се обе стране кутије. По завршетку процеса озрачивања, конвејер се празни у магацинском делу за стерилну робу. Рад јединице за озрачивање се контролише и њом се управља са контролног пулта.

Сви узорци земљишта прикупљени дуж слива реке Колубаре су зрачени различитим дозама гама зрачења: 1 kGy, 3 kGy, 5 kGy и 10 kGy, са различитим брзинама дозе: 300 Gy/h, 1 Gy/h и 10 Gy/h. За дозиметријску контролу апсорбоване дозе зрачења коришћен

је дозиметар етанол-монохлоробензен (ЕСВ) (ISO/ASTM 51538, 2009; Kovács *et al.*, 1987). Мерна опрема је инструмент осцилотитратор типа ОК-302/2, фирме Radelkis (Будимпешта, Мађарска). Пошто тачност мерења осцилоскопом (Kovács *et al.*, 1995) у великој мери зависи од температуре мерења (Vujić *et al.*, 2018), сви дозиметри су термостатирани на 25°C. Мерења су вршена на константној температури. Следљивост са примарним стандардом је постигнута преко трансфер дозиметара послатих у Референтну лабораторију за високе дозе „Riso High Dose Referente Laboratory“, у Данској.

3.4.1. Метод калибрације и утврђивања хомогености расподеле дозе апсорбованог зрачења озраченог материјала

Метода за одређивање најниже и максималне области апсорбоване дозе зрачења, као и униформности дозе, позната је као мапирање дозе. Мапирање дозе је потребно извршити за сваку промену процедуре рада, при пуњењу новог извора или при почетку употребе нове серије дозиметара у комерцијалном постројењу за зрачење које ради у шаржном режиму. Због дизајна постројења за озрачивање и јаког продора гама зрачења, просечна доза зрачења у свакој кутији производа може се равномерно распоредити. Расподела дозирања унутар производа, с друге стране, је сложена функција густине производа, положаја и облика извора зрачења и дизајна ирадијатора. Мањи узорци се могу озрачити у посебном контејнеру који се налази близу извора зрачења, поред озрачивања у шаржном моду, које је спорије. Густина и дебљина слоја узорка имају важан утицај на дистрибуцију дозе у овом сценарију.

Ово испитивање представља свеобухватно мапирање доза у узорцима земљишта озраченим у индустријском Со-60 ирадијатору. Извршено је мапирање дозе у редовном шаржном режиму и мапирање дозе у контејнеру за брзо озрачивање.

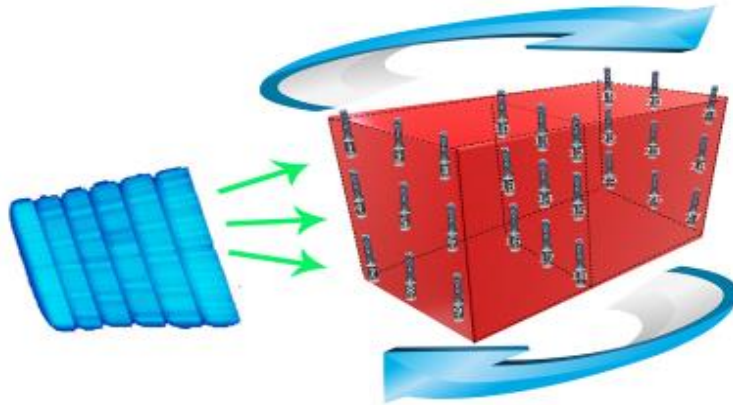
Третман излагања производа дејству јонизујућег зрачења се најчешће користи за стерилизацију медицинских уређаја, очување хране и производњу савремених полимерних материјала. У Србији постоји само једно постројење за индустријски третман јонизујућим зрачењем. Радијациона јединица, која је део Лабораторије за радијациону хемију и физику ”Гама” Института за нуклеарне науке „Винча“, пружа

услуге озрачивања различитим корисницима из различитих делатности (производња медицинске опреме, лекова, конзервација хране, очување културног наслеђа). Има максимални годишњи капацитет од 25000 m³ озрачене робе. Предмети се зраче у циклусима од 328 кутија следећих димензија: ширине 46 cm, дужине 46 cm и висине 43 cm. Максимална тежина кутије је 20 kg. Кутије се аутоматски транспортују у комору за зрачење. Свака кутија је постављена поред извора зрачења на одређено време. Поред тога, обе стране кутије су равномерно озрачене у многим пролазима у близини извора зрачења. Свака кутија у циклусу добија идентичну дозу зрачења захваљујући аутоматизованој методи (Ranković *et al.*, 2020). Међутим, пошто гама зраци не зраче производ равномерно на површини и унутар кутије, расподела дозе зрачења унутар кутије није равномерна (Mortuza *et al.*, 2018; Moradi *et al.*, 2017). Као резултат тога, одређивање разлике између дистрибуције дозе гама зрачења унутар производа је критично.

У свакодневном раду радијационог објекта, често је потребно анализирати понашање неких узорака као одговор на третман гама зрачењем. Ово радимо тако што узорке стављамо у посебно направљен контејнер који је постављен близу извора зрачења, удаљен отприлике 35 cm. У контејнеру, брзина је око 10 kGy·h⁻¹. Количина излагања зрачењу је обрнуто пропорционална квадрату удаљености од извора. На расподелу дозе унутар узорака и даље утиче густина производа. Као резултат тога, потребно је извршити и мапирање дозирања и у контејнеру за брзо зрачење узорака.

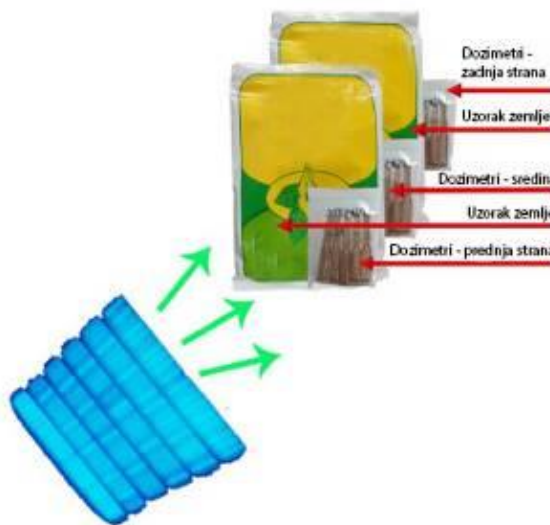
3.4.2 Методологија озрачења узорака у шаржном режиму

Гама зрачење је обављено у Радијационој јединици Института за нуклеарне науке „Винча“. Да би се успоставило мапирање дозе у шаржном режиму, ампуле које садрже ЕСВ биле су позициониране у три равни кутије: предња равна, средња равна и задња равна, у односу на позицију извора (слика 19). Дизајн уређаја за зрачење обезбеђује да се зрачење равномерно распоређује на све стране кутије. Након првог дела процеса, кутије се аутоматски ротирају.



Слика 19. Приказ распореда дозиметара у кутији приликом мапирања дозе (лична архива)

За одређивање мапирања дозе у контејнеру за брзо озрачивање, постављени су ЕСВ дозиметри напред, у средини и иза узорка. За прецизније мерење, на сваку раван мерења је постављено по пет дозиметара (слика 20).



Слика 20. Распоред дозиметара за мерење дистрибуције дозе у контејнеру (лична архива)

Да би се утврдила хомогеност апсорбоване дозе унутар кутије, одређивано је мапирање дозе унутар кутија са производима различите густине. Коришћено је петнаест дозиметара за одређивање мапирања дозе. Пет дозиметара је првобитно постављено у узорак близу извора (фронт). Друга серија дозиметара постављена је у средину узорка. Трећа серија дозиметара постављена је у узорак насупрот извора (позади). И у овом

случају поређена је хомогеност расподеле апсорбоване дозе у земљи са хомогеношћу у материјалима мање густине, у тканини и пластици.

3.5. Микробиолошка анализа

У акредитованој микробиолошкој лабораторији испитивана је почетна контаминација и укупан број микроорганизама, плесни и бактерија, у узоркованом земљишту пре озрачивања и после гама зрачења различитим дозама зрачења. Метода коришћена за одређивање ових параметара је Ph. Eur. 7.0 (2.6.12. – Микробиолошки преглед нестерилних производа (укупни број живих аеробних ћелија) и 2.6.13. – Микробиолошки преглед нестерилних производа (тест на одређене микроорганизме) (Европска дирекција за квалитет лекова и HealthCare, 2011).

3.5.1. Одређивање присуства плесни

Одређивање присуства плесни је обављено наношењем испитиваног раствореног узорка на Sabouraud декстрозни агар. Плоче су инкубирани на 25°C током 5-7 дана. За квалитативно испитивање, 10 ml припремљеног узорка је додато у 100 ml Casein Soyabean Digest агар.

3.5.2. Одређивање присуства *E. coli*

За одређивање присуства *E. coli* коришћено је 100 ml бујонског медијума А. Раствор је хомогенизован и инкубиран на 35-37°C током 18-48 h. После мућкања, додат је бујон медијум Г и инкубиран на 43-45°C током 18-24 h. Субкултура на плочама агар медијума Х и инкубиран је на 35-37°C током 18-72 h. Раст црвених, немукоидних колонија грам-негативних штапића указује на присуство *E. coli*. То је потврђено одговарајућим биохемијским тестовима, као што је производња индола.

3.5.3. Одређивање присуства *S. aureus*

За одређивање присуства *S. aureus* коришћено је 100 ml бујонског медијума А. Раствор је хомогенизован и инкубиран на 35-37°C током 18-48 h. Субкултура на плочи са агар медијумом О и инкубација на 35-37°C током 18-72 h. Црне колоније грам-позитивних кока, окружене чистом зоном, указују на присуство *S. aureus*. На потврду могу утицати одговарајући биохемијски тестови, као што су тест коагулазе и тест дезоксирибонуклеазе.

3.5.4. Одређивање присуства *P. aeruginosa*

За одређивање присуства *P. aeruginosa* коришћено је 100 ml бујонске подлоге А. Раствор је хомогенизован и инкубиран на 35-37°C током 18-48 h. Субкултура на плочи са агар медијумом Н и инкубирана је на 35-37°C током 18-72 h. Ако се не открије раст микроорганизама, производ пролази тест. Ако дође до раста грам-негативних штапића, пренети део материјала морфолошки различитих, изолованих колонија у бујон медијум А и инкубирати га на 41-43°C током 18-24 h. Производ пролази тест ако не дође до раста на 41-43°C.

3.5.5. Одређивање концентрације тешких метала у земљишту

За одређивање присуства кадмијума, олова, никла и бакра (Cd, Pb, Ni и Cu) у земљишту, узорци земљишта су растворени у HF, HClO₄ и HCl. Након растварања, садржај Ni и Cu је одређен коришћењем AAS (PerkinElmer PinAAcle 900T). За квантитативне анализе арсена, живе и селена (As, Hg и Se), узорци земљишта су растворени у HNO₃, HClO₄, H₂SO₄ и HCl. Након растварања, садржај As, Hg и Se је одређен коришћењем Mercury Hydride System AAS (PerkinElmer PinAAcle 900T). Примењена метода је изабрана према досадашњим истраживањима одређивања укупне концентрације метала у узорку (Hu, Qi, 2014; Liu, Sun, 2013; Luo, 2012).

За одређивање кадмијума, кобалта, олова, никла, хрома и бакра (Cd, Co, Pb, Ni, Cr и Cu), 2 g сувог узорка помешано је са 15 ml HF и 5 ml HClO₄ и загрејано на 150°C. Суви остатак је растворен у 10 ml HCl (1:1) и охлађен на собну температуру.

За одређивање As, Hg и Se, 1 g сувог узорка је помешан са 5 ml HNO₃, уз лагано загревање. Након тога, производ дигестије је охлађен на собну температуру, додато је 0,5 ml HClO₄ и 2 ml H₂SO₄ и растварање је настављено до појаве белих пара. Раствор је поново охлађен до собне температуре и додато је 10 ml 6M HCl. После хлађења, раствор је пребачен у волуметријски балон од 25 ml са дестилованом водом.

3.6. Синтеза етанол-монохлоробензена

При одређивању и контроли апсорбоване дозе гама зрачења, раствор дозиметра етанол-монохлоробензен (ЕСВ) се користи у великој мери. Уобичајени састав раствора ЕСВ садржи 24 запреминска процента монохлоробензена, 4 запреминска процента дестиловане воде, 0.04 запреминска процента ацетона, 0.04 запреминска процента бензена и 71.92 запреминска процента етанола (Kovács, Miller, 1986).

Раствор је направљен од састојака високе чистоће и троструко дестиловане воде. Све посуде које се користе за прављење ЕСВ дозиметара се испирају дестилованом водом (ECS, 2017). Произведени раствор се ставља у ампуле од 2 ml, које се затим затварају пламеном и калибришу у Референтној лабораторији за високе дозе „Riso High Dose Referente Laboratory“, у Данској.

4. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

4.1. Одређивање укупног броја микроорганизама у земљишту на различитим тачкама дуж тока реке Колубаре

У табели 3 приказан је укупан број микроорганизама у земљишту дуж слива реке Колубаре, узоркованом на 48 позиција, на дубини од 20 cm и 50 cm. Такође, дато је растојање сваке позиције узорковања од тачке формирања реке Колубара.

Табела 3. Укупан број микроорганизама у земљишту дуж слива реке Колубаре

Позиција узорка	Назив узорка	UTM Е	UTM N	Удаљеност од тачке формирања реке Колубаре	Број микроорганизама на дубини од 20 cm	Број микроорганизама на дубини од 50 cm
редни број		m	m	km	10 ⁴ cfu/g	10 ⁴ cfu/g
1	Колубара 39	409870	4901541	0	0.51	1.04
2	Колубара 38	411267	4902313	2.08	1.33	1.03
3	Колубара 37	413176	4902302	4.13	2.30	1.05
4	Колубара 36	414809	4902869	6.16	1.89	1.16
5	Колубара 35.3	415957	4903106	7.67	1.45	1.28
6	Колубара 35.2	417231	4903158	9.38	1.01	1.42
7	Колубара 35.1	419073	4903407	12.66	0.56	1.54
8	Колубара 35	420402	4904172	14.41	0.67	1.54
9	Колубара 34	422392	4904432	17.13	0.78	1.57
10	Колубара 33	423969	4904412	19.24	0.91	1.61
11	Колубара 32	425744	4906085	22.82	1.03	1.63
12	Колубара 31	425844	4906627	23.82	1.10	1.61
13	Колубара 30	426017	4908709	26.48	1.17	1.56
14	Колубара 29	427448	4909905	29.62	1.23	1.53
15	Колубара 28.2	428691	4910728	31.55	1.25	1.56
16	Колубара 28.1	429063	4910222	33.66	1.30	1.62
17	Колубара 28	429973	4910814	35.97	1.33	1.67
18	Колубара 27	430811	4911380	37.4	1.39	1.74
19	Колубара 26	432450	4911657	39.46	1.46	1.83
20	Колубара 25	433753	4912103	40.92	1.49	1.85

21	Колубара 24.1	434611	4911729	43.92	1.54	1.95
22	Колубара 24	436200	4913471	46.03	1.54	1.97
23	Колубара 23	436983	4914129	47.16	1.53	1.99
24	Колубара 22	436902	4915180	48.69	1.53	2.00
25	Колубара 21	437618	4915943	49.64	1.53	2.01
26	Колубара 20.1	437726	4916923	52.08	1.51	2.04
27	Колубара 20	438042	4918379	54.39	1.48	2.05
28	Лукавица 4	440828	4914415	53.21	1.66	7.82
29	Колубара 19	439755	4919475	57.44	2.49	7.40
30	Колубара 18	439973	4920354	58.41	2.32	5.95
31	Колубара 17	441544	4925803	64.21	2.40	5.17
32	Колубара 16	441087	4927716	67.44	2.51	3.87
33	Колубара 15	440513	4928554	68.66	2.53	3.62
34	Колубара 14	439805	4929213	69.39	2.52	3.30
35	Колубара 13	439767	4930692	72.26	2.52	2.98
36	Колубара 12	439091	4932009	74.36	2.51	2.65
37	Колубара 11.1	438299	4932954	76	2.51	2.35
38	Колубара 11	438318	4934179	78.44	2.51	2.02
39	Колубара 10	437638	4935240	80.86	2.50	1.72
40	Колубара 9	437166	4936662	83.14	2.49	1.41
41	Колубара 8	437052	4937122	84.66	2.49	1.09
42	Колубара 7	437770	4938992	86.3	2.48	1.53
43	Колубара 6	436974	4939775	88	2.47	1.98
44	Колубара 5	436965	4941019	90	2.46	2.43
45	Колубара 4	437258	4943323	92.14	2.46	2.87
46	Колубара 3	437823	4944668	94	2.40	3.14
47	Колубара 2	439862	4945621	97	2.32	3.26
48	Колубара 1	440398	4945644	97.82	2.26	3.46

У табели 3 примећујемо трендове повећања и опадања броја микроорганизама у узорцима земљишта прикупљеним на дубинама од 20 cm и 50 cm дуж слива реке Колубаре.

Укрштањем информација о бројном стању микроорганизама у узорцима из табеле 3 и распореду урбаних и руралних простора са бројем становника из табеле 1, може се закључити следеће:

Бројност микроорганизама на позицији 1 износи ($0.51 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$) на дубини од 20 cm и ($1.04 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$) на дубини од 50 cm, на ушћу река Обнице и Јабланице, односно на месту формирања реке Колубаре у граду Ваљево (позиција узорковања 1).

Приликом протицања реке Колубаре кроз урбану средину града Ваљево број микроорганизама на дубини од 20 cm на позицији 3 ($2.30 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$) расте, након чега долази до опадања броја микроорганизама све до позиције 7 ($0.56 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$), док на дубини од 50 cm имамо постепено раст, који на позицији 3 износи ($1.05 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$). Ваљево, као највећа урбана средина Колубарског слива, са око 90 хиљада становника, захваљујући постројењу за третман отпадних вода, нема велики утицај на повећање броја микроорганизама у приобалном земљишту Колубаре.

Након изласка из самог града, обалу реке Колубаре наредних 6 km (позиција узорковања 7) прати индустријска зона града Ваљево, где број микроорганизама опада на дубини од 20 cm и износи ($0.56 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$), док на дубини од 50 cm и даље имамо постепено раст који на позицији 7 износи ($1.54 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$), а треба имати на уму да се код саме позиције 7 у Колубару улива притока – река Бања. Наредних 5 km (позиција узорковања 9), дуж обале Колубаре, простире се рурално подручје. У овим зонама на дубини од 20 cm долази до тренда постепеног раста броја микроорганизама, док се на дубини од 50 cm наставља тренд благог раста, све до позиције 11, где број микроорганизама износи ($1.63 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$).

