

Факултет Технички факултет у Бору

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

(Број захтева)

Веће научних области техничких наука

(Назив већа научне области коме се захтев упућује)

(Датум)

**ЗАХТЕВ****за давање сагласности на одлуке о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације и о именовану комисије за одбрану**

Молимо да, сходно члану 48. ст. 5. тач. 4. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета", број 201/2018, 207/2019, 213/2020, 214/2020, 217/2020, 230/21, 232/22, 233/22 и 236/22), дате сагласност на одлуку о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације:

КАНДИДАТ АЛЕКСАНДРА (Драган) ПАПЛУДИС

(име, име једног од родитеља и презиме)

студент докторских студија на студијском програму **Технолошко инжењерство**

уписан на докторске студије 2023 године,

пријавио је тему докторске дисертације дана 15.09.2025. године, под називом:

**Хеометријско одређивање 16 приоритетних полицикличних ароматичних угљоводоника у земљишту и биљним деловима бршљана, јоргована и смокве (сорте црна Петровача) из борског региона: Контекст фитомониторинга и фиторемедијације**из научне области: **Технолошко инжењерство**

Универзитет је дана 28.11.2025. својим актом под бр. 61206-4181/2-25 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

**Хеометријско одређивање 16 приоритетних полицикличних ароматичних угљоводоника у земљишту и биљним деловима бршљана, јоргована и смокве (сорте црна Петровача) из борског региона: Контекст фитомониторинга и фиторемедијације****Име и презиме ментора: Др Слађана Алагић**  
редовни професор, Технички факултет у Бор**Комисија за оцену докторске дисертације** именована је на седници одржаној **19.02.2026.** године одлуком факултета под бр. VI/4-7-8, у саставу:

	Име и презиме члана комисије	звање	научна област	Установа у којој је запослен
1.	Др Снежана Милић	редовни професор	Хемија, хемијска технологија и хемијско инжењерство	Технички факултет у Бору
2.	Др Жаклина Тасић	ванредни професор	Хемија, хемијска технологија и хемијско инжењерство	Технички факултет у Бору
3.	Др Јелена Николић	ванредни професор	Аналитичка и физичка хемија	Природно-математички факултет Ниш

---

---

**Напомена: уколико је члан Комисије у пензији навести датум пензионисања.**

**Датум стављања извештаја Комисије и докторске дисертације на увид јавности 06.03.2026.године**

**Наставно-научно веће факултета усвојило је извештај Комисије за оцену докторске дисертације на седници одржаној 30.04.2026. године**

**Комисија за одбрану докторске дисертације именована на седници одржаној 30.04.2026. године**

одлуком факултета под бр. VI/4-9-126, у саставу:

	Име и презиме члана комисије	звање	научна област	Установа у којој је запослен
1.	Др Снежана Милић	редовни професор	Хемија, хемијска технологија и хемијско инжењерство	Технички факултет у Бору
2.	Др Жаклина Тасић	ванредни професор	Хемија, хемијска технологија и хемијско инжењерство	Технички факултет у Бору
3.	Др Јелена Николић	ванредни професор	Аналитичка и физичка хемија	Природно-математички факултет Ниш

---

---

**Напомена: уколико је члан Комисије у пензији навести датум пензионисања.**

---

**ДЕКАН ФАКУЛТЕТА**

- Прилози:**
- 1. Одлука Наставно-научног већа о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације и одлука о именовању Комисије за одбрану докторске дисертације**
  - 2. Извештај Комисије о оцени докторске дисертације**
  - 3. Примедбе на извештај Комисије о оцени докторске дисертације (уколико их је било) и мишљење Комисије о примедбама**

**Напомена: Факултет доставља Универзитету захтев са прилозима у електронској форми и у једном писаном примерку за архиву Универзитета**

Универзитет у Београду  
**Технички факултет у Бору**  
Број: VI/4-9-12а  
Бор, 30. 04. 2026. године

На основу чл. 49. Статута Техничког факултета у Бору и чл. 44. Правилника о докторским студијама на Техничком факултету у Бору, Наставно-научно веће Факултета на седници одржаној 30. 04. 2026. године, донело је

## О Д Л У К У

**I** Усваја се Извештај Комисије за оцену докторске дисертације кандидаткиње **Александре Паплудис**, мастер. инж. технологије, студента докторских академских студија студијског програма Технолошко инжењерство, под називом: „**Хеометријско одређивање 16 приоритетних полицикличних ароматичних угљоводоника у земљишту и биљним деловима бршљана, јоргована и смокве (сорте црна Петровача) из борског региона: Контекст фитомониторинга и фиторемедијације**“.

**II** Универзитет у Београду је дана 28. 11. 2025. године дао сагласност на предлог теме докторске дисертације.

**III** Радови из научних часописа са листе која је утврђена као релевантна за вредновање научне компетенције у одређеном научном пољу:

### Рад у међународном часопису категорије M22

**1. A. Papludis, S. Alagić, S. Milić, J. Nikolić, S. Jevtović, V. Stankov Jovanović, G. Stojanović (2025)** Chemometric Evaluation of 16 Priority PAHs in Soil and Roots of *Syringa vulgaris* and *Ficus carica* from the Bor Region (Serbia): An Insight into the Natural Plant Potential for Soil Phytomonitoring and Phytoremediation, **Environments**, 12(8), 256.

<https://doi.org/10.3390/environments12080256>; (IF (2025) = 4.223)

**IV** Одлуку доставити надлежном Већу научних области Универзитета у Београду, ради давања сагласности. Докторска дисертација из става 1. ове одлуке подобна је за одбрану након добијања сагласности именованог Већа Универзитета.

### Доставити:

- именованој
- Већу научних области Универзитета у Београду
- студентској служби
- архиви

ПРЕДСЕДНИК  
НАСТАВНО НАУЧНОГ ВЕЋА

ДЕКАН

Проф. др Дејан Таникић

Универзитет у Београду  
**Технички факултет у Бору**  
Број: VI/4-9-126  
Бор, 30. 04. 2026. године

На основу чл. 49. Статута Техничког факултета у Бору и чл. 45. Правилника о докторским студијама на Техничком факултету у Бору, Наставно-научно веће Факултета на седници одржаној 30. 04. 2026. године, донело је

## О Д Л У К У

**I** Именује се Комисија за одбрану докторске дисертације кандидаткиње **Александре Паплудис**, мастер. инж. технологије, студента докторских академских студија студијског програма Технолошко инжењерство, под називом: „**Хеометријско одређивање 16 приоритетних полицикличних ароматичних угљоводоника у земљишту и биљним деловима бршљана, јоргована и смокве (сорте црна Петровача) из борског региона: Контекст фитомониторинга и фиторемедијације**“ у следећем саставу:

1. др Снежана Милић, редовни професор, Универзитет у Београду - Технички факултет у Бору;
2. др Драгана Медић, доцент, Универзитет у Београду - Технички факултет у Бору;
3. др Јелена Николић, ванредни професор, Универзитету Нишу, Природно-математички факултет у Нишу.

**II** Одлуку доставити надлежном Већу научних области Универзитета у Београду, ради давања сагласности. Докторска дисертација из става 1. ове одлуке подобна је за одбрану након добијања сагласности именованог Већа Универзитета.

### Доставити:

- именованој
- Већу научних области Универзитета у Београду
- студентској служби
- архиви

ПРЕДСЕДНИК  
НАСТАВНО НАУЧНОГ ВЕЋА

ДЕКАН

Проф. др Дејан Таникић

## **НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ**

**Предмет:** Реферат комисије о оцени докторске дисертације кандидаткиње Александре Д. Паплудис, мастер инжењера технологије

Одлуком Наставно-научног већа Техничког факултета у Бору, Универзитета у Београду, бр. VI/4–7–8 од 19.02.2026. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену докторске дисертације кандидаткиње Александре Д. Паплудис, под називом: „Хеометријско одређивање 16 приоритетних полицикличних ароматичних угљоводоника у земљишту и биљним деловима бршљана, јоргована и смокве (сорте црна Петровача) из борског региона: Контекст фитомониторинга и фиторемедијације”. Након прегледа достављене дисертације, пратећих материјала и разговора са кандидаткињом, Комисија подноси следећи:

### **РЕФЕРАТ**

#### **1. УВОД**

##### **1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације**

Хронологија одобравања и израде дисертације одвијала се следећом динамиком:

✓ **16.09.2025.** – На састанку Већа катедре за хемију и хемијску технологију Техничког факултета у Бору, Универзитета у Београду, разматрана је пријава теме за докторску дисертацију кандидаткиње Александре Д. Паплудис (мастер инжењер технологије), која је заведена под ознаком VI/1-8/34 (на дан 15.09.2025.). На истој седници Већа катедре, Наставно–научном већу Техничког факултета у Бору, предложена је и Комисија за давање мишљења о научној заснованости и подобности предложене теме докторске дисертације у саставу: др Снежана Милић, редовни професор, др Драгана Медич, доцент и др Јелена Николић, ванредни професор. Такође, Веће катедре за хемију и хемијску технологију, једногласно је за ментора предложило др Слађану Алагић, редовног професора Техничког факултета у Бору, Универзитета у Београду, која има значајан број публикованих радова у часописима са СЦИ листе. Предлог теме дисертације: „Хеометријско одређивање 16 приоритетних полицикличних

ароматичних угљоводоника у земљишту и биљним деловима бршљана, јоргована и смокве (сорте црна Петровача) из борског региона: Контекст фитомониторинга и фиторемедијације”, састав Комисије, као и предлог ментора, прослеђени су Наставно-научном већу Техничког факултета у Бору, Универзитета у Београду на даље разматрање и усвајање.

✓ **25.09.2025.** - На седници Наставно–научног већа Техничког факултета у Бору, Универзитета у Београду, прихваћен је предлог Већа катедре за хемију и хемијску технологију, тако да је Одлуком бр. VI/4–34–14, од 25.09.2025. године именована Комисија за оцену научне заснованости предложене теме докторске дисертације кандидаткиње Александре Д. Паплудис, у саставу: др Снежана Милић, редовни професор, Универзитет у Београду, Технички факултет у Бору, др Драгана Медић, доцент, Универзитет у Београду, Технички факултет у Бору и др Јелена Николић, ванредни професор, Универзитет у Нишу, Природно-математички факултет у Нишу.

✓ **30.10.2025.** – На седници Наставно–научног већа Техничког факултета у Бору, Универзитета у Београду, једногласно је прихваћен Извештај Комисије о научној заснованости теме докторске дисертације кандидаткиње Александре Д. Паплудис и за ментора предложена др Слађана Ч. Алагић, редовни професор Техничког факултета у Бору, Универзитета у Београду, на основу чега је донета и одговарајућа Одлука бр.: VI/4-2-12 (од 30.10.2025).

✓ **28.11.2025.** - Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду прихватило је Захтев Наставно-научног већа Техничког факултета у Бору од 30.10.2025., бр.: I/2-774 (заведен 06.11.2025), а који је упућен на основу Извештаја Комисије за оцену научне заснованости теме, и донело решење, тј., Одлуку бр.: 61206-4181/2-25 о давању сагласности на предлог теме докторске дисертације кандидаткиње Александре Д. Паплудис, као и на предлог др. Слађане Ч. Алагић, за ментора кандидаткиње.

