



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ  
ФАКУЛТЕТ ЗАШТИТЕ НА РАДУ У НИШУ



**Никола З. Мишић**

**КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ЗАПАЉИВОСТИ,  
ГОРИВОСТИ И ЕМИСИЈЕ ПРОДУКАТА  
САГОРЕВАЊА ДОМИНАНТНИХ ВРСТА ШУМСКЕ  
ВЕГЕТАЦИЈЕ СРБИЈЕ**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ниш, 2025.



UNIVERSITY OF NIŠ  
FACULTY OF OCCUPATIONAL SAFETY



**Nikola Z. Mišić**

**CHARACTERIZATION OF FLAMMABILITY,  
COMBUSTIBILITY, AND EMISSION OF  
COMBUSTION PRODUCTS OF DOMINANT FOREST  
VEGETATION SPECIES IN SERBIA**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2025.

## Подаци о докторској дисертацији

Ментор:

др Милан Протић, ванр. проф.  
Универзитет у Нишу, Факултет заштите на раду у Нишу

Наслов  
докторске  
дисертације:

Карактеризација запаљивости, горивости и емисије продуката сагоревања доминантних врста шумске вегетације Србије

Резиме:

Докторска дисертација бави се проблемима растућег ризика од шумских пожара у Србији, који је појачан климатским променама. Истраживање полази од проблема недостатка поузданих података о запаљивости свежег биљног материјала карактеристичног за екосистеме Србије, што је кључно за разумевање и предвиђање понашања пожара.

За потребе истраживања, развијена је и примењена експериментална инсталација која обједињује калориметар за одређивање топлотне снаге и FTIR гасни анализатор за мерење састава продуката сагоревања у реалном времену. Овај приступ је омогућио свеобухватну анализу процеса паљења и сагоревања под контролисаним лабораторијским условима.

Кроз спроведено истраживање је систематски испитан утицај кључних фактора на запаљивост доминантних четинарских и широколисних врста. Анализирани су ефекти садржаја воде, типа паљења (пилотирано и спонтано) и нивоа топлотног флукса на динамику сагоревања и емисију продуката сагоревања. Спроведена је и интегрална процена утицаја морфолошких (величина, дебљина и густина листа/иглица) и хемијских карактеристика (садржај терпена, алкана и других једињења) на параметре запаљивости. Посебан методолошки допринос представља анализа поузданости и поновљивости мерења у зависности од конфигурације носача узорака.

Резултати су показали јасну везу између анализираних фактора и понашања вегетације у пожару. Утврђено је да хемијски састав има доминантан утицај на запаљивост четинара, док су код широколисних врста пресудне морфолошке особине и садржај воде. Дисертација формира важну базу података која се може применити у унапређењу модела за предвиђање ширења пожара, планирању превентивних мера и ефикаснијем управљању шумским екосистемима, чиме се директно доприноси заштити од шумских пожара у Србији.

Научна  
област:

Инжењерство заштите животне средине и заштите на раду

Научна  
дисциплина:

Заштита од пожара

Кључне речи:

Шумски пожари; запаљивост свеже шумске вегетације; параметри запаљивости; садржај влаге; пилотирано паљење; спонтано паљење; морфолошко-хемијске карактеристике; производи сагоревања; калориметрија.

УДК:

614.841.42:630(497.11)(043.3)  
581.526.42 (497.11):539.918 (043.3)

CERIF  
класификација:

T 200 Термички инжењеринг, примењена термодинамика

Тип лиценце  
Креативне  
заједнице:

Одабрани тип лиценце: **CC BY-NC-ND**

### Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	PhD Milan Protić, Associate Professor University of Niš, Faculty of Occupational Safety
Title of Doctoral Dissertation:	Characterization of flammability, combustibility, and emission of combustion products of dominant forest vegetation species in Serbia
Abstract:	<p>This doctoral dissertation addresses the growing risk of wildfires in Serbia, which has been intensified by climate change. The research is grounded in the identified lack of reliable data on the flammability of fresh plant material typical of Serbia's forest ecosystems, which is essential for understanding and predicting wildfire behavior.</p> <p>For the purposes of the research, an experimental setup was developed and applied, integrating a mass loss calorimeter for determining heat release rate and an FTIR gas analyzer for real-time measurement of combustion products. This approach enabled a comprehensive analysis of ignition and combustion processes under controlled laboratory conditions.</p> <p>The study systematically examined the influence of key factors on the flammability of dominant coniferous and broadleaf species. It analyzed the effects of moisture content, ignition type (piloted and non-piloted), and levels of incident heat flux on combustion dynamics and gas emissions. An integrated assessment was also conducted on the influence of morphological traits (leaf/needle size, thickness, and density) and chemical characteristics (content of terpenes, alkanes, and other compounds) on flammability parameters. A notable methodological contribution is the analysis of measurement reliability and repeatability depending on the configuration of sample holders.</p> <p>The results demonstrated a clear relationship between the analyzed factors and vegetation behavior during fire exposure. It was found that chemical composition predominantly influences the flammability of coniferous species, while morphological characteristics and moisture content are critical for broadleaf species. The dissertation establishes an important database that can be used to improve wildfire spread models, support preventive planning, and enhance forest ecosystem management, thus directly contributing to wildfire protection in Serbia.</p>
Scientific Field:	Environmental and Occupational Safety Engineering
Scientific Discipline:	Fire protection
Key Words:	Forest fires; flammability of live forest vegetation; flammability parameters; moisture content; piloted ignition; spontaneous ignition; morphological-chemical characteristics; combustion products; calorimetry.

UDC:

614.841.42:630(497.11)(043.3)  
581.526.42 (497.11):539.918 (043.3)

CERIF  
Classification:

T 200 Thermal engineering, applied thermodynamics

Creative  
Commons  
License  
Type:

Selected License Type: **CC BY-NC-ND**

## *Захвалност аутора*

Најпре изражавам искрену и дубоку захвалност свом ментору, проф. др Милану Протићу, за изузетну стручну и моралну подршку коју ми је пружао током читавог процеса рада на овој докторској дисертацији. Његови конструктивни савети, подстицајне идеје и истраживачко усмерење били су кључни за формирање теме и целокупни ток истраживања.

Посебну захвалност упућујем проф. др Ани Бијелић, чланици комисије, и др Ирени Раца, научној сарадници Природно-математичког факултета у Нишу, за несебичну стручну подршку, сарадњу и ангажовање током експерименталног дела истраживања, чиме су значајно допринеле реализацији ове докторске дисертације.

Захваљујем се и осталим члановима комисије, проф. др Миомиру Раосу, проф. др Дарку Зигару и проф. др Мирку Стојиљковићу, на корисним сугестијама, подршци и поверењу које су исказали у процесу оцењивања и вредновања овог рада.

Захвалност дугујем и проф. др Срђану Глишовићу и проф. др Евици Јовановић, на пријатељској подршци и разумевању током овог периода.

Такође, желим да искажем и захвалност проф. др Миодрагу Ђорђевићу, са Природно-математичког факултета у Нишу, за корисне сугестије и подршку током статистичке обраде података.

Посебну захвалност дугујем и проф. др Ненаду Живковићу, који ми је пружио прилику да се ангажујем у настави и научној делатности на факултету.

Највећу захвалност дугујем својој драгој породици Мишић на безусловној подршци, охрабрењу и разумевању које су ми пружили током читавог трајања овог захтевног процеса.

**Ову докторску дисертацију посвећујем свом сину Огњену.**

*Никола Мишић*

# Садржај

СПИСАК ТАБЕЛА.....	I
СПИСАК СЛИКА .....	IV
1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА .....	1
1.1. Предмет истраживања.....	6
1.2. Идентификација истраживачких проблема.....	8
1.3. Циљеви научног истраживања .....	11
1.4. Хипотезе истраживања .....	12
1.5. Очекивани резултати истраживања .....	12
1.6. Примењене научне методе.....	13
1.7. Структура докторске дисертације.....	14
1.8. Објављене научне публикације у области докторске дисертације.....	17
2. РАЗВОЈ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНЕ ИНСТАЛАЦИЈЕ ЗА ИСПИТИВАЊЕ ПОЖАРНИХ КАРАКТЕРИСТИКА И ПРОДУКАТА САГОРЕВАЊА ШУМСКЕ ВЕГЕТАЦИЈЕ .....	18
2.1. Преглед метода и уређаја за испитивање запаљивости шумске биомасе .....	19
2.2. Опис експерименталне инсталације .....	25
2.2.1. Калориметар за одређивање топлотне снаге .....	27
2.2.2. Узорковање и мерење састава продуката сагоревања .....	32
3. УТИЦАЈ САДРЖАЈА ВЛАГЕ НА ЗАПАЉИВОСТ ТЕРМИНАЛНИХ КРАЈЕВА ГРАНА КРОШЊИ ДОМИНАНТНИХ ЧЕТИНАРСКИХ ВРСТА .....	36
3.1. Општи део .....	36
3.1.1. Садржај влаге као главни фактор запаљивости шумске биомасе .....	39
3.2. Материјали и методе .....	42
3.2.1. Подручје истраживања и локације узорковања.....	42
3.2.2. Припрема узорака.....	44
3.2.3. Примењена експериментална апаратура.....	44
3.2.4. Експериментални дизајн.....	46
3.2.5. Примењене статистичке методе.....	46
3.3. Резултати .....	47
3.3.1. Разлике у параметрима запаљивости међу четинарским врстама за различите нивое топлотног флуksа и садржаја влаге .....	47
3.3.2. Корелациона анализа параметара запаљивости четинарских врста за различите нивое топлотног флуksа и садржаја влаге .....	59
3.3.3. Резултати анализе главних компоненти.....	63
3.4. Дискусија.....	65
3.5. Закључна разматрања.....	71

4. ЕФЕКАТ ТОПЛОТНОГ ФЛУКСА И ТИПА ПАЉЕЊА НА САГОРЕВАЊЕ СВЕЖИХ ГРАНЧИЦА ЦРНОГ БОРА ( <i>Pinus nigra</i> ) .....	73
4.1. Општи део .....	73
4.2. Материјали и методе .....	76
4.2.1. Припрема узорака и процедура тестирања .....	76
4.2.2. Експериментални дизајн.....	77
4.2.3. Статистичка анализа .....	78
4.3. Резултати и дискусија .....	79
4.3.1. Интеракција топлотног флукса и типа паљења на параметре запаљивости...	79
4.3.2. Одређивање састава продуката сагоревања у зависности од вредности топлотног флукса и типа паљења .....	89
4.3.3. Резултати РСА анализе параметара запаљивости и састава продуката сагоревања у зависности од типа паљења.....	97
4.4. Закључна разматрања.....	102
5. ИНТЕГРАЛНА ПРОЦЕНА УТИЦАЈА МОРФОЛОШКО-ХЕМИЈСКИХ КАРАКТЕРИСТИКА НА ЗАПАЉИВОСТ СВЕЖЕ ШУМСКЕ ВЕГЕТАЦИЈЕ.....	104
5.1. Општи део .....	104
5.2. Материјали и методе .....	106
5.2.1. Анализирани билне врсте и локације узорковања .....	106
5.2.2. Одређивање параметара запаљивости.....	109
5.2.3. Одређивање морфолошких карактеристика .....	109
5.2.4. Одређивање хемијског састава .....	110
5.2.5. Експериментални дизајн и статистичка анализа.....	112
5.3. Резултати .....	115
5.3.1. Анализа параметара запаљивости испитиваних врста .....	115
5.3.2. Анализа морфолошких карактеристика испитиваних врста.....	120
5.3.3. Анализа хемијских карактеристика испитиваних врста .....	124
5.3.4. Класификација врста по запаљивости у односу на таксономску припадност...	127
5.3.5. Утицај морфолошких карактеристика на запаљивост четинарских врста .	128
5.3.6. Утицај хемијских карактеристика на запаљивост четинарских врста .....	132
5.3.7. Утицај морфолошких карактеристика на запаљивост широколисних врста..	138
5.3.8. Утицај хемијских карактеристика на запаљивост широколисних врста ..	140
5.3.9. Комбиновани утицај морфолошко-хемијских карактеристика на запаљивост четинарских врста .....	144
5.3.10. Комбиновани утицај морфолошко-хемијских карактеристика на запаљивост широколисних врста.....	148
5.4. Дискусија.....	152
5.5. Закључна разматрања.....	157

6. ПРОЦЕНА ПОНОВЉИВОСТИ И ПОУЗДАНОСТИ У ПРИМЕНИ РАЗЛИЧИТИХ КОНФИГУРАЦИЈА НОСАЧА УЗОРАКА НА КАЛОРИМЕТРУ ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ ТОПЛОТНЕ СНАГЕ ПРИ ИСПИТИВАЊУ КАРАКТЕРИСТИКА ЗАПАЉИВОСТИ ШУМСКЕ ВЕГЕТАЦИЈЕ.....	160
6.1. Општи део .....	160
6.2. Материјали и методе .....	163
6.2.1. Дизајн носача узорака .....	163
6.2.2. Експериментални дизајн.....	165
6.2.3. Статистичка анализа .....	165
6.3. Резултати и дискусија .....	166
6.4. Закључна разматрања.....	173
7. ФИНАЛНИ ЗАКЉУЧЦИ И ДОПРИНОСИ ИСТРАЖИВАЊА .....	175
7.1. Научни и методолошки доприноси истраживања .....	176
7.2. Практични допринос и примена резултата .....	177
7.3. Ограничења и препоруке за будућа истраживања .....	178
ЛИТЕРАТУРА .....	181
БИОГРАФИЈА АУТОРА.....	198
ИЗЈАВЕ АУТОРА .....	199

## СПИСАК ТАБЕЛА

<b>Табела 2.1.</b>	Преглед експерименталних конфигурација и њихових излазних параметара за карактеризацију запаљивости шумске вегетације	21
<b>Табела 2.2.</b>	Упоредни приказ температура конусног грејача за одређене вредности топлотних флуксева	31
<b>Табела 2.3.</b>	Проток метана потребан за калибрацију термопарова	31
<b>Табела 3.1.</b>	Локација и координате места узорковања	43
<b>Табела 3.2.</b>	Фактори и нивои у експерименталном дизајну	46
<b>Табела 3.3.</b>	Преглед експерименталних резултата са добијеним параметрима запаљивости за узорке <i>A. alba</i> , распоређене према различитим садржајима влаге и топлотним флуксевима. У експоненту су представљени резултати поређења по групама. Мала слова у експоненту се односе на поређење група по нивоима топлотног флукса, док се велика слова односе на поређење група по нивоима садржаја влаге. Ако две групе третмана садрже исто слово, то значи да се те две групе не разликују значајно	48
<b>Табела 3.4.</b>	Преглед експерименталних резултата са добијеним параметрима запаљивости за узорке <i>P. abies</i> , распоређене према различитим садржајима влаге и топлотним флуксевима. У експоненту су представљени резултати поређења по групама. Мала слова у експоненту се односе на поређење група по нивоима топлотног флукса, док се велика слова односе на поређење група по нивоима садржаја влаге. Ако две групе третмана садрже исто слово, то значи да се те две групе не разликују значајно	49
<b>Табела 3.5.</b>	Векторска оптерећења анализираних варијабли према димензијама <i>PC1</i> и <i>PC2</i>	64
<b>Табела 4.1.</b>	Фактори и нивои у експерименталном дизајну	77
<b>Табела 4.2.</b>	Приказ експерименталних и статистичких резултата интеракције топлотног флукса и типа паљења на параметре запаљивости. Статистички значајни резултати су приказани подебљаним текстом ( $p < 0,05$ )	81
<b>Табела 4.3.</b>	Приказ експерименталних и статистичких резултата интеракције топлотног флукса и типа паљења на концентрације продуката сагоревања. Статистички значајни резултати су приказани подебљаним текстом ( $p < 0,05$ )	90

<b>Табела 4.4.</b>	Векторска оптерећења анализираних варијабли према димензијама <i>PC1</i> и <i>PC2</i>	97
<b>Табела 5.1.</b>	Листа одабраних врста са координатама узорковања	107
<b>Табела 5.2.</b>	Маса биљног материјала који је подвргнут екстракцији, маса и принос добијеног екстракта	110
<b>Табела 5.3.</b>	Средње вредности резултата параметара запаљивости испитиваних врста и резултати једнофакторске ANOVA анализе. Статистички значајни резултати су приказани подебљаним текстом ( $p < 0,05$ )	116
<b>Табела 5.4.</b>	Средње вредности резултата морфолошких карактеристика испитиваних врста и резултати једнофакторске ANOVA анализе. Статистички значајни резултати су приказани подебљаним текстом ( $p < 0,05$ )	121
<b>Табела 5.5.</b>	Хемијски састав анализираних биљних врста	124
<b>Табела 5.6.</b>	Средње вредности резултата хемијских карактеристика разврстане према припадности врста на четинарске и широколисне групе и резултати непараметарског <i>Mann-Whitney U</i> теста. Статистички значајни резултати су приказани подебљаним текстом ( $p < 0,05$ )	126
<b>Табела 5.7.</b>	Векторска оптерећења анализираних параметара запаљивости према димензијама <i>PC1</i> и <i>PC2</i>	128
<b>Табела 5.8.</b>	Векторска оптерећења анализираних морфолошких карактеристика четинарских врста за издвојене <i>PC</i> димензије	129
<b>Табела 5.9.</b>	Резултати <i>PLS</i> регресије: предвиђање параметара запаљивости на основу морфолошких карактеристика четинарских врста	130
<b>Табела 5.10.</b>	Векторска оптерећења анализираних хемијских карактеристика четинарских врста за издвојене <i>PC</i> димензије	134
<b>Табела 5.11.</b>	Резултати <i>PLS</i> регресије: предвиђање параметара запаљивости на основу хемијских карактеристика четинарских врста	136
<b>Табела 5.12.</b>	Векторска оптерећења анализираних морфолошких карактеристика широколисних врста за издвојене <i>PC</i> димензије	139
<b>Табела 5.13.</b>	Резултати <i>PLS</i> регресије: предвиђање параметара запаљивости на основу морфолошких карактеристика широколисних врста	139
<b>Табела 5.14.</b>	Векторска оптерећења анализираних хемијских карактеристика широколисних врста за издвојене <i>PC</i> димензије	142

<b>Табела 5.15.</b>	Резултати <i>PLS</i> регресије: предвиђање параметара запаљивости на основу хемијских карактеристика широколисних врста	142
<b>Табела 5.16.</b>	Векторска оптерећења анализираних морфолошко-хемијских карактеристика четинарских врста за издвојене <i>PC</i> димензије	145
<b>Табела 5.17.</b>	Резултати <i>PLS</i> регресије: предвиђање параметара запаљивости на основу морфолошко-хемијских карактеристика четинарских врста	147
<b>Табела 5.18.</b>	Векторска оптерећења анализираних морфолошко-хемијских карактеристика широколисних врста за издвојене <i>PC</i> димензије	149
<b>Табела 5.19.</b>	Резултати <i>PLS</i> регресије: предвиђање параметара запаљивости на основу морфолошко-хемијских карактеристика широколисних врста	150
<b>Табела 6.1.</b>	Преглед истраживања карактеристика запаљивости шумске вегетације применом лабораторијских калориметријских уређаја	162
<b>Табела 6.2.</b>	Фактори и нивои у експерименталном дизајну	165
<b>Табела 6.3.</b>	Резултати параметара запаљивости по врстама, типовима носача узорака и садржају влаге, са израчунатим вредностима коефицијента варијације и резултатима Левеновог теста.	167

## СПИСАК СЛИКА

<b>Слика 1.1.</b>	Шематски приказ структуре и методолошки ток реализације истраживања докторске дисертације	16
<b>Слика 2.1.</b>	Приказ експерименталне инсталације у Лабораторији за заштиту од пожара на Факултету заштите на раду у Нишу	27
<b>Слика 2.2.</b>	Компоненте калориметра за одређивање топлотне снаге [49]	29
<b>Слика 2.3.</b>	Попречни пресек конусног грејача [50]	29
<b>Слика 2.4.</b>	Пример криве калибрације термопарова за топлотни флуks од 50 kW/m <sup>2</sup>	32
<b>Слика 2.5.</b>	Изглед сонде за узорковање продуката сагоревања, израђена у складу са стандардом ISO/TS 21397	33
<b>Слика 2.6.</b>	Шематски приказ инсталације за одређивање времена одзива	34
<b>Слика 2.7.</b>	Промена концентрација угљен монооксида у функцији времена за одређивање одзива гасног анализатора	35
<b>Слика 3.1.</b>	Четинари на рубу шуме са базалним гранама које додирују тло	39
<b>Слика 3.2.</b>	Мапа локација сакупљања узорака	43
<b>Слика 3.3.</b>	Специјално дизајниран носач узорка са постављеним узорцима: (а) гранчица јеле ( <i>A. alba</i> ); (б) гранчица смрче ( <i>P. abies</i> )	45
<b>Слика 3.4.</b>	Утицај садржаја влаге и топлотног флуksа на време паљења узорака	50
<b>Слика 3.5.</b>	Графикон развоја топлотне снаге за различите вредности садржаја влаге и топлотних флуksева за анализиране четинарске врсте	52
<b>Слика 3.6.</b>	Максимална топлотна снага за различите вредности садржаја влаге и топлотних флуksева за анализиране четинарске врсте	54
<b>Слика 3.7.</b>	Средња ефективна топлотна моћ за различите вредности садржаја влаге и топлотних флуksева за анализиране четинарске врсте	55
<b>Слика 3.8.</b>	Матрица Спирманове корелације између параметара запаљивости и садржаја влаге за врсту <i>A. alba</i> . Статистички значај резултата приказан је звездама: ***- $p < 0,001$ ; **- $p < 0,01$ ; *- $p < 0,05$ .	60
<b>Слика 3.9.</b>	Матрица Спирманове корелације између параметара запаљивости и садржаја влаге за врсту <i>P. abies</i> . Статистички значај резултата приказан је звездама: ***- $p < 0,001$ ; **- $p < 0,01$ ; *- $p < 0,05$ .	60
<b>Слика 3.10.</b>	Биplot PCA анализе за параметре запаљивости у односу на различите топлотне флуksеве и садржај влаге за узорке (а) <i>A. alba</i> и (б) <i>P. abies</i>	65