У околини позиције узорковања 10, на територији села Клашнић, Радобић и Дивци, налазе се бројне фарме говеда, свиња и пилића, као и неки индустријски објекти. Такође, нешто јужније, у атару села Табановић, у Колубару се уливају притоке Лепеница и Рибница, које протичу кроз урбану средину Мионице, са око 14 хиљада становника. Мионица нема постројење за прераду отпадних вода. На дубинама од 20 cm и 50 cm запажен је тренд раста броја микроорганизама, све до позиције узорковања 22, где број микроорганизама на дубини од 20 cm износи ($1.54 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$), док је на дубини од 50 cm износи ($1.97 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$). Колубара, између поменутих позиција узорковања, наредних 27 km протиче кроз атаре села Дивци, Радобић, Табановић, Лозница, Веселиновац, Вировци, Словац, Ратковац (река Топлица се улива у Колубару), Непричава, Рубрибреза, Лајковац и Ћелије (река Љиг се улива у Колубару). У близини корита реке Колубаре, у овом потезу, гради се нови брзи пут од Лајковца, тј.

ауто-пут Милош Велики (до Диваца). Поред градње овог брзог пута и поменутог ауто-пута, у непосредној близини корита Колубаре пролазе и пруга Београд–Бар и Ибарска магистрала. Већа урбана места на овом потезу су Мионица, која је 5 km удаљена од Колубаре (кроз коју протичу Лепеница и Рибница, до уливања у Колубару), Бања Врујци, 15 km удаљена од Колубаре (кроз коју протиче река Топлица), Лајковац, са око 15 хиљада становника и без постројења за прераду отпадних вода (кроз који протиче сама Колубара) и Љиг, двадесетак km удаљен од Колубаре. Река Љиг, као притока Колубаре, пролази кроз истоимену варош која има око 12 хиљада становника. Љиг нема постројење за прераду отпадних вода.

Од позиције узорковања 23 до позиције узорковања 27, на дубини од 20 cm долази до постепеног смањења броја микроорганизама који на позицији 27 износи ($1.48 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$), док на дубини од 50 cm се и даље наставља постепен раст и износи ($2.05 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$). На овом потезу Колубара протиче кроз рурални део, у дужини од 7 km.

На позицијама узорковања 28 (центар општине Лазаревац, на реци Лукавици) и 29 (локација уливања реке Пештан у Колубару), на дубини од 20 cm долази до наглог скока броја микроорганизама који на позицији 29 износи ($2.49 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$), док је на дубини од 50 cm, на позицији 28, скок још израженији и износи ($7.82 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$). Реке Лукавица и Пештан примају све отпадне воде урбаног дела Лазаревца, који има око 58 хиљада становника.

На позицији узорковања 30, на дубини од 20 cm, број микроорганизама је нешто нижи у односу на позицију 29 и износи ($2.32 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$), но даљим током Колубаре има тренд благог раста све до позиције узорковања 33, где на дубини од 20 cm износи ($2.53 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$), а након тога следи тренд опадања броја микроорганизама следећих 30 km, све до уливања Колубаре у Саву на позицији 48, где број микроорганизама на дубини од 20 cm износи ($2.26 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$).

Што се тиче дубине од 50 cm, од позиције узорковања 29, где број микроорганизама износи ($7.40 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$), па све до позиције узорковања 41, где број микроорганизама износи ($1.09 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$), постоји тренд опадања броја микроорганизама, након чега следи постепен раст броја микроорганизама све до ушћа Колубаре у Саву и позиције 48 где број микроорганизама на дубини од 50 cm износи ($3.46 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$).

Између позиција узорковања 30 и 31 налазе се површински копови угља Колубара. Између позиције 31 и 44 простире се рурално подручје. На позицији узорковања 33, река Бељаница се улива у Колубару. Бељаница са својим притокама улази у урбану средину Барајева, које има око 27 хиљада становника, али и постројење за третман отпадних вода. Код позиције узорковања 40, река Тамнава се улива у Колубару. Тамнава са својим притокама покрива урбане средине Уб, са око 28 хиљада становника, и Коцељеву, са око 13 хиљада становника, а обе урбане средине немају постројења за прераду отпадних вода. У близини позиције узорковања 44, налази се локална депонија општине Обреновац. Након позиције 44 све до позиције 48, Колубара протиче кроз урбану средину општине Обреновац са око 23 хиљаде становника. Обреновац нема постројење за третман отпадних вода.

Укрштањем и анализом података из (табела 1. и 3.) може се закључити да отпадне воде и муљеви из урбаних средина, индустрије и пољопривреде доприносе повећању микроорганизама у сливу реке Колубаре. Бројно стање микроорганизама се увећава на дубини од 20 cm након протицања реке Колубаре кроз Ваљево, уливања притока Лепенице и Рибнице које протичу кроз Мионицу, уливања река Лукавице и Пештан које протичу кроз Лазаревац и копова угља Колубара, уливањем Тамнаве и притоке Уба које протичу кроз Уб и Коцељеву. Са друге стране, након уливања притока Бање и Бељанице и протицаја Колубаре кроз дуже руралне коридоре запажају се трендови опадања бројности микроорганизама.

Број микроорганизама на дубини од 50 cm има постепен тренд раста дуж целог тока реке Колубаре. Такође, може се закључити да је један од највећих загађивача Лазаревац, као урбана средина без постројења за третман отпадних вода и муља које се испуштају у реку Лукавицу и реку Пештан. Просечна вредност укупног броја микроорганизама у свим испитиваним тачкама дуж слива реке Колубаре износи $(1.78 \cdot 10^4 \text{ cfu/g})$ на дубини узорковања од 20 cm, односно $(2.37 \cdot 10^4 \text{ cfu/g})$ на дубини од 50 cm.

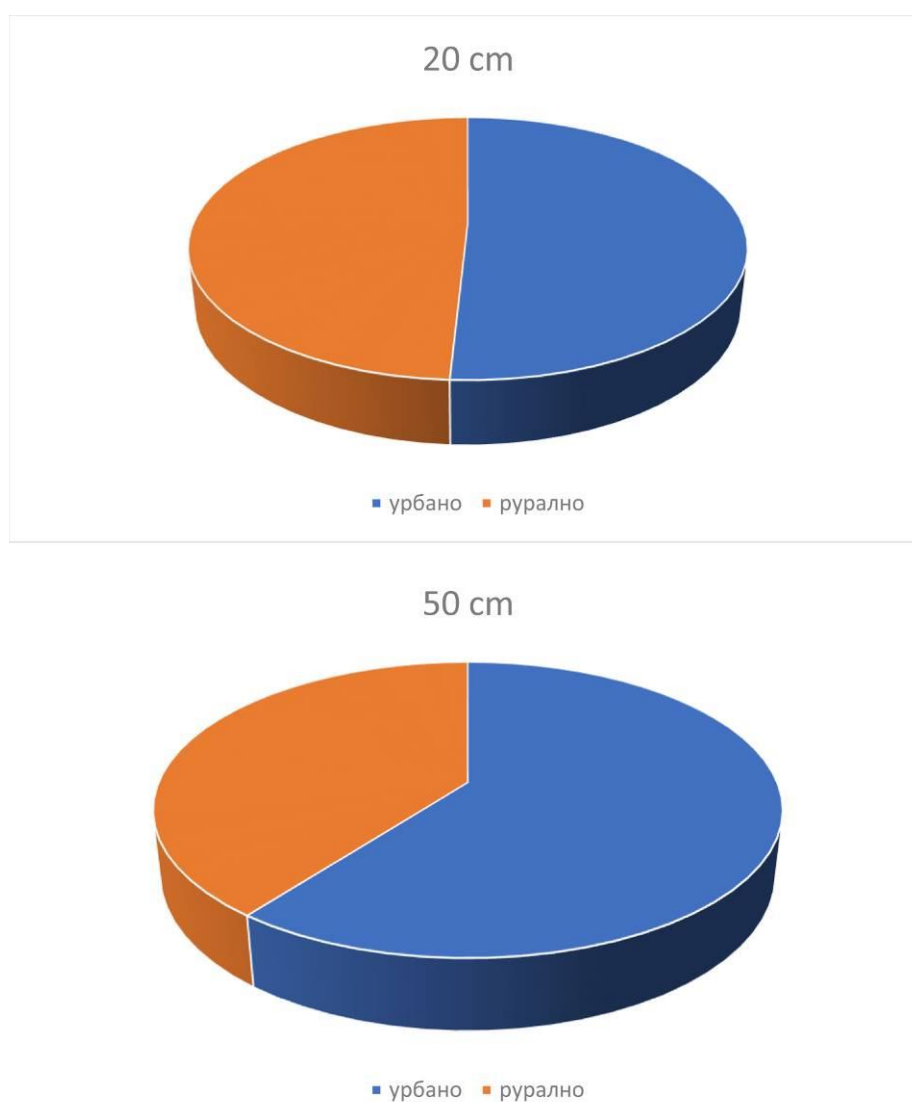
Број микроорганизама на дубини од 20 cm је више је склон променама него на дубини од 50 cm, због изложености спољашњим утицајима, попут осунчаности, мањка влаге, недостатка контакта са подземним водама и сл.

Вредности су више у тачкама узорковања дуж реке Колубаре приликом протицаја кроз урбане, него кроз руралне средине. У руралним срединама, разлика у броју микроорганизама између две дубине узорковања у просеку је релативно мала, док је у урбаним срединама број микроорганизама на дубини од 50 cm у просеку знатно већи од броја микроорганизама на дубини од 20 cm (табела 4, слике 21 а и б).

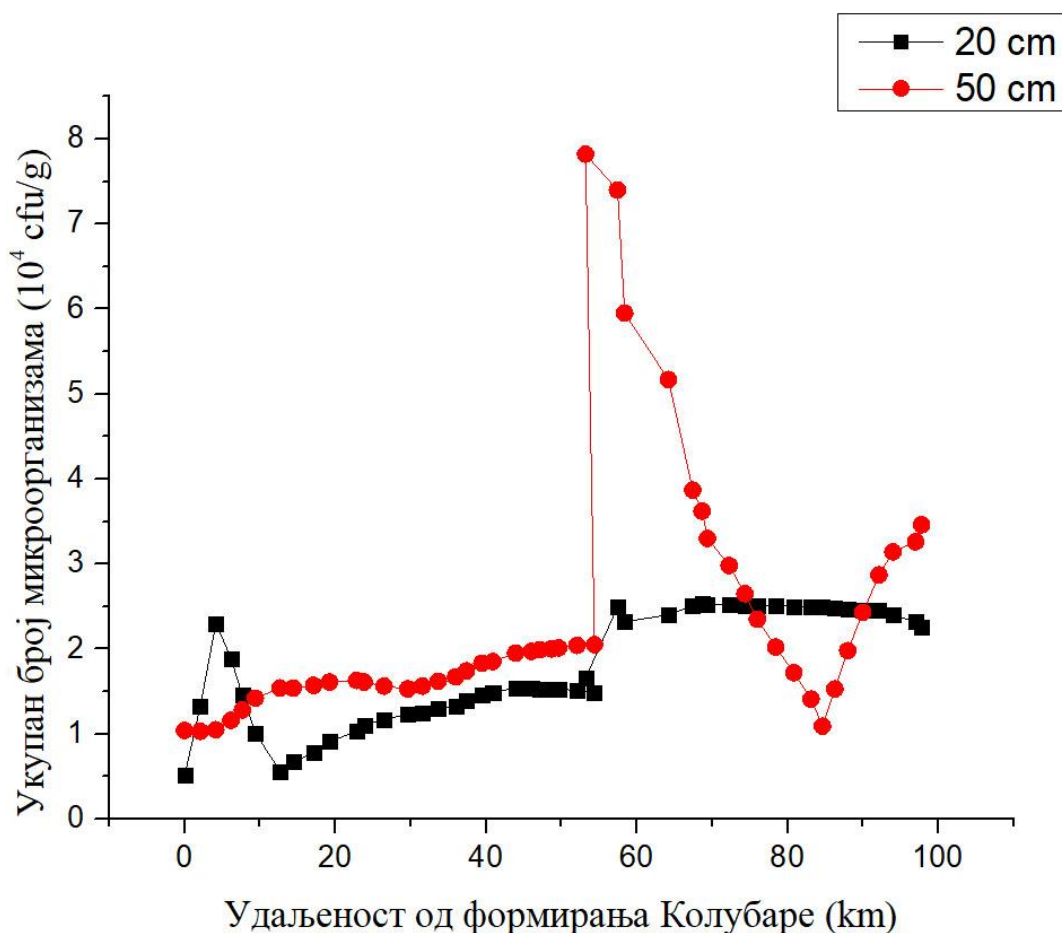
Добијени резултати, који су публиковани (Гајић *et al.*, 2022), су слични резултатима представљеним у претходним истраживањима (Ђорђевић *et al.*, 2014).

Табела 4. Просечне вредности броја микроорганизама у узорцима земљишта у урбаним и руралним деловима Колубарског слива

Дубина узорковања (cm)	Укупан број микроорганизама у урбаној средини	Укупан број микроорганизама у руралној средини
20	1,81	1,75
50	2,79	1,83



Слика 21. а и б. Приказ расподеле микроорганизама у урбаним и руралним срединама на дубинама узорковања од 20 cm и 50 cm



Слика 22. Укупан број микроорганизама у земљишту у зависности од удаљености од тачке формирања реке Колубаре

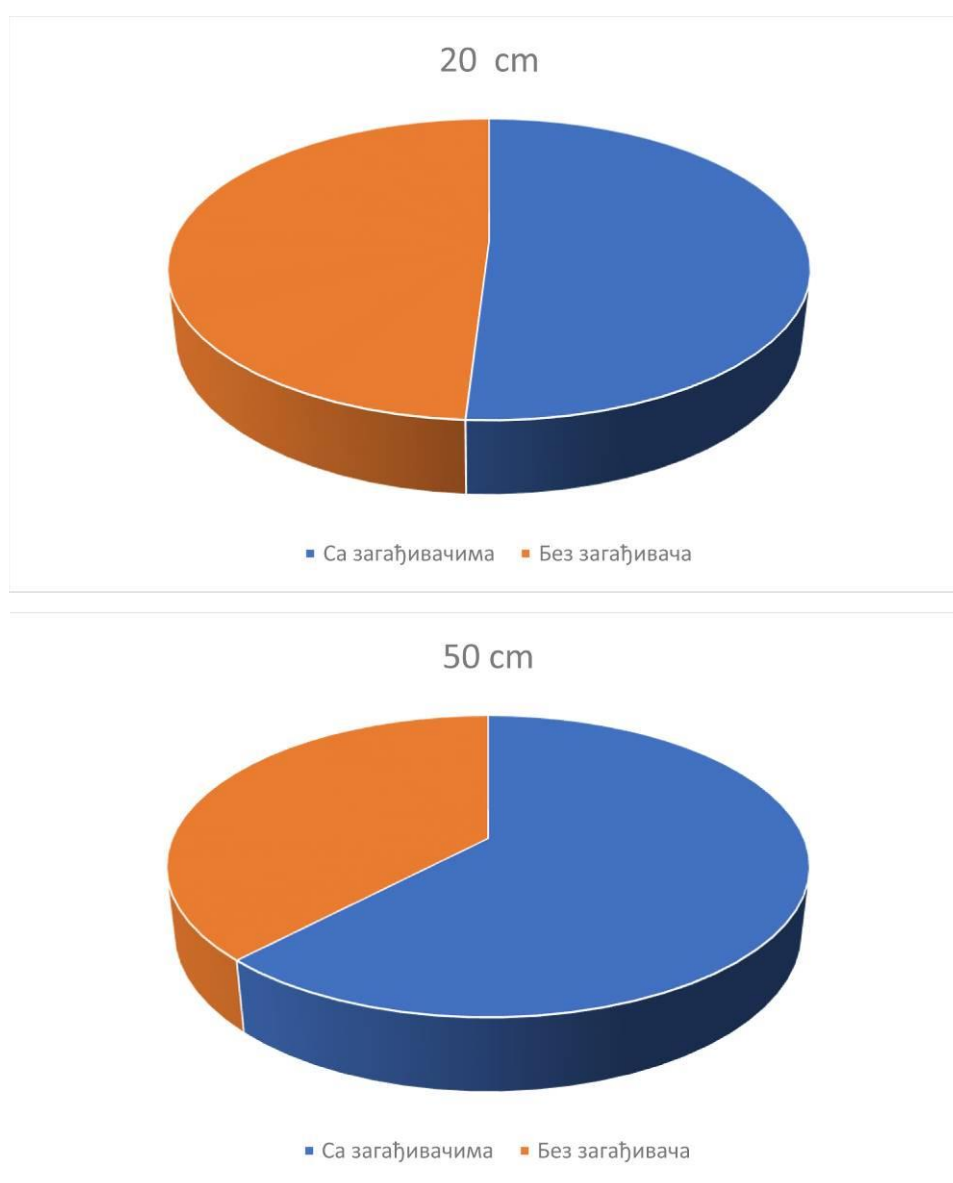
На слици 22, види се да загађење земљишта микроорганизмима расте дуж тока реке Колубаре, што се може повезати са срединама кроз које река протиче. Осим тога, загађење земљишта је веће у дубљим слојевима, јер су они изложенији контакту са самим речним током. Тачке 2-5 и 37-44 су изузеци. Узорци 2-5 су узети из урбаног подручја града Ваљева, где је површински слој загађен због оцедних вода локалне депоније и уређења речног корита, као и због отпадних вода генерисаних од стране самог града. Због неприступачног терена на месту узорковања, узорковање на тачкама 37-44 је обављено нешто даље од саме обале, па ови узорци земљишта немају контакт са водом реке Колубаре и подземним водама.

Графикон, такође, приказује пикове у тачкама узорковања 28 и 29, који су узроковани повећаним загађењем које реке Лукавица и Пештан носе из урбане средине Лазаревца.

Уколико анализирамо само тачке које пролазе кроз области са загађивачима (индустријске зоне, копови, депоније), иницијално загађење земљишта микроорганизмима је више. Број микроорганизама је у оба случаја, у присуству и без присуства загађивача, већи на дубинама од 50 cm што се може објаснити контактом са полутантима у водама реке Колубаре. Разлика између узорака изложених загађивачима и оних који нису је релативно мала на дубини узорковања од 20 cm, док је на дубини узорковања од 50 cm знатно већа у областима са присуством загађивача (табела 5, слике 23 а и б).