✓ **12.02.2026.** - На седници Већа катедре за Хемију и хемијску технологију, Техничког факултета у Бору, Универзитета у Београду, потврђено је да је кандидаткиња Александра Д. Паплудис завршила израду докторске дисертације (која је 10.02.2026. год. проверена и на оригиналност) и разматран је захтев кандидаткиње (бр.: VI/1-24/23 од 11.02.2025. године) за формирање Комисије за оцену докторске дисертације под називом: „Хеометријско одређивање 16 приоритетних полицикличних ароматичних угљоводоника у земљишту и биљним деловима бршљана, јоргована и смокве (сорте црна Петровача) из борског региона: Контекст фитомониторинга и фиторемедијације”. Веће катедре за хемију и хемијску технологију једногласно је прихватило захтев Александре Д. Паплудис, студента докторских академских студија на Технолошком инжењерству (бр. индекса 02/18), за формирање Комисије за оцену докторске дисертације: „Хеометријско одређивање 16 приоритетних полицикличних ароматичних угљоводоника у земљишту и биљним деловима бршљана, јоргована и смокве (сорте црна Петровача) из борског региона: Контекст фитомониторинга и фиторемедијације” и предложило Наставно-научном већу факултета Комисију за оцену докторске дисертације у саставу: др Снежана Милић, ред. проф., Универзитет у Београду, Технички факултет у Бору, др

Жаклина Тасић, ванред. проф., Универзитет у Београду, Технички факултет у Бору и др Јелена Николић, ванред. проф., Универзитет у Нишу, Природно-математички факултет у Нишу.

✓ **19.02.2026.** – Одржана је седница Наставно–научног већа Техничког факултета у Бору, Универзитета у Београду, на којој је именована Комисија за оцену докторске дисертације кандидаткиње Александре Д. Паплудис (Одлука бр. VI/4–7–8 од 19.02.2026.), у саставу: проф. др Снежана Милић, Технички факултет у Бору, Универзитет у Београду (председница); проф. др Жаклина Тасић, Технички факултет у Бору, Универзитет у Београду (члан) и проф. др Јелена Николић, Универзитет у Нишу, Природно-математички факултет у Нишу (члан).

## **1.2. Научна област дисертације**

Докторска дисертација под називом: „Хеометријско одређивање 16 приоритетних полицикличних ароматичних угљоводоника у земљишту и биљним деловима бршљана, јоргована и смокве (сорте црна Петровача) из борског региона: Контекст фитомониторинга и фиторемедијације” по предмету истраживања припада научној области технолошко инжењерство и ужој научној области хемија, хемијска технологија и хемијско инжењерство, за које је Технички факултет у Бору, Универзитета у Београду акредитован. За ментора докторске дисертације одређена је др Слађана Ч. Алагић, редовни професор Техничког факултета у Бору Универзитета у Београду. Досадашње искуство и објављени радови др Слађана Ч. Алагић, указују на њену компетентност у поступку руковођења израде докторске дисертације кандидаткиње Александре Д. Паплудис. Као аутор или коаутор, објавила је 135 радова са рецензијом, од којих је 41 (Scopus-база) / 34 (база Е-науке) из категорије M20, укупна цитираност - 786 за 38 докумената и h-индекс - 16, (Scopus-база на дан 02.03.2026. године). Аутор је и 2 поглавља у истакнутој монографији међународног значаја (M11), категорија M13 и M15, као и 1 монографије националног значаја категорије M42.

## **1.3. Биографски подаци о кандидату**

Александра Д. Паплудис (девојачко Грујић), рођена је 06.12.1989. године у Бору, где је завршила основну школу и Гимназију „Бора Станковић“. Технички факултет у Бору, Универзитета у Београду уписала је школске 2008/2009. године на студијском програму Технолошко инжењерство, модул Инжењерство заштите животне средине. Основне академске студије завршила је 17.05.2013. године, одбраном завршног рада под називом: „Фиторемедијација земљишта контаминираних перзистентним органским загађивачима“, оценом 10. Просечна оцена током основних академских студија била је 8,06. Кандидаткиња Александра Паплудис је проглашена за студента генерације. Мастер академске студије, на студијском програму Технолошко инжењерство, на Техничком факултету у Бору, Универзитета у Београду, уписала је школске 2016/2017. године, а завршила 30.01.2018. године, одбраном мастер рада „Садржај мангана у виновој лози (*Vitis vinifera* L.) из Борског региона – аспекти фиторемедијације и биомониторинга“, са просечном оценом у току студија 9,88 и оценом 10 на мастер раду. Докторске академске студије, на студијском програму Технолошко инжењерство,

на Техничком факултету у Бору, Универзитета у Београду, уписала је школске 2018/2019. године. Говори и пише енглески и француски језик.

Радни однос на Техничком факултету у Бору, Универзитета у Београду, засновала је 01.02.2019. године, на одсеку за Технолошко инжењерство, као сарадник у звању асистента за ужу научну област Хемија, хемијска технологија и хемијско инжењерство. Као избрани асистент, активно је учествовала у припреми и извођењу лабораторијских и рачунских вежби на следећим предметима: Органска хемија, Механичке операције, Заштита животне средине, Операције преноса топлоте и масе, Отпадне воде, Екологија, као и на организовању Стручне праксе.

Кандидат Александра Д. Паплудис била је члан комисије за попис ситног инвентара и амбалаже у употреби на Техничком факултету у Бору 2019. године, као и члан комисије за попис основних средстава 2024. године. Као члан радне групе за спровођење SWOT анализе на Техничком факултету у Бору, Универзитета у Београду, а за потребе израде Извештаја о самовредновању и оцени квалитета установе и студијских програма, била је ангажована 2019. године. У циљу промоције Техничког факултета у Бору учествовала је на 63. Међународном сајму технике и техничких достигнућа, одржаном у Београду маја 2019. године, под покровитељством Министарства просвете, науке и технолошког развоја. Била је и члан радне групе која врши промоцију Факултета код ученика средњих школа у школској 2020/21. години.

Александра Д. Паплудис учествовала је у догађајима посвећеним популаризацији науке: „Тимочки Научни Торнадо – ТНТ” (2019., 2020. и 2021. године). Била је члан организационих одбора међународних конференција International Conference Ecological Truth and Environmental Research: EcoTER 2019., 2020. и 2022., као и члан организационог одбора Студентске конференције техничких наука: ISC 2021 (7<sup>th</sup> International Student Conference on Technical Science) и ISC 2025 (9<sup>th</sup> International Student Conference on Technical Science). Била је и технички уредник Зборника студентске секције EcoTERS 2022. Члан је Српског хемијског друштва, Подружнице у Бору.

Учествовала је и у реализацији пројекта финансираног од стране Министарства, науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије по уговорима: 1) број: 451-03-65/2024-03/200131 и 2) број: 451-03-137/2025-03/200131, о реализацији и финансирању научно-истраживачког рада НИО Техничког факултета у Бору (Универзитета у Београду), током 2024. и 2025. године.

Александра Д. Паплудис је аутор, или коаутор радова публикованих у међународним часописима категорија М21 (2 рада) и М22 (3 рада), у водећем националном часопису категорије М24 (1 рад), у више часописа националног значаја категорија М51 (3 рада) и М53 (1 рад), као и бројних саопштења на конференцијама међународног значаја категорије М33 (16 радова).

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### **2.1 Обим дисертације**

Докторска дисертација садржи 54226 речи на 137 страна обрађеног текста (почев од Увода, а закључно са поглављем: Литература и насловом: Прилог 2.), 15 почетних страна (Насловна

страна на српском и енглеском језику, Страна са именованим члановима комисије и ментором, Захвалница, Сажетак на српском и енглеском језику и Садржај) са 4840 речи и 9 завршних страница (биографија аутора и изјаве о ауторству) са 1709 речи.

Укупан број страна дисертације је 161 и све су формата задатог по упутству за израду докторских дисертација на факултетима Београдског Универзитета. Дисертација садржи:

- 21 табелу у основном, текстуалном делу и 6 табела у делу Прилог 1.;
- 53 слике (све у основном, текстуалном делу дисертације) и
- 140 литературних извора (са линковима).

## 2.2. Структура и садржај дисертације

Структура и садржај дисертације су такви да после краћег увода у тему следе поглавља и потпоглавља која логичним редоследом објашњавају тематику којом се кандидаткиња бавила (како у поглављу: "Теоријске основе са литературним прегледом података", тако и у поглављу: "Основне полазне хипотезе и циљ рада"), а затим се излажу и експериментална истраживања и резултати, као и закључци предметне дисертације. Коначно, на крају дисертације дати су и списак коришћене литературе и прилози (укупно 3). Нека од најважнијих поглавља и потпоглавља у дисертацији су:

1. Увод: Полициклични ароматични угљоводоници (ПАУ) као микро-полутанти у животној средини
2. Теоријске основе са литературним прегледом података
  - 2.1. Извори и судбина ПАУ у животној средини
  - 2.2. ПАУ у земљишту
  - 2.3. ПАУ у биљкама
    - 2.3.1. ПАУ у биљкама: Токсичност и детоксификација
    - 2.3.2. ПАУ у биљкама: Усвајање и понашање
    - 2.3.3. ПАУ у биљкама: Процеси у ризосфери
  - 2.4. Фитомониторинг и фиторемедијација као две еколошки пожељне методе у контроли и заштити животне средине у односу на ПАУ
    - 2.4.1. Фиторемедијација
    - 2.4.2. Фитомониторинг
  - 2.5. Хеометрија у анализи и карактеризацији ПАУ из биљних и земљишних узорака: Значај за фитомониторинг и фиторемедијацију
    - 2.5.1. Методе изоловања и хемијске детекције ПАУ као део хеометријске карактеризације и анализе биљних и земљишних узорака
    - 2.5.2. Статистичке методе као део хеометријске карактеризације и анализе ПАУ у биљним и земљишним узорцима
    - 2.5.3. Примери студија са хеометријским приступом у анализи и карактеризацији ПАУ присутним у земљишним и биљним узорцима
3. Основне полазне хипотезе и циљ рада
4. Експериментални део
  - 4.1. Опис места истраживања
  - 4.2. Опис испитиваних биљних врста
  - 4.3. Узорковање и прелиминарна припрема биљног и земљишног материјала

- 4.3.1. Мерени земљишни параметри
- 4.4. Изоловање и инструментална анализа ПАУ из биљног и земљишног материјала са обезбеђењем и контролом квалитета
  - 4.4.1. Коришћени регенси
  - 4.4.2. Процедура припремања стандардних раствора ПАУ
  - 4.4.3. Модификација и оптимизација поступка QuEChERS технике за изоловање ПАУ
- 4.5. Методе процесуирања резултата добијених хемијском анализом
- 5. Резултати и дискусија
  - 5.1. Резултати оптимизације модификоване QuEChERS технике за изоловање ПАУ из биљних и земљишних узорака
  - 5.2. Резултати хеометријске анализе испитиваних биљних врста: Аспекти фиторемедијације и фитомониторинга
- 6. Закључак
  - Литература
  - Прилог 1.: Табеларни прикази резултата Pearson-ове корелационе студије
  - Прилог 2.: Биографија аутора
  - Прилог 3.: Изјаве аутора

По својој форми, садржају, добијеним резултатима, њиховој примењивости, ова докторска дисертација у потпуности задовољава критеријуме и стандарде како Техничког факултета у Бору, Универзитета у Београду, тако и самог Универзитета у Београду.