<b>Слика 4.1.</b>	Носач узорка са постављеним узорком врсте <i>P. nigra</i>	76
<b>Слика 4.2.</b>	Време паљења узорака за различите топлотне флуksеве и типове паљења	82
<b>Слика 4.3.</b>	Графички приказ развоја топлотне снаге ( <i>HRR</i> ) и брзине губитка масе за пилотирано и непилотирано паљење при излагању топлотном флуksу од 50, 60 и 70 kW/m <sup>2</sup>	83
<b>Слика 4.4.</b>	Максимална топлотна снага за различите нивое топлотног флуksа и типа паљења	85
<b>Слика 4.5.</b>	Вредности просечне брзине губитка масе ( <i>Mean MLR</i> ) за различите нивое топлотног флуksа и типа паљења	87
<b>Слика 4.6.</b>	Вредности укупно ослобођене топлоте ( <i>THR</i> ) и максималне ефективне топлотне моћи ( <i>Peak EHC</i> ) за различите нивое топлотног флуksа и типа паљења	88
<b>Слика 4.7.</b>	Концентрације доминантних продуката сагоревања у функцији времена, за различите типове паљења, при излагању топлотним флуksевима од 50, 60 и 70 kW/m <sup>2</sup>	95
<b>Слика 4.8.</b>	Биplot приказ корелације параметара запаљивости и продуката сагоревања у зависности од типа паљења на топлотном флуksу од 50 kW/m <sup>2</sup>	99
<b>Слика 4.9.</b>	Биplot приказ корелације параметара запаљивости и продуката сагоревања у зависности од типа паљења на топлотном флуksу од 60 kW/m <sup>2</sup>	100
<b>Слика 4.10.</b>	Биplot приказ корелације параметара запаљивости и продуката сагоревања у зависности од типа паљења на топлотном флуksу од 70 kW/m <sup>2</sup>	101
<b>Слика 5.1.</b>	Локације узорковања по врстама	108
<b>Слика 5.2.</b>	Слике анализираних врста: (а) <i>Pinus nigra</i> - <i>Pn</i> (црни бор); (б) <i>Picea abies</i> - <i>Pa</i> (смрча); (в) <i>Pinus sylvestris</i> - <i>Ps</i> (бели бор); (г) <i>Larix decidua</i> - <i>La</i> (ариш); (д) <i>Pseudotsuga menziesii</i> - <i>Pm</i> (дуглазија); (ђ) <i>Fagus sylvatica</i> - <i>Fs</i> (буква); (е) <i>Pteridium aquilinum</i> - <i>Paq</i> (папрат); (ж) <i>Acer pseudoplatanus</i> - <i>Ap</i> (јавор)	109
<b>Слика 5.3.</b>	Статистичко груписање врста према параметрима запаљивости применом Тукијевог <i>post-hoc</i> теста. Тумачење Тукијевог <i>post-hoc</i> теста заснива се на томе да се средње вредности које не деле исто слово, значајно разликују	119
<b>Слика 5.4.</b>	Статистичко груписање врста према морфолошким карактеристикама применом Тукијевог <i>post-hoc</i> теста. Тумачење Тукијевог <i>post-hoc</i> теста заснива се на томе да се средње вредности које не деле исто слово, значајно разликују	123

<b>Слика 5.5.</b>	Визуелни приказ хемијског састава анализираних биљних врста по класама једињења	125
<b>Слика 5.6.</b>	<i>PCA</i> биplot за параметре запаљивости за анализиране врсте	128
<b>Слика 5.7.</b>	<i>PCA</i> биplot морфолошких карактеристика за четинарске врсте	129
<b>Слика 5.8.</b>	Визуелни приказ доприноса морфолошких карактеристика на параметре запаљивости четинарских врста	132
<b>Слика 5.9.</b>	<i>PCA</i> биplotови хемијских карактеристика за четинарске врсте ( <i>PC1-PC2</i> ; <i>PC1-PC3</i> ; <i>PC2-PC3</i> )	134
<b>Слика 5.10.</b>	Визуелни приказ доприноса хемијских карактеристика на параметре запаљивости четинарских врста	137
<b>Слика 5.11.</b>	<i>PCA</i> биplot морфолошких карактеристика за широколисне врсте	138
<b>Слика 5.12.</b>	Визуелни приказ доприноса морфолошких карактеристика на параметре запаљивости широколисних врста	140
<b>Слика 5.13.</b>	<i>PCA</i> биplot хемијских карактеристика за широколисне врсте	141
<b>Слика 5.14.</b>	Визуелни приказ доприноса хемијских карактеристика на параметре запаљивости широколисних врста	143
<b>Слика 5.15.</b>	<i>PCA</i> биplotови морфолошко-хемијских карактеристика за четинарске врсте ( <i>PC1-PC2</i> ; <i>PC1-PC3</i> ; <i>PC2-PC3</i> )	145
<b>Слика 5.16.</b>	Визуелни приказ доприноса морфолошко-хемијских карактеристика на параметре запаљивости четинарских врста	148
<b>Слика 5.17.</b>	<i>PCA</i> биplot морфолошко-хемијских карактеристика за широколисне врсте	149
<b>Слика 5.18.</b>	Визуелни приказ доприноса морфолошко-хемијских карактеристика на параметре запаљивости широколисних врста	151
<b>Слика 6.1.</b>	Изглед израђених носача узорака	164
<b>Слика 6.2.</b>	Средње вредност параметара запаљивости по типу носача узорака и нивоа влажности узорака	168

# 1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

Шумски пожари су уобичајена појава у многим екосистемима, који сваке године проузрокују значајне губитке, како у људским животима, тако и у материјалној штети и животној средини. Према подацима Националног међуинституционалног ватрогасног центра (енгл. *National Interagency Fire Center*) и чланку *BathGeo Largest Wildfires of the Decade* (Највећи шумски пожари деценије), током последње деценије, годишње се у просеку догодило више од 64.000 шумских пожара, при чему су државе попут Бразила, Грчке и Сједињених Америчких Држава биле нарочито погођене [1], [2]. Стотине хиљада пожара у амазонским прашумама током последњих година имале су огроман утицај на глобални екосистем, при чему су милиони хектара шума трајно уништени [3].

Студија *Gincheva* и сарадника пружа детаљан преглед глобалних површина захваћених пожарима на основу *ONFIRE* базе података. У периоду од 1992-2020. године, Сједињене Америчке Државе бележиле су просечно 24.700 km<sup>2</sup> изгореле површине годишње, док је у Аустралији та вредност била знатно већа, у просеку 450.000 km<sup>2</sup> годишње у периоду од 2001-2020. За разлику од тога, у Европи је регистрована знатно мања просечна годишња површина захваћена пожарима, која је износила око 3.400 km<sup>2</sup> [4].

Велики шумски пожари („мега-пожари“) у Медитеранској регији који су захватили Португалију 2003 и 2005. године, Шпанију 2006. године и Грчку 2007. године, изазвали су значајне људске, економске и еколошке штете. Екстремни услови, као што су суше, високе температуре и јаки ветрови, стварају окружење погодно за брзо и неконтролисано ширење пожара, које превазилази капацитете националних служби за гашење. У таквим ситуацијама, пожари добијају комплексну, вишедимензионалну друштвену, еколошку и безбедносну димензију [5].

Пожари у Атици 2018. године, обележени изузетном разорном снагом и великим бројем жртава, сматрају се једним од најсмртоноснијих и најпогубнијих шумских пожара у савременој историји Европе [6]. Током пожара у Калифорнији исте године, на граничном појасу између шумских и насељених области (енгл. *Wildland Urban Interface - WUI*), изгорело је више од 30.000 кућа, док је број жртава достигао скоро 200 [1]. Пораст учесталости и интензитета ових пожара најчешће се доводи у везу са два кључна фактора: прво, са климатским променама које доприносе све неповољнијим условима за настанак и ширење пожара; и друго, са ширењем и развојем прелазних зона између

шумских и урбаних подручја (енгл. *Wildland Urban Interface - WUI*), што повећава изложеност стамбених објеката ризику од пожара.

За Сједињене Америчке Државе, 2025. година је била посебно тешка. Пожари у Лос Анђелесу, јануара 2025. године указују на све већу озбиљност пожара између шумских и насељених области. Ови пожари захватили су преко 50.000 хектара, уништили 16.000 објеката, однели 27 живота и изазвали економске губитке веће од 250 милијарди долара [7].

Поред директне штете, шумски пожари значајно доприносе загађењу ваздуха, ослобађајући токсичан дим, тешке метале и гасове стаклене баште, при чему се озбиљно нарушава квалитет ваздуха и здравље људи. Осим тога, емисије угљен-диоксида из пожара додатно убрзавају климатске промене, стварајући повратну спрегу која доприноси све учесталијим екстремним пожарима.

На основу пројекција климатских сценарија, вероватноћа појаве екстремних пожара је посебно висока у областима у којима ће температура Земље премашити 2 °C, при чему се очекује повећање опасности од шумских пожара у периоду од 2030-2040. године, са још озбиљнијим последицама у периоду од 2080. до 2100. године. Према овим прогнозама, одређене области, попут Западног Балкана и Источне Европе, могу се суочити са повећањем броја шумских пожара од 150 до 560% до 2090. године, уколико не буду предузете адекватне мере прилагођавања на климатске промене [8].

Према квантитативној анализи адаптивних мера на климатске промене, применом *Standalone Fire Model-a (SFM)*, уколико не буду примењене мере адаптације, површине захваћене шумским пожарима у Европи могу се повећати за 200% до 2090. године у односу на почетак 21. века [9]. Најугроженији региони биће Медитеран, Балкан и Источна Европа, где ће повећање температуре, продужене суше и смањење падавина значајно допринети учесталијим пожарима [9].

Климатске промене значајно утичу на пожарне ризике, и у великој мери доприносе продужењу пожарних сезона, што консеквентно доводи до повећања површина захваћених пожаром на глобалном нивоу [10]. Аутори су представили детаљну анализу трајања сезоне шумских пожара у периоду од 1979. до 2013. године, коришћењем више климатских база података и индекса опасности од пожара. Резултати су показали да је трајање сезоне шумских пожара продужено за 25,3%, што је довело до повећања просечног трајања пожарне сезоне за 18,7%. Додатно, површина захваћена пожаром је порасла за 108,1%. Овај тренд потврђују и новија истраживања, која јасно указују да климатске промене значајно утичу на пожарне режиме, доводећи до чешћих,

интензивнијих и дужих пожарних сезона широм света. Без ефикасних мера ублажавања и адаптације, шумски пожари ће постати један од највећих климатских изазова у наредним деценијама [11].

Климатске промене и растући ризик од шумских пожара одражавају се и на националном нивоу где се уочавају глобални трендови загревања, праћени порастом температура, изменама режима падавина и све израженијим климатским ризицима. Уколико емисије гасова стаклене баште остану високе, према сценарију RCP8.5, Србија би до 2100. године могла да се суочи са порастом температуре већом од 4 °C, што би резултирало учесталијом појавом екстремних временских услова [12]. Све чешћи и интензивнији топлотни таласи ствараће услове у којима ће вегетација постајати запаљивија, што ће повећати вероватноћу настанка пожара и убрзати њихово ширење. Овај тренд је већ примећен у Медитеранским земљама попут Грчке, Шпаније и Италије. Према резултатима новијих истраживања, промене у климатским обрасцима могле би довести до трансформације српских шума у екосистеме подложније пожарима, што би додатно повећало ризик од шумских пожара у будућности [12].

Температура ваздуха, количина падавина, релативна влажност ваздуха, брзина ветра и појава суше су доминантни метеоролошки фактори који утичу на настанак и развој шумских пожара [13]. Анализа података са 15 метеоролошких станица на територији Србије, за период од 2000 до 2017. године потврђују да високе температуре и ниска влажност ваздуха значајно повећавају вероватноћу настанка шумских пожара, нарочито у току продужених сушних периода. Такође, ниво сувоће вегетације и дезертификација земљишта су доминантан индикатор у предвиђању шумских пожара у Србији [14].

Приметан је тренд пораста ризика од шумских пожара у Србији, који су у великој мери под утицајем климатских промена, нарочито због раста температуре ваздуха и промена у режиму падавина [15]. Поређењем два временска периода, од 1961. до 1990. и од 1981. до 2010. године, уочен је значајан пораст температура на свим метеоролошким станицама у Србији, што доводи до повећаног ризика од пожара, посебно током летњих месеци [15].

За смањење ризика од шумских пожара неопходне су хитне проактивне мере адаптације и стратегије прилагођавања. Без свеобухватних политика и глобалних напора за смањење емисија гасова стаклене баште, шумски пожари ће и даље представљати растућу претњу здрављу и безбедности људи, имовини и екосистемима. Адаптација на локалном нивоу у Србији све је више усмерена на управљање ризиком од шумских

пожара и одрживо коришћење земљишта, како би се одговорило на изазове климатских промена. Кључни приоритети укључују развој система раног упозоравања ради унапређења превенције и реаговања на шумске пожаре, одрживо планирање коришћења земљишта и успостављање противпожарних коридора [16].

*Vranić* и *Mišić* су анализирали 23 студије о пројекцијама будућих опасности од шумских пожара у јужној Европи и указали на растућу заступљеност ове теме у научној литератури. Студија разматра ограничења и неизвесности у постојећим пројекцијама шумских пожара, при чему се посебна пажња посвећује изазовима повезаним са климатским пројекцијама, утицајем повратних веза између пожара и вегетације, као и антропогеним факторима који утичу на односе између климе и пожара [17].

Учесталост и разорни ефекти шумских пожара све више привлаче пажњу научне заједнице, што је довело до интензивног развоја истраживања у овој области. Систематско научно проучавање шумских пожара започето је 1940-их година. *Fons* се сматра првим истраживачем који је систематски проучавао шумске пожаре и развио први математички модел њиховог ширења. Иако је модел имао бројне недостатке, представљао је први документовани покушај да се проблем шумских пожара смести у научни оквир и експериментално верификују добијени резултати [18].

У наредном периоду развијен је низ емпиријских и полу-емпиријских модела. Најзначајнији међу њима је основни модел ширења површинског пожара који је формулисао *Rothermel* [19]. Иако су касније развијени напреднији модели и софистициранији приступи, овај модел и даље налази широку примену у управљању пожарима и доношењу одлука. Интегрисан је у неколико широко коришћених алата за предвиђање понашања пожара, као што су *BehavePlus*, *FARSITE*, *FlamMap* и *FireFamily Plus*.

За успешно предвиђање развоја шумских пожара, неопходно је узети у обзир карактеристике запаљивости како свежег вегетативног материјала, тако и шумске стеље. Примена традиционалних модела који предвиђају развој шумских пожара ретко узимају у обзир сагоревање свежег вегетативног материјала, јер се сматрало да је његов допринос у пожарима занемарљив. Иако висок садржај воде у свежој вегетацији традиционално указује на његову мању запаљивост, све је више доказа да под одређеним условима, као што су суше и вишемесечни недостатак падавина, свежа вегетације може достићи критичне нивое воде који омогућавају ширење пожара [20].

Пожар у области *Lower North Fork* у Колораду 2012. године, показао је како потцењивање улоге свежег вегетативног материјала може довести до катастрофалних

последица, при чему је његова екстремна запаљивост, узрокована дуготрајном сушом, управо омогућила брзо ширење шумског пожара [21].

Савремена истраживања све више указују на значајне разлике у процесима сагоревања свежег и сувог вегетативног материјала. Главне разлике огледају се у садржају влаге, структури ткива и хемијском саставу, који имају значајан допринос на механизме пиролизе, паљења и ширења пожара. Свежа биљна ткива садрже знатно већу количину влаге, што условљава потребу за већом количином топлоте за иницирање паљења, будући да испаравање влаге доводи до хлађења горивог материјала. Додатно, начин складиштења влаге унутар биљног ткива, као и присуство одређених хемијских једињења, имају значајан утицај на брзину сагоревања. Све ово указује на потребу да се у савремене моделе развоја шумских пожара интегришу и параметри запаљивости свежег вегетативног материјала [22].

Карактеризација запаљивости шумске вегетације представља кључни аспект управљања ризиком од шумских пожара, нарочито у областима погођеним климатским променама. Интеграцијом експерименталних истраживања, технологија даљинске детекције и предиктивних модела пожара, истраживачи и доносиоци одлука могу да развију ефикасније стратегије превенције и ублажавања последица пожара, смањујући на тај начин негативан утицај шумских пожара на екосистеме и људске заједнице. Недостатак стандардизованих метода за процену запаљивости шумске вегетације доводи до неконзистентности у моделима за предвиђање шумских пожара. Разлике у лабораторијским методама које се примењују у различитим истраживањима и регионима отежавају поређење резултата и процену њихове поузданости. Ове варијације доводе до непрецизне класификације ризика од пожара и ограничења у предиктивном моделирању, што може утицати на поузданост стратегија управљања пожарима [23].

Квантификовање карактеристика запаљивости шумске вегетације је од кључног значаја за унапређење управљања ризиком од пожара, посебно у шумско-насељеним областима (*WUI*) [24]. Такође, један од значајних мотива за проучавање запаљивости шумске вегетације јесте формулисање критеријума за избор биљних врста погодних за озелењавање у подручјима подложним пожарима. Селекција шумских врста које се користе у циљу смањења ризика од пожара тренутно су засноване на општим претпоставкама, уместо на научним потврђеним подацима о понашању шумске вегетације у условима пожара [24].

Сагледавајући све наведене трендове и изазове, неопходна су систематска истраживања која ће обухватити не само механизме настанка и ширења шумских пожара, већ и карактеристике самог горивог материјала.

## **1.1. Предмет истраживања**

Сложеност и повезаност фактора који утичу на појаву и ширење шумских пожара, попут густине и просторне расподеле шумске вегетације као и структурних карактеристика шумске биомасе (физичких карактеристика и хемијског састава), представљају велики изазов за истраживање у овој области. Анализа пожарних карактеристика шумске вегетације може се спровести на више нивоа: делова јединки (грана, иглица, лишћа), целе јединке (стабла) или популације јединки одређене биљне врсте. Одређивање пожарних карактеристика шумске биомасе само на основу параметара запаљивости, попут ослобођене топлоте, геометрије пламена и температуре није смислено без разматрања њихових физичких и хемијских карактеристика.

Из физичке перспективе, однос површина-запремина елемената шумске биомасе се често сматра значајним фактором који утиче на запаљивост. Са друге стране, утврђивање доминантних процеса који утичу на запаљивост и процес горења шумске вегетације није могуће без анализирања њихове физиолошке структуре и хемијског састава. Индиректан приступ проучавања запаљивости шумске вегетације је одређивање састава гасовитих продуката сагоревања, који дају важне информације о токовима реакција при сагоревању.

Досадашња истраживања запаљивости шумске вегетације углавном су била усмерена на површинске шумске пожаре са посебним нагласком на суву или влажну шумску стељу, занемарујући карактеристике запаљивости свежег биљног материјала. Ово се посебно односи на истраживање запаљивости и горивости структурних елемената крошњи стабала, које је у литератури врло оскудно.

И поред бројних истраживања, и даље постоје недостаци у разумевању кључних механизма који утичу на запаљивост и горивост шумске вегетације. Избором адекватне методологије при експерименталним истраживањима, и повезивањем добијених резултата са физичко-хемијским својствима испитиваних узорака могу се добити нова, релевантна сазнања о кључним факторима који утичу на запаљивост и горивост шумске биомасе.

Експериментално одређивање карактеристика запаљивости шумске вегетације може се изводити на уређајима за анализу узорака различитих димензија, почев од делова узорака на микро нивоу (уситњени делови биомасе) до анализе узорака у њиховој реалној величини (стабала). Истраживања у пуној размери, која укључују теренске експерименте, су најкориснија, јер су најприближнија стварним условима пожара, али су овакви подухвати комплексни, скупи и тешко изводљиви. Са друге стране, експерименти на уређајима за испитивање узорака мањих размера (на нивоу делова грана, листова) су једноставнији, изводљивији и дају врло корисне резултате који могу помоћи у разумевању физичких и хемијских процеса који се одвијају код паљења и горења узорака у пуној величини.

У литератури се могу пронаћи описи бројних наменски израђених уређаја за одређивање карактеристика паљења и горења, попут времена паљења, трајања пламене фазе и фазе тињања, геометрије пламена, мерења температуре, али резултати ових експеримената углавном немају потребну поузданост, тачност и поновљивост. Параметри попут брзине губитка масе, топлотне снаге, сматрају се неопходним за разумевање опасности од пожара, при чему се показало да уређаји који раде на принципу калориметрије, представљају поуздан алат у одређивању параметара запаљивости чврстих материјала, а самим тим и шумске вегетације.

Одређивање карактеристика запаљивости шумске вегетације није једноставан задатак, јер стандардизована методологија испитивања још увек не постоји. У том смислу, неопходно је имати развијену методологију испитивања са адекватном контролом лабораторијских услова како би се обезбедила одговарајућа поузданост, поновљивост и тачност.

У складу са претходно изложеним, **предмет истраживања** докторске дисертације је *развој методологије за одређивање параметара запаљивости доминантних врста шумске вегетације Републике Србије.*

Одређивање параметара запаљивости и горивости уз истовремену карактеризацију насталих продуката сагоревања узорака вршена је на наменски израђеној експерименталној инсталацији. Инсталација се састоји из калориметра за одређивање топлотне снаге и посебно дизајниране хаубе за одвођење продуката сагоревања. Предност примене уређаја који раде на принципу калориметрије је контрола критичних параметара попут топлотног флукса, масе узорака, и др. Анализа састава продуката сагоревања вршиће се применом FTIR гасног анализатора у реалном времену. Адаптирана експериментална инсталација обезбедиће нови приступ у процени и

класификацији запаљивости шумске вегетације, чији резултати могу да се користе и као улазни подаци за развој кредибилних модела за настанак и ширење шумских пожара, који се заснивају на нумеричкој динамици флуида (енгл. *Computational Fluid Dynamics - CFD*).