Табела 5. Анализа броја микроорганизама у тачкама узорковања дуж слива реке Колубаре у односу на присуство загађивача

Дубина узорковања (cm)	Укупан бр. микроорганизама средина са загађивачима	Укупан бр. микроорганизама средина без загађивача
20	1,88	1,77
50	3,42	2,09



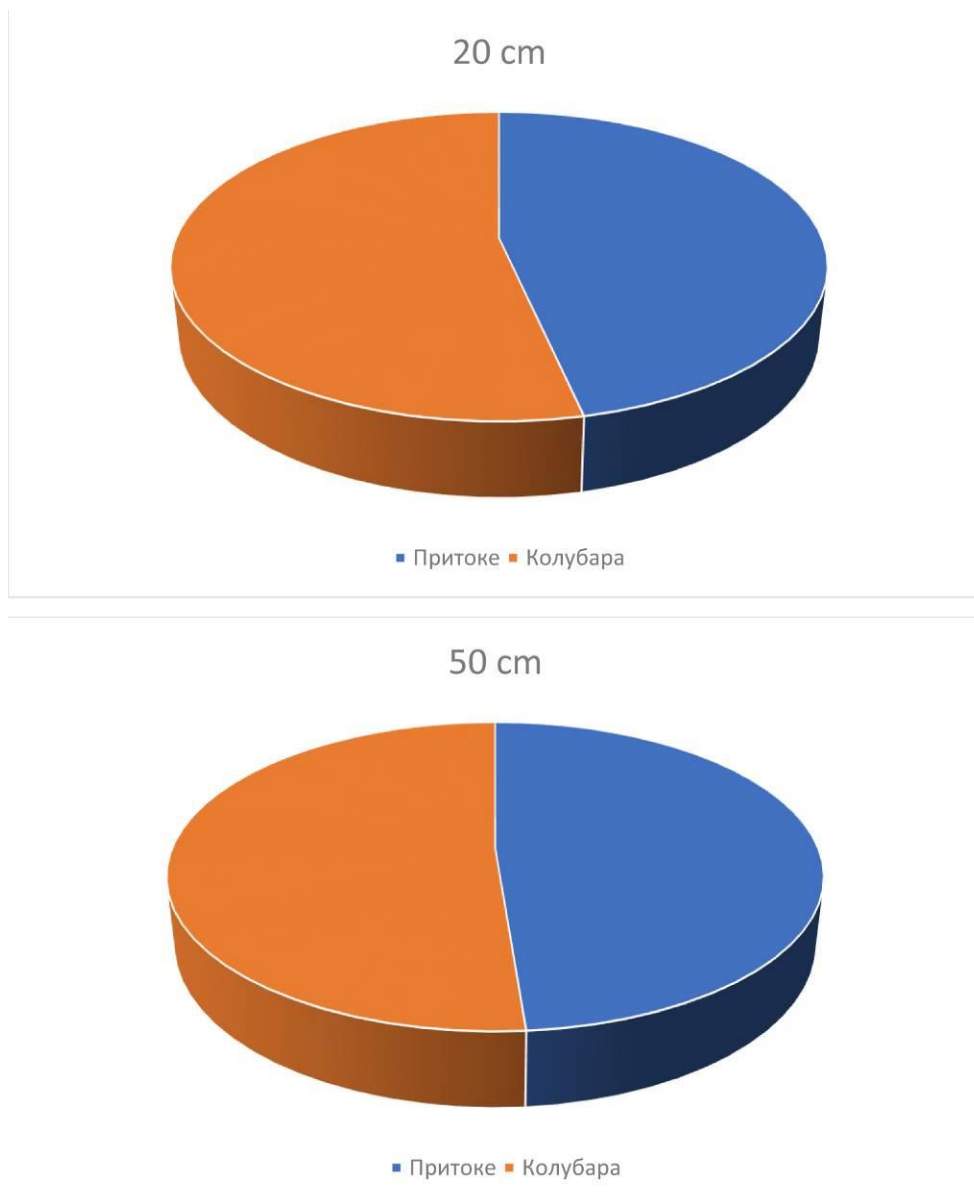
Слика 23. а и б. Приказ броја микроорганизама у узорцима дуж слива реке Колубаре у односу на присуство загађивача

Примећује се да је разлика у иницијалном загађењу земљишта знатно већа на већим дубинама узорковања (4% на дубини од 20 cm и 39% на дубини од 50 cm), што се објашњава испирањем површинских слојева под утицајем атмосферских прилика и контактом контаминираних подземних приобалних вода са дубљим слојевима земљишта.

Загађење микроорганизмима у тачкама узорковања земљишта на местима уливања притока у реку Колубару је нешто ниже од загађења дуж саме Колубаре (табела 6, слике 24 а и б).

Табела 6. Анализа броја микроорганизама у односу на уливање притока и самог тока реке Колубаре

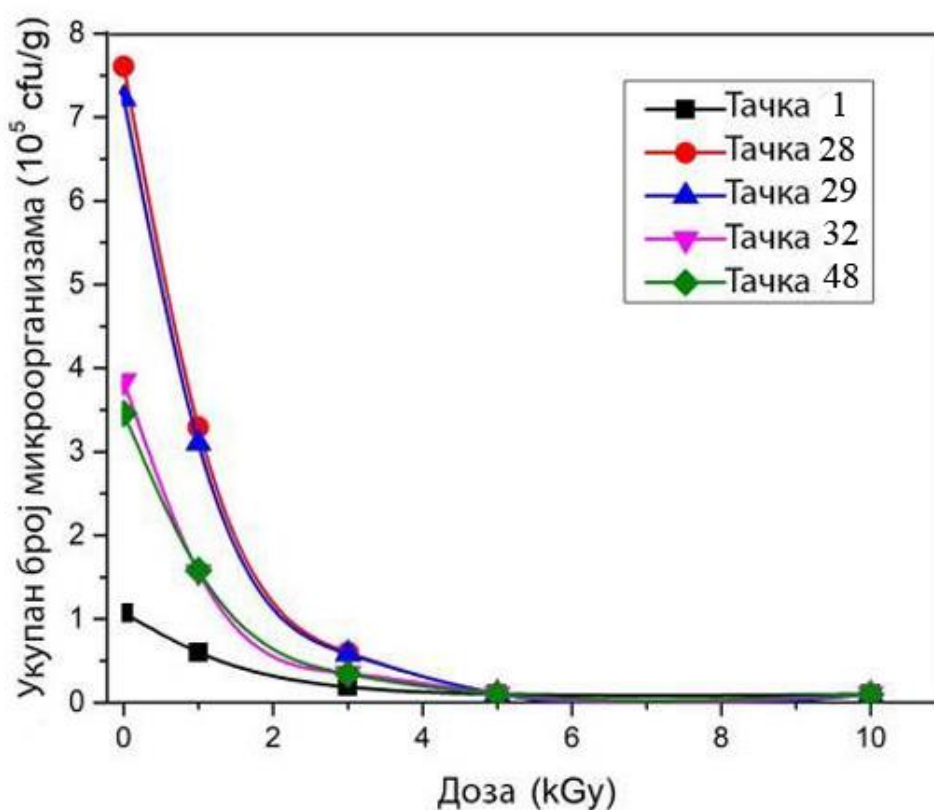
Дубина узорковања (cm)	Укупан бр. микроорганизама дуж Колубаре	Укупан бр. микроорганизама на местима уливања притока
20	1,78	1,55
50	2,46	2,34



Слика 24. а и б. Приказ загађења микроорганизама приликом уливања притока у реку Колубару и дуж самог тока реке Колубаре

4.2. Утицај гама зрачења на микробиолошку деконтаминацију

Утицај различитих доза гама зрачења на укупан број микроорганизама утврђен је за кључних пет тачака узорковања (близу извора реке Колубаре, близу ушћа Колубаре у Саву и три тачке са већом контаминацијом). Узорци су узети са дубине од 50 см. При брзини дозе зрачења од 10 kGy/h, коришћене су дозе од 1, 3, 5 и 10 kGy. Резултати су приказани на слици 23.



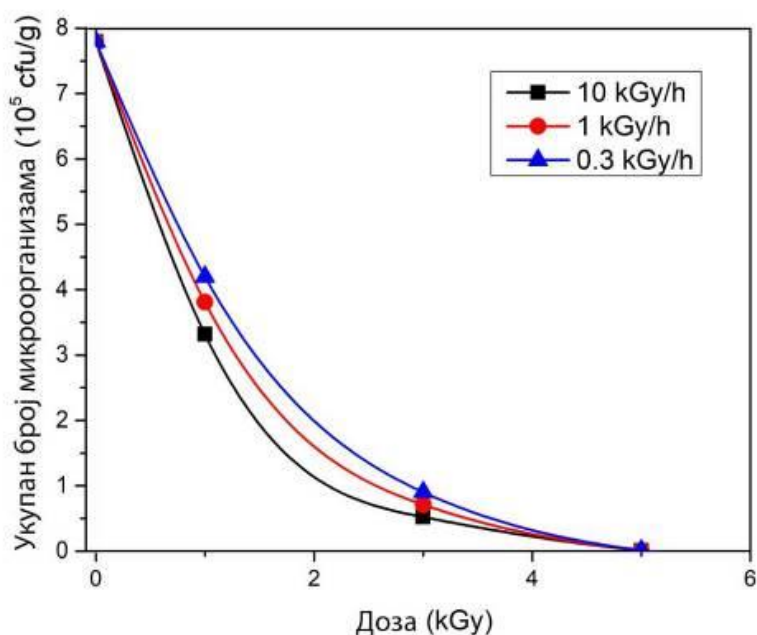
Слика 25. Утицај различитих доза гама зрачења на смањење укупног броја микроорганизама

Слика 25 показује да доза од 5 kGy неутралише већину микроорганизама у земљишту. Поређења ради, доза од 10 kGy довољна је за потпуну инактивацију микроорганизама и стерилизацију замљишта. Стерилизована земљишта се често користе за клијање семена, размножавање резница и узгој млађих биљака (Gamliel *et al.*, 1987; Fernando, Lynch, 2015). Саднице узгајане на стерилним земљиштима производе више биомасе корена и већу запремину ризосфере, него оне узгајане на нетретираним земљиштима.

Ризосфера се дефинише као део земљишта који физички пријања уз коренов систем. Стерилизација земљишта зрачењем повећава раст корена и запремину ризосфере код садница пшенице (Mahmood *et al.*, 2014).

4.3. Ефекат различитих брзина доза гама зрачења на микробиолошку деконтаминацију

Поред брзине дозе од 10 kGy/h, испитиван је и ефекат нижих доза које се обично користе у комерцијалном зрачењу. У ту сврху упоређен је утицај брзина доза од 0.3, 1 и 10 kGy. Испитивање је спроведено на најзагађенијем узорку, који је имао почетни ниво контаминације 7,8105 cfu/g. Слика 26 показује зависност укупног броја микроорганизама у узорку у односу на коришћену дозу зрачења при различитим брзинама дозе.

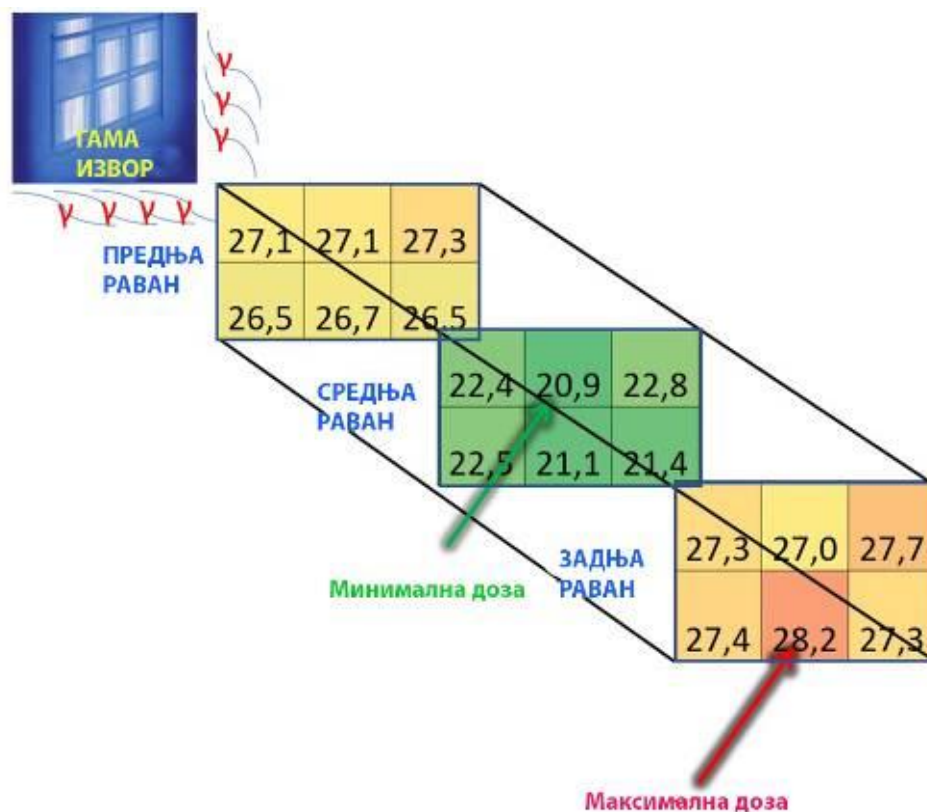


Слика 26. Утицај различитих доза и брзина доза гама зрачења на микробиолошку деконтаминацију земљишта

На слици 26 се може видети да се стопа деконтаминације земљишта смањује са смањењем брзине дозе. Међутим, пошто су ове разлике мале и практично безначајне, може се закључити да брзина дозе нема већег утицаја на инактивацију микроорганизама у земљишту.

4.4. Резултати калибрација и утврђивања хомогености расподеле дозе апсорбованог зрачења озраченог материјала

Расподела дозе зрачења унутар кутије са земљиштем приказана је на слици 27. Места са већим дозама су представљена црвеним квадратима, док су места са нижим дозама представљена зеленим квадратима.



Слика 27. Расподела дозе зрачења унутар кутије испуњене земљом (лична архива)

Просечна густина производа је 480 kg/m^3 .

$D_{av}=25.40 \text{ kGy}$ је просечна доза.

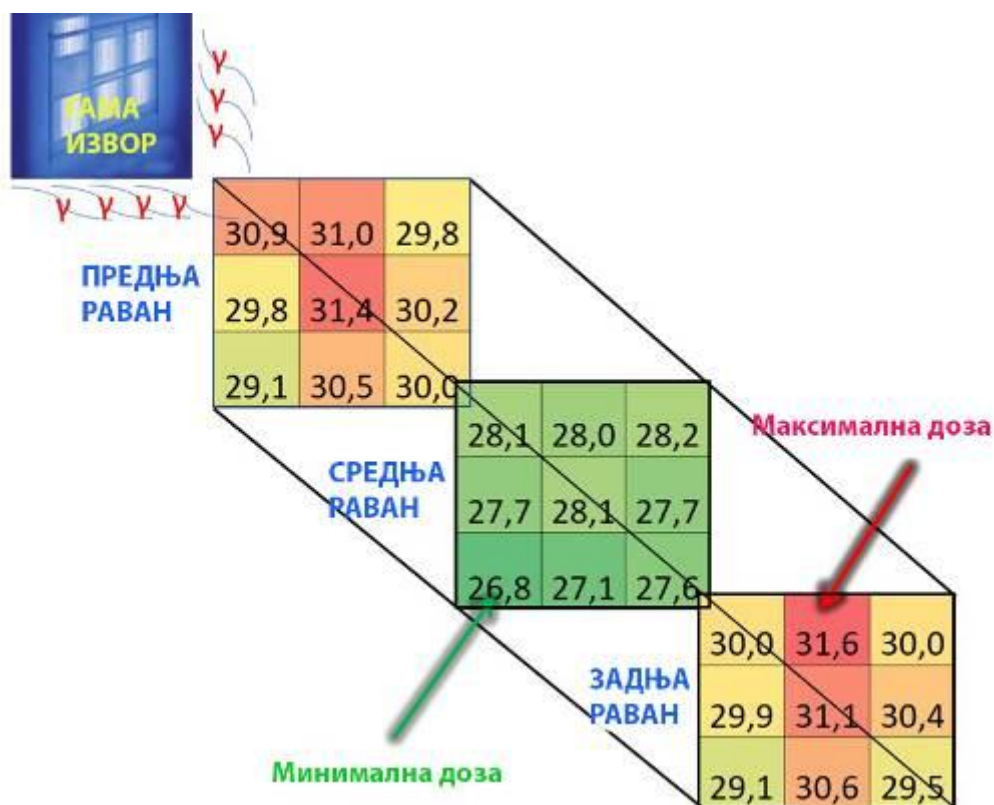
Минимална апсорбована доза је у доњем левом углу средње равни. Висина сандука са земљом је 20 см, тако да не би требало да буде тежа од 20 kg. У том примеру је коришћено 18 дозиметара, по шест у свакој од три равни.

У предњој и задњој равни просечне апсорбоване дозе зрачења су $26.9 \pm 1.3\%$ и $27.5 \pm 1.5\%$, респективно. У средњој равни просечна апсорбована доза зрачења износи $21.9 \pm 3.7\%$. У просеку, средња раван добија 19% нижу изложеност зрачењу.

Укупна хомогеност унутар кутије:

$$U_{av} = \left(100 \cdot \frac{D_{max}}{D_{min}} - 100 \right) \% = \left(100 \cdot \frac{28.23}{20.93} - 100 \right) \% = 34.8\%$$

Испитиван је и утицај густине производа који се озрачује на хомогеност расподеле апсорбоване дозе зрачења. У том циљу, узорци земљишта су упоређени са узорцима мање густине, тканином и пластиком. Слика 28 приказује расподелу дозе зрачења унутар кутије са тканином.



Слика 28. Расподела дозе зрачења унутар кутије испуњене тканином (лична архива)

Просечна густина производа је 65 kg/m^3 .

$D_{av}=29.42 \text{ kGy}$ је просечна доза.