### 2.3. Кратак приказ појединачних поглавља

Поглавље **Увод** представља краћи приказ физичких, хемијских и токсиколошких особина 16 најважнијих (приоритетних) полицикличних ароматичних угљоводоника, ПАУ (заједно са њиховим комплексним структурним формулама), као и проблема загађења животне средине изазваним овим опасним микро-полутантима. **Увод** садржи и објашњење о порасту њихових концентрација у савременом добу, као и могућности њиховог формирања, пре свега, услед различитих антропогених активности, али и током природних појава као што су шумски пожари, вулканске ерупције, итд. Указано је и на могућности примене фиторемедијације и фитомониторинга као две еколошке и економски изразито прихватљиве методе у контроли квалитета животне средине у односу на ПАУ. При томе, биљни биомониторинг, може пружити веома корисне и поуздане информације о нивоу атмосферског загађења у некој области од интереса, док се контаминирани сфери животне средине могу потпуно, или бар делимично рехабилитовати применом одговарајућих метода фиторемедијације.

Поглавље **Теоријске основе са литературним прегледом података** садржи бројна потпоглавља у којима су дата детаљнија објашњења о изворима, начинима формирања (кроз пиролитичке процесе) и судбини ПАУ у животној средини. Посебна пажња посвећена је понашању ПАУ у земљишту (које је главни резервоар ових полутаната у природи), али и њиховом понашању у биљкама, јер се захваљујући овим процесима биљке и могу применити у фиторемедијацији и фитомониторингу. Приказане су различите методе фиторемедијације и фитомониторинга примењиве у случају ПАУ. Посебна пажња посвећена је механизмима

усвајања ПАУ преко корена и листа, уз анализу утицаја земљишних параметара (pH, ЕС и ОМ) на процесе усвајања у корену. Додатно су размотрени процеси који се одвијају у биљним ћелијама, ткивима, али и у земљишту у непосредној близини самог корена, тј. у ризосфери. Детаљније су објашњени и неки важни појмови као што су фитотоксичност, толерантност према ПАУ, стратегије биљака у борби против токсичних ефеката ПАУ, способност за излучивање различитих коренских екскудата, али и могућности акумулације у биљним ткивима, као и значај ових механизма за фиторемедијацију и фитомониторинг. У овом смислу, описани су и могући процеси у области ризосфере, где биљно корење, у борби против токсичности ПАУ, има могућност синергистичког деловања са присутним микробима (почев од процеса преципитације, имобилизације и трансформације ПАУ у земљишту, па све до њиховог усвајања и акумулације у корену). Указано је и на значај хеометријског приступа резултатима који се добијају хемијском анализом података "забележених" у биљном (и одговарајућем земљишном) материјалу, где су описане не само најсавременије методе хемијске квалитативне и квантитативне детекције ПАУ (са посебним акцентом на гасну хроматографију, GC и масену спектрометрију, MS које су као комбиноване, тј., као GC/MS, коришћене у овој дисертацији, уз трипл-квадрупол масени анализатор), већ су описане и најчешће коришћене методе статистичке обраде резултата добијених хемијском анализом, попут Pearson-ове корелационе студије, PCS, једносмерне анализе варијансе, One-way ANOVA, анализе главних компоненти, PCA и хијерархијске кластер анализе, HCA. Такође су изложене и методе екстракције ПАУ из биљног и земљишног материјала, а посебно је истакнута употреба релативно нове, такозване QuEChERS-технике за рад са микро-количинама, јер су ПАУ у животној средини уобичајено присутни у веома ниским концентрацијама. У посебном, последњем потпоглављу, наведени су и бројни примери студија из целог света, које су користиле различите хеометријске приступе за објашњење добијених резултата и формулисање правилних закључака, а дата је и сумарна табела са овим студијама, односно методама које су у њима биле примењене.

**Основне полазне хипотезе и циљ рада** је поглавље у коме су приказане не само постављене полазне хипотезе, већ су дефинисани и предмет и циљ предметне дисертације. Наиме, у овој докторској дисертацији, кренуло се од неколико основних хипотеза и то:

- да град Бор са рударско-металуршким комплексом и градском топланом у свом индустријском центру, као и његова шира околина, представљају изразито адекватан терен за истраживање, јер је чињеница да је током прошлог, XX века, он непрестано био изложен снажном негативном утицају не само неорганских, већ и органских загађујућих материја, међу којима се издвајају једињења ПАУ; посебно су значајне оне локације које су позициониране на правцима доминантних ветрова у целом региону, па су као такве биле и најизложеније дугогодишњој контаминацији загађујућим материјама (и неорганског и органског порекла). Овакви услови карактеришу подручја са дуготрајним индустријским оптерећењем и деградираним екосистемима, као што је то случај са испитиваним борским подручјем;
- међутим, без обзира на овако нарушено стање квалитета саме животне средине, постоје многе биљне врсте које опстају на територији града Бора и околине, те је претпостављено и да би неке од тих локалних врста могле послужити као добри кандидати за тестирање њихових природних фиторемедијационих и фитомониторинг потенцијала; наиме, уколико би се на више одабраних,

критичних места, пронашли здрави примерци извесних, отпорних биљних врста, које опстају у агресивним условима, онда би спровођење једног интердисциплинарног истраживања у наведене сврхе (са провером значаја разних утицајних фактора у процесима усвајања, акумулације, или депозиције ПАУ), било не само могуће, тј., методолошки изводљиво већ и научно оправдано;

- наредна и уједно, најзначајнија претпоставка је да је детекција, тј., идентификација, а затим и анализа извесних, до сада неиспитаних биљних врста са добрим капацитетима за усвајање, акумулацију, али и депозицију ПАУ (посматрајући по различитим органима) сасвим могућа, што би био значајан допринос у фиторемедијацији и фитомониторингу, као две релативно младе и пре свега обећавајуће методе технолошких наука; додатно, ово истраживање би могло да укаже и да ли те врсте могу бити апликоване и у ревегетацији и спречавању ерозије најугроженијих терена;

- очекује се и да ће избор метода истраживања у оквиру најсавременијег хеометријског приступа, уз извршену модификацију и оптимизацију QuEChERS-технике (пре свега у односу на биљне узорке), довести до добијања поузданих и тачних података који ће, у коначном, обезбедити формулисање поузданих закључака; наиме, по први пут, за пречишћавање ПАУ из биљних узорака, употребљена је дијатомејска земља као сорбент у екстракцији дисперзном чврстом фазом.

На основу свега изложеног, предмет и циљ ове докторске дисертације, у најширем смислу, дефинисан је као хеометријски приступ у испитивању аутентичних, природних, потенцијала одабраних локалних биљних врста из екстремно загађеног региона Бора (источна Србија), за усвајање, акумулацију, или депозицију ПАУ, а ради потенцијалне примене пронађених, тј селектованих биљака у сврхе фитомониторинга и фиторемедијације (нарочито фитостабилизације као једне од најпогоднијих метода за фиторемедијацију ПАУ).

У поглављу **Експериментални део**, описани су и објашњени материјали, методе и фазе рада. Детаљно је приказано и описано подручје испитивања (са мапом комплетног подручја и укупно 9 испитиваних локација: 4 урбано-индустријских, УИ, 4 руралних, Р и 1 туристичка, Т), а затим су описане и испитиване биљне врсте (јоргован, смоква и бршљан) узорковане са селектованих локација. Посебно потпоглавље посвећено је детаљном опису узорковања, припреме и начинима изоловања (и специјално, поступку оптимизације модификоване QuEChERS-технике у односу на биљни материјал), као и хемијске GC/MS анализе ПАУ у биљном и одговарајућем земљишном материјалу. Такође је описано и мерење земљишних параметара: рН, ЕС и ОМ. Последње потпоглавље објашњава начине процесуирања добијених резултата, тј. примењене методе статистичке анализе (РСА и НСА), као и обрачун одговарајућих биоконцентрационих фактора, BCF, који указују на моћ корења одређене биљне врсте да акумулира одређене ПАУ.

Поглавље **Резултати и дискусија** је подељено у два главна потпоглавља – прво од њих садржи резултате и дискусију валидације модификоване QuEChERS-технике, док друго садржи резултате хемијске и статистичке анализе, као и израчунавања одговарајућих BCF (приказане у бројним табелама и дендрограмима), као и њихову дискусију са аспеката фитомониторинга и фиторемедијације.

У првом потпоглављу, приказани су параметри валидације модификоване QuEChERS-технике, као важни резултати, али и оригинални допринос ове докторске дисертације у односу на обезбеђење квалитета и тачности квалитативне и квантитативне детекције једињења ПАУ из (пре свега) биљних узорака, а који су потврдили да су сви параметри оптимизације били на неопходном нивоу.

Резултати који се односе на аспекте фитомониторинга и фиторемедијације дискутовани су и тумачени са више страна. На првом месту, уочен је велики ниво варирања детектованих концентрација испитиваних ПАУ у свим матриксама и додатно, како би се учили и евентуални ризици од ових једињења, концентрације појединачних и укупних ПАУ у земљишту упоређене су са одговарајућим законским ограничењима. Следеће, PCS је искоришћена на више начина, ради утврђивања значајности, поузданости и природе (позитивна, или негативна) корелација, тј. односа између испитиваних параметара, као што су: 1) детектоване концентрације ПАУ у корењу са концентрацијама истоветних ПАУ у земљишту, као и са концентрацијама других ПАУ у земљишту, али и са другим мереним земљишним параметрима (pH, ЕС и ОМ), 2) концентрације међу различитим ПАУ у земљишту, али и у корењу и надземним деловима и 3) детектоване концентрације ПАУ у земљишту, као и у надземним деловима свих испитиваних биљних врста и параметар удаљеност (U) места узорковања од индустријске зоне у Бору која садржи рударско-металуршки комплекс и градску топлану, као могући главни извор загађења ПАУ у целом региону. Адекватна илустрација дела ових резултата приказана је и на хијерархијским дендрограмима добијеним методом Ward-а уз коришћење квадрата Euclidean-удаљености као мерног интервала. Метода НСА примењена је на све испитиване матриксе (земљиште и појединачно – корење и надземни делови сакупљених биљних врста). Посебно су приказани и резултати израчунавања одговарајућих VCF за сваки појединачни ПАУ у корењу сваке врсте, са сваке локације. Комбинација примењених метода и тумачење њихових резултата развијени су кроз свеобухватну дискусију и усмерени у правцу добијања прецизних и научно утемељених закључака.

У оквиру поглавља **Закључак**, изведени су најважнији закључци проистекли на основу резултата истраживања и дискусије из конкретне докторске дисертације, са посебним акцентом на значај примене хеометрије у одређивању природних биљних фиторемедијационих и фитомониторинг потенцијала.

У поглављу **Литература** приложен је абецедни преглед коришћене литературе – 140 референци, које су цитиране кроз целокупни текст докторске дисертације.

На крају дисертације, дати су **Прилози**, који садрже следеће материјале: Табеларни прикази резултата Pearson-ове корелационе студије (Прилог 1.), Биографија аутора (Прилог 2.) и Изјаве аутора (Прилог 3.).