## **1.2. Идентификација истраживачких проблема**

У контексту све учесталијих и разорнијих шумских пожара широм света, сложеност фактора који утичу на настанак и ширење пожара захтева систематична и детаљна истраживања. Иако је евидентан рапидан раст броја студија и истраживања која се баве проблематиком шумских пожара, свеобухватним прегледом научних извора уочено је да у овој области и даље постоје значајни, нерешени истраживачки проблеми. На основу извршене анализе релевантне литературе, идентификовани су следећи кључни истраживачки недостаци, којима се ова докторска дисертација систематски бави:

- **Евидентан недостатак поузданих података о запаљивости свежег биљног материјала карактеристичног за шумске екосистеме Србије**

Иако су параметри запаљивости шумске вегетације интензивно истраживани широм света, постоји очигледан недостатак поузданих података о запаљивости свежег биљног материјала карактеристичног управо за шумске екосистеме Србије и шири регион Западног Балкана. У доступној научној литератури не постоји довољно података о истраживањима која се баве карактеристикама запаљивости и горивости шумске вегетације Србије, уз примену лабораторијских метода које обезбеђују адекватну поузданост и поновљивост резултата. Додатни проблем је што су традиционални модели и истраживања најчешће била усмерена на суву шумску стељу, потцењујући или у потпуности занемарујући запаљивост свеже вегетације. Овакав приступ проистекао је из претпоставке да висок садржај влаге спречава паљење. Међутим, екстремни пожари у последњим деценијама указују да свежа вегетација, под одређеним условима (нпр. продужене суше и излагање високим температурама), може врло брзо достићи критичне вредности садржаја влаге које омогућавају њено активно сагоревање које значајно доприноси развоју шумских пожара. Посебно треба истаћи да је недовољно истражен утицај промене садржаја влаге у терминалним крајевима грана доминантних четинарских врста на критичне параметре запаљивости. Ови делови крошње, нарочито код стабала са ниском висином основе крошње, представљају прве елементе крошње

који могу бити захваћени фронтом пламена површинског пожара. За врсте попут јеле (*Abies alba*) и смрче (*Picea abies*), које су доминантне у четинарским шумама Србије, доње гране крошње често додирују тло, чиме су нарочито подложне паљењу услед приближавања и развоја површинског шумског пожара на ободима шума. У таквим условима, терминални делови грана могу представљати потенцијалну критичну везу у вертикалном ширењу површинског пожара ка знатно интензивнијим и динамичнијим пожарима крошњи.

- **Недовољно истражен утицај извора паљења на пожарне карактеристике и састав продуката сагоревања свеже шумске вегетације**

Различити механизми иницирања паљења (пилотирано наспрот спонтаном/непилотираном) директно утичу на ефикасност сагоревања и састав продуката сагоревања, али овај аспект није довољно истражен у контексту свеже биомасе. Иако је познато да различити механизми иницирања паљења могу утицати на ток сагоревања, у литератури је недовољно испитано у којој мери присуство или одсуство иницијатора паљења условљава промене у параметрима запаљивости и саставу продуката сагоревања. Недостатак података је посебно наглашен у случају доминантних аутохтоних врста шумске вегетације у Србији, попут црног бора (*Pinus nigra*). Паралелно разматрање утицаја типа паљења, уз промену нивоа топлотног зрачења (топлотног флукса), омогућава стицање бољег увида у механизме сагоревања свеже вегетације. Ово је нарочито важно у сценаријима реалних шумских пожара, где тињање и одложено паљење имају значајну улогу у иницирању и ширењу пожара. Додатну сложеност представља интеракција између типа паљења и интензитета топлотног зрачења, јер различите вредности зрачења могу мењати праг запаљивости, брзину реакција пиролизе и количину ослобођене енергије.

- **Одсуство интегралног приступа који истовремено узима у обзир морфолошке и хемијске карактеристике шумске вегетације приликом процене њене запаљивости**

Један од значајних недостатака у области истраживања шумских пожара је одсуство интегралног приступа који истовремено узима у обзир морфолошке и хемијске карактеристике шумске вегетације приликом процене њене запаљивости. Бројна истраживања показала су значај појединачних морфолошких својстава, као што су величина листа, дебљина, однос површине и запремине, као и хемијских једињења попут

терпена, који могу знатно утицати на паљење и динамику сагоревања. Ипак, ови аспекти се ретко разматрају заједно у статистички поузданом оквиру који би јасно приказао њихов заједнички утицај на понашање параметара запаљивости. У великом броју радова, запаљивост се доводи у вези са уским спектром хемијских једињења, и то најчешће монотерпенима, без истовременог сагледавања утицаја морфолошких карактеристика, што отежава генерализацију резултата. Такође, нису познати који типови особина, било морфолошки или хемијски, имају доминантан ефекат у оквиру различитих таксономских група вегетације. Иако је познато да су четинарске врсте богатије лако испарљивим хемијским једињењима, а лиснате врсте морфолошки масивније и са већим садржајем влаге, у литератури недостаје интегрални приступ који би објединио скуп морфолошких и хемијских карактеристика и испитао њихов појединачни и заједнички утицај на параметре запаљивости. Имајући у виду све наведено, постоји очигледна потреба за систематским и обједињеним приступом који ће истовремено обухватити морфолошке и хемијске карактеристике шумске вегетације, са циљем бољег разумевања њиховог међусобног деловања и укупног утицаја на параметре запаљивости.

▪ **Недостатак стандардизованих метода за процену запаљивости шумске вегетације и значајна варијабилност у резултатима због дизајна носача узорака**

Поузданост експерименталних резултата у истраживањима запаљивости шумске вегетације у великој мери зависи од обезбеђивања добре поновљивости мерења, што представља озбиљан методолошки изазов услед хетерогене структуре узорака. Иако су у научној литератури заступљени различити типови уређаја који се користе за карактеризацију запаљивости шумске вегетације, у практичној реализацији експеримената се јављају бројна методолошка ограничења, попут начина постављања и стабилности носача узорака, који услед различитог конструктивног решења могу довести до значајне варијабилности у добијеним резултатима. У литератури се могу пронаћи иновативна решења попут модификованих, перфорираних носача узорака, кружног или квадратног попречног пресека, али недостају систематске анализе које би упоредиле различите конфигурације носача узорака под контролисаним условима, и утврдиле онај тип који обезбеђује најмању варијабилност у добијеним резултатима. Такође, још увек није довољно истражено у којој мери се ови резултати могу репродуковати у различитим лабораторијама, што је предуслов за њихову ширу примену. Због тога постоји јасна потреба за систематском проценом различитих конфигурација носача узорака, са циљем да се утврди који дизајн обезбеђује најбољу

поновљивост и најмању варијабилност у испитивању шумске вегетације, јер се само кроз такав приступ могу добити репрезентативни, поуздани и међусобно упоредиви резултати.

### 1.3. Циљеви научног истраживања

Докторска дисертација представља наставак досадашњих истраживања у циљу идентификације оних аспеката методологије за одређивање параметара запаљивости и горивости шумске вегетације који до сада нису обухваћени научном литературом.

На основу претходно утврђеног предмета истраживања и идентификованих истраживачких проблема, **општи циљ истраживања** докторске дисертације је *карактеризација параметара запаљивости и кључних физичко-хемијских процеса који детерминишу паљење и горење свеже шумске вегетације доминантних врста на територији Републике Србије.*

У складу са општим циљем, истраживање се заснивало и на неколико специфичних сегмената, дефинисаних кроз појединачне циљеве истраживања:

- Развој прилагођене експерименталне инсталације за одређивање пожарних карактеристика и састава гасовитих продуката сагоревања шумске вегетације под контролисаним лабораторијским условима;
- Анализа утицаја промене садржаја влаге терминалних крајева грана крошњи четинарских врста на параметре запаљивости;
- Анализа варијабилности у параметрима запаљивости и саставу продуката сагоревања у зависности од начина паљења шумске вегетације;
- Утврђивање међусобног односа параметара запаљивости у односу на промену топлотног флукса;
- Интегрална процена утицаја физичко-хемијских карактеристика на запаљивост свеже шумске вегетације;
- Одређивање коефицијента поузданости у примени различитих конфигурација носача узорака на калориметру за одређивање топлотне снаге при испитивању карактеристика запаљивости и горивости шумске вегетације.

Наведени појединачни циљеви истраживања су допринели остварењу општег циља, чиме је омогућено дубље разумевање настанка шумских пожара и поузданија карактеризација запаљивости свеже шумске вегетације.

## 1.4. Хипотезе истраживања

На основу дефинисаног предмета и циљева истраживања постављена је основна хипотеза: *Применом калориметра за одређивање топлотне снаге и FTIR гасног анализатора могуће је развити поуздану експерименталну инсталацију за карактеризацију параметара запаљивости шумске вегетације, чиме би се допринело развоју и стандардизацији методологије за њихово одређивање.*

Поред основне, дефинисане су и помоћне хипотезе предложеног истраживања:

- Количина садржаја влаге шумске биомасе утиче на параметре запаљивости и динамику сагоревања;
- Динамика сагоревања, параметри запаљивости и састав гасовитих продуката сагоревања зависе од извора паљења у шумским пожарима;
- Постоји зависност између физичко-хемијских карактеристика шумске вегетације и параметара запаљивости;
- Карактеризацију запаљивости шумске вегетације је могуће извршити применом специјализованих конфигурација носача узорака на уређајима који раде на принципу калориметрије.

## 1.5. Очекивани резултати истраживања

Очекивани резултати истраживања су:

- Проширење теоријских и практичних сазнања о доминантним механизмима сагоревања шумске вегетације;
- Утврђивање утицаја садржаја влаге шумске биомасе на параметре запаљивости при различитим нивоима топлотног зрачења;
- Анализа динамике сагоревања, карактеризација параметара запаљивости, квалитативно и квантитативно одређење састава гасовитих продуката сагоревања при пилотираном и спонтаном паљењу свеже шумске вегетације;
- Идентификација утицаја физичко-хемијских карактеристика шумске вегетације на параметре запаљивости;
- Одређивање варијација параметара запаљивости шумске вегетације применом различитих конфигурација носача узорака на уређајима заснованим на принципу калориметрије.

Предложено истраживање је веома важно са становишта управљања шумским пожарима, из чега произилази и његова оправданост. Израда базе података о карактеристикама запаљивости шумске вегетације омогућава боље разумевање фактора који утичу на настајање и ширење пожара у шумским подручјима. На основу ових података, могуће је развити моделе за предвиђање настанка и ширења шумских пожара, што омогућава ефикасније планирање превентивних мера и брже реаговање у случају њиховог настанка. Овакви модели могу бити од суштинског значаја за надлежне институције и ватрогасне службе у доношењу одлука о расподели ресурса и приоритетима у борби против шумских пожара, чиме се директно доприноси заштити људских живота, имовине и животне средине. Стога, истраживање о карактеристикама запаљивости шумске вегетације поред научног има и друштвени значај.

## 1.6. Примењене научне методе

Структура истраживања и методе истраживања условљене су предметом, постављеним циљевима истраживања и хипотезама.

Теоријско разматрање предмета истраживања и постављених циљева обухватило је преглед, анализу и систематизацију релевантне литературе користећи методу анализе садржаја. Овај сегмент истраживања фокусирао се на генеричку анализу карактеристика шумских пожара, састав шумске биомасе, опис доминантних механизма преноса топлоте и начина ширења шумских пожара. Посебна пажња била је посвећена прегледу кључних информација о карактеристикама примењених метода и уређаја за испитивање запаљивости шумске вегетације.

Применом аналитичко-синтетичке и хипотетичко-дедуктивне методе, постављена је теоријска основа за нова истраживања, заснована на претходној анализи доступних информација о својствима запаљивости шумске вегетације.

Прикупљање релевантних података извршено је експерименталном методом, којом је омогућено квалитативно и квантитативно одређивање параметара запаљивости, горивости и продуката сагоревања шумске вегетације, у складу са постављеним циљевима и хипотезама истраживања.

У експерименталном делу истраживања, одређивање параметара запаљивости извршено је применом калориметра за одређивање топлотне снаге (енгл. *Mass Loss Calorimeter*). Овим уређајем мерена је топлотна снага, време паљења, брзина губитка

масе, при различитим вредностима топлотног флукса. За квалитативну и квантитативну анализу садржаја продуката сагоревања коришћен је *FTIR* гасни анализатор.

За реализацију појединачних циљева креиран је план експеримента, који је обухватио комбинацију експерименталних елемената попут јединица, третмана, нивоа и фактора. Планом експеримента омогућено је прецизно мерење и ефикасно решавање истраживачких проблема на начин који је валидан и поуздан.

Узорковање је било ограничено на доминантне шумске врсте Републике Србије. Селективни избор узорака одређених врста спроведен је методом случајног узорковања, чиме су узорци представљали циљану популацију одређене врсте.

За обраду података и тестирања постављених хипотеза истраживања коришћене су методе и тестови инференцијалне и дескриптивне статистике, применом софтверског пакета *R studio*.

Добијени резултати истраживања анализирани су како би се утврдила узрочно-последична веза испитаних параметара са налазима из литературе, применом компаративне методе.

Индуктивно-дедуктивна метода примењена је за доношење општих, посебних и појединачних закључака предложеног истраживања.

## **1.7. Структура докторске дисертације**

Докторска дисертације је организована у седам поглавља која обухватају уводна разматрања, преглед литературе, опис примењених експерименталних уређаја и метода, као и приказ, анализу и дискусију добијених резултата.

У складу са реализацијом постављених циљева истраживања, поглавља 3, 4, 5 и 6 обликована су као тематске заокружене целине, при чему свака садржи теоријску основу анализираног циља истраживања, опис материјала и метода, који укључују припрему узорака, експериментални дизајн и статистичку анализу, као и приказ резултата и дискусије. За сва четири истраживања коришћена је наменски развијена експериментална инсталација, помоћу које су добијени параметри запаљивости анализираних узорака, у различитим условима испитивања. На слици 1.1. дат је шематски приказ логичке структуре и методолошки ток реализације истраживања у оквиру докторске дисертације.

Прво поглавље обухвата уводна разматрања која постављају концептуални и истраживачки оквир дисертације. У овом делу формулисани су проблем и предмет

истраживања, из којих су проистекли циљеви и хипотезе докторске дисертације, дат је опис примењених метода и истакнут научни и практични значај спроведеног истраживања.

Друго поглавље описује развој експерименталне инсталације. Најпре је дат свеобухватан преглед метода и уређаја који се користе за испитивање запаљивости шумске биомасе. Затим је приказан детаљан опис конструкције и функције главних компоненти експерименталне инсталације, која обухвата калориметар за одређивање топлотне снаге и FTIR гасни анализатор за мерење састава гасовитих продуката сагоревања.

У трећем поглављу анализиран је утицај садржаја влаге на запаљивост терминалних крајева грана крошњи доминантних четинарских врста. Приказане су промене у параметрима запаљивости у зависности од промене садржаја влаге у узорцима при различитим вредностима топлотног зрачења.

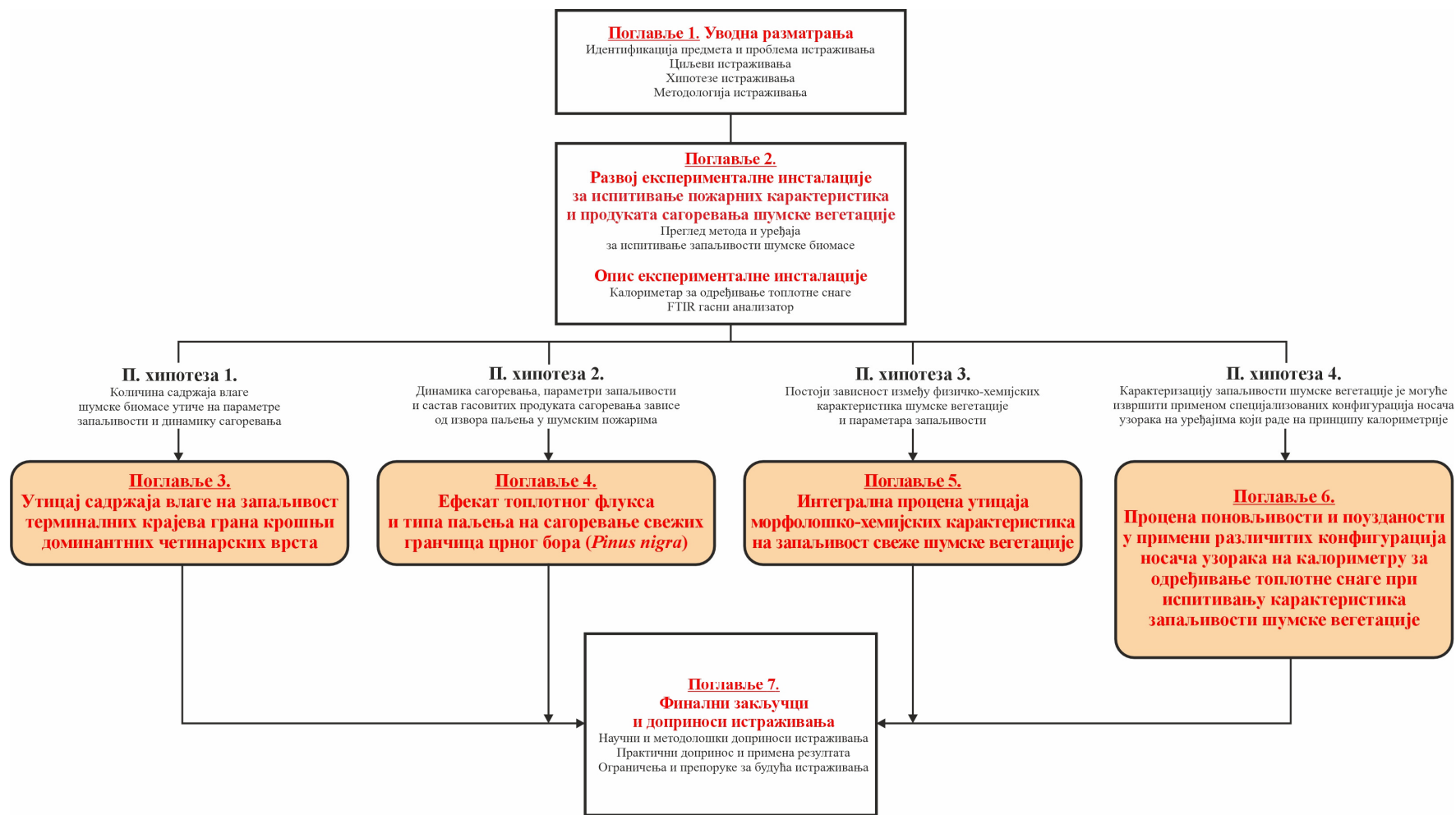
Четврто поглавље обухвата испитивање ефеката топлотног флукса и типа паљења на сагоревање свежих гранчица црног бора. Анализирана је интеракција ових фактора на параметре запаљивости и састава продуката сагоревања.

Пето поглавље даје интегралну процену утицаја морфолошких и хемијских карактеристика четинарских и широколисних врста на параметре запаљивости.

Шесто поглавље анализира поновљивост и поузданост добијених резултата параметара запаљивости шумске вегетације, у зависности од примене различитих конфигурација носача узорака на калориметру за одређивање топлотне снаге.

Последње, седмо поглавље доноси финалне закључке, научне и методолошке доприносе, практичне могућности примене резултата у моделима и просторним анализама ризика, као и препоруке за будућа истраживања.

На крају, дат је списак коришћене литературе, кратка биографија аутора дисертације и одговарајуће изјаве.



Слика 1.1. Шематски приказ структуре и методолошки ток реализације истраживања докторске дисертације

## 1.8. Објављене научне публикације у области докторске дисертације

У оквиру реализације докторске дисертације објављено је више научних радова који се баве анализом запаљивости шумске вегетације и представљају резултате спроведених експеримената. Изабране публикације обухватају оригиналне научне радове у међународним и домаћим часописима, као и радове презентоване на научним конференцијама. Поједини радови, у целини или делимично, односно у измењеној и проширеној форми, чине саставни део ове докторске дисертације. Списак објављених научних радова дат је у наставку:

1. **N. Mišić**, M. Protić, A. Cerdà, M. Raos, M. Blagojević, „Transition from Surface to Crown Fires: Effects of Moisture Content“, *Fire Technol.*, стр. 669–700, 2024, doi: 10.1007/s10694-023-01525-1.
2. M. Protić, **N. Mišić**, M. Raos, V. Tasić, D. Topalović, „Effects of Heat Flux and Ignition Type on the Combustion of Live *Pinus nigra* Branches“, *Tehnički vjesnik*, у штампи.
3. **N. Mišić**, M. Protić, M. Raos, M. Gocić, „Bench-scale Flammability Testing Of Forest Fuels: A Review Of Methods And Apparatuses“, у *20th International Conference „Man and Working Environment“ Safety Engineering & Management - Science, Industry, Education*, 2023, стр. 101–104.
4. **N. Mišić**, M. Protić, „Experimental investigation of the thermal degradation of forest litter - pine needles“, у *X International Conference Industrial Engineering and Environmental Protection*, 2020, стр. 324–329.
5. **N. Mišić**, M. Protić, „Influence of different sample holders on the flammability of pine needles in the mass loss calorimeter“, у *1st International Congress on Fire in the Earth System: Humans and Nature*, 2021, стр. 101–102.
6. **N. Mišić**, M. Protić, V. Tasić, A. Božilov, „Evaluation of gaseous emission characteristics during forest fuel combustion in mass loss calorimeter coupled with ftir apparatus“, у *The Eighth WeBIOPATR Workshop & Conference Particulate Matter: Research and Management*, 2021, стр. 78.
7. **N. Mišić**, M. Protić, M. Raos, A. Vukadinović, „A literature review of key findings in fundamental forest fire research“, *Facta Univ. Ser. Work. Living Environ. Prot.*, том 21, изд. 1, стр. 37–48, 2024, doi: <https://doi.org/10.22190/FUWLEP240213003M>.