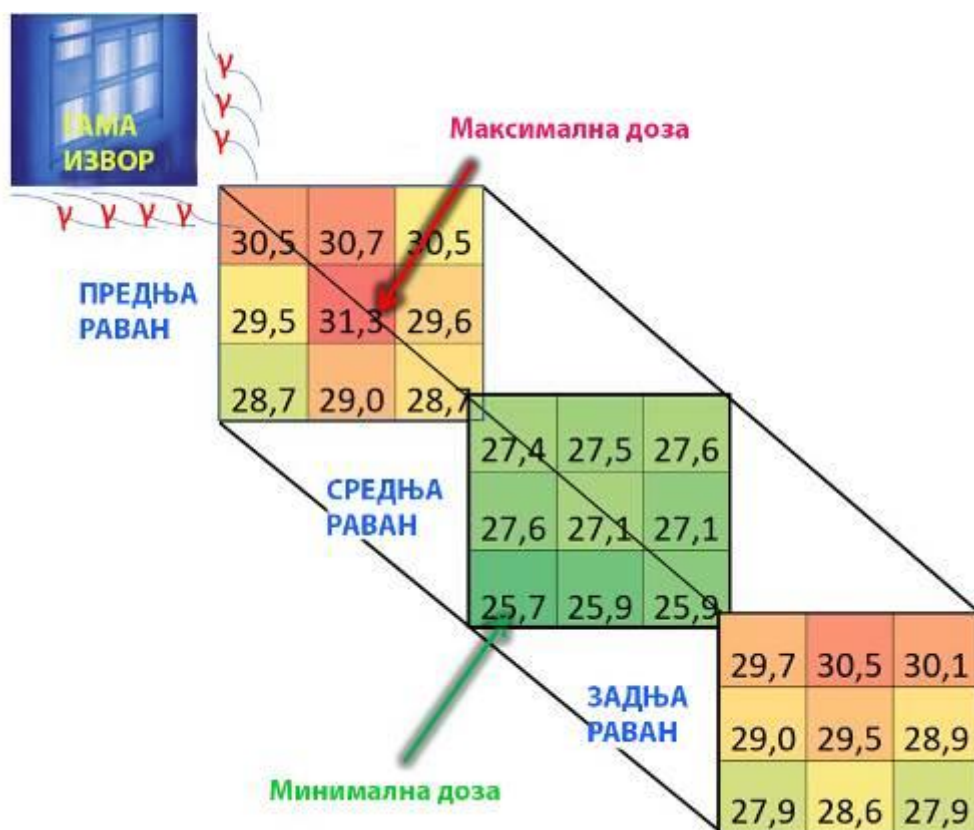
Минимална апсорбована доза је у доњем левом углу средње равни, као што је приказано на (слици 19). У предњој и задњој равни, просечне апсорбоване дозе зрачења су $30.3 \pm 2.4\%$ и $30.2 \pm 2.6\%$, респективно. Архитектура постројења резултира скоро истом вредношћу, јер кутија за гравирање мења стране пролазећи поред извора, апсорбујући исту количину зрачења.

Као резултат продора гама зрака кроз материјал, средња раван добија око 9% мање излагања зрачењу. У средњој равни просечна апсорбована доза зрачења износи $27.7 \pm 1.7\%$.

Укупна хомогеност унутар кутије:

$$U_{av} = \left(100 \cdot \frac{D_{max}}{D_{min}} - 100 \right) \% = \left(100 \cdot \frac{31.40}{26.77} - 100 \right) \% = 17.3\%$$

Слика 29 приказује расподелу дозе зрачења унутар кутије са пластиком.



Слика 29. Расподела дозе зрачења унутар кутије испуњене пластиком (лична архива)

Просечна густина производа је 165 kg/m^3 .

$D_{av}=28.57 \text{ kGy}$ је просечна доза.

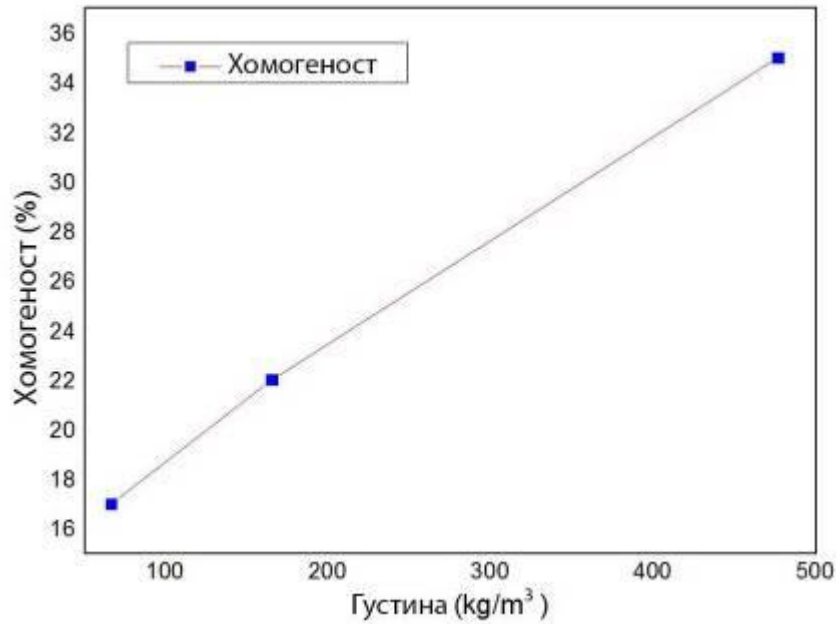
Минимална апсорбована доза је у доњем левом углу средње равни. Просечне апсорбоване дозе зрачења у предњој и задњој равни су $30.9 \pm 9.8\%$ и $29.1 \pm 3.1\%$.

У средњој равни, просечна апсорбована доза зрачења је $26.9 \pm 3.0\%$. У просеку, средња раван добија 13% нижу изложеност зрачењу.

Укупна хомогеност унутар кутије:

$$U_{av} = \left(100 \cdot \frac{D_{max}}{D_{min}} - 100 \right) \% = \left(100 \cdot \frac{31.30}{25.67} - 100 \right) \% = 21.9\%$$

Хомогеност апсорбоване дозе расте са повећањем густине производа, као што је раније утврђено у литератури (Chakarova *et al.*, 1991). Разлика између минималне и максималне апсорбоване дозе је мања када је мања униформност. Као резултат тога, за производе са мањом густином, апсорбована доза зрачења је равномерније распоређена унутар производа. Слика 30 приказује униформност производа након шаржног зрачења. Сваки производ зрачења имао је дебљину од 46 cm .



Слика 30. Зависност хомогености дозе у функцији густине производа за производ озрачен у шаржном режиму (лична архива)

4.4.2. Резултати озрачивања узорак у контејнеру за брзо озрачивање

У табели 7 приказани су резултати дозиметријских мерења.

Табела 7. Расподела дозе у производима различите густине (тканина, пластика и земља)

Узорак	Положај према извору	Дозиметар 1 [kGy]	Дозиметар 2 [kGy]	Дозиметар 3 [kGy]	Дозиметар 4 [kGy]	Дозиметар 5 [kGy]	Просечна доза [kGy]	Стандардна девијација	Несигурнос τ [%]
Тканина	Предњи	25.6	24.9	25.8	26.4	25.8	25.7	0.5	2.1
	Средњи	23.1	23.3	25.6	23.9	24.1	24.0	1.0	4.1
	Задњи	21.4	21.4	21.6	22.2	22.9	21.9	0.6	3.0
Пластика	Предњи	25.7	25.9	25.1	25.7	25.9	25.7	0.3	1.1
	Средњи	22.9	22.7	23.1	23.5	23.5	23.1	0.4	1.5
	Задњи	20.8	20.9	21.0	21.2	21.0	21.0	0.1	0.7
Земља	Предњи	26.5	26.5	25.8	25.0	25.1	25.8	0.7	2.8
	Средњи	22.0	21.0	20.7	20.5	20.7	21.0	0.6	2.8
	Задњи	20.9	20.7	19.7	20.7	19.8	20.4	0.6	2.8

Просечна густина производа је 480 kg/m³.

$D_{av}=22.40$ kGy је просечна доза.

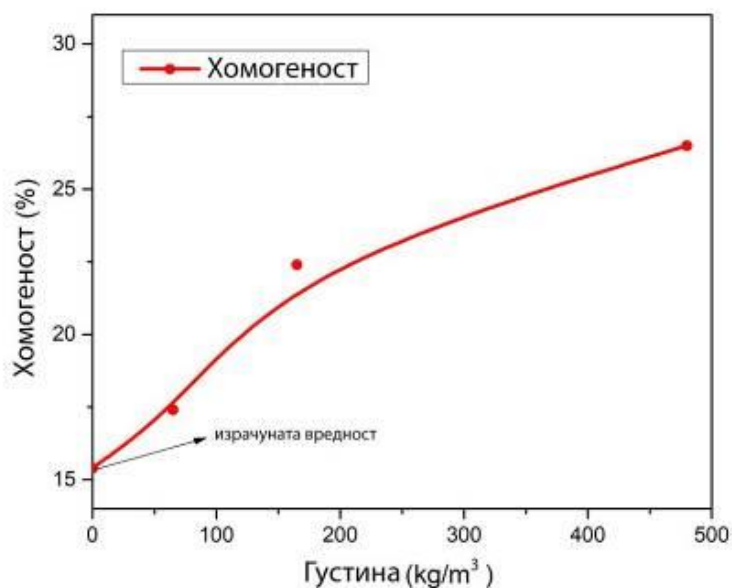
Хомогеност:

$$U_{av} = \left(100 \cdot \frac{D_{max}}{D_{min}} - 100 \right) \% = \left(100 \cdot \frac{25.8}{20.4} - 100 \right) \% = 26.5\%$$

Дебљина свих узорака коришћених за процену дистрибуције дозе била је 1.3 cm у узорцима различите густине. Укупна дебљина узорака била је 2.6 cm када су два слоја стављена у контејнер (слика 25). Пошто је прва равна 35 cm од извора и два слоја узорака су укупне дебљине 2.6 cm, однос између предње и задње равни када нема материјала између слојева, према закону обрнутог квадрата (Ballard, 2018), је:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} = \frac{37.6^2}{35^2} = 1.154$$

У вакууму би хомогеност апсорбоване дозе била 15.4%. На хомогеност, с друге стране, утиче густина узорка (Urban, 2014). У случајевима тканине, пластике и земље, истражује се утицај различитих густина материјала. Слика 31 приказује дистрибуцију дозе у производима различите густине у дебљини од 2.6 cm.



Слика 31. Зависност хомогености дозе у функцији густине производа за узорке озрачене у посуди за брзо зрачење (лична архива)

Код производа озрачених у шаржном режиму, као и производа озрачених у кутији за брзо озрачивање узорака, уједначеност апсорбоване дозе расте са повећањем густине производа.

Утврђено је да је хомогеност апсорбоване дозе зрачења код кутије у режиму између 17 и 34%. Ова хомогеност је одређена густином производа. Сви производи су имали дебљину од 46 cm. Хомогеност узорака гама зрачења дебљине 2.6 cm и озрачених у контејнеру за брзо зрачење, с друге стране, креће се од 17 до 27%.

Због упоредивих вредности дистрибуције дозе, а како смо претходно доказали да брзина дозе не утиче значајно на ефекте озрачивања код посматраних узорака, можемо применити зрачење узорака у контејнеру за брзо озрачивање да бисмо брзо испитали ефекат зрачења на узорке.

4.5. Утврђивање утицаја гама зрачења на садржај патогених микроорганизама у узорцима земљишта

Испитиван је утицај гама зрачења при деконтаминацији земљишта од присуства три патогене бактерије – *E. coli*, *S. aureus* и *P. Aeruginosa*. Тестирано је пет различитих узорака: један на извору реке, један на ушћу и три на местима са већим загађењем. Табела 8 приказује добијене резултате.

Табела 8. Садржај патогених бактерија у земљишту пре и после гама зрачења

Патогена бактерија	МДК[cfu/ml]	Радијациона доза [kGy]	Узорак Тачка 1 (50 cm)	Узорак Тачка 28 (50 cm)	Узорак Тачка 29 (50 cm)	Узорак Тачка 32 (50 cm)	Узорак Тачка 48 (50 cm)
<i>Escherichia coli</i>	1.26	0	>1	2.56	4.11	1.68	>1
		1	>1	>1	>1	>1	>1
		3	>1	>1	>1	>1	>1
<i>Staphylococcus aureus</i>	0<	0	0	0<	0<	0	0<
		1	0	0<	0	0	0<
		3	0	0	0	0	0
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	0<	0	0	0<	0<	0<	0
		1	0	0	0<	0	0
		3	0	0	0	0	0

Из табеле 8 можемо закључити да је доза зрачења од 3 kGy довољна за уклањање свих патогених бактерија из земљишта, што је сагласно литературним подацима (Соггеа *et al.* 2019).

4.6. Садржај плесни у земљишту и утицај различитих доза гама зрачења на деконтаминацију

У испитиваним узорцима земљишта откривена је плесан. Закључак је да се плесан мора уклонити пре него што се земљиште може адекватно користити.

У табели 9 и на слици 32 приказан је укупан број плесни у земљишту узоркованом на 48 позиција дуж слива реке Колубаре, на дубини од 20 cm и 50 cm. Такође, дато је растојање сваке позиције узорковања од тачке формирања реке Колубаре.

Табела 9. Укупан број плесни у земљишту дуж слива реке Колубаре

Позиција узорка	Назив узорка	UTM Е	UTM N	Удаљеност од формирања реке Колубаре	Плесни на дубини од 20 cm	Плесни на дубини од 50 cm
редни број		m	m	km	10 ⁴ cfu/g	10 ⁴ cfu/g
1	Колубара 39	409870	4901541	0	0.47	1.01
2	Колубара 38	411267	4902313	2.08	1.36	1.02
3	Колубара 37	413176	4902302	4.13	2.33	1.04
4	Колубара 36	414809	4902869	6.16	1.92	1.14
5	Колубара 35.3	415957	4903106	7.67	1.47	1.26
6	Колубара 35.2	417231	4903158	9.38	0.97	1.41
7	Колубара 35.1	419073	4903407	12.66	0.56	1.52
8	Колубара 35	420402	4904172	14.41	0.68	1.53
9	Колубара 34	422392	4904432	17.13	0.77	1.55
10	Колубара 33	423969	4904412	19.24	0.88	1.59
11	Колубара 32	425744	4906085	22.82	1.02	1.62
12	Колубара 31	425844	4906627	23.82	1.08	1.60
13	Колубара 30	426017	4908709	26.48	1.14	1.57
14	Колубара 29	427448	4909905	29.62	1.23	1.54
15	Колубара 28.2	428691	4910728	31.55	1.26	1.57
16	Колубара 28.1	429063	4910222	33.66	1.31	1.63
17	Колубара 28	429973	4910814	35.97	1.34	1.68
18	Колубара 27	430811	4911380	37.4	1.41	1.75

19	Колубара 26	432450	4911657	39.46	1.47	1.82
20	Колубара 25	433753	4912103	40.92	1.51	1.88
21	Колубара 24.1	434611	4911729	43.92	1.56	1.96
22	Колубара 24	436200	4913471	46.03	1.56	1.98
23	Колубара 23	436983	4914129	47.16	1.55	2.00
24	Колубара 22	436902	4915180	48.69	1.55	2.02
25	Колубара 21	437618	4915943	49.64	1.54	2.03
26	Колубара 20.1	437726	4916923	52.08	1.52	2.06
27	Колубара 20	438042	4918379	54.39	1.50	2.07
28	Лукавица 4	440828	4914415	53.21	1.66	7.80
29	Колубара 19	439755	4919475	57.44	2.23	7.40
30	Колубара 18	439973	4920354	58.41	2.34	5.97
31	Колубара 17	441544	4925803	64.21	2.41	5.18
32	Колубара 16	441087	4927716	67.44	2.51	3.89
33	Колубара 15	440513	4928554	68.66	2.55	3.65
34	Колубара 14	439805	4929213	69.39	2.54	3.30
35	Колубара 13	439767	4930692	72.26	2.53	2.98
36	Колубара 12	439091	4932009	74.36	2.52	2.64
37	Колубара 11.1	438299	4932954	76	2.51	2.34
38	Колубара 11	438318	4934179	78.44	2.51	2.01
39	Колубара 10	437638	4935240	80.86	2.50	1.71
40	Колубара 9	437166	4936662	83.14	2.49	1.39
41	Колубара 8	437052	4937122	84.66	2.49	1.06
42	Колубара 7	437770	4938992	86.3	2.49	1.51
43	Колубара 6	436974	4939775	88	2.49	1.97
44	Колубара 5	436965	4941019	90	2.48	2.41
45	Колубара 4	437258	4943323	92.14	2.48	2.88
46	Колубара 3	437823	4944668	94	2.41	3.11
47	Колубара 2	439862	4945621	97	2.34	3.24
48	Колубара 1	440398	4945644	97.82	2.29	3.49

У табели 9 примећујемо трендове повећања и опадања броја плесни прикупљених у узорцима земљишта на дубинама од 20 cm и 50 cm дуж слива реке Колубаре.

Укрштањем информација о бројном стању плесни у узорцима из табеле 9 и распореду урбаних и руралних простора са бројем становника из табеле 1, може се закључити следеће:

Бројност плесни је мања на самом ушћу река Обнице и Јабланице, односно на месту формирања реке Колубаре у граду Ваљево (позиција 1), са око 90 хиљада становника. На позицији 1 и дубини од 20 cm број плесни је ($0.47 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$), док је на дубини од 50 cm ($1.01 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$). Захваљујући постројењу за третман отпадних вода, урбана средина наизглед нема велики утицај на повећање броја плесни у приобалном земљишту Колубаре. Приликом протицања реке кроз урбану средину града број плесни на дубини од 20 cm нагло расте до позиције узорковања 3 ($2.33 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$), док на дубини од 50 cm расте постепено све до позиције узорковања 11 ($1.62 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$).

Након изласка из урбане средине Ваљево, позиција узорковања 4, број плесни на дубини од 20 cm полако опада све до позиције узорковања 7 ($0.56 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$), у чијој се близини налазе ливница и фабрика за прераду воћа.

Од позиције узорковања 7 ($0.56 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$) имамо постепен раст броја плесни на дубини од 20 cm све до позиције узорковања 22 ($1.56 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$). У овом потезу река Колубара углавном протиче кроз рурална подручја све до позиције узорковања 20, у близини Лајковца, са око 15 хиљада становника и без постројења за прераду отпадних вода. Од позиције узорковања 22 па све до позиције узорковања 27 ($1.50 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$) имамо тренд благог опадања броја плесни на дубини од 20 cm. У овом потезу река Колубара од Лајковца протиче кроз рурални део све до ушћа река Лукавице и Пештана са самом Колубаром.

Од позиције узорковања 11 ($1.62 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$), па до позиције узорковања 15 ($1.57 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$), на дубини од 50 cm, долази до смањења броја плесни, након чега долази поново до тренда повећавања броја плесни све до позиције узорковања 27 ($2.07 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$), тј. До локације пре уливања река Лукавице и Пештан у Колубару.