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост, оригиналност и значај

Савременост, оригиналност и значај ове дисертације огледају се не само у испитивању аутентичних потенцијала до сада неиспитаних локалних биљних врста из Бора и његове непосредне околине за примену у релативно новим, еколошким методама контроле и заштите животне средине, тј., за фиторемедијацију и фитомониторинг ПАУ, већ и у избору најадекватнијих и најсавременијих метода хемијске и статистичке анализе, тј. у одабраном хеометријском приступу за добијање тачних и прецизних резултата, као и њиховом критичком тумачењу. Такође, у оквиру моделованог хеометријског приступа, извршена је и модификација QuEChERS-технике за изоловање ПАУ из биљних узорака, уз истовремено извођење поступка њене валидације, тј. оптимизације. Прецизније речено, у кораку пречишћавања испитиваних узорака (екстракцијом дисперзном чврстом фазом), а у циљу коначне тачне идентификације ПАУ, као и смањења трошкова саме анализе, коришћена је дијатомејска земља као сорбент, до сада примењиван једино на узорке земљишта, али не и биљног материјала.

Проблеми узроковани ПАУ представљају све већи проблем са аспекта угрожавања животне средине и здравља људи. То су умерено испарљива хидрофобна органска једињења, веома сложене структуре, која се пак добро растварају у липофилним структурама. Многа једињења из ове групе су генотоксична и могу изазвати појаву мутација, као и неке врсте канцера. Из ових разлога, Америчка агенција за заштиту животне средине (енг., USEPA), поставила је 16 ПАУ једињења на листу приоритетних полутаната који се обавезно прате у индустријским емисијама (у литератури познати као укупни ПАУ, или енг., ΣPAHs) и то су: нафтален (Nap), аценафтилен (Acu), аценафтен (Ace), флуорен (Flr), фенантрен (Phe), антрацен (Ant), флуорантен (Flt), пирен (Pyr), бензо(а)антрацен (BaA), хризен (CHR), бензо(б)флуорантен (BbF), бензо(к)флуорантен (BkF), бензо(а)пирен (BaP), дибензо(а,х)антрацен (DhA), индено(1,2,3-цд)пирен (IcP) и бензо(г,х,и)перилен (BgP). Седам од ових једињења сматра се потенцијално канцерогеним за људе: BaA, BaP, BbF, BkF, DhA, CHR и IcP.

Због ниског степена деградације у животној средини и слабе растворљивости у води, ПАУ су веома постојана једињења у животној средини. Обзиром на њихову перзистентност и биоакумулативност, као и могућност транспорта на велике удаљености, сматрају се једним од значајнијих представника перзистентних органских загађујућих материја, тј., полутаната (ПОП). У општем случају, сва ПОП-једињења, па тако и ПАУ, могу потицати из природних (вулканске ерупције, шумски пожари, неки геохемијски и микробиолошки процеси), као и антропогених извора (индустријска постројења, градске топлане, али и индивидуална ложишта, градски отпад, саобраћај, активности у пољопривреди, као и продукти деградације органских молекула настали из различитих пиролитичких процеса). Ипак, присуство ПАУ је генерално препознато као контаминација која потиче из антропогених активности, с обзиром на стални и све већи техничко-технолошки развој.

Проблеми узроковани ПАУ који потичу из антропогених извора, присутни су на светском нивоу. Многе локалне области (попут борског региона) изложене су дугогодишњем загађењу не само околног биотопа, већ и присутних биоценоза и што је најважније – људске популације.

Због тога и менаџмент загађених сфера животне средине представља тему од глобалног интереса, а посебно у односу на земљиште као добро познати (природни) резервоар различитих загађујућих материја.

Међутим, чест је случај када нема једноставног решења за санацију контаминираниог земљишта, као и других контаминираних медијума, или пак за контролу негативног утицаја ПАУ на живе организме. Бројне технологије базиране на различитим физичким, електричним, термалним, хемијским, или биолошким процесима тестиране су у циљу добијања поузданих и тачних података у односу на њихову ефикасност при редукцији, или тоталном уклањању ПАУ са контаминираних места. Изведени тестови показали су многе афирмативне, али у исто време и бројне негативне резултате за сваки поједини, или комбиновани приступ. Ипак, током последњих деценија, једна од "зелених" технологија, позната као фиторемедијација, почела је да се истиче као релативно једноставна, јефтина и пре свега - еколошки прихватљива метода, како у односу на загађену воду и ваздух, тако и на земљиште, као веома важан и у исто време - екстремно слабо обновљиви (практично - необновљиви) природни ресурс. У случају земљишта, показано је да фиторемедијација, иако дуготрајни процес (базиран на специфичним биљним капацитетима за толеранцију, биоаккумуляцију, или деградацију ПАУ), може потпуно да уклони, или бар да делимично разори, тј. трансформише једињења ПАУ у мање токсичне форме, тј. метаболите. Ова метода се најчешће користи на великим контаминираним површинама и то на врло ефикасан и безбедан начин, поправљајући истовремено многе физичке, хемијске и биолошке карактеристике третиране подлоге.

У предузетим истраживањима, такође је било примећено да микроорганизми могу да делују у садејству са вишим биљкама и на тај начин остваре побољшану деградацију било ког молекула ПАУ. Ово је све додатно довело до разјашњења и самих процеса метаболизма васкуларних биљака, који могу бити укључени у процесе ремедијације, што је пак за крајњу последицу имало развој различитих метода фиторемедијације. Данас се ова техника састоји од низа иновативних технологија за заштиту животне средине у чијем центру се налазе управо јединствене екстрактивне и метаболичке способности појединих врста биљака.

Прецизно речено, васкуларне, тј. више биљке, поседују бројне генетске, биохемијске и физиолошке карактеристике које их чине погодним средствима за примену у ремедијационим процесима. Оне могу да издрже веће концентрације органских загађујућих материја (укључујући и ПАУ), од већине микроорганизама (који се типично примењују у биоремедијацији), могу да их усвајају путем корена и да их унутар својих ћелија брзо претварају у метаболите мање токсичности, или пак да стимулишу њихову деградацију у сфери кореновог система; у ризосферном земљишту биљке могу чак и да исталоже, практично - имобилишу ПАУ. У том смислу, главне предности фиторемедијације у поређењу са другим приступима огледају у следећем:

- 1) чува природну структуру и текстуру подлоге,
- 2) енергија коју користи потиче првенствено од сунца,
- 3) постиже се висок ниво корисне микробиолошке биомасе у подлози и
- 4) остварује се ниска цена и потенцијал за релативно брзо спровођење.

Овде треба напоменути да, осим преко корена, биљке могу усвајати ПАУ и преко листова (из контаминираних честица прашине које се на њима таложе депозицијом из ваздуха), што се

обично најчешће користи у различитим процедурама биомониторинга, као још једне еколошке и економски исплативе методе контроле и заштите животне средине, а пре свега, у смислу праћења промене стања и нивоа загађености. Додатно, неусвојени део атмосферских честица који се задржава на површинама лишћа, али и других делова надземне биомасе, може да послужи за прецизнију детекцију једне актуелне контаминације, тако да су бројни аутори, у својим биомониторинг тестовима користили и различите неопране надземне биљне делове.

Имајући у виду све ове могућности, предметна дисертација указује да су васкуларне копнене биљке врло специфично организовани живи организми са јединственим екобиолошким карактеристикама, чије испитивање у сврхе фиторемедијације и фитомониторинга ПАУ представља крајње целисходну и смислену истраживачку активност. Осим тога, приликом ових испитивања, треба тежити примени савремених и прецизних хемијских метода, тј., моделовању најадекватнијих хеометријских приступа анализе, као и пажљивом сагледавању и тумачењу добијених резултата.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Када су у питању природни потенцијали биљака за примену у ремедијацији и мониторингу ПАУ у животној средини, до данас је испитан велики број биљних врста, а такође и начини којима оне усвајају и акумулирају ове опасне микро-полутанте у својим ткивима, или их једноставно задржавају на површини својих надземних делова. Студије објављене овој области у часописима међународног значаја су бројне (укључујући и малобројне студије домаћих аутора који су наведени у списку референци коришћених у конкретној дисертацији), док је на српском језику, у часописима националног значаја, публикован значајно мањи број радова и то пре свега аутора Алагић и сар. (2011, 2012, 2013, 2015), Алагић и Димитријевић (2014) и Паплудис и сар. (2022, 2023, 2024). Поред својих експерименталних резултата, ови аутори су презентовали и мноштво података објављених у страној литератури и приближили домаћој стручној и научној јавности проблематику о способностима биљака у успостављању различитих тактика у борби против токсичних ПАУ, које имају кључну улогу у прилагођавању и опстанку у агресивном окружењу. Ова докторска дисертација се у свом теоретском и литературном делу ослања не само на поменуте домаће изворе, већ пре свега, на водећу светску литературу публиковану у најновијем временском периоду, али исто тако и у периодима самих почетака истраживања метода фиторемедијације и биомониторинга, као и хеометрије, која се све више показује неопходном у овим истраживањима. Неке од најважнијих коришћених референци су:

Alagić S.Č., Maluckov B.S., Radojičić V.B. (2015) How can plants manage polycyclic aromatic hydrocarbons? May these effects represent a useful tool for an effective soil remediation? A review, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17(3), 597–614.

Alagić S.Č., Stankov Jovanović V.P., Mitić V.D., Cvetković J.S., Petrović G.M., Stojanović G.S. (2016) Bioaccumulation of HMW PAHs in the roots of wild blackberry from the Bor region (Serbia): phytoremediation and biomonitoring aspects, *Science of the Total Environment*, 562, 561–570.

Alagić S., Stankov Jovanović V., Mitić V., Nikolić J., Petrović G., Tošić S., Stojanović S. (2017) The effect of multiple contamination of soil on LMW and MMW PAHs accumulation in the roots of *Rubus fruticosus* L. naturally growing near The Copper Mining and Smelting Complex Bor (East Serbia), *Environmental Science and Pollution Research*, 24(18), 15609–15621.

Alagić, S.Č., Nujkić, M.M., Tošić, S.B., Milić, S.M., Dimitrijević, M.D. (2019) Heavy Metal Pollution in the Region of Bor (Serbia) Resulting from the Long-Term Copper Mining and Metallurgical Activities: The Evidence Recorded in Plant Organs and Implications for Biomonitoring and Phytoremediation as Two Prospective Environmentally-Friendly Methods of Pollution Control. in *Serbia: Current Issues and Challenges in the Areas of Natural Resources. Agriculture and Environment*. Ed. Janev, I., New York. Nova Science Publishers US., 301–356.

Alagić, S.Č. (2022) Prisustvo potencijalno toksičnih metala u regionu Bora (istočna Srbija): Biljni zapis. Urednik: dr Milan Trumić; Tehnički fakultet u Boru, Univerziteta u Beogradu.

Al-Nasir F., Hijazin T.J., Al-Alawi M.M., Jiries A., Al-Madanat O.Y., Mayyas A., Al-Dalain S., Al-Dmour R., Alahmad, A., Batarseh M.I. (2022) Accumulation, Source Identification, and Cancer Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Different Jordanian Vegetables, *Toxics*, 10, 643.

Altova E.P. i Hargittai I. (2022) Mikhail S. Tsvet—pioneer of chromatography—150 years from his birth, *Structural Chemistry*, 33, 1–3.