## 2. РАЗВОЈ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНЕ ИНСТАЛАЦИЈЕ ЗА ИСПИТИВАЊЕ ПОЖАРНИХ КАРАКТЕРИСТИКА И ПРОДУКАТА САГОРЕВАЊА ШУМСКЕ ВЕГЕТАЦИЈЕ

Формирање поузданих метода за испитивање запаљивости шумске вегетације од пресудног је значаја за разумевање понашања шумских пожара. Развој и ширење пожара у шумским екосистемима условљени су сложеним међусобним дејством више фактора, попут метеоролошких, топографских и структурних особина шумске биомасе. Метеоролошки параметри као што су падавине, сунчево зрачење, температура ваздуха, влажност, брзина и правац ветра, управљају процесима преноса топлоте и масе и директно утичу на могућност паљења и брзину ширења пожара. Осим тога, ови параметри регулишу и садржај воде у шумској биомаси, који је од посебног значаја за свежи вегетативни материјал. Такође, интензитет шумских пожара може зависити и од конфигурације терена (нагиб, експозиција, надморска висина) и интеракције са другим елементима животне средине [25]. Структурне и физичко-хемијске особине шумске биомасе, попут морфологије лишћа и грана, распореда горивог материјала, садржаја воде и присуства специфичних хемијских органских једињења, представљају кључне параметре који утичу на запаљивост шумске биомасе.

Сложеност процеса сагоревања шумске вегетације, као и варијабилност морфолошких и хемијских карактеристика биљног материјала, захтевају примену пажљиво осмишљених метода и поузданих експерименталних уређаја који омогућавају тачно одређивање релевантних параметара запаљивости. Системску анализу коју су спровели *Celebrezze* и сарадници, обухватила је 134 рада о запаљивости шумске вегетације, при чему су истакли велико разилажење у коришћеним методама и уређајима, чиме је указано на недостатак стандардизације метода при одређивању карактеристика запаљивости шумске вегетације [26].

Савремена истраживања указују на потребу за новим методолошким приступима који не само да омогућавају контролу над критичним факторима као што су топлотни флуks, влажност узорака, тип и извор паљења, већ и да обезбеђују висок степен поновљивости и упоредивости добијених резултата у испитивањима карактеристика запаљивости различитих вегетативних врста.

У том контексту, развој прилагођене експерименталне инсталације представља основу за реализацију више сегмената овог истраживања, која укључују процену утицаја

садржаја влаге, анализу ефеката различитих типова паљења на параметре запаљивости и састава продуката сагоревања, до испитивања запаљивости у зависности од морфолошко-хемијских карактеристика анализираних врста.

У овом поглављу, прво је приказан систематизован преглед метода и уређаја који се користе у испитивању запаљивости шумске вегетације, са посебним освртом на њихову применљивост, предност и ограничења. Такав преглед представљао је основу за развој и дизајн јединствене, прилагођене експерименталне инсталације, чија је намена да омогући карактеризацију запаљивости шумске вегетације у контролисаним лабораторијским условима. Даље, у наставку поглавља, дат је детаљан опис техничких и функционалних карактеристика развијене инсталације, компонената које је чине, као и принципа мерења и прикупљања података. Оваква интеграција литературног прегледа и практичне примене представља методолошки и технолошки допринос ове докторске дисертације.

## **2.1. Преглед метода и уређаја за испитивање запаљивости шумске биомасе**

Разумевање динамике развоја шумских пожара тесно је повезано са основним физичким процесима, попут сагоревања и преноса топлоте, као и са типовима и особинама вегетативног материјала који се јављају у различитим структурним слојевима. Имајући у виду да запаљивост шумске вегетације зависи од сложене интеракције морфолошких, хемијских и просторних карактеристика, методе испитивања морају бити пажљиво прилагођене овим карактеристикама, како би резултати били валидни и репрезентативни.

Одређивање карактеристика запаљивости шумске вегетације врши се првенствено ради квантификације података о одређеним физичким процесима који се јављају током сагоревања, попут времена паљења, брзине сагоревања, топлотне снаге, брзине губитка масе, и других релевантних параметара. Подаци о овим параметрима могу се генерисати коришћењем експерименталних уређаја различитих скала, у зависности од обима и циља истраживања. С обзиром на високе трошкове и сложеност спровођења теренских истраживања и експеримената у пуној размери, експерименти мањих размера служе као добра полазна тачка за добијање квалитативно значајних података, који су карактеристични за пожаре у природним условима. Тако добијени

подаци су од великог значаја за развој и валидацију математичких модела који се користе за предвиђање понашања пожара у различитим условима.

Иако експерименти мањих размера не могу у потпуности симулирати све факторе у реалним условима, њихово директно поређење са теренским пожарима изискује пажљиво разматрање димензионалног скалирања [27]. Димензионална анализа показује да потпуно скалирање није могуће због сложене интеракције физичких, биолошких и атмосферских фактора, док парцијално скалирање омогућава добијање вредних и применљивих резултата у разумевању процеса понашања пожара [27].

Лабораторијски експерименти мањих размера првенствено се користе за одређивање запаљивости појединих делова шумске вегетације, као што су листови, иглице и делови грана. Ови експерименти доприносе бољем разумевању односа између потрошње гориве материје и процеса сагоревања. То је кључно јер су ови процеси зависни од преноса топлоте, ширења пламена и термичке деградације током сагоревања. Посебно су корисни за идентификацију утицаја појединачних морфолошких и хемијских карактеристика на различите параметре запаљивости. Са друге стране, експерименти већих размера се користе за испитивање запаљивости целих биљака и биљних заједница. Иако овакви експерименти омогућавају реалнији приказ понашања вегетације у условима шумских пожара, њихова примена у пракси је често ограничена због високе варијабилности међу узорцима (облик, структура, старост, садржај воде). Такође, ови експерименти захтевају сложенију опрему, већи простор, логистику и значајне финансијске ресурсе [24].

С обзиром на то да је немогуће измерити целокупну популацију једне шумске заједнице, неопходно је формирати одговарајући (репрезентативни) узорак који узима у обзир просторне обрасце и време узорковања. Да би се добили тачни подаци, технике мерења и опрема морају испунити два услова: прецизност и тачност. Прецизност се односи на поновљивост мерења, док се тачност односи на то колико скупови мерења одговарају стварној вредности. Квалитет и применљивост експерименталних резултата зависе од добро осмишљеног експерименталног плана, који подразумева пажљиво контролисано окружење и улазне променљиве, дефинисане параметре мерења и адекватан број понављања. У том смислу, лабораторијски експерименти мањих размера омогућавају бољу контролу експерименталних услова, за разлику од теренских и експерименталних већих размера.

Да би се разумеле постојеће методологије и експерименталне поставке за истраживање запаљивости шумске вегетације, неопходна је опсежна анализа и преглед

расположиве литературе која обухвата специфичне експерименталне конфигурације, параметре мерења и добијене резултате. Ово је од посебне важности у контексту правилне интерпретације експерименталних налаза и упоређивања различитих истраживања.

У наставку су приказани резултати систематске анализе 14 различитих експерименталних конфигурација, са циљем идентификације могућих параметара који се могу мерити сваком од њих (Табела 2.1).

**Табела 2.1.** Преглед експерименталних конфигурација и њихових излазних параметара за карактеризацију запаљивости шумске вегетације

	Експерименталне конфигурације													
	Конусни калориметар	Калориметар за одређивање топлотне снаге (енгл. <i>Mass Loss Calorimeter</i> )	Уређај за испитивање ширења и развоја пожара (енгл. <i>Fire Propagation Apparatus</i> )	Калориметар за сагоревање узорака у пуној величини	Епиррадиатор	Нискотехнолошки уређај <sup>1</sup>	Пећ за жарење <sup>2</sup>	Калориметар са кисеоничном бомбом <sup>3</sup>	Челични прстен (енгл. <i>Steel Ring</i> ) <sup>4</sup>	FIST ваздушни тунел	Лабораторијска платформа за испитивање пожара (енгл. <i>Fire Bench</i> )	Термограметријски анализатор	Апаратура за испитивање запаљивости (енгл. <i>Ignitability Apparatus</i> )	Статички калориметар са комором (енгл. <i>Static Bomb Calorimeter</i> )
Топлотна снага	X	X	X	X										X
Укупна ослобођена топлота	X	X	X	X										
Време паљења	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X		
Ефективна топлотна моћ	X	X	X	X										
Брзина губитка масе	X	X	X	X			X			X	X			
Време сагоревања						X					X			
Дужина сагоревања						X								
Процент сагореле биомасе						X								
Дужина пламена					X									
Висина пламена					X						X			
Дубина пламена														
Трајање/време пламена	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
Брзина ширења пламена									X	X	X			
Температура						X	X		X	X	X			
Бруто енергетски садржај								X						
Топлотна моћ								X						
Виша топлотна вредност														X
Нижа топлотна вредност														X
Просечна температура пламена											X			
Садржај пепела												X		

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

<sup>1</sup> Импровизована платформа направљена од металног бурета пресеченог по дужини, са постављеном металном решетком и термопаровима за мерење температуре.

<sup>2</sup> Пећ за жарење – лабораторијски уређај за термичку обраду узорака у затвореном простору при високим температурама. Тестирање се спроводи са отвореним вратима како би се омогућило праћење процеса горења.

<sup>3</sup> Калориметар са кисеоничном бомбом – калориметријски уређај затвореног типа који омогућава мерење бруто топлотне вредности узорака сагоревањем у атмосфери чистог кисеоника.

<sup>4</sup> Челични прстен – једноставна експериментална поставка за испитивање запаљивости површинског слоја шумске вегетације, у којој се прати развој пожара у ограниченом металном оквиру.

Истраживања која користе ваздушне тунеле за усмеравање струје ваздуха ка узорцима шумске вегетације често примењују инфрацрвене панеле за иницирање паљења. Овакве студије омогућавају квантитативну анализу утицаја конвективног преноса топлоте на процес сагоревања [28].

Прегледом литературе може се издвојити неколико аутора који су конструисали прилагођену експерименталну апаратуру за одређивање карактеристика запаљивости шумске вегетације [29]–[32]. Основа ових експерименталних инсталација је равна површина, где су као извор паљења коришћене различите запаљене честице, епирадииатори и памучни фитиљи натопљени етанолом или ксиленом. Њихови резултати дају процену физичких карактеристика пламена, као што је дужина, висина, дубина, и трајање пламена.

*Jaureguiberry* и сарадници представили су једноставан уређај за мерење запаљивости целих биљака у теренским условима. Овај уређај и методологија мерења имају потенцијал за брзо и ефикасно прикупљање података о запаљивости великог броја врста директно на терену [33].

Напреднија мерења укључују одређивање брзине губитка масе, употребу термопарова за мерење температуре и примену инфрацрвених камера за снимање промене температурне струје врелих гасова изнад узорка. Тако, *Parsons* и сарадници наглашавају значај анализе односа између специфичних особина листова различитих врста и њихове запаљивости на основу експерименталних резултата које укључују температуру, висину и време трајања пламена и губитак масе [34].

За мерење параметара запаљивости коришћене су и пећи за жарење. *Grootemaat* и сарадници су користили ову методу како би истражили везу између особина листова (специфична површина, садржај влаге, сува маса и хемијски састав листа) и параметара запаљивости (време паљења, трајање пламена и тињања) [35].

С обзиром да велики број стандардизованих метода за испитивање запаљивости није првобитно развијена за шумску вегетацију, већ за грађевинске и индустријске материјале, њихова примена или адаптација у овим истраживањима постаје све чешћа. То је могуће због чињенице да ове методе обезбеђују високу поновљивост, висок степен контроле експерименталних услова и могућност квантификације параметара запаљивости.

У наставку је дат преглед експерименталних уређаја који подржавају стандардизоване протоколе за одређивање својстава запаљивости и сагоревања

материјала, а који се у одговарајућим условима могу применити и за испитивање запаљивости шумске вегетације:

- Калориметар са кисеоничном бомбом (енгл. *Bomb Calorimeter*)
  - ASTM D 5865 – Стандардна метода испитивања за бруто калоријску вредност угља и кокса;
  - ISO 1716 - Испитивања реакције на пожар за производе - Одређивање бруто топлоте сагоревања (калоријске вредности)
- Апаратура за одређивање запаљивости (енгл. *Ignitability Apparatus*)
  - ISO 5657 - Испитивање реакције на пожар – одређивање запаљивости грађевинских производа коришћењем зрачења као извора топлоте
- Калориметар за одређивање топлотне снаге (енгл. *Mass Loss Calorimeter*)
  - ASTM E 2102 – Стандардна метода испитивања за мерење губитка масе и запаљивости у сврху праћења, коришћењем конусног грејача
- Калориметар за мерење утрошка кисеоника у гасовитим продуктима сагоревања (енгл. *Oxygen Consumption Calorimeter*)
  - ASTM E 1354 - Стандардна метода испитивања за одређивање топлотне снаге и видљивих продуката за материјале и производе
- Конусни калориметар (енгл. *Cone Calorimeter*)
  - ISO 5660 - Стандардна метода испитивања реакције на пожар – топлотна снага, развој дима и брзина губитка масе
- Калориметар за сагоревање узорака у пуној размери (енгл. *Large Scale Calorimeter; Full-scale Calorimeter*)
  - ASTM E 2067 – Стандардна процедура за испитивање пожара у пуној размери методом калориметрије на бази утрошка кисеоника
- Калориметар за испитивање пожара у просторији (енгл. *Room/corner test calorimeter*)
  - ASTM E 1822 - Стандардна метода испитивања отпорности на пожар наслаганих столица (енгл. *Test method for fire testing of stacked chairs*);
  - ASTM E 2257 - Стандардна метода испитивања пожара у просторији за материјале и склопове зидова и таваница;
  - ISO 9705 Испитивање реакције на пожар – Испитивање производа за облагање зидова и таваница излагањем дејству пожара у углу.
- Микро калориметар (енгл. *Micro Calorimeter*)

- ASTM D 7309 Стандардна метода испитивања за одређивање карактеристика запаљивости пластичних и других чврстих материјала применом калориметра за сагоревање узорака на микро нивоу.

Реалне вредности параметара запаљивости могу се добити применом стандардизованих метода заснованих на принципима калориметрије, попут конусног калориметра (енгл. *Cone Calorimeter - CC*), уређаја за испитивање ширења и развоја пожара (енгл. *Fire Propagation Apparatus – FPA*) и калориметра за одређивање топлотне снаге (енгл. *Mass Loss Calorimeter - MLC*), који омогућавају испитивања у условима непотпуног сагоревања, ближим реалним сценаријима шумских пожара [24]. Кључна карактеристика ових уређаја је могућност мерења топлотне снаге (енгл. *Heat Release Rate – HRR*), која представља један од најважнијих параметара у процени опасности од пожара [36]. Додатно, ови уређаји су широко примењивани у истраживањима шумских пожара, посебно када је фокус на квантификацији топлотне енергије која се ослобађа током процеса сагоревања.

Једна од значајних предности калориметријских уређаја мањих размера је могућност прецизног одређивања запаљивости узорака при фиксним вредностима топлотног флукса. У случајевима када се прати време паљења узорака изложених директном дејству пламена, овај параметар се најчешће доводи у везу са температуром паљења, чија вредност може бити изразито променљива и зависи од услова испитивања и примењене методологије. Тако на пример, температура паљења дрвета може варирати у распону од 296 до 497 °С, што значајно отежава поређење резултата различитих студија [37]. Насупрот томе, испитивања у условима фиксног топлотног флукса омогућавају већу контролу експерименталних услова, бољу поновљивост и поузданију процену параметара запаљивости.

Додатна практична вредност ових уређаја је и могућност одређивања критичног топлотног флукса, који представља минималну количину енергије по јединици површине која је неопходна да би горива материја достигла температуру паљења. Овај параметар има посебан значај у симулацији услова шумских пожара, где паљење настаје као резултат равнотеже између топлоте примљене из околине и губитка путем зрачења и конвекције [38].

У последњој деценији, више аутора је истраживало могућности прилагођавања калориметријских уређаја специфичностима шумске вегетације, кроз модификацију носача узорака и промене у експерименталној поставци. Овакве адаптације омогућиле су прецизнију процену параметара запаљивости, посебно у погледу утицаја струјања

ваздуха, структуре и састава узорака [39]–[42]. Недавно су развијени и приступи који симулирају реално услове шумских пожара, излагањем узорака директном пламену у контролисаним условима на калориметријским уређајима мањих размера [43].

И поред значајног напретка у развоју експерименталних уређаја и методологија, испитивање запаљивости шумске вегетације и даље представља сложен изазов због њене велике варијабилности и специфичности термичких процеса који се јављају у току пожара. Калориметријски уређаји мањих размера издвајају се као најпоузданији инструменти за квантитативну процену основних параметара запаљивости, којима се успешно може извршити описивање све четири компоненте запаљивости шумске вегетације [44], [45]. Запаљивост се може квантификовати кроз параметар време паљења (енгл. *Time to Ignition – TTI*), сагоривост преко параметра топлотне снаге (енгл. *Heat Release Rate – HRR*), одрживост сагоревања се може проценити на основу укупно ослобођене топлоте (енгл. *Total Heat Released – THR*) и потрошивост се може одредити мерењем преостале масе након сагоревања, односно смањењем масеног удела укупне биомасе. Њихова предност огледа се у могућности контроле критичних експерименталних услова, високе поновљивости мерења и применљивости резултата за израду предиктивних модела развоја шумских пожара. Иако још увек не постоји јединствена стандардизована методологија за одређивање карактеристика запаљивости шумске вегетације, примена ових уређаја представља важан корак ка унапређењу у овој области.

## 2.2. Опис експерименталне инсталације

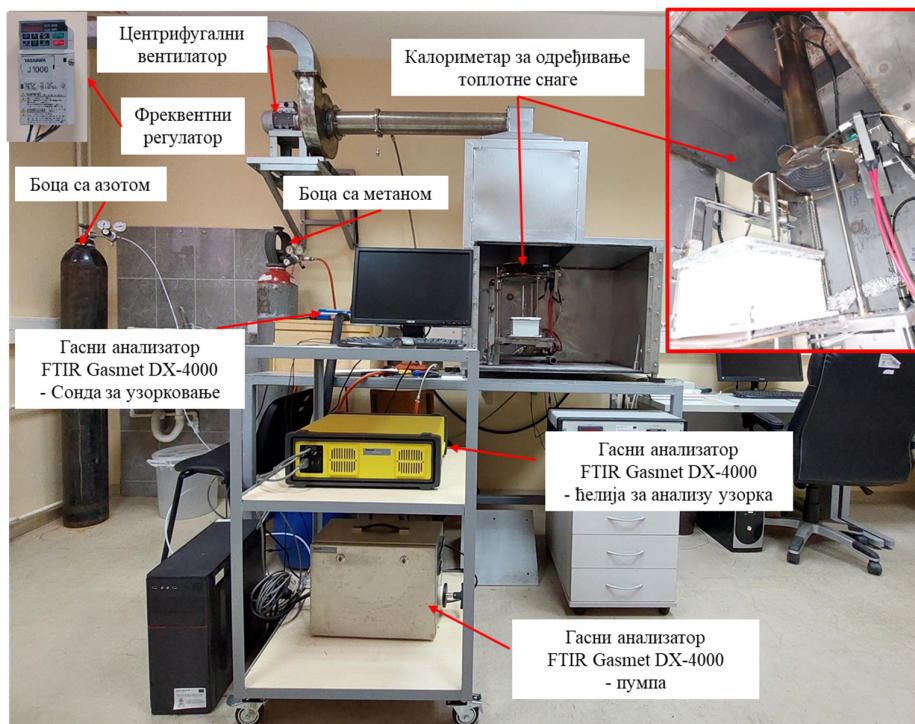
Полазећи од потребе за унапређењем постојећих методолошких решења и узимајући у обзир ограничења доступних уређаја, у наставку је приказан опис развијене експерименталне инсталације која обједињује мерење параметара запаљивости и анализу продуката сагоревања у реалном времену.

Централна компонента експерименталне инсталације представља калориметар за мерење губитка масе (енгл. *Mass Loss Calorimeter, Fire Testing Technology (FTT), Велика Британија*). Уређај је израђен у складу са ISO 17554:2014 [46]. Ова база јединица, стандардизована за прецизно мерење промене масе узорка током његове термичке деградације и сагоревања надограђена је придодавањем димњака са интегрисаним термопаровима директно на врх конусног грејача. На тај начин је калориметар за мерење масе трансформисан у калориметар за одређивање топлотне снаге (енгл. *Mass Loss*

Calorimeter) који се након адекватне калибрације са метанским горионом може користити за одређивање параметара запаљивости, горивости и топлотне снаге различитих узорака.

Модел и конфигурација конусног грејача у калориметру за одређивање топлотне снаге (*MLC*) идентичан је са грејачем који се користи и код конусног калориметра (*CC*), који је *de facto* стандардни уређај за одређивање топлотне снаге, чиме се обезбеђује упоредивост резултата ових уређаја [47]. *Hasburgh* и сарадници извршили су упоредна мерења топлотне снаге дрвених материјала коришћењем калориметра за мерење топлотне снаге и конусног калориметра. Резултати су показали висок степен слагања између ова два уређаја, због чега аутори предлажу да калориметар за мерење топлотне снаге представља економичну алтернативу конусном калориметру [48].

Полазећи од овог концепта, а са циљем додатног проширивања опсега мерних могућности, у Лабораторији за заштиту од пожара Факултета заштите на раду Универзитета у Нишу, дизајнирана је и успешно реализована експериментална инсталација добијена спрезањем калориметра за одређивање топлотне снаге *MLC* и *FTIR* гасног анализатора, *GASMET DX-4000 (Gasmel, Финска)* (Слика 2.1). Интеграцијом поменутих уређаја постигнуто је да се симултано са одређивањем параметара запаљивости и горивости одвија и прецизна анализа продуката сагоревања који настају током специфичних фаза термичког разлагања и пламеног сагоревања испитиваних узорака у реалном времену. Ова експериментална инсталација коришћена је за реализацију свих експеримената у оквиру докторске дисертације. Добијени резултати анализирани су у складу са постављеним истраживачким циљевима, у оквиру појединачних тематских целина.