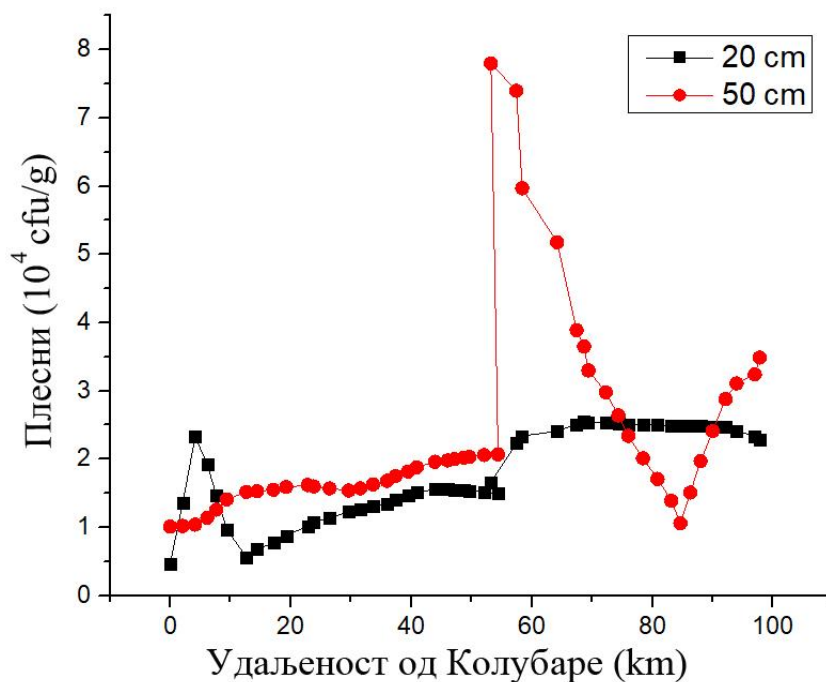
На позицијама узорковања 28 и 29, на реци Лукавици код Лазаревца и код ушћа река Лукавице и Пештан у Колубару, на дубини од 20 cm, долази до скока у броју плесни – позиција 28 ($1.66 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$) и позиција 29 ($2.23 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$), док је скок броја плесни на дубини од 50 cm на позицији 28 ($7.80 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$) и позицији 29 ($7.40 \cdot 10^4 \text{cfu/g}$). Потенцијални узрок за повећање броја плесни су отпадне воде и муљеве из урбаних средина Лазаревца и околине. Реке Лукавица и Пештан примају све отпадне воде

урбаног дела Лазаревца који има око 58 хиљада становника и не поседује постројење за прераду отпадних вода.

Од позиције узорковања 29 ($2.23 \cdot 10^4$ cfu/g) имамо благи раст броја плесни на дубини од 20 cm све до позиције узорковања 33 ($2.55 \cdot 10^4$ cfu/g). У овом потезу река Колубара протиче између површинских копова угља Колубара. На дубини од 50 cm имамо тренд опадања број плесни од позиције узорковања 29 ($7.40 \cdot 10^4$ cfu/g), све до позиције узорковања 41 ($1.06 \cdot 10^4$ cfu/g). У близини позиције узорковања 41, у Колубару се улива река Тамнава са својом притоком Уб, које покривају урбане средине Уб са око 28 хиљада становника и Коцељеву са око 13 хиљада становника, које обе немају постројења за прераду отпадних вода.

Од позиције узорковања 34 ($2.54 \cdot 10^4$ cfu/g), па све до позиције узорковања 48 ($2.29 \cdot 10^4$ cfu/g), локација ушћа реке Колубаре у реку Саву, пратимо тренд постепеног опадања броја плесни на дубини од 20 cm. Колубара у овом потезу протиче углавном кроз руралне крајеве све до Обреновца и уливања у Саву. На дубини од 50 cm имамо тренд наглог скока броја плесни од позиције узорковања 41 ($1.06 \cdot 10^4$ cfu/g), па све до позиције узорковања 48 ($3.49 \cdot 10^4$ cfu/g), тј. уливања Колубаре у Саву. Дуж овог потеза, од уливања реке Тамнаве, Колубара протиче кроз урбано предграђе Обреновца.

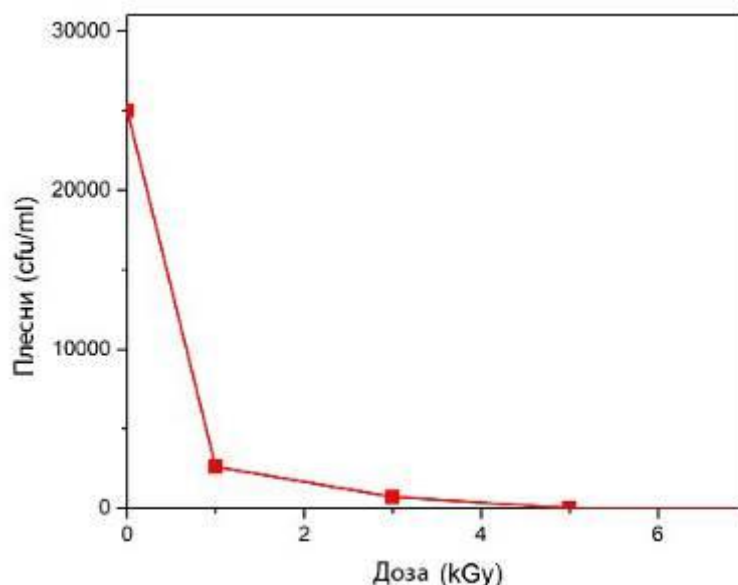
У близини позиције узорковања 43 се налази Јозића колиба, еколошки локалитет и резерват храстова лужњака, док се недалеко од позиције узорковања 44 налази Гребача (депонија Обреновца). Након позиције 44, све до позиције 48, Колубара протиче кроз урбану средину општине Обреновац са око 23 хиљаде становника. Обреновац нема постројење за третман отпадних вода. Од позиције узорковања 42 па до позиције узорковања 48, лева и десна обала Колубаре је обрасла густом шумом.



Слика 32. Садржај плесни у земљишту у зависности од удаљености од извора реке Колубаре. Тачке узорковања представљене су бројевима од 1 до 48.

Са (слике 32) се види да положај тачке у односу на реку Колубару и урбане средине има благ утицај на количину плесни у земљишту. Садржај плесни се креће од 7000 до 25000 cfu/g у свим узорцима.

Ефекат гама зрачења на инактивацију плесни проучаван је применом доза зрачења од 1, 3 и 5 kGy и брзином дозе од 10 kGy/h на узорку са највећом вредношћу плесни (25000 cfu/g). Дијаграм на слици 33, који је публикован и у раду (Gajić *et al.*, 2022), приказује добијене резултате.



Слика 33. Ефекат различитих доза зрачења на смањење плесни у узорцима земљишта

Може се закључити да је доза од 5 kGy довољна за потпуну инактивацију плесни у узорку земљишта.

4.7. Концентрације тешких метала у земљишту

Утврђен је садржај тешких метала у узорцима земљишта прикупљеним са пет кључних тачака узорковања (1, 28, 29, 32 и 48). Утицај тешких метала на микробиолошко стање земљишта углавном укључује утицај на микробну активност земљишта, активност ензима у земљишту и састав микробне заједнице земљишта (Chu, 2018). Добијени резултати упоређени су са ремедијационим вредностима и граничним максималним вредностима из Уредбе о загађивачима, штетним и опасним материјама у земљишту (ОГРС, 2019). Максималне и санационе вредности за садржај тешких метала у земљишту наведене су у овој уредби. Када просечна концентрација било ког тешког метала прелази ремедијациону вредност, пројекат мера се мора применити. (Табела 10.) приказује садржај тешких метала у узоркованом земљишту, као и граничне максималне и ремедијационе вредности загађујућих, штетних и опасних материја у земљишту прописаних регулативом.

Табела 10. Концентрације тешких метала у различитим узорцима земљишта

Тешки метали		Кадмијум	Бакар	Никл	Олово	Цинк	Жива	Арсен	Селен
		Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg	As	Se
Позиција узорка	Дубина	mg/kg суве материје							
1	20 cm	1.9	83.5	33.6	100	150	6.2	15.3	<0.1
	50 cm	2.0	82.0	35.7	78	150	6.7	16.0	<0.1
28	20 cm	2.2	182.5	44.2	116	150	8.2	18.5	<0.1
	50 cm	2.2	178.0	45.8	110	165	9.0	18.6	<0.1
29	20 cm	1.9	185.0	46.2	98	145	9.0	16.3	<0.1
	50 cm	2.0	182.0	40.3	96	145	9.1	16.0	<0.1
32	20 cm	1.8	212.0	28.7	84	120	8.2	14.7	<0.1
	50 cm	1.6	209.0	31.3	83	95	8.3	15.1	<0.1
48	20 cm	1.6	165.0	30.2	90	110	7.5	14.1	<0.1
	50 cm	1.6	160.0	26.3	82	120	7.3	13.2	<0.1
Ремедијационе вредности		12	190	210	530	720	10	55	100
Граничне максималне вредности		0.8	36	35	85	140	0,3	29	0.7

Садржај кадмијума, бакра и живе превазилази граничне максималне вредности у свим испитиваним узорцима, а само садржај бакра (Cu) прелази ремедијационе вредности само у једној тачки узорковања.

На основу табеле 10, могуће је закључити да је садржај тешких метала у анализираним узорцима земљишта испод границе ремедијационих вредности. Тешки метали не морају бити уклоњени из земљишта пре микробиолошке деконтаминације. Једини изузетак је узорак са нешто већим садржајем бакра од дозвољене ремедијационе вредности (тачка узорковања 32).

На обе дубине узорковања вредност премашује ремедијациону вредност за бакар од 190 mg/kg. Могући извори повишене концентрације бакра на датој локацији су копови угља Колубара или оближња термоелектрана Колубара са својим пепелиштем. Пре гама третмана земљишта са тачке узорковања, садржај бакра би требало смањити санацијом. Неке од метода које се генерално користе за уклањање бакра из земљишта су очвршћавање/стабилизација, испирање земљишта, витрификација и флотација (Baskaran *et al.*, 2020; Peng *et al.*, 2009; Yao *et al.*, 2012). Због микробиолошких разлога, након успешног уклањања бакра, земљиште се може третирати гама зрачењем.

Кад сагледамо ситуацију широм слива реке, првенствено треба обратити пажњу на садржај различитих елемената у земљишту, а затим и на њихову концентрацију у зависности од дубине узорковања земљишта. Повећање концентрације различитих елемената са повећањем дубине земљишта, може се објаснити геолошким разлозима, док се повишене концентрације у плићим слојевима могу посматрати као да су антропогеног порекла. Међутим, стање са расподелом концентрације појединих елемената у земљишту је врло компликовано у подручју реке Колубаре. Садржај Hg је повишен у оба слоја узорковања што је јасна индиција утицаја копова, где сама налазишта лигнита имају повећани садржај Hg и As, а и сагоревање лигнита доводи до појаве повишеног садржаја ових елемената у животној средини. За садржај Cd у земљишту такође можемо рећи да је мешовитог порекла. Потенцијалан извор повишене концентрације цинка може бити природног порекла, из налазишта Pb и Zn на Маљену, а може бити и антропогеног порекла, из наменске индустрије Крушик, што се види по његовом повећаном садржају након протицања Колубаре кроз Ваљево. Садржај Ni је геолошког порекла, под утицајем планине Рудник која је карактеристична по наслагама серпетинита који је богат овим елементом. Садржај Cu је углавном антропогеног порекла које се може довести у везу како са сагоревањем лигнита и експлоатацијом његових наслага, тако и са пољопривредним активностима. На основу анализа малог броја прикупљених узорака није могуће утврдити њихово порекло, нити је могуће спровести релевантне статистичке анализе. На основу резултата анализа њиховог садржаја, загађење тешким металима дуж слива реке Колубаре постоји, као што је и раније утврђено (Kalabić, *et al.*, 2019), а самим тим и оправданост и потреба за будућим истраживањима.

Тешки метали и други потенцијално токсични елементи су често присутни у малим количинама у земљишту, а њихов повишен садржај може бити и антропогеног порекла. Од посебаног значаја су пољопривредна земљишта, јер интензивна биљна производња доводи до брзог уласка потенцијално токсичних елемената у ланац исхране (Adriano, 2002). На концентracију потенцијално токсичних елемената у земљишту утичу геохемија матичне стене, климатски и геоморфолошки услови, време изложености временским утицајима, текстура земљишта, живи организми и антропогени инпути, као што су индустријско загађење и рударство, као и неке активности везане за пољопривреду (ђубрење и употреба заштитних средстава) (Roca *et al.*, 2012; Cabral Pinto *et al.*, 2014).

Један од важних чинилаца који утичу на повећање садржаја тешких метала су и промене настале као последице поплава и клизишта. Девастација пејзажа настаје као резултат уклањања земљишта и таложења материјала, као и механичког загађења воде потенцијално токсичним елементима, што доводи до низа еколошких проблема (Milasčić *et al.*, 2017). Садржај потенцијално штетних микроелемената у земљиштима погођених поплавама се константно мења, било да је њихово порекло антропогено (Martínez-Santos *et al.*, 2015) или геолошко (Liu *et al.*, 2016). Ове промене имају посебно негативан утицај на пољопривредно земљиште у речним долинама (Du Laing *et al.*, 2009). Земљишта која су директно погођена поплавним седиментима могу деловати као извор загађења сама по себи, или бити у интеракцији са другим факторима на ширим просторним и временским интервалима (Erfemeijer, 2012). Као резултат тога, речни седименти су постали важан индикатор за идентификацију извора загађења и антропогеног утицаја (Xu *et al.*, 2014).

Геолошко порекло Ni, Cr и Co, као и мешовито (геолошко и антропогено) порекло As и Pb, добро је испитано и њихови нивои су углавном одређени типом стена у планинама на периферији речног слива, где се налазе њихова природна лежишта. Cd, Zn и Cu; са друге стране су у великој мери антропогени, пореклом из места са развијеном индустријом (Ваљево, Лазаревац и Обреновац).

Према свим овим показатељима промене су део природних процеса формирања земљишта у басену, са занемарљивим антропогеним утицајем.

Међутим, због физичко-хемијских промена које се одвијају током поплава, количине полутаната у наносима не могу се користити као једини показатељ њиховог утицаја на приобално земљишта. Као резултат тога, морају се утврдити њихови позадински нивои, као и њихови нивои у поређењу са укупним садржајем полутаната на локацијама за узорковање (N'guessan *et al.*, 2009).

Поплаве доводе до спирања и ерозије контаминираног земљишта, а, такође, приликом великих падавина полутанти настали као последица интензивног саобраћаја на путевима или као продукти индустрије, завршавају у сливу. Бујични токова на овај начин могу транспортовати и потом депоновати полутанте из различитих извора дуж целог слива (Bates *et al.*, 2008).

Од средине шездесетих година XX века догодило се више од 298 поплава у земљама ЕУ, што чини 12% свих глобалних поплава (Green *et al.*, 2013). Између 1915. и 2013. године, у Србији су се догодило 848 бујичних поплава (Petrović *et al.*, 2014), при чему се једна од најгорих догодила 2014. године, а погодила је шест речних сливова: Дунав, Саву, Велику Мораву, Западну Мораву, Дрину и Колубару. Између 15. и 24. маја пало је више од 200 mm кише, што је више од тромесечног просека падавина за то доба године. То је резултирало поплавама на површини земљишта од 482700 ha (SGRF, 2014).

4.8. Поређење методе третмана земљишта употребом јонизујућег зрачења са осталим методама за стерилизацију земљишта

4.8.1 Поређење иновативних и старих технологија и метода за стерилизацију земљишта

Стерилизација земљишта је пракса која се одавно примењује у комерцијалним пластеницима и код пољопривредних произвођача. Пољопривредници стерилишу своја поља када имају проблема са болестима у високим усевима – стерилизација је јефтинија од евентуалних третирања насталих проблема или надокнаде потенцијалног губитка читавог усева.

Код сваке методе стерилизације земљишта постоје предности и недостаци. Када се процедуре ригорозно поштују, негативне последице се могу свести на минимум.

Хемијски третмани и топлотни третмани су две најчешће методе за стерилизацију земљишта (Strausbaugh, 2020), поред методе третмана гама зрачењем, које је испитано у овој дисертацији.

Третмани хемијске стерилизације су једноставни за употребу и примену, чак и када се стерилише велика количина земљишта. Они се углавном користе у ширем обиму од стране комерцијалних компанија.

Међутим, постоје неки значајни недостаци, због чега хемијски третмани нису толико популарни:

- примене хемикалија могу угрозити здравље и безбедност појединца који га примењује, као и других у близини;
- ефекти савремених хемикалија имају прилично уску област употребе; у већини случајева, једна хемикалија је ефикасна само против малог броја болести или патогених микроорганизама;
- након наношења, следи период карантина пре него што се земљиште може поново користити; ово је потребно да би се хемикалије потпуно разградиле или испрале из подлоге;
- полутанти се могу задржати у земљишту и ако се њима не рукује правилно, биљке их кроз корење могу апсорбовати и таложити у својим ткивима у опасним концентрацијама;
- дуготрајна употреба хемикалија може учинити болест или патогене микроорганизме отпорнијим на специфичан третман, временом их чинећи мање ефикасним или чак неефикасним.

Приликом употребе топлотне стерилизације, топлотни третмани се чешће користе да би се избегли многобројни недостаци хемијске стерилизације који су већ поменути. Топлотни третмани подижу температуру земљишта до тачке у којој опасни организми, споре гљивица, микроорганизми и семена корова не могу да преживе. Термичка обрада

се обично назива стерилизација, иако је ово погрешан назив, јер земљиште није потпуно стерилно на повишеним температурама.

Нежељени организми се елиминишу на основу постигнуте унутрашње температуре и времена потребног за њихову елиминацију. Да би се уништили одређени организми у влажном земљишту, препоручује се најмање 30 минута излагања на високој температури.

Иако стерилизација утиче на популацију корисних бактерија у земљишту, она их, према истраживању, не елиминише у потпуности. Одређене врсте, као што су *Pseudomonas* и *Bacillus*, брзо реколонизују земљиште након стерилизације, а њихове популације достижу високе нивое у кратком временском периоду. Ова брза реколонизација надмашује пад популације изазван стерилизацијом.

Ако се дозволи да унутрашња температура подлоге постане превисока, топлотни третмани могу бити опасни. Фитотоксичност растворљивих соли, токсичност мангана и отровних органских једињења може бити повећана и довести до прекомерног загревања земљишта.

Када су изложене претерано високим температурама, већа је вероватноћа да ће ова метода нанети штету мешавинама земљишта где је органска материја више заступљена и брзо се распада (стајњак, бућ на лишћу, компост), него у случају минералних земљишта где се органска материја потпуно разградила.

Примена гама зрачења у животној средини има бројне предности у односу на друге методе, као што је способност да брзо убије бактерије и инактивира вирусе.