Antošova B., Hrabak P., Antoš V., Waclawek S. (2020) Chemical Oxidation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water By Ferrates (VI), *Ecological Chemistry and Engineering S*, 27(4), 529–542.

Awere E., Obeng P.A., Bonoli A., Obeng P.A. (2020) E-waste recycling and public exposure to organic compounds in developing countries: a review of recycling practices and toxicity levels in Ghana, *Environmental Technology Reviews*, 9(1), 1–19.

Balmer J.E., Hung H., Yu Y., Letcher R.J., Muir D.C.G. (2019) Sources and environmental fate of pyrogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the Arctic, *Emerging Contaminants*, 5, 128–142.

Bishnoi K., Rani P., Bishnoi N.R. (2024) Polycyclic aromatic hydrocarbons in sewage-irrigated vegetables from industrial cities in Haryana, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196, 337.

Calzoni G.L., Antognoni F., Pari E., Fonti P., Gnes A., Speranza A. (2007) Active biomonitoring of heavy metal pollution using *Rosa rugosa* plants, *Environmental Pollution*, 149, 239–245.

Cvetkovic J.S., Mitic V.D., Stankov Jovanovic V.P., Dimitrijevic M.V., Petrovic G.M., Nikolic-Mandic S.D., Stojanovic G.S. (2016) Optimization of the QuEChERS extraction procedure for the determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil by gas chromatography-mass spectrometry, *Analytical Methods*, 8(7), 1711–1720.

Deelaman W., Pongpiachan S., Tipmanee D., Choochuay C., Iadtem N., Suttinun O., Cao J. (2020) Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Terrestrial Soils in Chile, *Journal of South American Earth Sciences*, 99, 102514.

Fu J., Zhao C., Luo Y., Liu C., Kyzas G.Z., Luo Y., Zhao D., An S., Zhu H. (2014) Heavy metals in surface sediments of the Jialu River, China: Their relations to environmental factors, *Journal of Hazardous Materials*, 270, 102–109.

Gad H.A., El-Ahmady S.H., Abou-Shoer M.I., Al-Azizi M.M. (2013) Application of Chemometrics in Authentication of Herbal Medicines: A Review, *Phytochemical Analysis*, 24, 1–24.

Gąsecka M., Włodarczyk-Makuła M., Popenda A., Drzewiecka K. (2015) Phytoremediation of PAH-Contaminated Areas. In: Ansari A.A., Gill S.S., Gill R., Lanza G.R., Newman L., editors. *Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants*. Volume 1, Springer International Publishing, 295–309.

Gu W., Bai J., Yuan W., Ma E., Zhang C., Wang J. (2019) Pollution analysis of soil polycyclic aromatic hydrocarbons from informal electronic waste dismantling areas in Xinqiao, China, *Waste Management & Research*, 37(4), 394–401.

Haritash A.K. i Kaushik C.P. (2009) Biodegradation aspects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A review, *Journal of Hazardous Materials*, 169(1–3), 1–15.

He M., Yang S., Zhao J., Collins C., Xu J., Liu X. (2019) Reduction in the exposure risk of farmer from e-waste recycling site following environmental policy adjustment: A regional scale view of PAHs in paddy fields, *Environment International*, 133, 105136.

Ho R. (2006) *Handbook of univariate and multivariate data analysis and interpretation with SPSS*, Taylor & Francis Group, LLC.

Hussain Z.S. i Maqbool K. (2014) GC-MS: Principle, Technique and its application in Food Science, *International Journal of Current Science*, 13, E116–126.

Idowu O., Semple K.T., Ramadass K., O'Connor W., Hansbro P., Thavamani P. (2019) Beyond the obvious: Environmental health implications of polar polycyclic aromatic hydrocarbons, *Environment International*, 123, 543–557.

Inobeme A., Nayak V., Mathew T.J., Okonkwo S., Ekwoba L., Ajai A.I., Bernard E., Inobeme J., Agbugui M.M., Singh K.R.B. (2022) Chemometric approach in environmental pollution analysis: A critical review, *Journal of Environmental Management*, Volume 309, 114653.

Jia J., Bi C., Jin X., Zeng Y., Deng L., Wang X., Chen Z. (2021) Uptake, translocation, and risk assessment of PAHs in contaminated soil-air-vegetable systems based on a field simulation experiment, *Environmental Pollution*, 271, 116361.

Jia J., Bi C., Zhang J., Jin X., Chen Z. (2018) Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in vegetables near industrial areas of Shanghai, China: Sources, exposure, and cancer risk, *Environmental Pollution*, 241, 750–758.

Jia J., Bi C., Zhang J., Chen Z. (2019) Atmospheric deposition and vegetable uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) based on experimental and computational simulations, *Atmospheric Environment*, 204, 135–141.

Kariyawasam T., Doran G.S., Howitt J.A., Prenzler P.D. (2022) Polycyclic aromatic hydrocarbon contamination in soils and sediments: Sustainable approaches for extraction and remediation, *Chemosphere*, 291, 132981.

Kaur H., Kumar A., Bindra S., Sharma A. (2024) Phytoremediation: An emerging green technology for dissipation of PAHs from soil, *Journal of Geochemical Exploration*, 259, 107426.

Khan Z., Troquet J., Vachelard C. (2005) Sample preparation and analytical techniques for determination of polyaromatic hydrocarbons in soils, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2(3), 275–286.

Kicińska A. i Dmytrowski P. (2023) Anthropogenic impact on soils of protected areas—example of PAHs, *Scientific Reports*, 13, 1524.

King A., Readman J.W., Zhou J.L. (2003) The application of solid-phase micro-extraction (SPME) to the analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), *Environmental Geochemistry and Health*, 25, 69–75.

Li J., Xue J., Tan Y., Jia M., Feng J., Feng X., Zheng N., Fan H., Yao H. (2025) Distribution characteristics, source analysis and ecological risk assessment of PAHs in tea garden soil in China, *Environmental Research*, 266, 120559.

Liao C., Yang P., Xie Z., Zhao Y., Cheng X., Zhang Y., Ren Z., Guo Z., Liao J. (2010) Application of GC – Triple Quadrupole MS in the Quantitative Confirmation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters in Soil, *Journal of Chromatographic Science*, 48, 161–166.

Lourenço R.A., Lube G.V., Jarcovis R. De L., da Silva M.J., de Souza A.C. (2023) Navigating the PAH maze: Bioaccumulation, risks, and review of the quality guidelines in marine ecosystems with a spotlight on the Brazilian coastline, *Marine Pollution Bulletin*, 197, 115764.

Meištininkas R., Vaškevičienė I., Dikšaitytė A., Pedišius N., Žaltauskaitė J. (2024) Biosurfactant-Assisted Phytoremediation of Diesel-Contaminated Soil by Three Different Legume Species. *Environments*, 11, 64.

Meudec A., Dussauze J., Jourdin M., Deslandes E., Poupart N. (2006) Gas chromatographic–mass spectrometric method for polycyclic aromatic hydrocarbon analysis in plant biota, *Journal of Chromatography A*, 1108, 240–247.

Miller J.N. i Miller J.C. (2005) *Statistics and “Chemometrics” for Analytical Chemistry*, Pearson Education Limited, London.

Milosavljević S.M. (1994) *Strukturne instrumentalne metode*, Hemijski fakultet, Beograd.

Mogashane T.M., Mokoena L., Tshilongo J. (2024) A Review on Recent Developments in the Extraction and Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Environmental Samples, *Water*, 16(17), 2520.

Molina L., Segura A. (2021) Biochemical and Metabolic Plant Responses toward Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals Present in Atmospheric Pollution. *Plants*, 10, 2305.

Nikolić J. (2018) *Optimizacija postupaka pripreme uzoraka zemljišta za kvantitativnu analizu policikličnih aromatičnih ugljovodonika primenom metode gasna hromatografija-masena spektrometrija*, Doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Prirodno matematički fakultet, Niš.

Papludis A., Alagić S., Milić S., Medić D., Zlatanović I., Nikolić J., Stankov Jovanović V. (2023a) The capacities of *Hedera helix* from the Bor region for PAH accumulation in the root and implications for phytostabilization, *Materials protection*, 64(1), 13–21.

Papludis A.D., Alagić S.Č., Milić S.M., Nikolić J.S., Medić D.V., Stević Z.M., Stankov Jovanović V.P. (2023b) A consideration of phenanthrene presence in Bor's municipality based on its content in leaves and stems of *Hedera helix* L., 11th International Conference on Renewable Electrical Power Sources, Union of Mechanical and Electrotechnical Engineers and Technicians of Serbia (SMEITS), Society for Renewable Electrical Power Sources, 239–243.

Papludis A., Alagić S., Milić S., Nikolić J., Zlatanović I., Jevtović S., Stankov Jovanović V. (2024a) Naphthalene screening in Bor's municipality based on its concentrations in leaves and stems of *Hedera helix* L., 31st International conference Ecological Truth & Environmental Research - EcoTER'24, Sokobanja, Serbia, 18-21 June 2024, University of Belgrade, Technical faculty in Bor, 38–42.

Papludis A.D., Alagić S.Č., Milić S.M., Medić D.V., Stanković S.S., Nedelkovski V.V., Cvetković A.Z. (2024b) Phytomonitoring of pyrene of atmospheric origin in the rural and urban/industrial sites of Bor's municipality using leaves and stems of *Hedera helix* L., *Chemia Naissensis*, 6(2), 34–41.

Papludis A.D., Alagić S.Č., Milić S.M., Nikolić J.S., Jevtović S.Č., Stankov Jovanović V.P., Stojanović G.S. (2025) Chemometric Evaluation of 16 Priority PAHs in Soil and Roots of *Syringa vulgaris* and *Ficus carica* from the Bor Region (Serbia): An Insight into the Natural Plant Potential for Soil Phytomonitoring and Phytoremediation, *Environments*, 12(8), 256.

Patel A.B., Shaikh S., Jain K.R., Desai C., Madamwar D. (2020) Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Sources, Toxicity, and Remediation Approaches, *Frontiers in Microbiology*, 11, 562813.

Prabakaran K., Li J., Anandkumar A., Leng Z., Zou C.B., Du D. (2019) Managing environmental contamination through phytoremediation by invasive plants: A review, *Ecological Engineering*, 138, 28–37.

Prupp A.H. (2013) *Statistics in Food Science and Nutrition*. Editor-in-Chief Richard W. Hartel, Associate Editors, J. Peter Clark, David Rodriguez-Lazaro, David Topping, Springer New York Heidelberg Dordrecht London.

Ratola N., Amigo J.M., Alves A. (2010) Comprehensive assessment of pine needles as bioindicators of PAHs using multivariate analysis, The importance of temporal trends, *Chemosphere*, 81, 1517–1525.

Ratola N., Lacorte S., Alves A., Barceló D. (2006) Analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in pine needles by gas chromatography – mass spectrometry, *Journal of Chromatography A*, 1114, 198–204.

Reichenauer T.G. i Germida J.J. (2008) Phytoremediation of Organic Contaminants in Soil and Groundwater, *Chemistry Sustainability Energy Materials*, 1(8–9), 708–717.

Royuela D., Veses A., Martínez J.D., Callen M.S., Lopez J.M., García T., Murillo R. (2024) Thermochemical recycling of polystyrene waste by pyrolysis using a pilot-scale auger reactor: Process demonstration in a relevant environment, *Resources Conservation and Recycling*, 211, 107869.