Слика 2.1. Приказ експерименталне инсталације у Лабораторији за заштиту од пожара на Факултету заштите на раду у Нишу

### 2.2.1. Калориметар за одређивање топлотне снаге

Топлотна снага, као кључни параметар у процени опасности од пожара, по стандарду се мери посредно, одређивањем смањења концентрације кисеоника у продуктима сагоревања (енгл. *Oxygen depletion principle*). Уређаји за мерење концентрације кисеоника, посебно они засновани на парамагнетном принципу, имају данас високу прецизност и низак детекциони лимит, што омогућава детекцију суптилних промена у концентрацији кисеоника, неопходних за прецизно одређивање топлотне снаге. Алтернативу представљају уређаји који топлотну снагу одређују на основу директно измерене температуре продукта сагоревања путем термопарове, попут оних који су интегрисани у калориметре за одређивање топлотне снаге.

Калориметар за одређивање топлотне снаге опремљен је системом за мерење температуре који се састоји од четири термопара, постављена на врху димњака директно повезаног са конусним грејачем. Током трајања експеримента термопарови мере температуру продукта сагоревања. Измерена температура се у уређају преводи у топлотну снагу након претходне калибрације уређаја са метанским гориоником.

Калориметар за одређивање топлотне снаге одликује се низом предности које га чине поузданим и ефикасним инструментом. Поседује високу тачност, прецизност,

поновљивост и репродуктивност мерења. Његова примена је олакшана једноставном калибрацијом и припремом узорака. Уређај омогућава испитивање узорака већих димензија (до 100 mm × 100 mm) и променљиве дебљине (до 50 mm), што га чини флексибилним за различите експерименталне сценарије. Добијени резултати се могу релативно лако анализирани и интерпретирани захваљујући структурираном излазу података.

Кључна предност уређаја је његова робусност, која се огледа у једноставности припреме и извођења тестова, контролисаном иницирању паљења путем електричне варнице, као и интегрисаном систему за мерење губитка масе узорка. Као и код конусног калориметра, уређај користи конусни електрични грејач што омогућава симулацију различитих сценарија пожара.

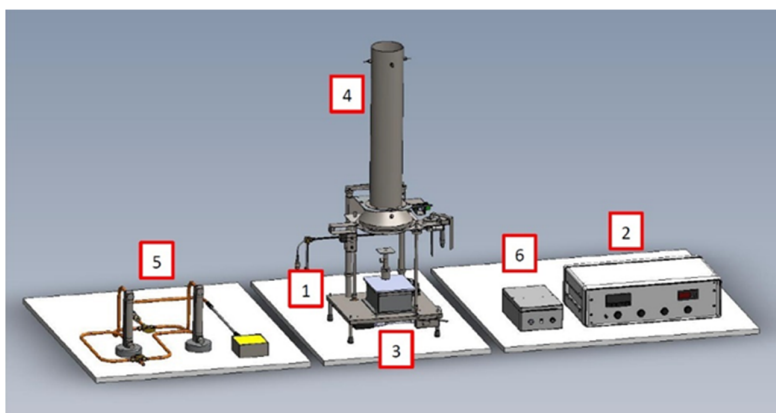
Овај тип калориметра омогућава мерење следећих параметара запаљивости: топлотну снагу (енгл. *Heat Release Rate – HRR*), време паљења узорка (*Time to Ignition – TTI*), брзину губитка масе узорка (*Mass Loss Rate – MLR*), укупну ослобођену топлоту (*Total Heat Release – THR*) и ефективну топлотну моћ (*Effective Heat of Combustion – EHC*).

#### **2.2.1.1. Конфигурација калориметра за одређивање топлотне снаге**

Калориметар за одређивање топлотне снаге састоји се из следећих компоненти:

1. Модула за симулацију пожара, који укључује конусни грејач, поклопац грејача, варнични упаљач и три термопара за контролу грејача;
2. Контролну јединицу;
3. Вагу за мерење губитка масе;
4. Димњак са термопаровима за мерење температуре гасовитих продуката сагоревања;
5. Калибрациони горионик и мерач протока гаса;
6. Кондиционер сигнала и аквизициони модул.

Саставни елементи уређаја приказани су на слици 2.2.

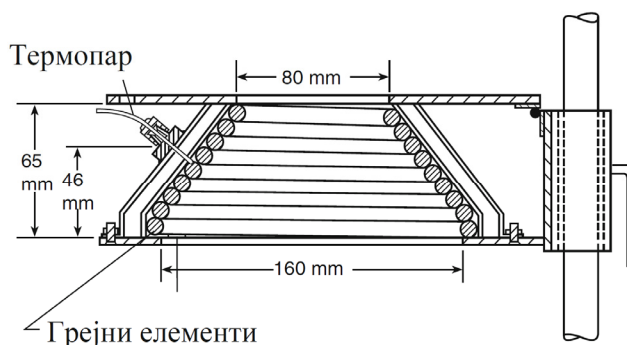


Слика 2.2. Компоненте калориметра за одређивање топлотне снаге [49]

- **Конусни грејач**

Дизајн конусног грејача преузет је из конусног калориметра у складу са ISO 5660 стандардом [50]. Овакво конструктивно решење ефикасно спречава локализовано прегревање у централном делу узорка и обезбеђује да пламен не дође у контакт са грејном спиралом. Шематски приказ конусног грејача дат је на слици 2.3.

Конусни грејач је изведен на тај начин да може достићи веома високе нивое зрачења, минимизирати утицај конвективног загревања и одржавати равномерну расподелу зрачења преко целе површине узорка. Грејачем је могуће реализовати топлотне флуксе у опсегу од 10 до 100 kW/m<sup>2</sup> што одговара различитим пожарним сценаријима пре флеш-овера.



Слика 2.3. Попречни пресек конусног грејача [50]

- **Вага за мерење губитка масе**

Вага за мерење губитка масе региструје промене у маси узорка у реалном времену током експеримента. Сви подаци се бележе помоћу *MLCCalc* софтвера, а промене у губитку масе приказују се и на контролној јединици уређаја. Њен максимални капацитет

оптерећења износи 500 g, са прецизношћу од 0,1 g и реагује на промену масе тако да за мање од 3 секунде региструје 90% коначне вредности.

- **Припрема узорака**

Стандардни носач узорака омогућава прецизно постављање узорака хомогене структуре. Међутим, припрема узорака шумске вегетације за тестирање запаљивости представља специфичан изазов, услед природе материјала и потребе за што вернијом репликацијом услова којима су узорци изложени током шумских пожара. Порозност, густина и просторни распоред шумске вегетације, утичу на механизме простирања топлоте и сагоревања, па је самим тим неопходно користити наменски израђене носаче узорака, како би експерименти одговарали стварним условима за време шумских пожара. На тај начин се могу добити валидни резултати о понашању вегетације у различитим сценаријима шумских пожара. Различите конфигурације носача узорака коришћене у овој дисертацији детаљно су описане у Поглављу 6.

- **Варнични упаљач**

Варнични упаљач служи као контролисани извор паљења, који омогућава иницирање пламеног сагоревања у тренутку када концентрације волатила у зони изнад узорка достигну доњу границу запаљивости. Упаљач се постаља на висини од 13 mm изнад центра површине узорка. Испитивања запаљивости и калориметријска тестирања могу се спроводити са или без примене варничног упаљача, односно кроз пилотирано или непилотирано паљење.

- **Калибрација**

Калориметар за одређивање топлотне снаге се подешава кроз три различите калибрације.

Прво, потребно је извршити калибрацију конусног грејача. Циљ ове калибрације је успостављање корелације између температуре грејача и топлотног флукса који он генерише. Овај процес се спроводи коришћењем *Schmidt-Boelter* флуксметра са воденим млаћењем. Температуре конусног грејача за одређене вредности топлотних флуксева, приказане су у табели 2.2. Такође, у истој табели упоредно су приказане и вредности температуре грејача конусног калориметра, добијене у експериментима Бабраускаса [51]. Вредности температуре грејача приказане су за експерименталне услове у којима је

проток продуката сагоревања у одводном каналу износио 3,4 m/s, а проток ваздуха испод конусног грејача  $0,1 \pm 0,02$  m/s.

**Табела 2.2.** Упоредни приказ температура конусног грејача за одређене вредности топлотних флукса

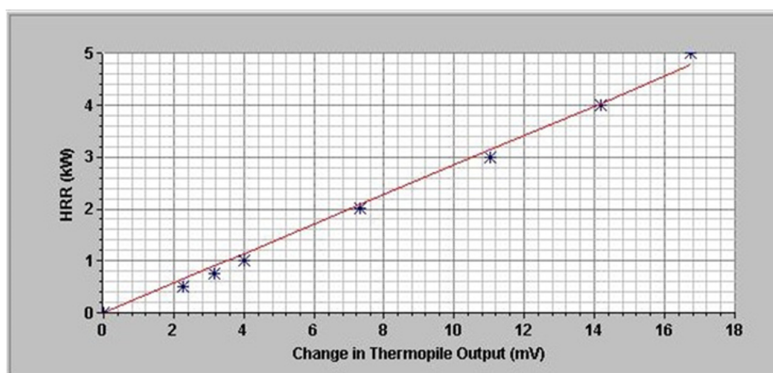
Топлотни флукс [kW/m <sup>2</sup> ]	Температура грејача на уређају у оквиру Лабораторије за заштиту од пожара [°C]	Температура грејача на конусном калориметру [51] [°C]
10	416	422
20	557	547
25	609	592
30	649	628
40	720	689
50	778	744
60	835	783
70	883	825

Друга калибрација односи се на термопарове, који се калибришу коришћењем метанског горионика. Калибрација термопарова изводи се за топлотне снаге од 0,5 kW, 0,75 kW, 1 kW, 2 kW, 3 kW, 4 kW и 5 kW. Наведене вредности топлотних снага постигнуте су адекватним подешавањем протока метана (чистоће 99,5%) на горионику.

**Табела 2.3.** Проток метана потребан за калибрацију термопарова

Топлотна снага [kW]	Проток метана [l/min]
0,5	0,83
0,75	1,26
1	1,68
2	3,35
3	5,03
4	6,7
5	8,38

Циљ ове калибрације је успостављање корелације између измерене температуре на термопаровима и тренутне топлотне снаге горионика. На слици 2.4 приказан је графикон који илуструје процес калибрације термопарова за топлотни флукс од 50 kW/m<sup>2</sup>.



Слика 2.4. Пример криве калибрације термопарова за топлотни флуks од 50 kW/m<sup>2</sup>

Поред ове калибрације, пре почетка рада са уређајем, неопходно је проверити топлотну снагу на 3 kW, што се такође спроводи метанским гориоником, са унапред дефинисаним протоком гаса.

Како би се губитак масе прецизно пратио и измерио, важно је извршити и калибрацију ваге пре коришћења уређаја. Ова калибрација се спроводи у складу са очекиваном масом узорка, чиме се побољшава тачност мерења.

### 2.2.2. Узорковање и мерење састава продуката сагоревања

Кључни аспект у процени токсичних опасности током пожара подразумева идентификацију различитих хемијских врста, њихових концентрација као и честица које се јављају у продуктима сагоревања. Због често екстремних услова који владају током пожара, неопходна је примена специјализованих метода узорковања и анализе како би се обезбедили поуздани и релевантни резултати [52].

GASMET DX-4000 је гасни анализатор, специјално дизајниран за мерење концентрација различитих гасова и пара, из емисионих и имисионих извора. Његов принцип рада заснован је на коришћењу инфрацрвене спектроскопије са Фуријеовом трансформацијом (енгл. *Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy*) за одређивање квантитативног и квалитативног садржаја гасова и пара. DX-4000 гасни анализатор се најчешће користи у праћењу емисионих гасова из димњака, контроли катализаторских процеса, као и у другим апликацијама које захтевају прецизан мониторинг различитих гасова у реалном времену, при високим температурама и влажности.

Гасни анализатор GASMET DX-4000 обухвата следеће компоненте:

- анализатор гасова GASMET DX-4000;
- преносни систем за узорковање гасова GASMET - Portable Sampling System;

- преносну сонду за узорковање гасова PSP4000-Н и
- линију за узорковање.

За узорковање продуката сагоревања из система за екстракцију током процеса сагоревања у калориметру за одређивање топлотне снаге, коришћена је сонда за узорковање, дизајнирана у складу са стандардом ISO/TS 21397 (Слика 2.5) [53].



Слика 2.5. Изглед сонде за узорковање продуката сагоревања, израђена у складу са стандардом ISO/TS 21397

Гасни анализатор GASMET DX-4000 опремљен је библиотеком од 16 гасова који се могу континуирано мерити: водена пара ( $H_2O$ ), угљен-диоксид ( $CO_2$ ), угљен-моноксид ( $CO$ ), азот-оксид ( $N_2O$ ), азот-моноксид ( $NO$ ), азот-диоксид ( $NO_2$ ), сумпор-диоксид ( $SO_2$ ), амонијак ( $NH_3$ ), водоник-хлорид ( $HCl$ ), водоник-флуорид ( $HF$ ), метан ( $CH_4$ ), етан ( $C_2H_6$ ), етилен ( $C_2H_4$ ), пропан ( $C_3H_8$ ), n-хексан ( $C_6H_{14}$ ) и формалдехид ( $CHOH$ ).

Према препорукама произвођача, GASMET гасни анализатори не захтевају додатне калибрације или корекције након почетне фабричке калибрације. За одржавање тачности мерења довољно је пре сваке употребе мерење референтног спектра користећи гас високе чистоће, попут азота ( $N_2$ ).

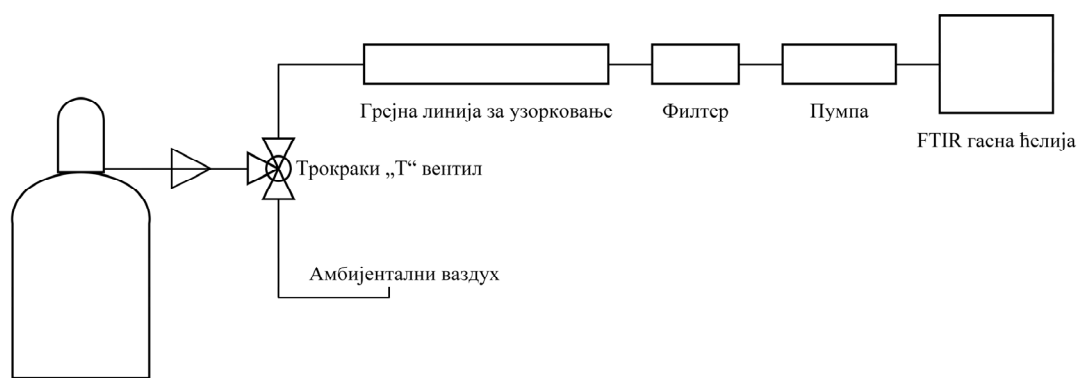
Интервал узорковања гаса може се конфигурисати, али због техничких ограничења инструмента, минимални теоријски интервал износи 3 секунде. Узорковани гас се транспортује до FTIR ћелије кроз грејну PTFE линију, која се одржавана на температури од  $180\text{ }^{\circ}C$ , чиме се спречава кондензовање водене паре из узоркованог гаса у систему.

С обзиром да калориметар за одређивање топлотне снаге и гасни анализатор раде независно, неопходно је ускладити временске токове података за оба уређаја. Ова усклађивања је потребно извршити како би се осигурала тачна интерпретација резултата за исти временски оквир.

### 2.2.2.1. Одређивање времена одзива FTIR система за узорковање продуката сагоревања

Одређивање времена одзива FTIR система за узорковање продуката сагоревања је спроведено према смерницама дефинисаним ISO 19702 стандардом, Анекса D [54].

У ту сврху, може се користити боца под притиском, која садржи било који гас који апсорбује инфрацрвено зрачење у азоту. За потребе ове дисертације коришћен је угљен моноксид, калибрисане концентрације од 10 ppm. Шематски приказ инсталације за одређивање времена одзива приказан је на слици 2.6 док је опис поступка дат у наставку.



Боца са аналитичким гасом

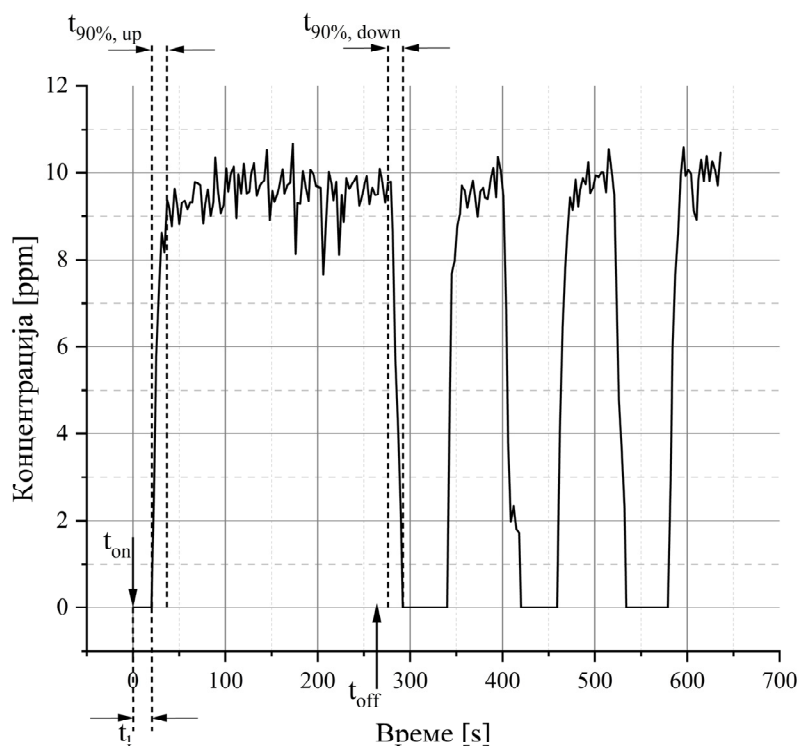
Слика 2.6. Шематски приказ инсталације за одређивање времена одзива

Након температурне стабилизације FTIR гасног анализатора и система за узорковање иницира се снимање спектра. Када се успостави стабилна базна линија, у систем се уводи анализирани гас променом положаја трокраког „Т“ вентила са амбијенталног ваздуха на гас из боце. У том тренутку бележи се време увођења гаса у систем ( $t_{on}$ ). Након што се постигне стабилна (устаљена) концентрација гаса, вентил се враћа у положај за амбијентални ваздух, чиме концентрација анализираног гаса почиње да опада, све до успостављања поновне базне линије. Време у тренутку престанка увођења гаса означава се као  $t_{off}$ .

Поред тога одређе се и време раста до 90% устаљене концентрације ( $t_{90\%, up}$ ), као и време пада концентрације до 90% вредности испод устаљене концентрације ( $t_{90\%, down}$ ), тј. стабилног платоа (енгл. *plateau*). Време раста ( $t_{90\%, up}$ ) представља интервал од почетка раста концентрације до тренутка када она достигне 90% стабилне вредности. Време пада ( $t_{90\%, down}$ ) је интервал од почетка опадања концентрације до тренутка када она опадне за

90% у односу на вредност устаљене концентрације (стабилног платоа). Према стандарду ISO 19702, ова два времена морају бити приближно једнака, јер одступање указује на неисправну калибрацију анализатора у посматраном концентрационом опсегу, што може довести до погрешне процене времена одзива. У оквиру овог истраживања, добијене вредности времена  $t_{90\%, up}$  и  $t_{90\%, down}$  биле су уједначене, са просечним трајањем од  $\approx 8 \pm 0,3$  s.

На слици 2.7 приказане су промене концентрације гаса у току времена, где су јасно обележени моменти раста, стабилизације и пада концентрације.



Слика 2.7. Промена концентрација угљен монооксида у функцији времена за одређивање одзива гасног анализатора

Време одзива мерног система представља збир времена кашњења ( $t_i$ ) и времена потребног да концентрација достигне 90% своје стабилне вредности. Време кашњења је интервал између тренутка када се анализирани гас уводи у систем и првог уочљивог пораста концентрације.

Формула за израчунавање времена одзива гласи:

$$t_r = t_i + t_{90\%up}$$

На основу измерених вредности ова два параметра, утврђено је да укупно време одзива износи 14 s.

### 3. УТИЦАЈ САДРЖАЈА ВЛАГЕ НА ЗАПАЉИВОСТ ТЕРМИНАЛНИХ КРАЈЕВА ГРАНА КРОШЊИ ДОМИНАНТНИХ ЧЕТИНАРСКИХ ВРСТА

#### 3.1. Општи део

Све актуелнији проблеми са шумским пожарима подстакли су обимна и продуктивна међународна истраживања. Међутим, већи део тих истраживања усмерен је на површинске шумске пожаре, са посебним нагласком на суву или влажну шумску стељу, док се запаљивост свежег вегетативног материјала често занемарује [55]–[59]. Оваква пракса вероватно је усвојена из ранијих радова о запаљивости вегетације, где су резултати за влажну шумску стељу једноставно коришћени као основа за тумачење својстава свеже шумске вегетације [60].

За разлику од површинских пожара, пожари крошњи у којима структура биомасе значајно варира и укључује велику масу свежег лишћа, гранчица и грана, нису били предмет интензивног истраживања [61]. Разлог за то вероватно лежи у чињеници да је ова врста шумских пожара релативно ретка појава. Ипак, последице могу бити разорне [62]. Пожари крошњи су изузетно интензивни, представљају велики изазов за ватрогасце, захтевају сложене тактике гашења и имају висок потенцијал да се развију у мегапожаре [61], [63].

Према *Cruz-у*, *Molchanov* је био први истраживач који је научно утврдио предуслове за настанак пожара крошњи [64], [65]. Међутим, најзначајнији допринос у овој области дао је *Van Wagner*, са моделом који је сада интегрисан у различите системе за предвиђање шумских пожара, мада уз одређене модификације [66]–[68]. Према *Van Wagner-у*, температура испод основног слоја крошње представља главни фактор за паљење крошњи дрвећа, док је садржај влаге други кључни фактор. У истом раду, аутор је дефинисао однос између критичне температуре потребне за паљење крошњи, измерене на висини изнад фронта површинског пожара, и интензитета површинског пожара. Закључио је да до вертикалног ширења пожара са површинског на крошње долази када интензитет површинског пожара премаши одређени критични праг, који представља минимални интензитет неопходан да би се достигла температура паљења крошње [66].