4.8.2 Упоредивање оперативних трошкова и примена иновативних и старих технологија и метода

Предвиђање утицаја нове технологије (акцелератор електрона у постројењу за пречишћавање отпадних вода) на текуће трошкове постројења и животну средину је кључна компонента његове примене. Неколико аутора се бавило темом озрачивања

канализационог муља. Тим на Флориди је дефинисао цену од 2,50 \$ за 3785 l муља за постројење за зрачење електрона од 1,5 MeV, које ради при 605 l у минути, док је друга група упоредила зрачење гама и електронским снопом за узорак активног муља и добила трошкове третмана од 4,20 \$/m³ за гама зрачење и 2,10 \$/m³ за зрачење електронским снопом, што је ниже у поређењу са 4,85–5,19 \$, када се користи конвенционална технологија у постројењу за пречишћавање отпадних вода Централног округа „Miami Dade“ (Meeroff *et al.*, 2004). Поред тога, урађено је поређење трошкова између гама зрачења од 6 kGy и постројења за спаљивања муља, при чему је постројење за спаљивање муља коштало 60,87 \$/m³ у поређењу са 3,12 \$/m³ када се користи метод гама зрачења. До сличних резултата дошли су Engohang-Ndong и колеге са 3 MeV акцелератором електрона. У овом сценарију, трошак зрачења једног кубног метра муља дозом од 25,7 kGy износио је 1,26 \$ (Jean *et al.*, 2015). Упоредивањем са другим технологијама примећује се да зрачење муља електронским снопом користи мање енергије, самим тим је постројење ефикасније и потребно је мање новца за његов рад. Зрачење електронским снопом траје дуже и еколошки је прихватљивије технолошко решење.

ЗАКЉУЧАК

Формирана је карта просторне расподеле прикупљених узорака 48 позиција дуж реке Колубаре, као и хидрографска мрежа, главне саобраћајнице и урбане средине на простору слива реке Колубаре.

Основна хипотеза да су урбане, индустријске и експлоатационе активности у сливу реке Колубаре довеле до контаминације приобалног земљишта је јасно доказана. Урбане средине су одговорне за контаминацију слива и приобалног земљишта дуж слива реке Колубаре микроорганизмима услед недостатка инфраструктуре и постројења за третман отпадних вода и муљева, јер већина урбаних средина у овом сливу не поседује постројења за обраду отпадних вода. Изузеци су Ваљево и Барајево који поседују постројења, али су потребна додатна улагања како би се испунили стандарди ЕУ. Утврђено је да након протицаја Колубаре кроз урбане средине (Ваљево, Лајковац, Лазаревац, Обреновац) долази до тренда повећања броја микроорганизама и плесни у приобалном земљишту, док њеним протицајем кроз руралне и слабо насељене области имамо тренд њиховог опадања. Прецизно одређена дистрибуција патогених микроорганизама, укупан број микроорганизама, плесни и бактерија, у приобалној области дуж реке Колубаре, као и њихова вертикална дистрибуција на 48 испитиваних тачака потврђује да су полутанти неравномерно распоређени и указује на утицај урбаних целина.

Бројност микроорганизама на ушћу река Обнице и Јабланице (позиција 1) износи $(0.51 \cdot 10^4 \text{cfu/g})$ на дубини од 20 cm и $(1.04 \cdot 10^4 \text{cfu/g})$ на дубини од 50 cm. Утврђен је и највећи извор загађења микроорганизмима на дубини од 50 cm $(7.40 \cdot 10^4 \text{cfu/g})$ у сливу, позиција узорковања 29, на реци Лукавици, која протиче кроз центар Лазаревца и потом се улива у Колубару. Бројност микроорганизама на позицији 48 уливања Колубаре у Саву на дубини од 20 cm износи $(2.26 \cdot 10^4 \text{cfu/g})$, док на дубини од 50 cm износи $(3.46 \cdot 10^4 \text{cfu/g})$.

Просечна вредност укупног броја микроорганизама у свим испитиваним тачкама дуж слива реке Колубаре износи $(1.78 \cdot 10^4 \text{cfu/g})$ на дубини узорковања од 20 cm, односно

(2.37 10⁴cfu/g) на дубини од 50 cm. Такође је потврђено да је бројност микроорганизама већа на дубини од 50 cm, са 39% у односу на дубину од 20 cm и 4%, што нам указује да загађење земљишта долази из подземних слојева и самог контакта са подземним водама контаминираних водотокова.

Анализом добијених података можемо да констатујемо да тешки метали не премашују прописане ремедијационе вредности, мада већина анализираних полутаната пробија граничне максималне вредности. Порекло виших концентracија тешких метала може да буде природног, геолошког порекла или антропогеног порекла везаног за индустрију. Добијени подаци указују на потребу за будућим обимнијим истраживањима тешких метала у сливу Колубаре. У узорцима прикупљеног земљишта из слива реке Колубаре, утврђене су концентracије садржаја тешких метала на позицијама (1, 28, 29, 32, 48). Све су испод границе ремедијационих вредности, осим јединог изузетака, код ког је незнатно повећан садржај бакра који премашује ремедијациону вредност на позицији узорковања 32, на дубини од 20 cm (212 mg/kg), док је на дубини од 50 cm – (209 mg/kg) (табела 10.). У овом случају, треба извршити санацију земљишта ради смањења садржаја бакра, пре третмана гама зрачењем.

Мапирањем дистрибуције дозе унутар озраченог узорка одредила се ефикасност наведене методе. Даље, установљено је да густина производа има значајан утицај на апсорбовану дозу зрачења у производу. Са повећањем густине материјала, доза зрачења апсорбована у материјалу линеарно пада. Такође, расподела дозе у контејнеру за узорке озрачене у шаржном режиму је прилично упоредива са дистрибуцијом дозе у контејнеру за узорке озрачене у брзом режиму. У сваком случају, због упоредиве дистрибуције дозе, зрачење узорака у контејнеру може се користити за брзу процену утицаја зрачења на материјал са високим степеном поузданости.

Истраживање у склопу ове дисертације је имало за циљ да оптимизује дозу зрачења и брзину дозе погодне за инактивацију патогених микроорганизама из контаминираниог земљишта на локацијама дуж реке Колубаре. Анализама је утврђено присуство три патогене бактерије (*E. coli*, *S. Aureus* и *P. aeruginosa*). Потврђено је да доза од 3 kGy уништава све патогене бактерије, 5 kGy инаktivира плесан, а 10 kGy потпуно стерилише третирано земљиште. Такође, показало се да брзина дозе не игра значајну улогу у микробиолошкој деконтаминацији земљишта применом гама зрачења.

Утврђено присуство патогених микроорганизама (*E. coli*, *S. Aureus* и *P. aeruginosa*) указује на неопходност изградње постројења за пречишћавање и третман отпадних вода и муља, а технологија високоенергетског јонизујућег зрачења би допринела спречавању даље дистрибуције патогених микроорганизама кроз слив реке Колубаре на самом месту настанка. У урбаним срединама широм слива реке Колубаре су у плану изградње постројења за прераду отпадних вода и муљева. Метод високоенергетског јонизујућег зрачења би могао да се употреби као иновативно решење, како у постојећим тако и у будућим постројењима за третман отпадних вода и муљева. Коришћењем ове технологије имали бисмо ефикаснија и профитабилнија постројења за третман отпадних вода и муљева која би решила вишедеценијски проблем загађења водотокова и допринела чистијој животној средини. Методом примене високоенергетског јонизујућег зрачења је доказано да је могућа стерилизација контаминираног земљишта на један иновативан и брз начин. Тренутно је могуће примењивати ову методу само на локацији Института за нуклеарне науке „Винча“, у Београду, где се налази индустријско постројење за третман гама зрачењем. Свакодневним напретком у развоју нуклеарних технологија можемо очекивати и иновације које ће омогућити ефикаснију примену метода високоенергетског јонизујућег зрачења на самим изворима загађења у постројењима за третман отпадних вода и муља.

Зрачење се дуго користи за регулисање микробне популације у храни, медицинској опреми и животној средини, а употреба зрачења електронским снопом за искорењивање могућих људских и животињских патогена из канализационог муља је нова. Технологија је доказала своју способност да елиминише бактеријске популације до нивоа који се сматрају безбедним за људе и животну средину. Показало се да су цене коришћења технологије метода високоенергетског јонизујућег зрачења за чишћење канализационог муља конкурентне традиционалним методама и трошковима третмана канализационог муља, попут механичке и хемијске методе. Употреба ове технике отвара нове могућности великим градовима широм света да безбедно рециклирају муљ из комуналних отпадних вода.

ЛИТЕРАТУРА

- Aguilar, J., Urday-Cornejo, V., Donabedian, S., Perri, M., Tibbetts, R. (2010). *Staphylococcus aureus meningitis: case series and literature review*. *Medicine (Baltimore)* 89(2): pp. 117-125.
- Adriano, D. C. (2002). Trace elements in terrestrial environments. Biogeochemistry, bioavailability, and risk of metals. Springer- Verlag, Berlin. XII, pp. 867. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-21510-5>
- Azara, E., Piras, M. G., Parisi, A., Tola, S. (2017). Antimicrobial susceptibility and genotyping of *Staphylococcus aureus* isolates collected between 1986 and 2015 from ovine mastitis. *Vet Microbiol* 205: pp. 53-56.
- Al-Bachir, M., Al-Adawi, M. A., & Shamma, M. (2003). Synergetic effect of gamma irradiation and moisture content on decontamination of sewage sludge. *Bioresource Technology*, 90(2), pp. 139–143. doi:10.1016/s0960-8524(03)00124-x
- Ali Mussad, R. (2004). Disinfection of Sewage Water and Sludge using Gamma Radiation, Sudan Academy of Sciences (SAS), Atomic Energy Research Coordination Council.
- Анђелковић, М., Митровић-Петровић, Ј., Јанкичевић, Ј. (1989). Палеогеографија Србије, креда, РГФ, Београд.
- Antić-Mladenović, S., Frohne, T., Kresović, M., Stärk, H. J., Tomić, Z., Ličina, V., Rinklebe, J. (2017). Biogeochemistry of Ni and Pb in a periodically flooded arable soil: fractionation and redox-induced (im)mobilization. *J Environ Manag* 186: pp.141–150
- Bajić, D., Polomčić, D. (2012). A conceptual hydrogeological model for open pit mine Polje E (Kolubara coal basin, Serbia). u: Růžička J., Růžičková K. [ur.] *The GIS Ostrava 2012: Surface models for geosciences symposium*, Ostrava, Czech Republic, 23-25 January 2012, Proceedings of, Ostrava: Technical University of Ostrava-Vysoká škola báňská, pp 1-12.
- Baley, D., Humm, J., Todd-Pokropek, A., Van Aswegen, A. (2014). *Nuclear Medicine Physics: A Handbook for Teachers and Students*, IAEA.
- Ballard, J. (2018). *Radiation Safety*. Oregon: Linn Benton Community College
- Baskaran, V., Dhivakar, M. R., Gunasegaran, V. (2020). Electrokinetic remediation of copper polluted soil concatenated with an adsorption zone. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 14, 100395. doi:10.1016/j.enmm.2020.100395

- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., Palutikof, J. P. (2008). Climate change and water. Technical paper of the intergovernmental panel on climate change. IPCC Secretariat, Geneva
- Belanović-Simić, S., Perović, V., Vidojević, D., Kostadinov, S., Knežević, M., Kadović, R., Kosanin, O. (2013). Assessment of soil erosion intensity in Kolubara District, Serbia. *Fresenius Environ Bull* 22(5a): pp. 1556–1563
- Bell, H. (2000). Fumigation in the 21st century. *Crop Protect.* 19, pp. 563–569.
- Belyaev, A., Ross D. (2021). Beta-Decay. *The Basics of Nuclear and Particle Physics* pp. 105-125
- Bojanowska-Czajka, A. (2021). "Decomposition of diclofenac in sewage from municipal wastewater treatment plant using ionizing radiation" *Nukleonika*, vol.66, no.4, 2021, pp.201-206. <https://doi.org/10.2478/nuka-2021-0029>
- Borrely, S. I., Cruz, A. C., Delmaestro, N. L., Sampa, M. H. O., Somessari, E. S. (1998). Radiation processing of sewage sludge: A review. *Progress in Nuclear Energy.* 1998; 33: pp. 3-21
- Bose, S., Bhattacharyya, A. K. (2008). Heavy metal accumulation in wheat plant grown in soil amended with industrial sludge, *Chemosphere*, 70, pp. 1264– 1272.
- Buhač, D., et al. (2012). Designe solution of open pit South Field dewatering from surface and underground water, coal basin Kolubara. u: Pavlović V. [ur.] *The X International Opencast Mining Conference OMC 2012*, Belgrade: Yugoslav Opencast Mining Committee, Proceedings of, pp. 19-32.
- Вакањац, Б., Гајић, В., Ристић Вакањац, В., Божић, Н. (2016). “Методологија израде просторне базе загађивача реке Дрине“, Пета национална научна конференција “Иновациони модели екосистемског инжењерства“, 8. Октобра, Београд.
- Вакањац, Б., Ристић Вакањац, В., (2015). Примена ГИС-а при картирању девостираних подручја, Прво саветовање са међународним учешћем Информационе технологије развој и примена у унапређењу животне средине, "IT ЕКО 2015" (ед. Танасијевић Љ. и Цокић З.), pp 98-111, Београд, ISBN: 978-86-80464-00-8, COBISS.SR-ID 219554572, Издавач: Удружење кластер комора за заштиту животне средине и одрживи развој, Београд.
- Vakanjac, B., Ristic Vakanjac, V., Bartula, M., Aleksic, J. (2014).: Devastation of riverside areas by gravel mining: Case study of the Bogatić Municipality in Serbia, International Conference „Ecological Improvment of Devastated Sites for Sustainable Development“ – ECOIDS-2014 (Ed. Gordana Dražić), pp 29-36, Belgrade, Serbia,

ISBN 978-86-86859-39-6, COBISS.SR-ID 212253452, Publisher: Faculty of Applied Ecology, Belgrade

- Вакањац, Б., Чопорда Мاستиловић, Т. (2010). “Лежиште минералних сировина, загађење и проблеми, организација ГИС базе података“, Зборник радова, Међународна конференција „Деградирани простори и екоремедијација“, 21.-22.мај, Београд, стр. 121
- Vasović, M. (2002). Podrinjsko-valjevske planine. Valjevo: Agencija Valjevac
- Vujić, I., Mašić, S., Spasevska, H., Dramicanin, M. (2018). Accuracy of Determining Absorbed Irradiation Dose at Different Temperature Measurements Using Ethanol-Chlorobenzene Oscillotitrator system, Nuclear Technology and Radiation Protection, 33(04), pp. 363-368. doi: 10.2298/NTRP180316004V
- Гавриловић, Л., Дукић, Д. (2002). Реке Србије. Београд: Завод за уџбенике и наставна средства
- Gajić, V., Vujčić, I., Dražić, G., Milovanović, J., Mašić, S. (2022). Use of high-energy ionizing radiation for microbiological decontamination of coastal soil in the Kolubara river basin, Nuclear technology and radiation protection, Vol. XXXVI, No. 3, pp. 261 - 270, Jan, 2022
- Gamliel, A., Hadar, E., Katan, J. (1987). Microbial phenomena related to increased growth response in solarized soils and to monoculture systems. Proceedings of the 7th Congress of the Mediterranean Phytopathological Union.
- Gautam, S., Shah, M. R., Sabharwal, S., Sharma, A. (2005). Radiation hygienization and value addition to municipal sewage sludge, Water Environ. Res. 77 (2005) pp. 472–479.
- Геолис, Geological Information System of Serbia (2010). Основне геолошке карте Србије 1:100000. Завод за геолошка и геофизичка истраживања Београд 1959–1966. <http://geoliss.mre.gov.rs/>
- Gräfe, J. (2021). X-Ray Magnetic Circular Dichroism and X-Ray Microscopy. Magnetic Measurement Techniques for Materials Characterization pp. 231-245
- Gracheva, A. Yu., Zav'yalov, M. A., Ilyukhina, N. V., Kukhto, V. A., Tarasyuk, V. T., Filippovich, V. P., Egorkin, A. V., Chasovskikh, A. V., Pavlov, Yu. S., Prokopenko, Strokova, A. V., N. E., Artem'ev, S. A., Polyakova, S. P. (2016). Enhancement of efficiency of storage and processing of food raw materials using radiation technologies. Physics of Atomic Nuclei volume 79, pp. 1682–1687

- Green, C., Dieperink, C., Ek, K., Hegger, D. L. T., Pettersson, M., Priest, S., Tapsell, S. (2013). Flood risk management in Europe: the flood problem and interventions (report no D1.1.1), STAR-FLOOD Consortium, Utrecht
- Група аутора (1989). Геологија шире околине Београда. Књига IV, палеогеографија, РГФ, Београд.
- Група аутора, (1984). Дегурићка пећина, Елаборат, Друштво истраживача „ Владимир Мандић – Манда“, Ваљево;
- Gheorghe, S., Stoica, C., Vasile, G. G., Nita-Lazar, M., Stanescu, E., Lucaciu, I. E. (2017). Metals Toxic Effects in Aquatic Ecosystems: Modulators of Water Quality. *Water Quality*. doi:10.5772/65744
- Degrange, V., Lensi, R., Bardin, R. (1997). Activity, size, and structure of a *Nitrobacter* community as affected by organic carbon and nitrite in sterile soil. *FEMS Microbiol. Ecol.* 24, pp. 173–180
- Deredjian, A., Colimon, C., Hien, E., Brothier, E., Youenou, B., Cournoyer B., Dequiedt, S., Hartmann, A., Jolivet, C., Houot, S., Ranjard, L., P. A. Saby N., Nazaret, S. (2014). Low occurrence of *Pseudomonas aeruginosa* in agricultural soils with and without organic amendment. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 4. doi:10.3389/fcimb.2014.00053
- Diggle, S., Whiteley, M. (2020). Microbe Profile: *Pseudomonas aeruginosa*: opportunistic pathogen and lab rat. *Microbiology* 166 (1): pp. 30–33. doi:10.1099/mic.0.000860
- Doi, Y., Nakanishi, I., Konno, Y. (2000). Operational experience of a commercial scale plant of electron beam purification of flue gas, *Radiat. Phys. Chem.* 57 (2000) pp. 495–499.
- Докмановић, П., Стевановић, З., Матић, И., Ристић Вакањац, В. (2013). Стручно мишљење о хидрогеолошким аспектима градње РВС „Ровни“, Београд;
- Kalabić, D., Dražić, G., Dražić, N., Ikanović, J. (2019): Production of Agri-Energy Crop *Miscanthus giganteus* on Land Degraded by Power Industry: SWOT Analysis. *Pol. J. Environ. Stud.* 28(5):3243–3251, DOI: <https://doi.org/10.15244/pjoes/93745>
- Драгићевић, С. (2002). Квантитативна анализа рељефа на примеру слива Колубаре. *Глобус* бр. 27, СГД, Београд.
- Dragičević, S., Živković, N., Ducić, V. (2007): Factors of flooding on the territory of the municipality of Obrenovac. *Zbornik radova Geografskog fakulteta*, sv. 55, Beograd.
- Dragičević, S., Živković, N., Novković, I., Petrović, A., Tošić, R., Milevski, I. (2016): Hydro- logical and suspended sediment regime in the Kolubara River during the extreme year of 2014. *Revista de Geomorfologie*, 18: 26–38

- Dragicevic, S., Zivkovic, N., Roksandic, M., Kostadinov, S., Novkovic, I., Tosic, R., ... Blagojevic, B. (2012). Land Use Changes and Environmental Problems Caused by Bank Erosion: A Case Study of the Kolubara River Basin in Serbia. *Environmental Land Use Planning*. doi:10.5772/50580
- Drndarski, N., Stojic, D., Markov, Z. (1993). Stable isotopes in periphyton and sediments from the kolubara river and its tributaries. *Environmental Pollution* 80, pp. 287-292
- Дукић, Д. Ж. (1982). Хидрологија копна. Београд: Научна књига
- Du Laing, G., Rinklebe, J., Vandecasteele, B., Meers, E., Tack, F. M. G. (2009). Trace metal behaviour in estuarine and riverine floodplain soils and sediments: a review. *Sci Total Environ* 407(13): pp. 3972–3985. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.07.025>
- Дуцић, В, Радовановић М (2005): Клима Србије, Завод за уџбенике и наставна средства, Београд, стр. 212.
- Ђорђевић, С., Целетовић, Ж., Станојевић, Д., Радан, З. (2014). Микробиолошке и биохемијске особине депосола РБ “Колубара”. *Заштита материјала* 55(1), пп. 91-94
- Ђукановић, Д. (2000). Клима Ваљевског краја. Скупштина општине Ваљево, Ваљево.
- Ено, С. Ф., Попенов, Н. (1964). Gamma radiation compared with steam and methyl bromide as a soil sterilizing agent. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.* 28, pp. 533–535.
- Erfteemeijer, P. L. A., Riegl, B., Hoeksema, B. W., Todd, P. A. (2012). Environmental impacts of dredging and other sediment disturbances on corals: a review. *Mar Pollut Bull* 64(9): pp. 1737–1765. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.05.008>
- Etzel, J. E., Born, G. S., Stein, J., Helbing, T. J., Baney, G. (1969). Sewage sludge conditioning and disinfection by gamma irradiation. *Am. J. Public Health*, 59, pp. 2067-2076
- Eugenio, N. R., McLaughlin, M., Pennock, D. (2018). Soil pollution: a hidden reality. Food and agriculture organization of the united nations Rome, Italy
- ECS (2017). European committee for standardization. 2017 ISO/ASTM 51538:2017: Standard practice for use of the ethanol-chlorobenzene dosimetry system
- Живковић, Н. (1995): Утицај физичко-географских фактора на висину отицаја у Србији.
- Живковић, Н., Драгићевић, С. (2003): Режим падавина у региону Београд. Међународни научни скуп "Београд и његов регион", Обреновац, стр. 159-166.