Rusănescu C.O., Istrate I.A., Rusănescu A.M., Constantin G.A. (2025) Bioremediation of Soil Contamination with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons — A Review, *Land*, 14, 10.

Sadowska-Rociek A., Surma M., Cieślik E. (2014) Comparison of different modifications on QuEChERS sample preparation method for PAHs determination in black, green, red and white tea, *Environmental Science and Pollution Research*, 21, 1326–1338.

Sakshi, Singh S.K., Haritash A.K. (2019) Polycyclic aromatic hydrocarbons: soil pollution and remediation, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 6489–6512.

Sari M.F., Esen F., Tasdemir Y. (2020) Biomonitoring and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Using Pine Tree Components from Three Different Sites in Bursa, Turkey, *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*.

Schwab A.P. i Dermody C.L. (2021) Pathways of polycyclic aromatic hydrocarbons assimilation by plants growing in contaminated soils, *Advances in Agronomy*, 193–250.

Shi T., Tian K., Bao H., Liu X., Wu F. (2017) Variation in foliar uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons in six varieties of winter wheat, *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 27215–27224.

Sumathi K. i Rameshpathy M. (2023) Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons contaminated soils: Recent progress, perspectives and challenges. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 1441.

Sushkova S., Minkina T., Tarigholizadeh S., Antonenko E., Konstantinova E., Gülser C., Dudnikova T., Barbashev A., Kızılkaya R. (2020) PAHs accumulation in soil-plant system of *Phragmites australis* Cav. in soil under long-term chemical contamination, *Eurasian Journal of Soil Science*, 9(3), 242–253.

Tarigholizadeh S., Sushkova S., Rajput V.D., Ranjan A., Arora J., Dudnikova T., Barbashev A., Mandzhieva S., Minkina T., Wong M.H. (2024) Transfer and Degradation of PAHs in the Soil–Plant System: A Review, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72(1), 46–64.

Ukalska-Jaruga A. i Smreczak B. (2020) The Impact of Organic Matter on Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) Availability and Persistence in Soils, *Molecules*, 25(11), 2470.

USEPA, 2024. United States Environmental Protection Agency (2024) Risk-Based Screening Table – Generic Tables; Regional Screening Level, RSL Summary Table (TR=1•10<sup>-6</sup> and THQ=1.0) May 2016. Dostupno na: <https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-generic-tables> (1.3.2025).

Wang Z., Ma X., Na G., Lin Z., Ding Q., Yao Z. (2009) Correlations between physicochemical properties of PAHs and their distribution in soil, moss and reindeer dung at Ny-Ålesund of the Arctic, *Environmental Pollution*, 157, 3132–3136.

Włóka D., Placek A., Smol M., Rorat A., Hutchison D., Kacprzak M. (2019) The efficiency and economic aspects of phytoremediation technology using *Phalaris arundinacea* L. and *Brassica napus* L. combined with compost and nano SiO<sub>2</sub> fertilization for the removal of PAH's from soil, *Journal of Environmental Management*, 234, 311–319.

Zhang J. i Fan S. (2016) Influence of PAH speciation in soils on vegetative uptake of PAHs using successive extraction, *Journal of Hazardous Materials*, 320, 114–122.

Zhang S., Yao H., Lu Y., Yu X., Wang J., Sun S., Liu M., Li D., Li Y-F., Zhang D. (2017) Uptake and translocation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and heavy metals by maize from soil irrigated with wastewater, *Scientific Reports*, 7(1), 12165.

Zhao Z., He W., Wu R., Xu F. (2022) Distribution and Relationships of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils and Plants near Major Lakes in Eastern China, *Toxics*, 10, 577.

Zhu Z., Li L., Yu Y., Tan L., Wang Z., Suo S., Liu C., Qin Y., Peng X., Lu H., Liang W. (2023) Distribution, source, risk and phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in typical urban landscape waters recharged by reclaimed water, *Journal of Environmental Management*, 330, 117214.

Xiao N., Liu R., Jin C., Dai Y. (2015) Efficiency of five ornamental plant species in the phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH)-contaminated soil, *Ecological Engineering*, 75, 384–391.

### **3.3. Опис и адекватност примењених научних метода**

У овој докторској дисертацији коришћене су хемијске и статистичке методе анализе које су усвојене и у другим сличним областима истраживања, а које су детаљније објашњене у једном од потпоглавља дисертације ("Примери студија са хеометријским приступом у анализи и карактеризацији ПАУ присутним у земљишним и биљним узорцима"), тако да су погодне и за истраживања која су била предузета у оквиру ове дисертације. Међутим, у овој дисертацији, осмишљена је и примењена њихова специфична комбинација, адекватна за конкретно истраживање, као део оригиналног хеометријског приступа, у оквиру којег су извршене и одређене модификације технике за изоловање ПАУ из узоркованог материјала. Такође, примењено је и додатно израчунавање одговарајућих BCF. Методе које су биле искоришћене у циљу остваривања постављених задатака су:

- снимање терена ради уочавања и одабира биљних врста које се понављају на локацијама од интереса,
- узорковање одабраног биљног и одговарајућег земљишног материјала са укупно 9 локација и припремање репрезентативних узорака од присутних биљака (за сваку локацију појединачно),
- припрема узоркованог материјала за хемијску анализу (прање корена, али не и надземних делова биљака, сушење свих делова, као и одговарајућег земљишта на ваздуху и хомогенизовање - млевење, просејавање, уситњавање),
- изоловање ПАУ из осушених биљних и кореспондирајућих земљишних узорака коришћењем модификоване QuEChERS-технике, уз претходно извођење поступка њене оптимизације,
- идентификација ПАУ и одређивање њихових концентрација у биљном и земљишном материјалу помоћу GC/MS-методе на 7890/7000B GC/MS/MS трипл-квадрупол уређају,

опремљеним Combi PAL аутоматским узоркивачем (Agilent Technologies, Santa Klara, Kalifornija, SAD) и HP-5MS капиларном колоном (5% фенилметил-силоксан, димензије: 30 m x 0,25 mm, дебљина филма 0,25 µm). Квантитативна анализа била је заснована на квантификационим јонима 16 испитиваних једињења ПАУ, као и њиховим ретенционим временима. Обезбеђење и контрола квалитета остварени су коришћењем слепих ("blank") проба и такозваних "спајкованих" узорака који су анализирани под истим условима. Линеарност је одређена анализом серије узорака са аналитима у дефинисаном опсегу концентрација, у 3 понављања. Прецизност је процењена методом понављања ("intra-day"), тј., у току истог дана, на истом инструменту, од стране истог оператера, коришћењем 3 "спајкована" узорка, а резултати су били изражени као релативна стандардна девијација поновљивости (RSDp), како за узорке биљака, тако и за узорке земљишта. Тачност је процењена на три различита нивоа "спајковања" и за узорке земљишта и за узорке биљака, а изражена је као вредност приноса. Границе детекције (LOD) и границе квантификације (LOQ) одређени су анализом калибрационих стандарда најнижих концентрација),

- одређивање физичко-хемијских особина земљишта: садржај ОМ одређен је методом губитка масе на температури од 550°C, а земљишни рН и ЕС су мерени у раствореним узорцима земљишта (земљиште/дестилована вода = 1:2,5 w/v), коришћењем рН-метра (CyberScan рН 510 Eutech, NL) и кондуктометра (4510 Jenway, UK), респективно и

- специфичан хеометријски приступ у обради резултата добијених хемијском анализом, као и израчунавање одговарајућих VCF. Наиме, при избору адекватних статистичких метода (за процесуирање добијених резултата), неопходно је тачно препознавање типова података, јер оно даље диктира одговарајући тип статистичке анализе и тестова које треба применити. Из тог разлога, тј., како би примена одговарајуће методе била исправна, веома је значајно да истраживач буде добро упућен не само у суштину различитих статистичких метода, већ и да прецизно одреди циљеве своје студије. Посматрано са аспекта и потреба ове докторске дисертације, употребљене су статистичке методе: PCS и HCA.

Припрема узорака биљног и земљишног материјала, као и мерење земљишних параметара рађени су у хемијској лабораторији Одсека за технолошко инжењерство, Техничког факултету у Бору, Универзитета у Београду, док су хемијске анализе изведене у лабораторији Катедре за органску хемију и биохемију, Природно-математичког факултета у Нишу, Универзитета у Нишу.

### **3.4. Примењивост остварених резултата**

Проучавањем научне и стручне литературе утврђено је да не постоје литературни подаци о примени бршљана, јоргована и смокве (сорте црна Петровача) у области заштите животне средине.

На основу резултата добијених у овој дисертацији, а пре свега тумачења вредности VCF, као и резултата PCS и HCA, може се рећи да се дошло до важних закључака о природним потенцијалима свих узоркованих биљних врста за примену у фитомониторингу и фиторемедијацији (нарочито фитостабилизацији) ПАУ и да је тиме остварен значајан допринос у области контроле и заштите пространих подручја која трпе директан утицај ПАУ, пореклом,

пре свега, из антропогених активности. Анализа корења испитиваних биљних врста, као и кореспондирајућег земљишта, представља велики допринос у разумевању процеса усвајања/акумулације ПАУ, што се практично своди на остваривање могућности за исправну процену примене одабраних биљних врста у фитостабилизацији као једној од најпогоднијих метода за фиторемедијацију ПАУ и истовремено указује на вероватноћу примене ових врста и у методи ризоремедијације (што захтева и нека додатна испитивања). Наиме, показало се да, иако су све биљне врсте имале различито понашање према различитим ПАУ, ипак су све оне имале добру способност акумулације и толерисања значајних количина различитих једињења ПАУ у свом корењу (а посебно: Flr, BkF+BbF и DhA), што их и квалификује као добре кандидате за фитостабилизацију, практично, за задржавање ПАУ у овом биљном органу, а чиме се у суштини, постиже рестрикција њиховог расејања у самом земљишту. Једино су VaP и CHR били потпуно искључени из овог усвајања (у свим испитиваним случајевима), што је даље сигнализирало њихову изузетну токсичност за све испитиване биљне врсте, а што представља одређени допринос ове дисертације у смислу тачних процена успешности примене испитиваних врста у односу на ремедијацију појединих ПАУ.

Међутим, пошто се показало да корење свих испитиваних биљних врста, иако способно да концентрише и толерише значајне количине ПАУ, ипак не може тачно и адекватно да одрази актуелно стање у земљишту како у односу на суму, тако и према појединачним једињењима, то га онда даље искључује као погодан алат за извођење тачног и прецизног фитомониторинга, тј., стања загађења у земљишту. У овом случају земљишног мониторинга, корисније је пратити садржаје ПАУ у самим земљишним узорцима.

Када су у питању надземни делови свих испитиваних врста може се рећи да они могу наћи примену, пре свега, у атмосферском мониторингу сезонског типа, а посебно - њихово лишће. При томе, како би се добило што тачније тумачења резултата, треба имати на уму да је највећи допринос аутентичне биоакумулације садржајима ПАУ код надземних делова биљака био у случају јоргована, а да је код смокве и бршљана, допринос атмосферске депозиције био изузетно значајан.