Даљи развој истраживања иницирања пожара крошњи представљен је у раду *Xanthopoulos-а* и *Wakimoto-а*, који су експериментално утврдили постојање зависности између температуре паљења грана у доњем делу крошње и њиховог садржаја влаге. Ови

результати указују на то да виши садржај влаге у гранама значајно повећава температуру потребну за иницирање паљења, што представља критичан фактор у моделирању преласка површинских пожара на пожаре крошњи [69].

*Alexander* и *Cruz* су у низу објављених радова детаљно обрадили проблем пожара крошњи, пружајући бројне корисне увиде [70]–[79]. Сажет преглед новијих истраживања у овој области, као и доступних модела, представљен је и у радовима *Keane*-а, *Xanthopoulos*-а и сарадника [61], [68].

Сви модели за иницирање пожара крошњи из литературе укључују концепт интензитета фронта пожара (енгл. *fireline intensity*). Овај појам, који је *Byram* увео 1959. године, стекао је значајну популарност у истраживачкој заједници која се бави шумским пожарима [80]. Интензитет фронта пожара дефинише се као количина ослобођена топлоте по јединици времена за сваку јединицу дужине фронта пожара [81]. Међутим, главни проблем са интензитетом фронта пожара је тај што не узима у обзир укупну енергију (топлотни флуks) коју биомаса прима од фронта пламена [82]. Насупрот томе, експерименти изведени са константним топлотним флуksом не поседују ове недостатке, због чега је овај приступ постао *de facto* стандард у истраживањима која се баве пожарима.

*Morandini* и сарадници сматрају да је мерење интензитета фронта пожара на терену нетачно [81]. Квантификација није директна, већ зависи од других варијабли које је тешко или чак немогуће измерити, као што је утрошена количина биомасе током сагоревања, брзина ширења пожара и слично [82]. У моделима за пожаре крошњи, прорачун интензитета фронта пожара може чак дати и погрешне резултате.

Висина основе крошње (енгл. *Crown Base Height – CBH*) је веома важан параметар који одређује вероватноћу преласка површинског пожара на пожаре крошњи [68]. Вредности значајно варирају између врста, крећући се од нула метара за мешовите шуме *Douglas* јеле до пет метара код *Ponderosa* борова (подаци са северних обронака Стеновитих планина у САД) [83]. Интересантно је да за врсте са нултом висином основе крошње овај модел даје праг интензитета једнак нули, што је очигледно нетачно.

Поред тога, посебна пажња у појединим истраживањима посвећена је испитивању свежег вегетативног материјала, нарочито жбунастих врста које могу имати значајну улогу у иницирању пожара крошњи. *Weise* и сарадници су развили логистички модел који представља користан алат за предвиђање ширења пожара у вегетацији *чапарала* (тип жбунасте вегетације попут *макије*). Овај модел обухвата различите факторе, као што су брзина ветра, нагиб терена, садржај влаге, количина и врста шумске биомасе [84].

Додатно, истраживање које су спровели *Weise* и сарадници указује на то да је брзина ветра најзначајнији фактор у ширењу пожара и да значајно повећава његов интензитет [85]. Уз присуство ветра, пламен постаје знатно разорнији у односу на услове без ветра [86]. У областима са заступљеним чапаралом, висина основе крошње има кључну улогу у смањењу брзине ослобађања топлоте и ширења пожара, како у условима са ветром, тако и без њега, јер се са повећањем размака између површинског слоја и крошњи смањује ефикасност преноса топлотне енергије, чиме се успорава развој пожара крошњи[87].

Значај преласка пожара са површинских на пожаре крошњи код четинара већ је разматран у литератури [88]. Међутим, према досадашњим сазнањима, нису спроведена истраживања усмерена на тестирање параметара запаљивости терминалних делова грана четинара. Ови делови крошње, нарочито код врста са ниском висином основе крошње, представљају прве елементе стабла који се запале под утицајем долазећег фронта пламена површинског пожара.

Истраживања запаљивости свеже шумске биомасе углавном су била усмерена на листове/иглице или гранчице [89]–[94]. Ипак, у литератури постоји недовољан број радова који се баве истраживањем запаљивости делова или целих грана, што је и предмет овог дела истраживања. Изузетак представља истраживање *Jaureguiberry*-а и сарадника, у којем је предложен практичан, теренски уређај за тестирање запаљивости вегетативних изданака [33]. Међутим, представљени уређај не може се сматрати аналитичким инструментима, попут конусног калориметра (*CC*), калориметра за одређивање топлотне снаге (*MLC*) или уређаја за испитивање ширења и развоја пожара (*FPA*). Овај недостатак је чак истакнут у самом раду поменутих аутора.

Преглед литературе о иницирању пожара крошњи указује на то да механизми овог процеса нису у потпуности разрађени, да су нека питања занемарена и/или недовољно истражена, те да су потребна даља истраживања у овој области. Овај сегмент истраживања у оквиру дисертације био је мотивисано уоченим недостацима и заснива се на следећим претпоставкама:

- терминални делови основних грана четинара, код којих је висина основе крошње ниска, представљају прве елементе крошње који постају захваћени фронтом пламена површинског пожара (ово питање је занемарено у литератури);
- експерименте у лабораторијским условима треба спроводити при константном топлотном флуксу, јер само овај приступ (за разлику од мерења температуре)

одражава реалну енергију коју изложени објекти “примају“ од пожара и пружају поновљиве и поуздане резултате;

- садржај влаге и хемијски састав целих грана, а не само листова или иглица, имају значајан утицај на запаљивост.

Ове претпоставке дефинисале су истраживачки план, чији је главни циљ био тестирање запаљивости свеже биомасе крошњи, са најизложенијих основних грана, са различитим режимима садржаја влаге. Експерименталне јединице (терминални делови основних грана) сакупљене су из састојина смрче (*Picea abies*) и јеле (*Abies alba*). Ове врсте су изабране због своје распрострањености у четинарским шумама Србије, као и због веома ниске висине основе крошње, чије основне гране дословно додирују тло (Слика 3.1). Ово је посебно изражено на рубовима састојина, где је вероватноћа преласка површинских пожара на пожаре крошњи највећа.



Слика 3.1. Четинари на рубу шуме са базалним гранама које додирују тло

### 3.1.1. Садржај влаге као главни фактор запаљивости шумске биомасе

Садржај влаге представља кључни фактор који утиче на развој и понашање шумских пожара. У литератури је уобичајено да се садржај влаге шумске биомасе изражава као проценат у односу на суву масу, одређен након сушења до константне тежине. Ова вредност се може добити коришћењем следеће формуле:

$$\text{Садржај влаге [\%]} = \frac{\text{маса свеже биомасе} - \text{маса суве биомасе}}{\text{маса суве биомасе}} \times 100\% \quad (1)$$

Садржај влаге значајно утиче на све процесе повезане са шумским пожарима, попут паљења, сагоревања и тињања. Услед излагања топлоти, вода прва испарава, што успорава процес паљења и сагоревања. У случају паљења, повећан садржај влаге може довести до смањеног интензитета пламеног сагоревања, уз повећано тињање и смањену масу сагореле биомасе [68].

Класични модели сагоревања претпостављају да ће сва влага из узорака иницијално испарити на температури близу тачке кључања воде. Међутим, истраживање *Pickett*-а и сарадника показало је да значајне количине влаге ипак остају у узорцима чак и након сагоревања [95].

Већина експеримената за одређивање карактеристика запаљивости шумске вегетације спроводи се на сувој шумској стељи са веома ниским садржајем влаге. Основна хипотеза ових истраживања заснива се на претпоставци да шумски пожари у многим екосистемима претежно захватају површинску вегетацију, чији је садржај влаге мањи од 5%.

Осцилација садржаја влаге у сувој биомаси најбоље се разуме кроз концепт равнотежног (еквалибријумског) стања садржаја влаге. Равнотежни садржај влаге означава стање у којем честице биомасе нити апсорбују влагу из ваздуха и околине нити је губе. Биомаса достиже равнотежни садржај влаге када се притисак водене паре унутар честица изједначи са притиском водене паре у ваздуху који је у контакту са њиховом површином, спречавајући било какву размену влаге између ваздуха и биомасе. Међутим, ово стање равнотеже ретко се постиже у природи, јер температура ваздуха, влажност и сунчево зрачење непрекидно варирају током дана и ноћи [25].

*Jervis* и *Rein* су утврдили да се свеже иглице *Pinus halepensis* запале приближно четири пута спорије и сагоревају са нижом топлотном снагом у поређењу са сувим иглицама. Сушење свежих узорака доводи до значајних варијација у понашању пожара што указује на то да су услови сушења и промене у хемијском саставу биомасе кључни фактори [96].

Са друге стране, неки истраживачи се фокусирају на разлике у понашању током сагоревања између свежих и сувих листова. *Prince* и *Fletcher* су спровели мерења како би анализирали разлике у обрасцима сагоревања и задржаној влази у свежим и сувим листовима. Групе свежих листова имале су приближно 34% и 63% садржаја влаге, док су суви листови осушени на око 4% влаге, при чему је једна група поново хидрирана до 26% влаге. Резултати су показали да влага у свежим листовима има снажнији утицај на температуру сагоревања у поређењу са сувим и хидрираним листовима [97].

*McAllister* и сарадници истраживали су термичко понашање свежих и сувих иглица, сакупљајући узорке током целе вегетационе сезоне како би анализирали варијације у садржају влаге и хемијском саставу. У студији је анализирано понашање приликом паљења свеже биомасе, конкретно иглица *Pinus contorta* и Дагласове јеле (*Pseudotsuga menziesii*), кроз експерименте са пилотираним паљењем. У оквиру истраживања извршен је преглед корелација између времена паљења и садржаја влаге у научној литератури, при чему је утврђено да оне не дају поуздане резултате за свежу шумску биомасу [28].

*Ferguson* и сарадници истраживали су како водена пара, која потиче из влаге у шумској вегетацији, утиче на сагоревање гасова који се ослобађају у току пиролизе. Применом детерминистичких, реакционо-кинетичких модела, у оквиру софтверског пакета *CHEMKIN-Pro*, симулирана су два типа пламена. Утврђено је да присуство водене паре снижава температуру пламена и мења његову структуру. Циљ ових модела је био да се испита утицај водене паре на кључне параметре пламена: максималну температуру, брзину сагоревања и ширину пламена [98]. Истраживање *Weise*-а и сарадника такође наглашава значај укључивања садржаја влаге вегетације као једног од кључних параметара у моделима пожара [99].

*Pinto* и сарадници представили су нов приступ о утицају садржаја влаге на топлотни флуks емитован из ламинарногдифузионог пламена. Са повећањем садржаја влаге, висина пламена и брзина губитка масе опадају, што доводи до смањења температуре пламена и укупне емисије зрачења. Занимљиво је да истраживање показује да садржај влаге у биомаси не мења облик пламена, који је моделован као конус. Ипак, током времена, како се садржај влаге повећава, долази до мањих промена у геометрији пламена. Како садржај влаге у биомаси расте, опадају висина пламена и његов радијус. Такође је утврђено да брзина губитка масе највише утиче на зрачење пламена [100].

У области одређивања параметара запаљивости шумске биомасе, активно се развијају нови приступи који узимају у обзир промену садржаја влаге. *Madrigal* и сарадници представили су нови метод лабораторијског испитивања, који се базира на калоримету за одређивање топлотне снаге и анализатору влаге. На тај начин фиксирају се услови испитивања попут топлотног флуksа, масе узорака, насипне густине узорака (енгл. *bulk density*) и фиксних нивоа садржаја влаге у узорцима, чиме се смањује варијабилност током тестирања. Овај метод се показао као врло прецизан за тестирање запаљивости различитих врста шумске биомасе у лабораторијским условима [101].

Прецизна процена запаљивости шумске биомасе од кључног је значаја за боље разумевање ризика од шумских пожара. Истраживање *Zhou*-а и сарадника истиче важност процене запаљивости у контексту примене вегетације као природне противпожарне баријере. Аутори су анализирали реакцију лишћа и гранчица три доминантне врсте у јужној Кини, како би идентификовали које су врсте најпогодније у планирању заштитних појасева шумско насељених области (енгл. *Wildland Urban Interface – WUI*) [102].

*Ramadhan* и сарадници указују на значај примене одговарајућих метода тестирања, припреме узорака, као и разматрање фактора попут величине узорака и садржаја влаге приликом одређивања карактеристика запаљивости шумске биомасе применом лабораторијских уређаја мањих размера. У раду је детаљно приказано како величина узорака утиче на резултате, као и то да промена садржаја влаге има значајан ефекат на све параметре запаљивости, попут времена паљења, топлотне снаге, брзине сагоревања, итд. [103].

*McAllister* и сарадници сугеришу да сам садржај влаге није довољан за прецизно предвиђање времена паљења свеже шумске биомасе, јер постоје и други механизми који контролишу време паљења. Термичке особине свежих листова, као што су густина, топлотна проводљивост и специфични топлотни капацитет, углавном су непознате и могу утицати на време паљења свеже шумске биомасе. Слично томе, резултати *Jervis*-а и *Rein*-а показују да постоје основне разлике у физици и хемији пламена свежих и сувих иглица, те да сам садржај влаге није довољан како би се објасниле варијације у понашању током сагоревања.

## **3.2. Материјали и методе**

### **3.2.1. Подручје истраживања и локације узорковања**

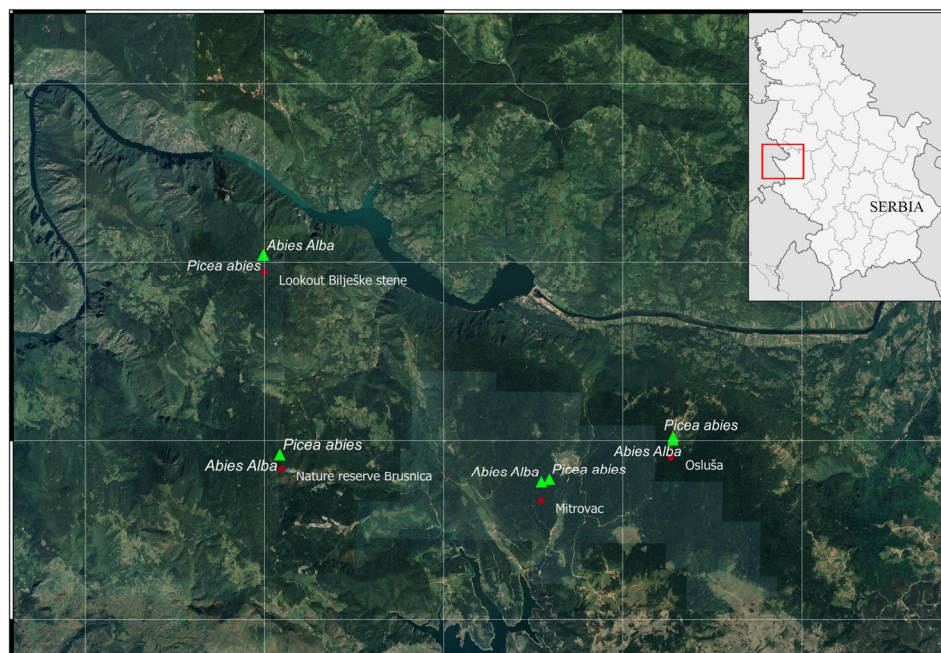
Узорци за овај сегмент истраживања у оквиру дисертације прикупљени су на подручју Националног парка Тара, на западу Србије. Укупна површина Националног парка износи 24.991,82 хектара. Клима је влажна континентална, са благим температурама и кишним данима у пролеће и јесен, топлим и сувим летима, и хладним зимама. Укупна годишња количина падавина креће се од 773 до 1038 mm/m<sup>2</sup>, са максимумом који се јавља од марта до јуна [104]. Јул и август су најтоплији месеци са просечним температурама од 17,2 °С, док је јануар најхладнији месец са просечном температуром од -2,1 °С [105]. Доминирајуће врсте четинара су јела (*Abies alba*) и смрча

(*Picea abies*). Због глобалних климатских промена и повећаних просечних дневних температура, Национални парк Тара погађа све већи број шумских пожара, од којих је најразорнији био онај из 2012. године, у којем је уништено око 2.000 хектара шуме. Погођена подручја налазила су се на висинама од 900 до 1.200 m надморске висине [106].

У августу 2021. године, када су узорци прикупљани, просечна температура је била 18,4 °C, са укупним падавинама од 138,7 mm. Узорковање је обављено на четири локације, класификоване у прву зону угрожености од шумских пожара према *Lode* пројекту - *Loss Data Enhancement for DDR & CCA management*. GPS координате одабраних локација дате су у Табели 3.1, и визуелно приказане на слици 3.2.

Табела 3.1. Локација и координате места узорковања

Назив врсте	Локација	Координате
<i>Abies alba</i> - јела	Природни резерват Брусница	43°55'20,41"С 19°19'25,25"И
	Видиковац Биљешке стене	43°58'21,46"С 19°18'59,88"И
<i>Picea abies</i> - смрча	Митровац	43°54'59,63"С 19°24'53,24"И
	Ослуша	43°55'43,39"С 19°27'36,94"И



Слика 3.2. Мапа локација сакупљања узорака

### 3.2.2. Припрема узорака

Узорци су сакупљени резањем свежих, зелених терминалних делова базалних грана стабала, млађих од 40 година. Стабла су насумично одабрана, при чему је посебан фокус стављен на јединке које се налазе на ивици шуме, с обзиром на то да су то прва стабла која би била изложене топлотном утицају потенцијалних прилазних површинских пожара. Узорци са ових стабала представљали су експерименталне јединице у истраживању карактеристика упаљивости. Изабране су гранчице са крошњи које су биле зреле и сличне старости. Током узорковања, посебна пажња је посвећена селекцији сличних узорака са приближно истом дужином од  $13 \pm 0,5$  cm и пречником примарне, водеће гранчице од  $0,5 \pm 0,2$  cm. Са сваке локације прикупљено је између 35 и 40 гранчица. Прикупљени узорци су одмах паковани у пластичне вреће и транспортовани у лабораторију. Узорци су подвргнути сушењу у уређају са принудном вентилацијом током различитих временских периода како би се креирала група експерименталних јединица са широким опсегом садржаја влаге. Ова метода је једноставна и најчешће коришћена у литератури [39], [40], [42], [93], [96]. Главни недостатак методе је то што може довести до делимичног испаравања волатила током сушења. Како би се деволатилизација минимизирала, за сушење је коришћена умерена температура од 60 °C. Сви узорци су измерени аналитичком вагом Radwag (AS 60/220.R2, Пољска) пре сушења, а затим поново након 4 и 6 сати након сушења. Додатно, креирана је контролна група од пет узорака који су сушени до константне тежине. Ове информације су коришћене за одређивање масе сувих узорака. За израчунавање садржаја влаге у узорцима примењена је формула (1).

У овом истраживању, садржај влаге (енгл. *Fuel Moisture Content – FMC*) се односи на садржај воде целокупне експерименталне јединице - терминалних делова базалних грана, који обухватају примарну гранчицу и иглице. На овај начин, креиране су експерименталне јединице са четири нивоа садржаја влаге (*FMC*), који су означени на следећи начин:  $FMC_{\text{свежи}} = 115 \pm 5\%$ ;  $FMC_{4h} = 70 \pm 5\%$ ;  $FMC_{6h} = 60 \pm 5\%$ ;  $FMC_{\text{суви}} = 0\%$ .

### 3.2.3. Примењена експериментална апаратура

Експериментални тестови овог сегмента истраживања дисертације спроведени су у Лабораторији за заштиту од пожара, на Факултету заштите на раду у Нишу, Универзитета у Нишу, на опреми која је детаљно описани у другом поглављу дисертације.

Како би се што верније симулирали потенцијални услови ширења пожара потребно је минимизирати утицај самог носача узорака на ток експеримента. У том контексту, за потребе овог истраживања израђен је специјално дизајниран носач узорка, са порозношћу већом од 80%, који омогућава равномеран проток ваздуха кроз узорак, а уједно минимизира загревање преостале површине носача узорака, чиме је очувана стабилност узорака током експеримента. Носач узорака који је коришћен током експеримената, заједно са узорцима, приказан је на слици 3.3.



Слика 3.3. Специјално дизајниран носач узорка са постављеним узорцима: (а) гранчица јеле (*A. alba*); (б) гранчица смрче (*P. abies*)

Проток ваздуха испод носача узорака измерен је пре експеримената помоћу анемометра са врућом жицом (Testo 435, Велика Британија), и износио је  $0,1 \pm 0,01$  m/s.

Пре експеримента конусни грејач је калибрисан *Schmidt-Boelter*-овим водено хлађеним флуksметром. Флуksметар је постављен на растојању од 25 mm испод грејача. Калибрација је извршена за вредности топлотног флуksа од 50, 60 и 70 kW/m<sup>2</sup>.

Температура ваздуха и влажност у лабораторији мерени су помоћу USB Data Logger (Lascar, Велика Британија). Током експеримената, температура у лабораторији била је  $28 \pm 2^{\circ}\text{C}$ , а релативна влажност  $57 \pm 3\%$ . Ове мале флукуације нису утицале на добијене експерименталне резултате.

### 3.2.4. Експериментални дизајн

Изведен је потпуни факторијални експеримент који обухвата све могуће комбинације нивоа испитиваних фактора. Фактори и нивои приказани су у табели 3.2. Сваки експериментални третман (комбинација нивоа фактора која утиче на зависну променљиву) поновљен је три пута.