- Zhang, J., Zhang, G., Cai, D., Wu, Z. (2015). Immediate remediation of heavy metal (Cr(VI)) contaminated soil by high energy electron beam irradiation. *Journal of Hazardous Materials*, 285, pp. 208–211. doi:10.1016/j.jhazmat.2014.11.007
- IAEA, International Status and Prospects for Nuclear Power (2017). Report by the Director General, 2017.
- Iller, E., Chmielewska, D. K., Koczy, B., Rygula, C. (2002). Testing of Compact ESP for Removal of Hygroscopic Ammonium Salts from Flue Gases, Rep. A-5/2002, 52, Institute of Nuclear Chemistry and Technology, Warsaw (in Polish).
- Ingham, E.R. (2020). Soil Bacteria, Natural Resources Conservation Service Soils - United States Department of Agriculture
- IPE, (2011). Influence of plant-earthworms' interactions on SOM chemistry and p, p'-DDE bioaccumulation. *Chemosphere*, 83 (2011), pp. 897-902.
- Islam, M. S., Ahmed, M. K., Raknuzzaman, M., Habibullah -Al- Mamun, M., & Islam, M. K. (2015). Heavy metal pollution in surface water and sediment: A preliminary assessment of an urban river in a developing country. *Ecological Indicators*, 48, pp. 282–291. doi:10.1016/j.ecolind.2014.08.016
- ISO/ASTM 51538 (2009). Practice for use of the ethanol-chlorobenzene dosimetry system, International Organization for Standardization. (2009)
- Jean, E-N., Uribe, R. M., Roger, G., Mahinda, G., Nickelsen, M.G., Philip, L. (2015). Effect of electron beam irradiation on bacterial and Ascaris ova loads and volatile organic compounds in municipal sewage sludge. *Radiation Physics and Chemistry*. 2015;112:6-12. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2015.02.013
- Jeж, Ж., Калуђеровић, З. (1985). Шалитрена пећина, палеолитско и неолитско налазиште, Археолошки преглед за 1985. годину, Љубљана;
- Јовановић, Б. (1956). Рељеф слива реке Колубаре, Српска академија наука, књ CCLXIII, Географски институт, књ. 10, Београд;
- Joksić, D., Bajat, B. (2004). Elements of spatial data quality as information technology support for sustainable development planning. *Spatium*, br. 11, str. 77-83
- Josimović, B. (2003). Implementation of the environmental management system in spatial planning. Belgrade: Faculty of Geography, Master Thesis
- Josimović, B. (2008). Spatial aspects in communal waste management in Kolubara region. Belgrade: Faculty of Geography, PhD dissertation

- Kalnejais, L. H., Martin, W. R., & Bothner, M. H. (2010). The release of dissolved nutrients and metals from coastal sediments due to resuspension. *Marine Chemistry*, 121(1-4), pp. 224–235. doi:10.1016/j.marchem.2010.05.002
- Карловић, Е. (2010). Муљеви од пречишћавања комуналних отпадних вода – легистатива коришћења и третмана муљева
- Kelsey, J. W., Slizovskiy, I. B., Peters, R. D., Melnick A. M. (2010). Sterilization affects soil organic matter chemistry and bioaccumulation of spiked p, p'-DDE and anthracene by earthworms. *Environ. Pollut.*, 158 (2010), pp. 2251-2257.
- Kovács, A., Miller, A. (1986). Electron dose determination by ethanol-monochlorobenzene dosimeter. *Radiation Physics and Chemistry*, 28 (5–6), 531-533. doi: 10.1016/1359-0197(86)90183-9
- Kovács, A., Slezsák, I., McLaughlin, W. L., Miller, A. (1995). Oscillometric and conductometric analysis of aqueous and organic dosimeter solutions. *Radiation Physics and Chemistry*, 46(4-6), pp. 1211–1215. doi:10.1016/0969-806x(95)00357-4
- Kovács, A., Stenger, V., Földiák, G. (1987). Evaluation methods of the ethanol — monochlorobenzene dosimeter system, *Proceedings of the 6th Tihany Symposium on Radiation Chemistry*, 2, pp. 701–709
- Kotowska, U., Zalikowski, M., Isidorov, V. A. (2012). HS-SPME/GC-MS analysis of volatile and semi-volatile organic compounds emitted from municipal sewage sludge. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2012;184:2893-2907
- L'Annunziata, M. (2007). *Radioactivity*, Elsevier Inc.
- L'Annunziata, M. (2012). *Handbook of Radioactivity Analysis*, Elsevier Inc.
- Lee, O. M.; Kim, H. Y.; Park, W.; Kim, T. H.; Yu, S. (2015). A comparative study of disinfection efficiency and regrowth control of microorganism in secondary wastewater effluent using UV, ozone, and ionizing irradiation process. *J. Hazard. Mater.* 2015, 295, pp. 201–208.
- Lessel, T. (1990). The sewage sludge irradiation plant in “Geiselbullach”. In: *Joint Meeting of American Society of Civil Engineers, Task Committee on Radiation Energy Treatment of Water, Wastewater and Sludges IAEA Coordination Research Group, Arlington (USA)*, pp. 1–21
- Lessel, T., Suess, A. (1984). Ten year experience in operation of sewage treatment plant using gamma irradiation. *Radiation Physics and Chemistry*. 1984;24:3-11
- Liegel, L. J. (1986). Effects of sterilization procedures on the biological, chemical, and physical properties of soils: a review. *Turrialba* 36, pp. 11–19.

- Little, J. (2003). *Principal Cellular and Tissue Effects of Radiation*, Holland-Frei Cancer Medicine. 6th edition, 2003.
- Liu, J., Sun, S. (2013). Total concentrations and different fractions of heavy metals in sewage sludge from Guangzhou, China. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23(8), pp. 2397–2407. doi:10.1016/s1003-6326(13)62747-8
- Liu, J., Wang, J., Chen, Y., Xie, X., Qi, J., Lippold, H., Luo, D., Wang, C., Su, L., He, L., Wu, Q. (2016). Thallium transformation and partitioning during Pb–Zn smelting and environmental implications. *Environ Pollut* 212: pp. 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.01.046>
- Lotrario, J. B., Stuart, B. J., Lam, T., Arands, R. R., O'Connor, O. A., Kosson, D. S. (1995). Effects of sterilization methods on the physical characteristics of soil: implications for sorption isotherm analyses. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 54, pp. 668–675
- Luo, G. (2012). Determination of Total Arsenic in Wastewater and Sewage Sludge Samples by Using Hydride-Generation Atomic Fluorescence Spectrometry Under the Optimized Analytical Conditions. *Analytical Letters*, 45(17), pp. 2493–2507. doi:10.1080/00032719.2012.694131
- Luo, Y. M., Yan, W. D., Christie, P. (2001). Soil solution dynamics of Cu and Zn in a Cu- and Zn-polluted soil as influenced by -irradiation and Cu-Zn interaction. *Chemosphere* 42, pp. 179–184.
- Marlise, dos S., Beatriz, A De S., Débora, M. C., Cintia, A. R., Felipe, C. E., Ana Maria, M. Da S., Nicolás, G. C., Phillipe, A. S., Thais, R. (2019). The Effects of Hypergravity and Radiation Exposure on Plants -Preliminary Results; Conference: AsMA 2019; Las Vegas, USA
- Martínez-Santos, M., Probst, A., García-García, J., Ruiz-Romera, E. (2015). Influence of anthropogenic inputs and a high-magnitude flood event on metal contamination pattern in surface bottom sediments from the Deba River urban catchment. *Sci Total Environ* 514: pp. 10–25. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.078>
- Матић, Б. И., Ракић, У. Д., Дејановић, С. М., Јовановић, В. С., Јевтић, М. Р., Ђонович, Н. Ж. (2017). Индустрijски контаминирани локалитети у Србији као потенцијална јавно-здравствена претња за изложену популацију. *Техника вол.* 72, бр. 3, стр. 441-447
- Mahmood, T., Mehnaz, S., Fleischmann, F., Ali, R., Hashmi, Z. H., Iqbal, Z. (2014). Soil sterilization effects on root growth and formation of rhizosheaths in wheat seedlings. *Pedobiologia*, 57(3), pp. 123–130. doi:10.1016/j.pedobi.2013.12.005

- Meeroff, D., Waite, T., Kazumi, J., Kurucz, C. (2004). Radiation-assisted process enhancement in wastewater treatment. *Journal of Environmental Engineering*. 2004;130:155-166
- Мијатовић, Б. (1983). Зависност хидродинамичког режима и биланса издани од дубинске циркулације у Лелићком карсту, Зборник радова одбора за крас и спелеологију САНУ, бр. 1, стр. 1-24, Српска академија наука и уметности, Београд;
- Milačić, R., Zuliani, T., Vidmar, J., Oprčkal, P., Ščančar, J. (2017). Potentially toxic elements in water and sediments of the Sava River under extreme flow events. *Sci Total Environ* 605–606: pp. 894–905. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.260>
- Милојевић, Н. (1959). Геологија и хидрогеологија терена јужно од Ваљева, докторска дисертација, Расправе завода за геолошка и геофизичка истраживања VIII, Београд;
- Molamahmood, H. V., Qin, J., Zhu, Y., Deng, M., Long, M. (2020). The role of soil organic matters and minerals on hydrogen peroxide decomposition in the soil. *Chemosphere* 249, 126146. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126146
- Moradi, F., Khandaker, M. U., Mahdiraji, G. A., Ung, N. M., & Bradley, D. A. (2017). Dose mapping inside a gamma irradiator measured with doped silica fibre dosimetry and Monte Carlo simulation. *Radiation Physics and Chemistry*, 140, 107–111. doi:10.1016/j.radphyschem.2017.01.032
- Mortuza, M. F., Lepore, L., Khedkar, K., Thangam, S., Nahar, A., Jamil, H. M., Alam, M. K. (2018). Commissioning dosimetry and in situ dose mapping of a semi-industrial Cobalt-60 gamma-irradiation facility using Fricke and Ceric-cerous dosimetry system and comparison with Monte Carlo simulation data. *Radiation Physics and Chemistry*, 144, 256–264. doi:10.1016/j.radphyschem.2017.08.022
- McNamara, N. P., Black, H. I. J., Beresford, N. A., Parekh, N. R. (2003). Effects of acute gamma irradiation on chemical, physical and biological properties of soils. *Applied Soil Ecology*, 24(2), pp. 117–132. doi:10.1016/s0929-1393(03)00073-8
- Navab-Daneshmand, T., Julian, T. R., Mosler, H-J., Friedrich, M. N. D., Montealegre, M. C., Gächter, M., Mlambo, L. S. (2018). *Escherichia coli* Contamination across Multiple Environmental Compartments (Soil, Hands, Drinking Water, and Handwashing Water) in Urban Harare: Correlations and Risk Factors. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 98(3), pp. 803–813. doi:10.4269/ajtmh.17-0521

- N'guessan, Y. M., Probst, J. L., Bur, A., Probst, A. (2009). Trace elements in stream bed sediments from agricultural catchments (Gascogne region, S-W France): where do they come from? *Sci Total Environ* 407(8): pp. 2939–2952. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.047>
- ОГРС (2019). Службени гласник Републике Србије. 2019. Уредба о граничним вредностима загађујућих материја, штетних и опасних материја у земљишту, 30/2018, 64/2019
- Okazaki, M., Hirata, E., Tensho, K. (1983). TTC reduction in submerged soils. *Soil Sci. Plant Nutr.* 29, pp. 489–497.
- Page, A. L., Miller, R. H., Keeney, D. R. 919820. (2009). *Methods of Soil Analysis, part 2, 2nd edition.* American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Paterne, M., Michel, É., Hatté et Jean-Claude Dutay C. (2020). Carbon-14. *Paleoclimatology* pp. 51-71
- Peng, J., Song, Y., Yuan, P., Cui, X., Qiu, G. (2009). The remediation of heavy metals contaminated sediment. *Journal of Hazardous Materials*, 161(2-3), pp. 633–640. doi:10.1016/j.jhazmat.2008.04.061
- Person, J. C., Ham, D. O. (1988). Removal of SO₂ and NO_x from stack gases by electron beam irradiation, *Radiat. Phys. Chem.* 31 (1988) pp. 1–8.
- Petrović, A., Kostadinov, S., Dragičević, S. (2014). The inventory and characterization of torrential flood phenomenon in Serbia. *Pol J Environ Stud* 23(3): pp. 823–830
- Pierce, J., Weiner, R., Veslind, P. (1998). *Environmental Pollution and Control*, Elsevier Inc.
- Pikaev, A. K. (1998). “Electron-beam purification of water and wastewater”, *Environmental Application of Ionizing Radiation*, Wiley-Interscience, New York (1998) pp. 495–506.
- Пиуковић-Бабичковић, Б., Војиновић, Ж., Вукадиновић, П. (2016). Иновирано пречишћавање отпадних вода као предуслов за коришћење муља у пољопривреди. *Економика пољопривреде*, вол. 63, бр. 2, стр. 471-484
- Podzorova, E. A., Ryabchenko, V. I., Ryabchenko N. I. (1992). Radiation treatment of industrial sewage.
- Поповић, А. Р., Ђорђевић, Д. С., Релић, Д. Ј., Ђиновић-Стојановић, Ј. М. (2013).: Термоелектране у Србији као могући извори загађивања површинских и подземних вода макро- и микроелементима. У: *Енергетика и животна средина* (ур. Анбелковић, М.), Српска Академија Наука и Уметности, Београд, стр. 373-401.

- Радовановић, М. (2001). Утицај рељефа и атмосферске циркулације на диференцијацију климата у Србији. Докторска дисертација, Географски факултет, Београд.
- Ramsay, A. J., Bawden, A. D. (1983). Effects of sterilization and storage on respiration, nitrogen status and direct counts of soil bacteria using acridine orange. *Soil Biol. Biochem.* 15, pp. 263–268.
- Ranković, B., Nikolić, N., Mašić, S., Vujčić, I. (2020). Dose mapping of products with different density irradiated in ⁶⁰Co irradiation facility of the Vinca institute, Serbia. *Nuclear Technology and Radiation Protection*, 35(1), 56-63. doi:10.2298/NTRP2001056R
- Rawat, K. P., Sharma, A., Rao, S. M. (1997). Microbiological and physicochemical analysis of radiation disinfected municipal sewage, *Water Res.* 32 (1997) pp. 737– 740.
- Reinthal, F.F., Galler, H., Feierl, G., Haas, D., Leitner, E., Mascher, F., et al. (2013). Resistance patterns of *Escherichia coli* isolated from sewage sludge in comparison with those isolated from human patients in 2000 and 2009. *Journal of Water and Health.* 2013;11:13-20
- Roca, N., Pazos, MS., Bech, J. (2012). Background levels of potentially toxic elements in soils: a case study in Catamarca (a semiarid region in Argentina). *Catena* 92: pp. 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.11.009>
- Ruiz-Fernández, A. C., Sanchez-Cabeza, J.-A., Alonso-Hernández, C., Martínez-Herrera, V., Pérez-Bernal, L. H., Preda, M., Quejido-Cabezas, A. J. (2012). Effects of land use change and sediment mobilization on coastal contamination (Coatzacoalcos River, Mexico). *Continental Shelf Research*, 37, pp. 57–65. doi:10.1016/j.csr.2012.02.005
- Ruml, M., Gregorić, E., Matović, G., Radovanović, S., Vujadinović, M., Vuković, A. (2016). Temperature and Precipitation Changes in Serbia Between 1961 and 2010. *Annals of the University of Craiova Agriculture, Montanology, Cadastre Series*, 46(2): pp. 260-265
- Rutherford, E., Royds T. (1908). Spectrum of the radium emanation, *Philosophical Magazine, Series 6*, vol. 16, pp. 313–317
- Sabharwal, S., Shah, M. R., Kumar, N., Patel, J. B. (2004). “Technical and economical aspects of radiation hygienization of municipal sewage sludge using gamma irradiator”, *Radiation Processing of Gaseous and Liquid Effluents*, internal report, IAEA, Vienna, 2004.