Садржаји ПАУ у земљишту и надземним деловима испитиваних биљних врста, уз пажљиву анализу резултата PCS и HCA, могу да укажу и на порекло ПАУ, тј., природно, или антропогено, а могу и да укажу на могуће тачкасте, или пак дифузне изворе ових опасних полутаната, што је такође важно за употребу бршљана, јоргована и смокве (сорте црна Петровача) у биомониторингу.

Добијени резултати су додатно указали и на ризике од испитиваних ПАУ (како у односу на појединачна једињења, тако и у односу на суму 16 ПАУ), што је од великог значаја не само за локалну вегетацију, већ и људску популацију (због могућности њиховог уласка у ланац исхране), те се они могу применити и искористити за различите процене ризика у конкретној, али и другим контаминираним областима, тј., у разним токсиколошким истраживањима.

Сви добијени резултати указали су и на постојање само минорних утицаја испитиваних параметара (U, OM, pH, EC и концентрације појединих земљишних ПАУ) на коренско усвајање/биоакумулацију, као и лисну биоакумулацију/депозицију, и тако потврдили да кључну улогу у овим процесима има биљна врста, сама по себи (највероватније због различитих могућности толерисања токсичних концентрација ПАУ). Ови резултати се могу применити, као

изузетно користан допринос и у другим наукама и научним дисциплинама које проучавају различите одговоре биљака у природним околностима агресивних окружења (морфологија и физиологија биљака везано не само за истраживања у биологији, већ и пољопривреди, токсикологији и сл.).

Обзиром на чињеницу да су резултати до којих се дошло, проистекли из реалних услова једне веома загађене средине, практична примена бршљана, јоргована и смокве (сорте црна Петровача), у областима са сличним изворима загађења је крајње препоручљива, али уз пажљив одабир, као и тумачење резултата хеометријског приступа.

Коначно, у оквиру специфично осмишљеног хеометријског приступа у предметној дисертацији, треба истаћи и могућност примене модификоване QuEChERS-технике и на друге врсте биљака, тј., њихових делова, јер су резултати валидације ове технике указали да су испуњени сви услови у погледу њене поновљивости и прецизности.

### **3.5. Оцена способности кандидата за самостални научни рад**

Урађена докторска дисертација, анализа добијених резултата, публиковани научни радови проистекли из саме дисертације (један у међународном и три у националним часописима, као и са пет међународних конференција), али и значајан број претходно објављених научних радова, као и учешћа у реализацији домаћих научно–истраживачких пројеката, указују на способност кандидаткиње, Александре Д. Паплудис, за самостални научни рад, али и за активно учешће у тимском раду. Кандидаткиња је током израде докторске дисертације у потпуности овладавала методологијом научно–истраживачког рада.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### **4.1. Приказ остварених научних доприноса**

Овом докторском дисертацијом остварен је значајан научни допринос у смислу могућности апликације одабраних биљних врста у фитомониторингу и фиторемедијацији, заједно са успешним осмишљавањем одговарајућег хеометријског приступа. Научни допринос дисертације огледа се у следећем:

- ✓ у утврђивању садржаја 16 приоритетних ПАУ (укупних и појединачних) у узорцима надземних делова и корења одабраних биљних врста: бршљана, јоргована и смокве (сорте црна Петровача), као и у узорцима земљишта из одговарајућих коренских зона.
- ✓ у резултатима GC/MS анализе свих врста узорака који су потврдили да су концентрације сваког појединачног једињења ПАУ варирале по локацијама и то не само посматрајући по различитим биљним врстама, већ и оквиру појединачне врсте, а и оквиру истог матрикса. Прецизније, утврђено је да су оне, у случајевима многих једињења (посматрајући све испитиване матриксе), на бројним локацијама, биле на нивоу испод граница детекције (nd), а нарочито код BgP и IcP, који су на свим локацијама били испод граница детекције. Додатно, BaP

и CHR нису били нађени код свих узорака корена (осим у случају једне УИ локације) и коначно, ВаР није био нађен ни код свих узорака надземних делова. Ови детаљи били су уједно и први показатељи да ВаР, али у великој мери и CHR, иначе одавно препознати као канцерогени за људе, највероватније представљају и изузетно токсична једињења за све биљне врсте испитиване у овој дисертацији, што је први пут утврђено за ове биљне врсте. Изостајање њиховог усвајања било је очигледно и то највише код корена. Ситуација са надземним деловима није била тако јасна (иако и они имају способност усвајања и биоакумулације ПАУ). Међутим, с обзиром да су ови делови били анализирани као неопрани, као и да сигурно није било транслокације корен-лист, случај изостајања овог једињења у надземним деловима, пре свега је био у корист претпоставке да, у периоду узорковања, вероватно није ни било емисије ВаР у Бору и околини;

✓ у утврђивању нивоа контаминације земљишта једињењима ПАУ (као последице вишегодишње акумулације) ради указивања на потенцијалне ризике од ових опасних полутаната за локалну вегетацију, али и људску популацију и то поређењем са одговарајућим граничним вредностима датим у научној литератури, али и USEPA-прописима. Важно је истаћи да су једино садржаји DhA (могући канцероген за људе) код земљишта смокве, на једној УИ локацији, биле изнад USEPA-граничне вредности и то везано за оба критеријума за TR и THQ за земљишта у насељеним местима. Ово даље сугерише да би, када су у питању индивидуална једињења, једино у односу на поменути случај, неке мере ремедијације могле бити предузете. Међутим, израчунате суме укупних ПАУ у земљишту сваке локације, допринеле су уочавању да ниједан од испитаних узорака не припада класи загађених земљишта;

✓ у процени контаминације надземних биљних делова (као последице сезонског загађења) укупним и појединачним ПАУ, такође ради указивања на потенцијалне ризике. Наиме, високе концентрације DhA у надземним деловима биљака на скоро свим локацијама (често вишим и од USEPA-граничних вредности за земљиште), као и високи износи сума укупних ПАУ у њима, подржавају не само примену мера очувања квалитета земљишта, већ и ваздуха, јер је јасно да су значајне количине ПАУ у/на испитиване биљке доспевале директно из ваздуха;

✓ у уочавању да су, упркос горе поменутих чињеницама, све испитиване биљне врсте успешно расле на својим природним стаништима, без показивања било каквих (видљивих) симптома токсичности ПАУ, што је први детаљ који их препоручује као перспективне и отпорне врсте, пригодне не само за фиторемедијацију и фитомониторинг, већ и за опстанак и за обнављање вегетације на загађеним локацијама;

✓ у процени способности сваке испитиване биљне врсте за усвајање, биоакумулацију, или депозицију ПАУ ради анализирања могућности употребе ових врста у појединим методама фитомониторинга и фиторемедијације и то применом израчунавања одговарајућих BCF, као и адекватне комбинације хемијских и статистичких метода у оквиру хеометријског приступа;

✓ у употреби и валидацији модификоване QuEChERS-технике као значајном делу хемијске анализе ПАУ, после које је уследила прецизна квалитативна и квантитативна анализа GC/MS-методом;

✓ у успешној примени одговарајућих метода статистичке анализе, као што су: PCS и HCA, као и у њиховом исправном тумачењу;

- ✓ у тумачењу резултата НСА која је била примењена на све испитиване матриксе (и земљиште и биљни делови свих испитиваних врста), а добијени хијерархијски дендрограми пружили су јасну класификацију испитиваних локација по њиховој сличности и тако помогли у процени биљних врста за примену у фитомониторингу;
- ✓ у тумачењу резултата PCS, којом је утврђена значајност, поузданост и природа корелација (позитивна, или негативна) између бројних испитиваних параметара који утичу на усвајање, депозицију, или акумулацију ПАУ (код сваке биљне врсте појединачно), као што су то корелације између: 1) детектованих концентрација појединачних ПАУ у корењу и концентрација у кореспондирајућем земљишту, као и мерених земљишних параметара (рН, ЕС и ОМ), 2) концентрација појединачних ПАУ у свакој од испитиваних матрица, 3) концентрација појединачних ПАУ у лишћу са концентрацијама у одговарајућим границима и 4) концентрација појединачних ПАУ у земљишту, као и у биљним деловима и удаљености (U) места узорковања од индустријске зоне у Бору (са рударско-металуршким комплексом и градском топланом), као могуће главног извора загађења ПАУ у целом региону;
- ✓ у уочавању чињенице да су резултати PCS указали да су корелације између коренских концентрација и земљишних параметара: рН, ЕС и ОМ, у највећем броју случајева биле на ниском нивоу, те да се ови параметри, осим у неколико ређих случајева, не могу означити као доминантни контролни фактори при усвајању већине ПАУ из земљишта;
- ✓ у уочавању да ни садржаји истоветних индивидуалних ПАУ у корену и земљишту нису били у значајним корелацијама, што је указало да садржаји кореспондентних појединачних земљишних ПАУ нису имали одлучујућу улогу при усвајању тих једињења у корену, док су неке друге (статистички значајне) корелације, које се односе на различита (тј., некореспондентна) земљишна и коренска једињења показала како синергистичке, тако и компетитивне односе (зато се они, у одређеној мери могу сматрати утицајним факторима);
- ✓ у запажању да је највише статистички значајних корелација (и то позитивних) било детектовано између концентрација различитих земљишних ПАУ на одабраним локацијама, што је такође важно јер индикује њихово заједничко порекло, највероватније, атмосферске и доминантно, антропогене природе. Једино се за ВаР у земљишту може сматрати да је доминантно природног порекла и само делимично антропогеног (из оквира рекалцитрантског пула);
- ✓ у запажању да су резултати PCS показали да ни параметар U није био од пресудног утицаја на садржај ПАУ у свим испитиваним матриксама и тиме потврдили да индустријска зона у Бору, са рударско-металуршким комплексом и градском топланом, не представља ни главни, а ни једини извор једињења ПАУ у посматраном региону. Наиме, резултати су били такви да су значајне корелације постојале само у случају пар једињења, посматрано по свим испитиваним матрицама. Ово је уједно била и потврда о присуству неких других извора ПАУ у Бору и комплетној околини, као што су: саобраћај, кућна ложишта у индивидуалним домаћинствима, роштиљање у природи, контролисано паљење стрништа током јесени, спонтани, тињајући пожари на градској депонији, али и спонтани шумски пожари током врелих летњих месеци;
- ✓ у уочавању изразитог варирања вредности VCF и то уз изостајање неких значајнијих правила, осим чињенице да су све биљне врсте имале способност биоакумулације и толерисања

значајних количина различитих ПАУ у свом корењу (а посебно: Flr, BkF+BbF и DhA), док су једињења попут VaP и CHR, била потпуно искључена из овог усвајања (код свих врста);

✓ у разјашњењу варирања и неуједначености VCF код НМ и ВМ ПАУ, као врсте потврде да хемијска структура и физичко-хемијске особине појединачних једињења нису имале значајнији утицај на усвајање и акумулацију ПАУ, што све даље даје потврду да је улога саме биљне врсте била пресудна током ових процеса;

✓ у истицању веома важне чињенице да су све испитиване биљне врсте биле способне да концентришу значајне количине различитих ПАУ у свом корењу (посебно Flr, BkF+BbF и DhA), те да су, као такве, све оне примењиве у фитостабилизацији ПАУ, као методи која суштински лимитира ширење ПАУ загађења у земљишту;

✓ у процени да су екскудати корења испитиваних биљака вероватно имали одређену улогу и у преципитацији, деградацији и осталим процесима са ПАУ у самом земљишту (такође могуће у кооперацији са микробима присутним у ризосфери). Одавде следи и претпоставка да се све врсте могу применити и у ризоремедијацији (што би требало детаљније анализирати);

✓ у уочавању различитих детаља, а пре свега оних који су проистекли из резултата НСА, који показују да надземни делови свих испитиваних врста могу бити корисни у праћењу сезонског, пре свега атмосферског загађења, као и да су делови смокве и бршљана најбоље одразили концентрације ПАУ из атмосферске депозиције, док су делови јоргована били најуспешнији у одражавању праве биоакумулације ПАУ, што је важно знати приликом осмишљавања начина мониторинга концентрација ПАУ, тј. у односу на потребе самог истраживања;

✓ у уочавању да је фитомониторинг земљишта на бази коренских концентрација ПАУ потпуно несигуран, пре свега због селективног усвајања ових једињења, а и чињенице да стање у земљишту одражава контаминацију из вишегодишњег периода. У овом случају, најпоузданије је утврђивање концентрација земљишних ПАУ и

✓ у проналажењу и испитивању чак три биљне врсте: бршљана, јоргована и смокве (сорте црна Петровача), које до сада нису биле проучаване са аспеката фитомониторинга и фиторемедијације, што ову дисертацију чини посебно значајном и оригиналном.