Табела 3.2. Фактори и нивои у експерименталном дизајну

Фактор	Јединица	Ниво 1	Ниво 2	Ниво 3	Ниво 4
Садржај влаге ( <i>FMC</i> )	%	115%	70%	60%	суви
Топлотни флуks (енгл. <i>Heat flux -HF</i> )	kW/m <sup>2</sup>	70	60	50	-
Четинарске врсте	-	<i>A. alba</i>	<i>P. abies</i>	-	-

На основу дефинисаних фактора и нивоа, креирана је потпуна асиметрична факторијална матрица облика 4×3×2. Овако конструисана матрица садржи 24 јединствене комбинације нивоа фактора, односно експерименталних третмана. Сваком третману додељена су три насумично одабрана узорка, чиме је обезбеђено да сваки експериментални третман буде поновљен по три пута. Укупно су изведена  $24 \times 3 = 72$  експериментална теста. Током сваког експерименталног теста, мерене су следеће зависне променљиве (параметри запаљивости): време паљења (енгл. *Time to Ignition – TTI*), просечна топлотна снага (енгл. *Mean Heat Release Rate – Mean HRR*), максимална топлотна снага (енгл. *Peak Heat Release Rate – PHRR*), средња ефективна топлотна моћ (енгл. *Average Effective Heat of Combustion - AEHC*), брзина губитка масе (енгл. *Mass Loss Rate – MLR*) и укупна ослобођена топлота (енгл. *Total Heat Release - THR*).

### 3.2.5. Примењене статистичке методе

Пре избора одговарајуће статистичке методе, извршена је провера подударности расподеле података са нормалном расподелом, применом Колмогоров-Смирновог (енгл. *Kolmogorov-Smirnov*) и Шапиро-Вилковог (енгл. *Shapiro-Wilk*) теста. Резултати су показали да у неким случајевима подаци нису нормално распоређени (дистрибуирани). Из тог разлога, коришћен је Крускал-Валис (енгл. *Kruskal-Wallis – KW*) непараметарски тест сума рангова, који представља алтернативу једнофакторској анализи варијансе (*one-way ANOVA*), како би се тестирале разлике у параметрима запаљивости пожара међу различитим врстама узорака, за различите нивое топлотног флуksа (*HF*) и садржаја влаге (*FMC*). *KW* тест испитује да ли се расподеле група разликују, али не даје конкретан показатељ које се групе разликују. Из тог разлога, извршен је Данов непараметарски

пост-хок тест (енгл. *post-hoc Dunn's test*) са Бонферонијевом корекцијом (енгл. *Bonferroni correction*) [107]. У циљу истраживања корелације између фактора (HF, FMC и четинарских врста) и зависних променљивих (параметри запаљивости: TPI, HRR, PHRR, АЕНС, MLR и THR) коришћен је Спирманов коефицијент корелације (енгл. *Spearman's correlation*). Мултиваријациона анализа запаљивости међу врстама, због високе колонеарности између параметара запаљивости, спроведена је применом анализе главних компоненти (енгл. *Principal Component Analysis – PCA*). Како би резултати PCA били илустративнији, креирани су биplotови за обе врсте. На крају, извршена је кластеризација К-средина (енгл. *K-mean clustering*) како би се потврдили резултати PCA да су експериментални тестови груписани према нивоима HF и FMC. За све тестове праг значајности постављен је на  $\alpha = 0,05$ . Статистичка анализа извршена је коришћењем R софтвера (*RStudio IDE*).

### **3.3. Резултати**

#### **3.3.1. Разлике у параметрима запаљивости међу четинарским врстама за различите нивое топлотног флуksа и садржаја влаге**

Резултати KW теста и Дановог непараметарског *post hoc* теста приказани су у табелама 3.3 и 3.4. Резултати KW тестова изведених за третмане са фиксним нивоима топлотног флуksа (HF) и различитих нивоа садржаја влаге (FMC) приказани су у последњој колони табела, обележених смеђом бојом. Слично томе, резултати тестова изведених за третмане са фиксним нивоима садржаја влаге (FMC) и различитих нивоа топлотног флуksа (HF) приказани су у последњем реду сваког параметра запаљивости у приказаним табелама, обележених плавом бојом. Статистички значајни резултати су приказани подебљаним текстом.

**Табела 3.3.** Преглед експерименталних резултата са добијеним параметрима запаљивости за узорке *A. alba*, распоређене према различитим садржајима влаге и топлотним флуксевима. У експоненту су представљени резултати поређења по групама. Мала слова у експоненту се односе на поређење група по нивоима топлотног флукса, док се велика слова односе на поређење група по нивоима садржаја влаге. Ако две групе третмана садрже исто слово, то значи да се те две групе не разликују значајно

Параметри запаљивости	Топлотни флукс	<i>A. alba</i>				p вредност
		FMC <sub>115%</sub>	FMC <sub>70%</sub>	FMC <sub>60%</sub>	FMC <sub>суви</sub>	
Време паљења TTI (s)	50 kW/m <sup>2</sup>	101 ±9 <sup>cC</sup>	58 ±3 <sup>cB</sup>	22 ±4 <sup>A</sup>	17 ±3 <sup>bA</sup>	<b>0,019</b>
	60 kW/m <sup>2</sup>	63 ±7 <sup>bC</sup>	40 ±4 <sup>bBC</sup>	19 ±3 <sup>AB</sup>	7 ±1 <sup>aA</sup>	<b>0,016</b>
	70 kW/m <sup>2</sup>	20 ±2 <sup>aB</sup>	16 ±1 <sup>aB</sup>	9 ±1 <sup>A</sup>	4 ±1 <sup>aA</sup>	<b>0,016</b>
	p вредност	<b>0,027</b>	<b>0,027</b>	0,063	<b>0,032</b>	
Максимална топлотна снага PHRR (kW/m <sup>2</sup> )	50 kW/m <sup>2</sup>	184 ±5 <sup>A</sup>	216 ±4 <sup>B</sup>	233 ±5 <sup>aB</sup>	324 ±3 <sup>bC</sup>	<b>0,016</b>
	60 kW/m <sup>2</sup>	199 ±5 <sup>A</sup>	226 ±4 <sup>B</sup>	250 ±8 <sup>abB</sup>	388 ±7 <sup>cC</sup>	<b>0,016</b>
	70 kW/m <sup>2</sup>	188 ±11 <sup>A</sup>	226 ±4 <sup>A</sup>	262 ±9 <sup>bB</sup>	276 ±7 <sup>aB</sup>	<b>0,024</b>
	p вредност	0,113	0,055	<b>0,032</b>	<b>0,027</b>	
Просечна топлотна снага Mean HRR (kW/m <sup>2</sup> )	50 kW/m <sup>2</sup>	139 ±6 <sup>aA</sup>	161 ±6 <sup>A</sup>	186 ±12 <sup>A</sup>	250 ±5 <sup>bB</sup>	<b>0,016</b>
	60 kW/m <sup>2</sup>	159 ±7 <sup>abA</sup>	155 ±8 <sup>A</sup>	171 ±8 <sup>A</sup>	315 ±3 <sup>cB</sup>	<b>0,027</b>
	70 kW/m <sup>2</sup>	164 ±7 <sup>bA</sup>	183 ±3 <sup>AB</sup>	206 ±12 <sup>AB</sup>	201 ±5 <sup>aB</sup>	<b>0,019</b>
	p вредност	<b>0,039</b>	0,063	0,055	<b>0,027</b>	
Средња ефективна топлотна моћ АЕНС (MJ/kg)	50 kW/m <sup>2</sup>	6,91 ±0,15 <sup>bA</sup>	7,48 ±0,26 <sup>A</sup>	8,17 ±0,52 <sup>A</sup>	13,05 ±0,52 <sup>B</sup>	<b>0,024</b>
	60 kW/m <sup>2</sup>	5,15 ±0,57 <sup>aA</sup>	7,95 ±0,78 <sup>AB</sup>	8,80 ±0,26 <sup>B</sup>	13,40 ±1,47 <sup>B</sup>	<b>0,016</b>
	70 kW/m <sup>2</sup>	6,19 ±0,21 <sup>bA</sup>	7,38 ±0,32 <sup>AB</sup>	8,40 ±0,32 <sup>AB</sup>	13,27 ±1,08 <sup>B</sup>	<b>0,016</b>
	p вредност	<b>0,027</b>	0,925	0,056	0,393	
Просечна брзина губитка масе Average MLR (g/s)	50 kW/m <sup>2</sup>	0,10 ±0,01	0,09 ±0,02	0,12 ±0,02	0,07 ±0,02	0,157
	60 kW/m <sup>2</sup>	0,06 ±0,13	0,16 ±0,03	0,13 ±0,01	0,13 ±0,01	0,789
	70 kW/m <sup>2</sup>	0,17 ±0,03	0,18 ±0,02	0,10 ±0,03	0,07 ±0,04	0,198
	p вредност	0,661	0,099	0,924	0,270	
Максимална брзина губитка масе Peak MLR (g/s)	50 kW/m <sup>2</sup>	0,25 ±0,015 <sup>B</sup>	0,18 ±0,007 <sup>aA</sup>	0,28 ±0,01 <sup>bB</sup>	0,24 ±0,011 <sup>aAB</sup>	<b>0,022</b>
	60 kW/m <sup>2</sup>	0,23 ±0,015	0,23 ±0,008 <sup>b</sup>	0,23 ±0,011 <sup>a</sup>	0,32 ±0,012 <sup>b</sup>	0,095
	70 kW/m <sup>2</sup>	0,32 ±0,016 <sup>B</sup>	0,30 ±0,011 <sup>cB</sup>	0,20 ±0,007 <sup>aA</sup>	0,29 ±0,01 <sup>abB</sup>	<b>0,031</b>
	p вредност	0,051	<b>0,027</b>	<b>0,027</b>	<b>0,027</b>	
Укупна ослобођена топлота THR (MJ/m <sup>2</sup> ) -период пламеног сагоревања-	50 kW/m <sup>2</sup>	1,11 ±0,20 <sup>aA</sup>	1,13 ±0,18 <sup>abA</sup>	2,41 ±0,36 <sup>aAB</sup>	4,00 ±0,25 <sup>B</sup>	<b>0,024</b>
	60 kW/m <sup>2</sup>	2,07 ±0,33 <sup>bAB</sup>	0,62 ±0,24 <sup>aA</sup>	3,59 ±0,44 <sup>abB</sup>	3,78 ±0,31 <sup>B</sup>	<b>0,024</b>
	70 kW/m <sup>2</sup>	1,96 ±0,06 <sup>aA</sup>	1,83 ±0,15 <sup>bA</sup>	4,96 ±0,07 <sup>bB</sup>	3,82 ±0,22 <sup>B</sup>	<b>0,024</b>
	p вредност	<b>0,032</b>	<b>0,027</b>	<b>0,027</b>	0,094	
Укупна ослобођена топлота THR (MJ/m <sup>2</sup> ) -цео период трајања експеримента-	50 kW/m <sup>2</sup>	5,11 ±0,41 <sup>C</sup>	3,46 ±0,24 <sup>bAB</sup>	2,61 ±0,23 <sup>aA</sup>	4,47 ±0,35 <sup>BC</sup>	<b>0,019</b>
	60 kW/m <sup>2</sup>	5,38 ±0,29 <sup>B</sup>	1,91 ±0,12 <sup>aA</sup>	4,04 ±0,38 <sup>abB</sup>	3,82 ±0,19 <sup>B</sup>	<b>0,025</b>
	70 kW/m <sup>2</sup>	2,24 ±0,19 <sup>AB</sup>	2,18 ±0,28 <sup>abA</sup>	5,13 ±0,25 <sup>bC</sup>	3,94 ±0,36 <sup>BC</sup>	<b>0,024</b>
	p вредност	0,061	<b>0,027</b>	<b>0,027</b>	0,079	

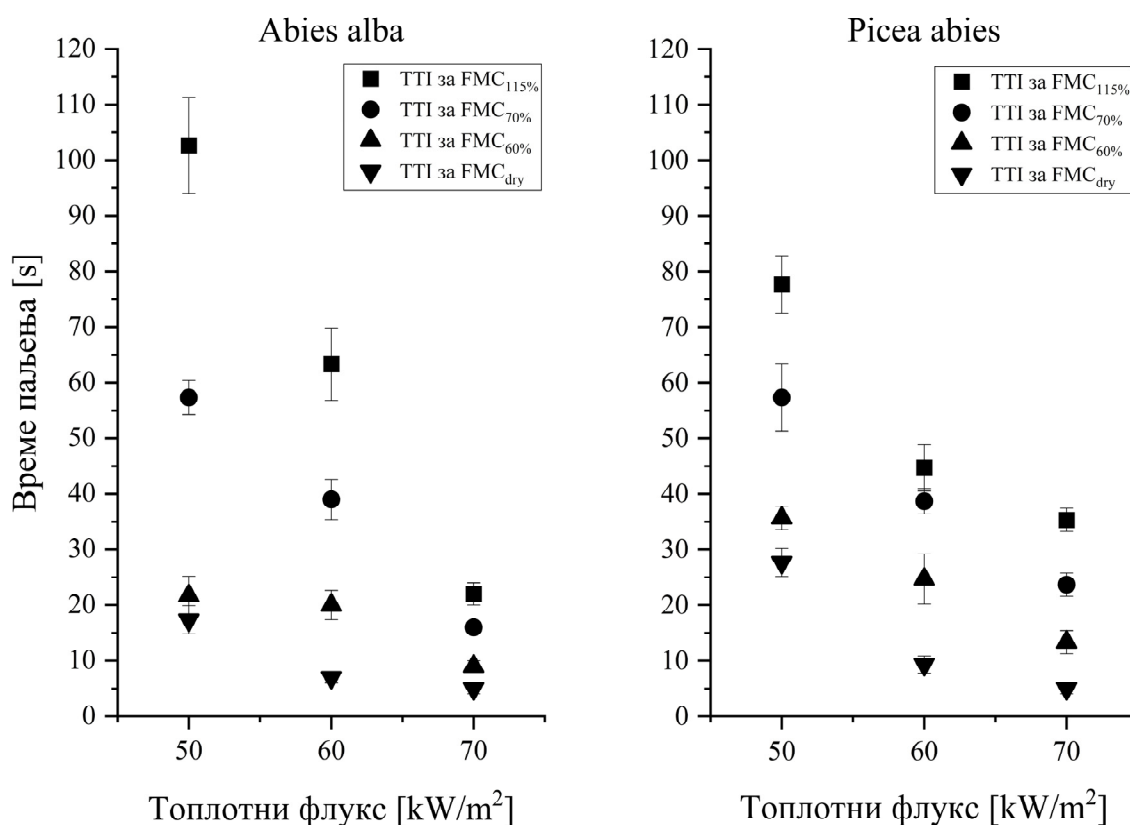
**Табела 3.4.** Преглед експерименталних резултата са добијеним параметрима запаљивости за узорке *P. abies*, распоређене према различитим садржајима влаге и топлотним флуксевима. У експоненту су представљени резултати поређења по групама. Мала слова у експоненту се односе на поређење група по нивоима топлотног флукса, док се велика слова односе на поређење група по нивоима садржаја влаге. Ако две групе третмана садрже исто слово, то значи да се те две групе не разликују значајно

Параметри запаљивости	Топлотни флукс	<i>P. abies</i>				p вредност
		FMC <sub>115%</sub>	FMC <sub>70%</sub>	FMC <sub>60%</sub>	FMC <sub>CVBN</sub>	
Време паљења TTI (s)	50 kW/m <sup>2</sup>	79 ±5 <sup>bc</sup>	58 ±6 <sup>bBC</sup>	35 ±2 <sup>bAB</sup>	28 ±3 <sup>bA</sup>	<b>0,016</b>
	60 kW/m <sup>2</sup>	46 ±4 <sup>aB</sup>	40 ±2 <sup>bB</sup>	29 ±5 <sup>abAB</sup>	11 ±2 <sup>aA</sup>	<b>0,018</b>
	70 kW/m <sup>2</sup>	31 ±4 <sup>aB</sup>	23 ±2 <sup>aB</sup>	14 ±2 <sup>aAB</sup>	4 ±1 <sup>aA</sup>	<b>0,016</b>
	p вредност	<b>0,027</b>	<b>0,027</b>	<b>0,027</b>	<b>0,027</b>	
Максимална топлотна снага PHRR (kW/m <sup>2</sup> )	50 kW/m <sup>2</sup>	120 ±10 <sup>A</sup>	175 ±7 <sup>B</sup>	197 ±8 <sup>B</sup>	221 ±7 <sup>C</sup>	<b>0,016</b>
	60 kW/m <sup>2</sup>	156 ±10 <sup>A</sup>	183 ±8 <sup>A</sup>	200 ±13 <sup>AB</sup>	235 ±6 <sup>B</sup>	<b>0,019</b>
	70 kW/m <sup>2</sup>	159 ±10	162 ±6	169 ±7	172 ±4	0,123
	p вредност	0,066	0,113	0,066	0,051	
Просечна топлотна снага Mean HRR (kW/m <sup>2</sup> )	50 kW/m <sup>2</sup>	100 ±5 <sup>aA</sup>	127 ±8 <sup>abAB</sup>	146 ±12 <sup>AB</sup>	156 ±6 <sup>aB</sup>	<b>0,027</b>
	60 kW/m <sup>2</sup>	115 ±10 <sup>aA</sup>	139 ±4 <sup>bA</sup>	158 ±6 <sup>AB</sup>	184 ±4 <sup>bB</sup>	<b>0,016</b>
	70 kW/m <sup>2</sup>	132 ±11 <sup>bA</sup>	109 ±3 <sup>aA</sup>	143 ±6 <sup>B</sup>	142 ±4 <sup>aB</sup>	<b>0,031</b>
	p вредност	<b>0,039</b>	<b>0,027</b>	0,066	<b>0,032</b>	
Средња ефективна топлотна моћ АЕНС (MJ/kg)	50 kW/m <sup>2</sup>	6,16 ±0,34 <sup>aA</sup>	6,44 ±0,33 <sup>aA</sup>	6,97 ±0,49 <sup>aA</sup>	10,41 ±0,55 <sup>B</sup>	<b>0,050</b>
	60 kW/m <sup>2</sup>	10,60 ±1,17 <sup>bAB</sup>	10,67 ±0,78 <sup>bA</sup>	11,98 ±0,48 <sup>bAB</sup>	13,66 ±0,49 <sup>B</sup>	<b>0,025</b>
	70 kW/m <sup>2</sup>	7,89 ±0,54 <sup>aAC</sup>	8,46 ±0,25 <sup>bAB</sup>	9,97 ±0,13 <sup>aCD</sup>	10,30 ±0,37 <sup>D</sup>	<b>0,019</b>
	p вредност	<b>0,027</b>	<b>0,027</b>	<b>0,027</b>	0,610	
Просечна брзина губитка масе Average MLR (g/s)	50 kW/m <sup>2</sup>	0,06 ±0,03	0,11 ±0,02	0,12 ±0,01 <sup>b</sup>	0,08 ±0,01	0,075
	60 kW/m <sup>2</sup>	0,06 ±0,02	0,06 ±0,02	0,07 ±0,01 <sup>a</sup>	0,06 ±0,02	0,838
	70 kW/m <sup>2</sup>	0,08 ±0,01	0,04 ±0,02	0,10 ±0,01 <sup>ab</sup>	0,07 ±0,39	0,478
	p вредност	0,561	0,055	<b>0,044</b>	0,837	
Максимална брзина губитка масе Peak MLR (g/s)	50 kW/m <sup>2</sup>	0,11 ±0,008 <sup>aA</sup>	0,23 ±0,011 <sup>B</sup>	0,21 ±0,009 <sup>B</sup>	0,14 ±0,01 <sup>aA</sup>	<b>0,019</b>
	60 kW/m <sup>2</sup>	0,14 ±0,01 <sup>abA</sup>	0,12 ±0,015 <sup>A</sup>	0,18 ±0,011 <sup>AB</sup>	0,20 ±0,008 <sup>bB</sup>	<b>0,020</b>
	70 kW/m <sup>2</sup>	0,17 ±0,011 <sup>b</sup>	0,22 ±0,013	0,17 ±0,009	0,17 ±0,013 <sup>ab</sup>	0,095
	p вредност	<b>0,027</b>	0,063	0,051	<b>0,027</b>	
Укупна ослобођена топлота THR (MJ/m <sup>2</sup> ) -период пламеног сагоревања-	50 kW/m <sup>2</sup>	0,50 ±0,40 <sup>AB</sup>	0,70 ±0,14 <sup>A</sup>	1,42 ±0,13 <sup>B</sup>	0,93 ±0,10 <sup>aAB</sup>	<b>0,044</b>
	60 kW/m <sup>2</sup>	1,26 ±0,20 <sup>B</sup>	0,64 ±0,23 <sup>A</sup>	1,75 ±0,40 <sup>B</sup>	2,39 ±0,24 <sup>bA</sup>	<b>0,024</b>
	70 kW/m <sup>2</sup>	1,45 ±0,30 <sup>A</sup>	4,49 ±0,11 <sup>B</sup>	1,00 ±0,16 <sup>A</sup>	1,27 ±0,19 <sup>aA</sup>	<b>0,023</b>
	p вредност	0,058	0,051	0,193	<b>0,027</b>	
Укупна ослобођена топлота THR (MJ/m <sup>2</sup> ) -цео период трајања експеримента-	50 kW/m <sup>2</sup>	4,01 ±0,20 <sup>bB</sup>	4,66 ±0,27 <sup>abB</sup>	2,75 ±0,16 <sup>bA</sup>	2,09 ±0,18 <sup>bA</sup>	<b>0,019</b>
	60 kW/m <sup>2</sup>	3,34 ±0,22 <sup>ab</sup>	2,67 ±0,47 <sup>a</sup>	3,05 ±0,33 <sup>b</sup>	2,42 ±0,31 <sup>b</sup>	0,143
	70 kW/m <sup>2</sup>	2,63 ±0,21 <sup>aA</sup>	5,03 ±0,05 <sup>bB</sup>	1,26 ±0,26 <sup>aA</sup>	1,51 ±0,18 <sup>aA</sup>	<b>0,024</b>
	p вредност	<b>0,027</b>	<b>0,027</b>	<b>0,027</b>	<b>0,039</b>	

Третмани са константним топлотним флуksom (*HF*) и променљивим садржајем влаге у узорцима (*FMC*) показали су значајне разлике у готово свим параметрима запаљивости. Изузетак представљају следећи случајеви: параметар *Average MLR* није показао значајне разлике ни за један ниво топлотног флукса за обе анализиране врсте; затим *Peak MLR* код врсте *A. Alba* при *HF* = 60 kW/m<sup>2</sup>, вредности *PHRR* и *Peak MLR* код *HF* = 70 kW/m<sup>2</sup>, као и *THR* код врсте *P. abies* при *HF* = 60 kW/m<sup>2</sup>.