- Samardzic, I. (2017). Occupation and land degradation due to mining works: Example of the 'Kolubara' mining basin. *Zbornik radova - Geografski fakultet Univerziteta u Beogradu* (65-1a), pp. 307-318. doi:10.5937/zrgfub1765307S
- Sameh F. N., Anwaar A., Iman S. N., Mona M., Alsherbeny, H. A., Naglaa M. F., Hadeer H., Sawsan M. (2022) Primary and secondary sludge treatment using ionizing radiation technology in Alexandria, Egypt, *Applied Radiation and Isotopes*, Volume 181, 2022, 110101, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110101>.
- Sampa, M. H. O. (2004). "Ongoing research in Brazil using electron beam liquid waste treatment", *Status of Industrial Scale Radiation Treatment of Wastewater and its Future*, IAEA-TECDOC-1407, IAEA, Vienna (2004) pp. 29—36.
- Sandoli, R. L., Ghiorse, W. C., Madsen, E. L. (1996). Regulation of microbial phenanthrene mineralization in sediment samples by sorbent-sorbate contact time, inocula and gamma irradiationinduced sterilization artifacts. *Environ. Toxicol. Chem.* 15, pp. 1901–1907.
- Santos-Araujo, S. N., Alleoni, L. R. F. (2016). Concentrations of potentially toxic elements in soils and vegetables from the macroregion of São Paulo, Brazil: availability for plant uptake. *Environ Monit Assess* 188(2): pp. 92. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5100-2>
- SGRF (2014). Serbian Government Reports on Floods 2014. <http://reliefweb.int/report/serbia/serbia-floods-2014>
- Sivinski, J., Ahlstrom, S. (1984). Summary of Cesium-137 sludge irradiation activities in the United States. *Radiation Physics and Chemistry Special Issue on Irradiation Technology for Environmental Conservation*. 1984. p. 14
- Smolders, E., Oorts, K., Sprang, P.van, Schoeters, I., Janssen, C. R., McGrath, S. P. (2009). Toxicity of trace metals in soil as affected by soil type and aging after contamination: Using calibrated bioavailability models to set ecological soil standards, *Environ Toxic Chem*, 28(8), pp. 1633–1642.
- Solpan, D., Guven, O., Takacs, E., Wojnariwits, L., Dajka, K. (2003). High energy irradiation treatment of aqueous solutions of azo dyes: Steady state gamma radiolysis experiments, *Radiat. Phys. Chem.* 67 (2003) pp. 531–534.
- Stankovic, S., Kalaba, P., & Stankovic, A. R. (2013). Biota as toxic metal indicators. *Environmental Chemistry Letters*, 12(1), pp. 63–84. doi:10.1007/s10311-013-0430-6

- Станојевић, Д. (2009). Биогеографске особености кањонско-клисурастог дела долине реке Рибнице и њихова адекватна заштита. Зборник радова - Географски факултет Универзитета у Београду, бр. 57, стр. 47-58
- Stanojković-Sebić, A., Dinić, Z., Maksimović, J., Ferdinando, M., Jaramaz, D., Pivić, R. (2015). Stanje i predlog mera popravke zemljišta opštine Veliko Gradište. U: Održivo korišćenje zemljišta (ur. Ninkov, J., zbornik radova naučno-stručnog skupa, 10. septembar 2015., Rimski Šančevi), Institut za ratarstvo i povrtarstvo, Novi Sad, str. 123-129.
- Strausbaugh, C. A. (2020). Soil sterilization. AccessScience. <https://doi.org/10.1036/1097-8542.632500>
- Stroetmann, I., Kämpfer, P., Dott, W. (1994). Untersuchungen zur effizienz von sterilisationsverfahren an unterschiedlichen böden (in German, with English Abstract). Zbl. Hyg. Umweltmed 195, pp. 111–120
- Supran, G., Oreskes, N. (2017). Assessing ExxonMobil's climate change communications (1977-2014). Environmental Research Letters, Vol. 12, No 8
- Shamma, M., Al-Adawi, M. A. (2002). The morphological changes of *Ascaris lumbricoides* ova in sewage sludge water treated by gamma irradiation. Radiation Physics and Chemistry, 65. 277-279 doi:10.1016/s0969-806x(02)00211-6
- Shamos, M. (1959). Great Experiments in Physics, Dover.
- Tebbe, C. C., Reber, H. H. (1991). Degradation of [¹⁴C] phosphinothricin (glufosinate) in soil under laboratory conditions: effects of concentration and soil amendments on ¹⁴CO₂ production. Biol. Fertil. Soils 11, pp. 62–67.
- Tokunaga, O., Suzuki, N. (1984). Radiation chemical reactions in NO_x and SO₂ removals from flue gas, Radiat. Phys. Chem. 24 (1984) pp. 145–165.
- Tomić, M. (2012). Application of remote sensing in environmental on the example of RB 'Kolubara'. u: International conference on land conservation - Landcon 1209 sustainable land management and climate changes, 2012 Danube Region, September 17-21, Donji Milanovac, Serbia
- Trevors, J. T. (1996). Sterilization and inhibition of microbial activity in soil. J. Microbiol. Meth. 26, pp. 53–59.
- Trump, J. G. (1981). Energized Electrons Tackle Municipal Sludge. American Scientist. 1981;69:276
- UNEP (1999). UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME 1999. Global Environment Outlook 2000, UNEP, Nairobi (1999).

- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2012). "Annex B". Sources and Effects of Ionizing Radiation.vol. 1.United Nations.p. 121. 2012. [49]
- Radiation and your patient (2001).: A guide for medical practitioners ICRP Supporting Guidance 2 Approved by ICRP Committee 3 in September 2001, 2001
- Unkašević, M., Tošić, I. (2011): A statistical analysis of the daily precipitation over Serbia: trends and indices. *Theoretical and Applied Climatology*, 106:69–78.
- Urban, T. (2014). Estimation of the radiation field homogeneity in ⁶⁰Co blood irradiator. *Radiation Physics and Chemistry*, 104, 381–384. doi:10.1016/j.radphyschem.2014.05.001
- Fernando, D. R., Lynch, J. P. (2015). Manganese phytotoxicity: new light on an old problem. *Annals of Botany*, 116(3), pp. 313–319. doi:10.1093/aob/mcv111
- Filipović, I. (2005). Spatial distribution of geological resources in northwestern Serbia (Jadar block terrane) and its relation to tectonic structures. *Annales Géologiques de la Péninsule Balkanique* 66: pp. 17–20
- Förstner, U., Wittmann, G. T. (1981). *Metal Pollution in the Aquatic Environment*, Springer-Verlag
- Fursova, K. K., Shchannikova, M. P., Loskutova, I. V., Shepelyakovskaya, A. O., Laman, A. G. (2018). Exotoxin diversity of *Staphylococcus aureus* isolated from milk of cows with subclinical mastitis in Central Russia. *J Dairy Sci* 101(5): pp. 4325-4331.
- Haagsma, J. A., Polinder, S., Stein, C.E., Havelaar, A. H. (2013). Systematic review of foodborne burden of disease studies: Quality assessment of data and methodology. *Int J Food Microbiol* 166(1): pp. 34-47.
- Håkanson, L., Jansson, M. (1983). *Principles of Lake Sedimentology*, Springer-Verlag, Berlin
- Han, B., et al. (2002). Combined electron-beam and biological treatment of dyeing complex wastewater: Pilot plant experiments, *Radiat. Phys. Chem.* 64 (2002) pp. 53– 59.
- Hashimoto, S., Kawakami, W. (1979). Application of process control techniques to radiation treatment of wastewater. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*. 1979;18: pp. 269-274
- Hilarides, R. J., Gray, K. A., Guzzetta, J., Cortellucci, N., Sommer, C. (1994). Radiolytic degradation of 2,3,7,8-TCDD in artificially contaminated soils, *Environ. Sci. Technol.* 28 (1994) pp. 2249–2258.
- Hillel, D. (2008). Soil pollution and remediation. *Soil in the Environment*, pp. 211–222. doi:10.1016/b978-0-12-348536-6.50020-4

- Hirota, K., et al. (2003). Application of electron beam for the reduction of PCDD/F emission from municipal solid waste incinerators, *Environ. Sci. Technol.* 37 (2003) pp. 3164–3170.
- Hu, Z., Qi, L. (2014). Sample Digestion Methods. *Treatise on Geochemistry*, pp. 87–109. doi:10.1016/b978-0-08-095975-7.01406-6
- Cabral Pinto, M. M. S., Ferreira da Silva, E. A., Silva, M. M. V. G., Melo-Gonçalves, P., Candeias, C. (2014). Environmental risk assessment based on high-resolution spatial maps of potential toxic elements sampled on stream sediments of Santiago, Cape Verde. *Geosciences* 4(4): pp. 297–315. <https://doi.org/10.3390/geosciences4040297>
- Castro, A., Silva, J., Teixeira, P. (2018). *Staphylococcus aureus*, a Food Pathogen: Virulence Factors and Antibiotic Resistance. In *Foodborne Diseases* ed. Holban, AM & Grumezescu AM Academic Press, Massachusetts, pp. 213-238.
- Цвијић, Ј. (1924). Геоморфологија I, издање из 2000: Стевановић, П., Куленовић-Грујић, Е., Ранковић, Д., Јовановић, Н., Петровић, Д., Грубић, А. (Едс.), САНУ и Завод за уџбенике и наставна средства, Београд, пп. 585;
- Цвијић, Ј. (1926). Геоморфологија II, издање из 1996: Петровић Д., Ранковић Д. (Едс.), САНУ и Завода уџбенике и наставна средства, Београд, пп. 587;
- CD (1986). Council Directive 86/278/EEC. 1986. Official Journal OJ L 181, 6
- CD (1991). Council Directive 91/271/EEC. 1991. Official Journal L 135, pp. 40-52
- Claisse, P. (2016). *Civil Engineering Materials*, Chapter 11 - Ionising radiation, pp. 101-106. doi: 10.1016/B978-0-08-100275-9.00011-5
- Clegg, H., Riding, M. J., Oliver, R., Jones, K. C., Semple, K. T. (2014). The impact of soil organic matter and soil sterilization on the bioaccessibility of ¹⁴C- azoxystrobin determined by desorption kinetics. *J. Hazard Mater.*, 278 (2014), pp. 336-342
- Coleman, C., MacFayden, A. (1966). The recolonization of gamma-irradiated soils by small arthropods. *Oikos* 17, pp. 62–70
- Cooper, W. J., Curry, R. D., O'shea, K. E. (Eds) (1998). *Environmental Applications of Ionizing Radiation*, Wiley Inc., New York (1998).
- Correa, W., Brandenburg, J., Behrends, J., Heinbockel, L., Reiling, N., Paulowski, L., Gutschmann, T. (2019). Inactivation of bacteria by γ -irradiation to investigate the interaction with antimicrobial peptides. *Biophysical Journal*. doi:10.1016/j.bpj.2019.10.012

- Chakarova, R., Kamenov, P., Tsankov, L. (1991). Computer simulation of radiation fields when designing and using gamma-irradiation facilities. *Radiation Physics and Chemistry*, 38(2), 165–168. doi:10.1016/1359-0197(91)90221-m
- Chmielewski, A. G., et al. (1993). Pilot plant for flue gas treatment with electron beam start-up and two stage irradiation tests, *Radiat. Phys. Chem.* 42 (1993) pp. 663– 668.
- Chmielewski, A. G., Zimek, Z., Bryl-Sandelewska, T., Kosmal, W., Kalisz, L., Kaźmierczuk, M. (1995). Disinfection of municipal sewage sludges in installation equipped with electron accelerator. *Radiation Physics and Chemistry*. 46(4-6): pp. 1071-1074
- Chmielewski, A. G., Iller, E., Tymiński, B., Zimek, Z., Licki, J. (1999). Electron Flue Gases Treatment in Poland. In: Inculet, I.I., Tanasescu, F.T., Cramariuc, R. (eds) *The Modern Problems of Electrostatics with Applications in Environment Protection*. NATO Science Series, vol 63. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4447-6_15
- Chu, D. (2018). Effects of heavy metals on soil microbial community. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 113, 012009. doi:10.1088/1755-1315/113/1/012009
- Шибалић, Д. (1986): Утицај сунчевог зрачења на ерозионе процесе земљишта. Материјали са симпозијума о проблемима ерозије у СР Србији. Београд.
- Qaim, S.M., Spahn, I., Scholten, B., Neumaier, B. (2016). Uses of alpha particles, especially in nuclear reaction studies and medical radionuclide production. *Radiochimica Acta*, 0(0), –. doi:10.1515/ract-2015-2566
- Wang, J., Wang, J. (2007). Application of radiation technology to sewage sludge processing: A review. *Journal of Hazardous Materials*. 2007;143:2-7
- Washino, M. (1981). Treatment of waste water. *Radiation Physics and Chemistry*. 1981;18:383-388
- Washino, M. (1981). Treatment of waste water. *Radiation Physics and Chemistry*. 18: pp. 383-388
- Wen, H.-W., Hsieh, M.-F., Wang, Y.-T., Chung, H.-P., Hsieh, P.-C., Lin, I.-H., & Chou, F.-I. (2010). Application of gamma irradiation in ginseng for both photodegradation of pesticide pentachloronitrobenzene and microbial decontamination. *Journal of Hazardous Materials*, 176(1-3), pp. 280–287. doi:10.1016/j.jhazmat.2009.11.025
- Wolf, D. C., Skipper, H. D. (1994). Soil sterilisation. In: Weaver, R.W., Angle, J.S., Bottomley, P. S. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2: Microbiological and Biochemical Properties*. Soil Science Society of America, Wisconsin, pp. 41–51.

- Xu, Y., Sun, Q., Yi, L., Yin, X., Wang, A., Li, Y., Chen, J. (2014). The source of natural and anthropogenic heavy metals in the sediments of the Minjiang River estuary (SE China): implications for historical pollution. *Sci Total Environ* 493: pp. 729–736. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.046>
- Yang, H. J., Jeong, H. J., Bong, K. M., Jin, D. R., Kang, T-W., Ryu, H-S., ... Na, E. H. (2020). Organic matter and heavy metal in river sediments of southwestern coastal Korea: Spatial distributions, pollution, and ecological risk assessment. *Marine Pollution Bulletin*, 159, 111466. doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111466
- Yao, Z., Li, J., Xie, H., & Yu, C. (2012). Review on Remediation Technologies of Soil Contaminated by Heavy Metals. *Procedia Environmental Sciences*, 16, pp. 722–729. doi:10.1016/j.proenv.2012.10.099
- Young, S., Juhl, A., O'Mullan, G. D. (2013). Antibiotic-resistant bacteria in the Hudson River Estuary linked to wet weather sewage contamination. *Journal of Water and Health*. 2013;11:297-310

ПРИЛОГ

Списак слика

- 1) Графички приказ слива реке Колубаре (Substrate map: software SAS.Planet.Nightly.201020.10106, Basemap: Bing Maps-satellite zoom 15).
- 2) Каменолом у Марковој Цркви Усликано: 11.08.2020. (лична архива)
- 3) Рудник угља Колубара Усликано: 12.09.2020. (лична архива)
- 4) Графички приказ слива реке Колубаре, урбаних средина, важних саобраћајница и Рударског басена Колубара (Substrate map: software SAS.Planet.Nightly.201020.10106, Basemap: Bing Maps-satellite zoom 15).
- 5) Ушће река Јабланице и Обнице и формирање реке Колубаре код Ваљева Усликано: 13.08.2020. (лична архива)
- 6) Регулација водотока реке Колубаре у граду Ваљеву Усликано: 14.08.2020. (лична архива)
- 7) Регулација водотока реке Љиг Усликано: 20.09.2020. (лична архива)
- 8) Рибничка пећина у долини реке Рибнице Усликано: 11.08.2020. (лична архива)
- 9) Река Градац Усликано: 13.08.2020. (лична архива)
- 10) Река Рибница Усликано: 20.09.2020. (лична архива)
- 11) Река Љиг Усликано: 11.08.2020. (лична архива)
- 12) Река Тамнава Усликано: 07.08.2020. (лична архива)
- 13) Река УБ Усликано: 13.09.2020. (лична архива)
- 14) Врсте јонизујућег зрачења и њихова продорност кроз различите материјале (лична архива)
- 15) Ортопан снимак Усликано: 28.10.2021. (лична архива)
- 16) Узорковање са Тачке 1 на дубини од 20 cm (лична архива)
- 17) Узорковање са Тачке 5 на дубини од 50 cm (лична архива)
- 18) Просторни распоред тачака узорковања у сливу реке Колубаре (Substrate map: software SAS.Planet.Nightly.201020.10106, Basemap: Bing Maps-satellite zoom 15).
- 19) Приказ распореда дозиметара у кутији приликом мапирања дозе (лична архива)
- 20) Распоред дозиметара за мерење дистрибуције дозе у контејнеру (лична архива)
- 21) Приказ расподеле микроорганизама у урбаним и руралним срединама на дубинама узорковања од 20 cm и 50 cm

- 22) Укупан број микроорганизама у земљишту у зависности од удаљености од тачке формирања реке Колубаре
- 23) Приказ броја микроорганизама у узорцима дуж слива реке Колубаре у односу на присуство загађивача
- 24) Приказ загађења микроорганизмима приликом уливања притока у реку Колубару и дуж самог тока реке Колубаре
- 25) Утицај различитих доза гама зрачења на смањење укупног броја микроорганизама
- 26) Утицај различитих доза и брзина доза гама зрачења на микробиолошку деконтаминацију земљишта
- 27) Расподела дозе зрачења унутар кутије испуњене земљом (лична архива)
- 28) Расподела дозе зрачења унутар кутије испуњене тканином (лична архива)
- 29) Расподела дозе зрачења унутар кутије испуњене пластиком (лична архива)
- 30) Зависност хомогености дозе у функцији густине производа за производ озрачен у шаржном режиму (лична архива)
- 31) Зависност хомогености дозе у функцији густине производа за узорке озрачене у посуди за брзо зрачење (лична архива)
- 32) Садржај плесни у земљишту у зависности од удаљености од извора реке Колубаре. Тачке узорковања представљене су бројевима од 1 до 48.
- 33) Ефекат различитих доза зрачења на смањење плесни у узорцима земљишта

Списак табела

- 1) Подаци о броју становника и општинама Колубарског слива (извор: Републички завод за статистику)
- 2) Средње месечне вредности падавина (у mm) за период од 1961. до 1990. године (извор: Републички хидрометеоролошки завод Србије)
- 3) Укупан број микроорганизама у земљишту дуж слива реке Колубаре
- 4) Просечне вредности броја микроорганизама у узорцима земљишта у урбаним и руралним деловима Колубарског слива
- 5) Анализа броја микроорганизама у тачкама узорковања дуж слива реке Колубаре у односу на присуство загађивача
- 6) Анализа броја микроорганизама у односу на уливање притока и самог тока реке Колубаре
- 7) Расподела дозе у производима различите густине (тканина, пластика и земља)

- 8) Садржај патогених бактерија у земљишту пре и после гама зрачења
- 9) Укупан број плесни у земљишту дуж слива реке Колубаре
- 10) Концентрације тешких метала у различитим узорцима земљишта