Резултати ове докторске дисертације имају значајан допринос за науку о животној средини, јер се фитомониторинг и фиторемедијација сматрају „зеленим технологијама” у којима биљке представљају поуздан и економски исплативи ресурс, а у исто време, добијени резултати доприносе и областима других наука као што су: хемија, екологија, биологија, токсикологија, статистика.

## 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Постављени циљеви и задаци истраживања у овој дисертацији потпуно су остварени. Добијени резултати постављеног експеримента пружили су веома корисне информације у вези са квалитативном и квантитативном детекцијом, праћењем и дистрибуцијом испитиваних ПАУ у животној средини и што је најважније, потврдили су добре природне биљне потенцијале одабраних врста: бршљана, јоргована и смокве (сорте црна Петровача), за примену и у фитомониторингу и фиторемедијацији (пре свега, методом фитостабилизације и могуће, ризоремедијације). Они су истовремено указали и да је за тумачење добијених резултата

одабраног хемометријског приступа, потребно добро познавање не само примењених хемијских и статистичких метода, већ и различитих особина, као и карактеристика испитиваних једињења, али и испитиваних биљака. Резултати истраживања у овој дисертацији могу се сматрати посебно значајним и оригиналним због проналажења и испитивања чак три биљне врсте које до сада нису биле проучаване са аспекта фитомониторинга и фиторемедијације. Још један оригиналан и веома важан допринос ове дисертације, у смислу обезбеђења квалитета и тачности квалитативне и квантитативне детекције ПАУ, огледа се и у успешном начину модификације QuEChERS-технике за изоловање ових једињења из узорака биљног (пре свега), али и земљишног материјала. Ово је потврђено кроз поступак оптимизације саме методе, где су сви параметри валидације били на неопходном нивоу.

### 4.3. Верификација научних доприноса

Научни допринос докторске дисертације је верификован публикованим научним радовима (један у међународном и три у националним часописима, као и на пет међународних конференција), као што следи:

#### Рад у међународном часопису категорије М22

1. **A. Papludis**, S. Alagić, S. Milić, J. Nikolić, S. Jevtović, V. Stankov Jovanović, G. Stojanović (2025) Chemometric Evaluation of 16 Priority PAHs in Soil and Roots of *Syringa vulgaris* and *Ficus carica* from the Bor Region (Serbia): An Insight into the Natural Plant Potential for Soil Phytomonitoring and Phytoremediation, *Environments*, 12(8), 256.

<https://doi.org/10.3390/environments12080256>; (IF (2025) = 4.223)

#### Саопштење са међународног скупа штампано у целини категорије М33

1. **A. Papludis**, S. Alagić, S. Milić (2020) Detection of PAHs as micro-pollutants in environmental soil and plant samples, 28th International Conference Ecological Truth and Environmental Research 2020, Kladovo, Serbia, 16.06.2020 - 18.06.2020, Proceedings, 111–115, ISBN: 978-86-6305-104-1.

2. **A. Papludis**, S. Alagić, S. Milić, I. Zlatanović, M. Filipović, J. Nikolić, V. Stankov Jovanović (2022) The content of dangerous contaminants PAHs in the soil and roots of *Hedera helix* in Slatina (Bor's municipality), 29th International Conference Ecological Truth and Environmental Research - EcoTER'22, University of Belgrade, Technical faculty in Bor, Sokobanja, Serbia, 21-24 June 2022, Proceedings, 137–141, ISBN 978-86-6305-123-2.

3. **A. Papludis**, S. Alagić, S. Milić, J. Nikolić, D. Medić, Z. Stević, V. Stankov Jovanović (2023) A consideration of phenanthrene presence in Bor's municipality based on its content in leaves and stems of *Hedera helix* L., 11th International Conference on Renewable Electrical Power Sources, Belgrade, Serbia, October 2 and 3, 2023, Proceedings, 239–243, ISBN 978-86-85535-16-1.

4. **A. Papludis**, S. Alagić, S. Milić, J. Nikolić, I. Zlatanović, S. Jevtović, V. Stankov Jovanović (2024) Naphtalene screening in Bor's municipality based on its concentrations in leaves and stems of *Hedera helix* L., 31st International conference Ecological Truth & Environmental Research - EcoTER'24,

University of Belgrade, Technical faculty in Bor, Sokobanja, Serbia, 18-21 June 2024, Proceedings, 38–42, ISBN 978-86-6305-152-2.

**5. A. Papludis, S. Alagić, S. Milić, D. Medić, J. Nikolić, S. Jevtović, I. Zlatanović Đaić (2025)** Distribution of PAHs in soils from the Bor region, taken from the rooting zone of poison ivy, The 56th International October Conference on Mining and Metallurgu, Bor Lake, Bor, Serbia, 22-25 October 2025, Proceedings/Zbornik, 624–627, ISBN: 978-86-6305-164-5.

#### **Рад у водећем националном часопису категорије M51**

**1. A. Papludis, A. Simonović, S. Alagić (2022)** The content of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil formed during incineration of e-waste at the sites of its inadequate disposal and recycling, *Materials Protection/Zaštita Materijala*, ISSN 0351-9465, E-ISSN 2466-2585, 63(2), 165–176.

<https://doi.org/10.5937/zasmat2202165P>

**2. A. Papludis, S. Alagić, S. Milić, D. Medić, I. Zlatanović, J. Nikolić, V. Stankov-Jovanović (2023)** The capacities of *Hedera helix* from the Bor region for PAH accumulation in the root and implications for phytostabilization, *Materials Protection/Zaštita Materijala*, ISSN 0351-9465, E-ISSN 2466-2585, 64(1), 13–21.

<https://doi.org/10.5937/zasmat2301013P>

#### **Рад у националном часопису категорије M53**

**1. Aleksandra D. Papludis, Slađana Č. Alagić, Snežana M. Milić, Dragana V. Medić, Sonja S. Stanković, Vladan V. Nedelkovski, Aleksandar Z. Cvetković (2024)** Phytomonitoring of pyrene of atmospheric origin in the rural and urban/industrial sites of Bor's municipality using leaves and stems of *Hedera helix* L., *Chemia Naissensis*, ISSN 2620-1895, 6(2), 34–41.

<https://doi.org/10.46793/ChemN6.2.34P>

### **5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ**

Докторска дисертација кандидаткиње **АЛЕКСАНДРЕ Д. ПАПЛУДИС**, мастер инжењера технологије, под називом: „Хеометријско одређивање 16 приоритетних полицикличних ароматичних угљоводоника у земљишту и биљним деловима бршљана, јоргована и смокве (сорте црна Петровача) из борског региона: Контекст фитомониторинга и фиторемедијације“, представља савремен, оригиналан и значајан научни допринос у области заштите животне средине, али и областима као што су: хемија, екологија, токсикологија, биологија, статистика итд. Комисија за оцену урађене докторске дисертације закључује да је докторска дисертација написана према стандардима научно–истраживачког рада, као и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању, Стандардима за акредитацију, као и Статутом и Правилником о докторским студијама Техничког факултета у Бору, Универзитета у Београду и критеријумима Универзитета у Београду. У дисертацији су предмет и циљеви истраживања јасно наведени и остварени, а приказани резултати примењиви су у савременој пракси.

На основу наведеног, Комисија за оцену урађене докторске дисертације закључује да кандидаткиња, **АЛЕКСАНДРА Д. ПАПЛУДИС**, мастер инжењер технологије, испуњава све законске и остале услове за одбрану докторске дисертације. У том смислу, Комисија предлаже Наставно–научном већу Техничког факултета у Бору, Универзитета у Београду, да се Реферат и дисертација прихвате и упуте на усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, као и да се након тога кандидаткиња позове на јавну, усмену одбрану.

У Бору, март 2026. године

**КОМИСИЈА:**

**др Снежана Милић**, редовни професор  
Универзитет у Београду - Технички факултет у Бору

**др Жаклина Тасић**, ванредни професор  
Универзитет у Београду - Технички факултет у Бору

**др Јелена Николић**, ванредни професор  
Универзитет у Нишу, Природно-математички факултет у Нишу

Универзитет у Београду  
Технички факултет у Бору  
Број: VI-1/15-212  
Бор, 21.10.2022. године

На основу чл. 107. Закона о високом образовању, чл. 100. Статута Универзитета у Београду и чл. 73. Статута Техничког факултета, декан доноси

## РЕШЕЊЕ

о мировању права и обавеза студента

**I. ПАПЛУДИС АЛЕКСАНДРИ**, бр. индекса 2/2018, мастер инж. технологије, из Бора, студенту докторских академских студија на Техничком факултету у Бору, одобрава се мировање права и обавеза у школској 2022/23, години, због одржавања трудноће.

## Образложење

Именована је дана 03.10.2022. године, поднела захтев за мировање права и обавеза у школској 2022/23. години на Техничком факултету у Бору.

Разматрајући поднети захтев, и на основу записника Наставне комисије III степена, број; VI-1/15-211 од 20.10.2022. године, одлучено је као у изреци.

**ДЕКАН**  
  
Проф. др Дејан Таникић

Универзитет у Београду  
Технички факултет у Бору  
Број: VI-1/10-300  
Бор, 04.12.2023. године

На основу чл. 107. Закона о високом образовању, чл. 100. Статута Универзитета у Београду и чл. 73. Статута Техничког факултета, декан доноси

## РЕШЕЊЕ

о мировању права и обавеза студента

**I. ПАПЛУДИС АЛЕКСАНДРИ, бр. индекса 2/2018, мастер инж. технологије,** студенту докторских академских студија на Техничком факултету у Бору, **одобрава се** мировање права и обавеза у школској 2023/24. години, због неге детета до годину дана живота.

## Образложење

Именована је дана 29.09.2023. године, поднела захтев заведен под бројем VI-1/10-175 за мировање права и обавеза у школској 2023/24. години на Техничком факултету у Бору.

Разматрајући поднети захтев, и на основу записника Комисије за студије III степена, број; VI-1/10-268 од 07.11.2023. године, одлучено је као у изреци.



ДЕКАН

Проф. др Дејан Таникић