На слици 3.4 приказано је време паљења узорака (*TTI*) за три поновљена мерења. Добијени резултати квалитативно указују да садржај влаге и вредност топлотног флукса директно утичу на вредности овог параметра. Такође, на слици се може уочити да је

време паљења за појединачне узорке на топлотном флуксу од  $50 \text{ kW/m}^2$  приближно исто код узорака са 60% садржаја влаге и код сувих узорака. За врсту *A. alba*, *TTI* се креће од  $22 \pm 4$  до  $17 \pm 3$  s, а за врсту *P. abies* од  $35 \pm 2$  до  $28 \pm 3$  s. Код сувих узорака уочена је израженија разлика у времену паљења при  $50 \text{ kW/m}^2$ , у односу на вредности добијене при 60 и  $70 \text{ kW/m}^2$ . На вишим топлотним флуксевима (60 и  $70 \text{ kW/m}^2$ ), време паљења је значајно краће: за *A. alba* креће се од  $7 \pm 1$  до  $4 \pm 1$  s, а за врсту *P. abies* од  $11 \pm 2$  до  $4 \pm 1$  s. На топлотном флуксу од  $70 \text{ kW/m}^2$ , вредности *TTI* за *A. alba* имају ужи временски опсег за скуп анализираних нивоа садржаја влаге, и крећу се у распону од  $4 \pm 1$  до  $20 \pm 2$  s, док је за врсту *P. abies* временски распон шири и износи од  $4 \pm 1$  до  $31 \pm 4$  s.



Слика 3.4. Утицај садржаја влаге и топлотног флукса на време паљења узорака

У случају врсте *A. alba* са 60% садржаја влаге, *KW* тест није показао статистички значајне разлике у *TTI* вредностима при различитим нивоима топлотног флукса (50, 60 и  $70 \text{ kW/m}^2$ ; Табела 3.3,  $p = 0,063$ ). За све остале услове, укључујући све нивое влаге код врсте *P. abies*, утврђене су статистички значајне разлике у *TTI* вредностима ( $p < 0,05$ ).

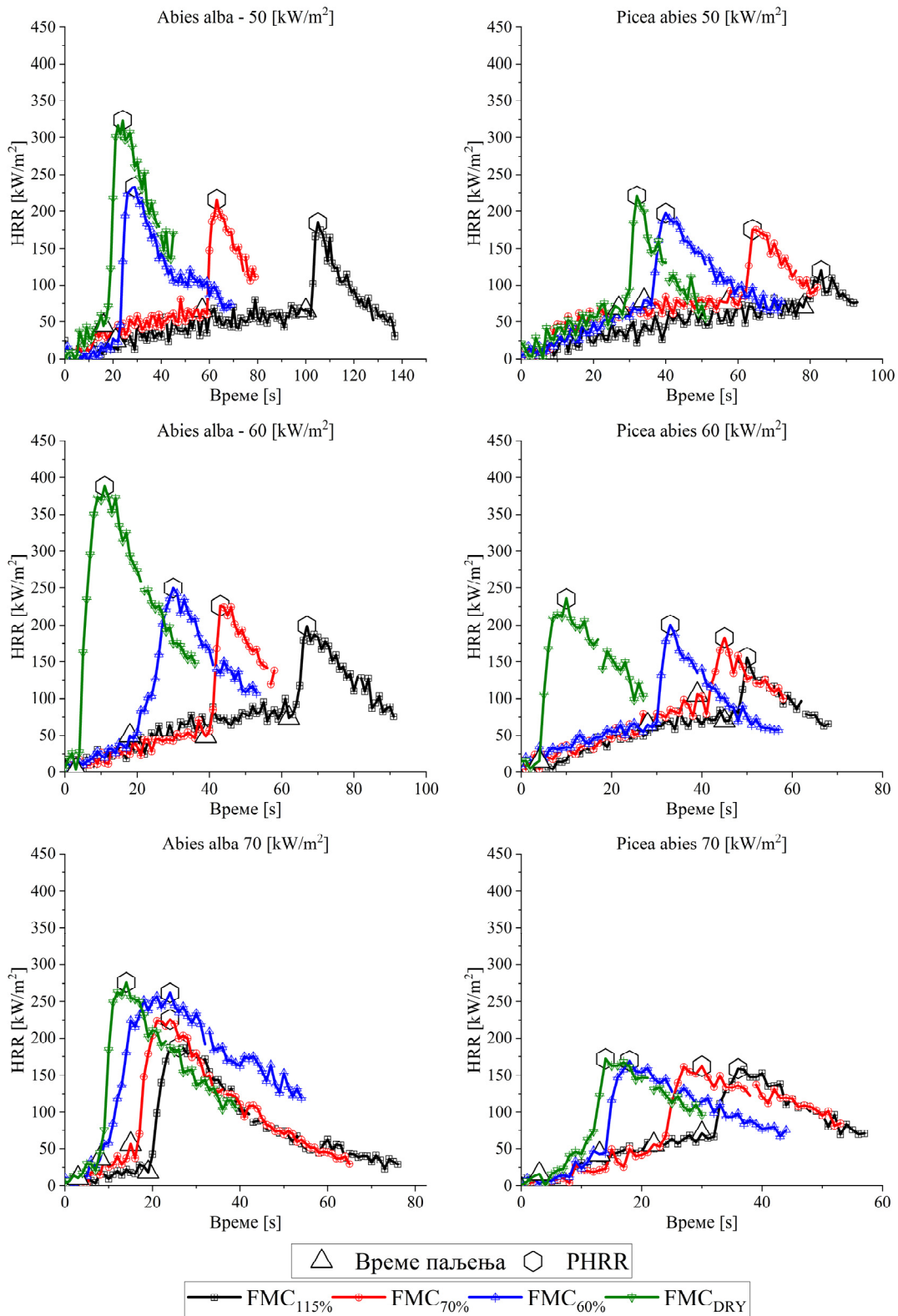
Према резултатима Дановог *post hoc* теста, *TPI* вредности за групе експерименталних јединица са сувим узорцима ( $FMC_{суви}$ ) биле су значајно ниже у односу на групе са већим садржајем влаге. Овај образац је уочен на свим нивоима топлотних флукса и код обе испитиване врсте. Код врсте *A. alba*, експерименталне јединице са фиксним садржајем влаге ( $FMC_{115\%}$  и  $FMC_{70\%}$ ) показале су статистички значајне разлике у *TPI* вредностима за сва три нивоа топлотног флукса. Са друге стране, обе четинарске врсте са сувим узорцима ( $FMC_{суви}$ ) нису показале значајне разлике у времену паљења при топлотним флуксевима од 60 и 70 kW/m<sup>2</sup>. Исто је уочено и код врсте *P. abies* са садржајем влаге од 115% ( $FMC_{115\%}$ ), за коју такође није утврђена значајна разлика између ових нивоа топлотног флукса.

На основу спроведене анализе, резултати указују да су нижи садржај влаге и већи топлотни флукс кључни фактори који убрзавају процес паљења узорака. Врста *A. alba* генерално показује већу осетљивост на паљење у поређењу са врстом *P. abies*.

На слици 3.5 дат је графички приказ развоја топлотне снаге (*HRR*) за анализиране врсте.

Трајање фазе сагоревања директно зависи од интензитета примењеног топлотног флукса и садржаја влаге у узорцима. Фаза сагоревања узорака са истим садржајем влаге може значајно варирати у зависности од интензитета топлотног флукса. На пример, за врсту *A. alba* при топлотном флуксу од 50 kW/m<sup>2</sup>, трајање фазе сагоревања за различите нивое влаге износи 31, 25, 19 и 12 s, респективно, а код врсте *P. abies* при топлотном флуксу од 70 kW/m<sup>2</sup>, трајање сагоревања је 15, 11, 8 и 6 s за све нивое садржаја влаге.

Када је реч о просечној топлотној снази (*Mean HRR*), *KW* тест за обе четинарске врсте показао је статистички значајне разлике у вредностима овог параметра у зависности од нивоа топлотног флукса и садржаја влаге ( $p < 0,05$ ). Сличан образац уочен је и при фиксираном садржају влаге, а различитим нивоима топлотног флукса, с тим што изузеци постоје код узорака са 70% и 60% садржаја влаге код врсте *A. alba*, као и код 60% садржаја влаге код врсте *P. abies*, за које није утврђена статистичка значајност ( $p > 0,05$ ).



Слика 3.5. Графикон развоја топлотне снаге за различите вредности садржаја воде и топлотних флукса за анализирани четинарске врсте

Код обе четинарске врсте, на топлотним флуксевима од 50 и 60 kW/m<sup>2</sup> вредности *Mean HRR* се повећавају са смањењем садржаја влаге у узорцима. Највише вредности *Mean HRR* на овим нивоима топлотног флуksа забележене су код сувих узорака, што указује на њихов највећи енергетски потенцијал. Међутим, на топлотном флуksу од 70 kW/m<sup>2</sup> примећен је тренд раста вредности *Mean HRR* са смањењем влаге до нивоа од 60%, након чега код сувих узорака долази до благог опадања.

Према резултатима Дановог *post hoc* теста, код врсте *A. alba* утврђене су статистички значајне разлике у вредностима просечне топлотне снаге (*Mean HRR*) између групе сувих узорака (*FMC<sub>суви</sub>*) и свих осталих група са већим садржајем влаге (*FMC<sub>115%</sub>*, *FMC<sub>70%</sub>*, *FMC<sub>60%</sub>*) при топлотним флуксевима од 50 и 60 kW/m<sup>2</sup>. На топлотном флуksу од 70 kW/m<sup>2</sup>, овај тест је показао статистички значајну разлику само између група са највишим (*FMC<sub>115%</sub>*) и најнижим (*FMC<sub>суви</sub>*) садржајем влаге.

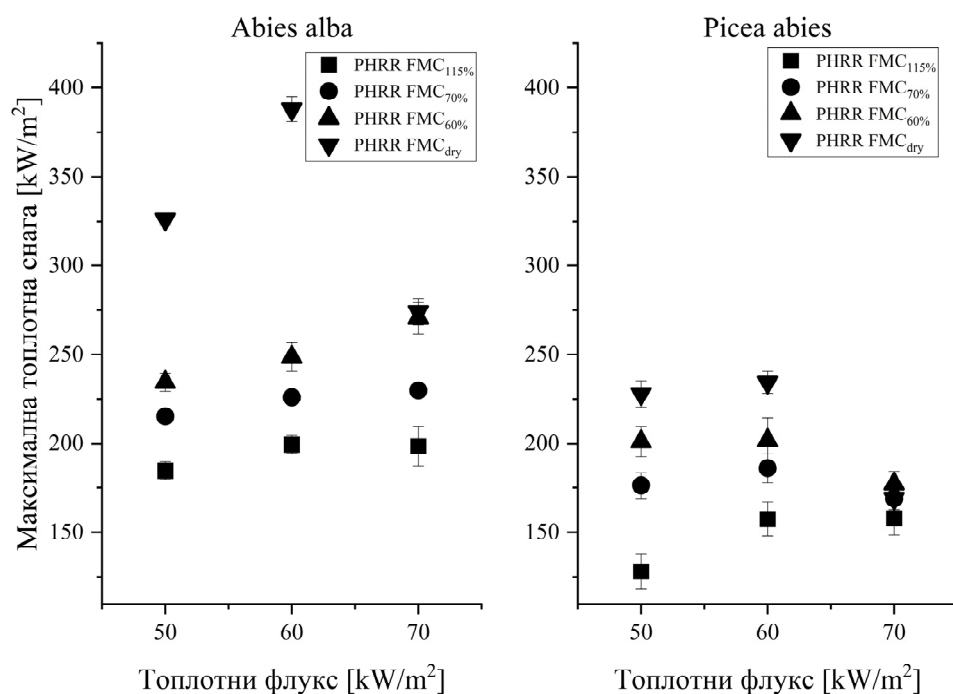
Код врсте *P. abies*, при топлотним флуксевима од 50 и 60 kW/m<sup>2</sup>, вредности просечне топлотне снаге (*Mean HRR*) за узорке са 115% садржаја влаге статистички се значајно разликују у односу на суве узорке. На топлотном флуksу од 70 kW/m<sup>2</sup>, утврђене су статистички значајне разлике између узорака са 115% и 70% садржаја влаге у односу на групе са 60% и суве.

У већини случајева, вредности просечне топлотне снаге (*Mean HRR*) биле су веће код сувих узорака за разлику од узорака са већим садржајем влаге, и то код обе четинарске врсте. За садржај влаге од 115%, није било значајних разлика у *Mean HRR* вредностима између узорака изложених топлотним флуксевима од 50 и 60 kW/m<sup>2</sup>. Ове групе узорака су имале знатно ниже вредности *Mean HRR* у поређењу са узорцима изложеним топлотном флуksу од 70 kW/m<sup>2</sup>.

Код врсте *A. alba*, уочене су значајне разлике у вредностима *Mean HRR* на свим нивоима топлотног флуksа за суве узорке, као и за узорке са 115% садржаја влаге, али између 50 и 70 kW/m<sup>2</sup>. Код врсте *P. abies* утврђене су значајне разлике између 50 и 60 kW/m<sup>2</sup> у поређењу са 70 kW/m<sup>2</sup> за узорке са 115% садржаја влаге, као и између 50 и 70 kW/m<sup>2</sup> у односу на 60 kW/m<sup>2</sup> за суве узорке.

Анализа максималне топлотне снаге (*PHRR*), приказана на слици 3.6, показује разлике у вредностима овог параметра за обе анализиране врсте. На пример, код сувих узорака врсте *A. abies*, вредности *PHRR* на топлотним флуксевима од 50, 60 и 70 kW/m<sup>2</sup> износе 324±3, 388±7 и 276±7 kW/m<sup>2</sup>, респективно. С друге стране, суви узорци врсте *P. abies* на истим топлотним флуксевима имају вредности од 221±7, 235±6 и 172±4 kW/m<sup>2</sup>, респективно. Код обе врсте са 0% садржаја влаге, уочен је тренд повећања *PHRR*

вредности, с тим што вредности на  $70 \text{ kW/m}^2$  благо опадају у односу на максимум на  $60 \text{ kW/m}^2$ .



Слика 3.6. Максимална топлотна снага за различите вредности садржаја воде и топлотних флуksева за анализиране четинарске врсте

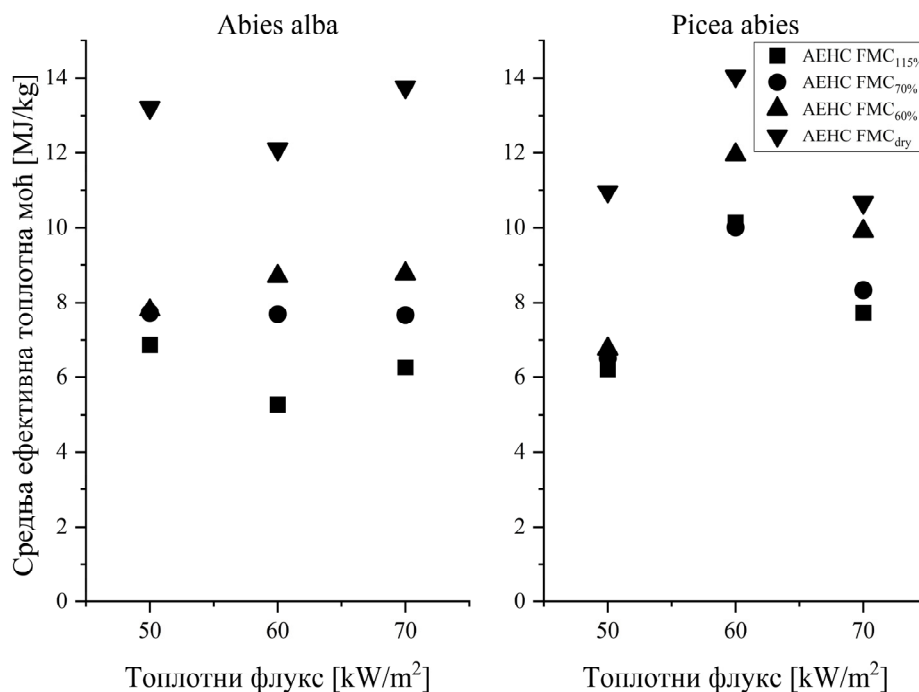
Анализом вредности максималне топлотне снаге (*PHRR*), утврђено је да код обе четинарске врсте, на топлотним флуksевима од  $50$  и  $60 \text{ kW/m}^2$ , *PHRR* расте са смањењем садржаја воде у узорцима, при чему је пораст израженији код врсте *A. alba* у односу на *P. abies*. На топлотном флуksу од  $70 \text{ kW/m}^2$  овај тренд је мање изражен, вероватно због бржег термичког разлагања узорка. Такође је уочено да врста *A. alba* има већи потенцијал у ослобађању максималне топлотне снаге и показује интензивније сагоревање у поређењу са врстом *P. abies*.

Вредности максималне топлотне снаге (*PHRR*) за суве узорке врсте *A. alba* биле су значајно више у односу на узорке са већим садржајем воде ( $FMC_{115\%}$ ,  $FMC_{70\%}$ ,  $FMC_{60\%}$ ). На основу *KW* теста приказаних у табелама 3.3 и 3.4, статистички значајне разлике утврђене су код обе четинарске врсте за све фиксне нивое топлотног флуksа у односу на различите нивое садржаја воде ( $p < 0,05$ ). Изузетак је код врсте *P. abies* при флуksу од  $70 \text{ kW/m}^2$ , где није утврђена статистичка значајност, као ни у комбинацији са фиксним нивоима воде и променљивим топлотним флуksевима. Код врсте *P. abies* на  $70$

$\text{kW/m}^2$ , добијене вредности максималне топлотне снаге ( $PHRR$ ) имале су ужи опсег, од 159 до  $172 \text{ kW/m}^2$ , док је код врсте *A. alba* опсег био знатно шири, и износио од 188 до  $276 \text{ kW/m}^2$ .

Код врсте *A. Alba* узорци са 115% и 70% садржаја влаге нису показали статистички значајне разлике у вредностима максималне топлотне снаге ( $PHRR$ ) при различитим нивоима топлотног флукса ( $p > 0,05$ ), за разлику од узорака са 60% и 0% садржаја влаге ( $p < 0,05$ ). Значајна разлика је утврђена између сва три нивоа топлотног флукса за суве узорке, као и између флукса од 50 и  $70 \text{ kW/m}^2$  за узорке са 60% садржаја влаге.

На слици 3.7 приказане су вредности средње ефективне топлотне моћи ( $AEHC$ ) у зависности од садржаја влаге у узорцима и различитих вредности топлотног флукса. Средња ефективна топлотна моћ ( $AEHC$ ) се одређује као однос између укупне ослобођене топлоте ( $THR$ ) током пламеног сагоревања и укупне масе сагорелог узорка.



Слика 3.7. Средња ефективна топлотна моћ за различите вредности садржаја влаге и топлотних флукса за анализирани четиначке врсте

Као што је приказано у табелама 3.3 и 3.4, обе четиначке врсте показују сличне вредности овог параметра при садржају влаге од 115%, 70% и 60%, изложене топлотном флуксу од  $50 \text{ kW/m}^2$ . За врсту *A. alba* те вредности се крећу у распону од 6,91 до 8,17

MJ/kg, а за врсту *P. abies* од 6,16 до 6,97 MJ/kg. Са друге стране, код сувих узорака уочена је знатно већа разлика.

Средња ефективна топлотна моћ (*AEHC*) значајно расте са смањењем садржаја влаге на топлотним флуksевима од 50 и 60 kW/m<sup>2</sup>, код обе четинарске врсте. Значајан раст примећен је код сувих узорака за обе врсте, при сва три нивоа топлотног флуksа. На топлотном флуksу од 70 kW/m<sup>2</sup> постоје мање осцилације у вредностима овог параметра међу узорцима са 115%, 70% и 60% садржаја влаге.

За обе четинарске врсте, *KW* тест је показао статистички значајне разлике у вредностима средње ефективне топлотне моћи (*AEHC*) између група са различитим садржајем влаге, при фиксним вредностима топлотног флуksа ( $p < 0,05$ ). Међутим, код врсте *A. alba*, узорци са 70%, 60% и 0% садржаја влаге, нису показали статистички значајне разлике у вредностима овог параметра при излагању различитим нивоима топлотног флуksа ( $p > 0,05$ ). Исто је уочено код сувих узорака врсте *P. abies*, где није утврђена статистичка значајност утицаја топлотног флуksа на промену *AEHC* вредности. Са друге стране, статистички значајне разлике у *AEHC* вредностима при различитим нивоима топлотног флуksа уочене су код узорака са 115% садржаја влаге за обе врсте.

Према резултатима Дановог *post hoc* теста, при топлотном флуksу од 50 kW/m<sup>2</sup> код обе четинарске врсте утврђене су статистички значајне разлике у вредностима средње ефективне топлотне моћи (*AEHC*) између сувих узорака и свих осталих група са садржајем влаге од 115%, 70% и 60%. На топлотном флуksу од 60 kW/m<sup>2</sup>, код врсте *A. alba*, утврђене су статистички значајне разлике између узорака са 115% и 60% садржаја влаге, као и између узорака са 115% влаге и сувих узорака. Међутим, суви узорци се не разликују значајно од узорака са 60% и 70% влаге. При флуksу од 70 kW/m<sup>2</sup>, статистички значајне разлике утврђене су између узорака са 115% влаге и сувих узорака. Између осталих група (70%, 60% и суви узорци) није било статистички значајних разлика.

Код врсте *P. abies*, при топлотном флуksу од 60 kW/m<sup>2</sup>, суви узорци статистички се значајно разликују од групе са 70% садржаја влаге, док остале групе (115%, 70% и 60%) не показују значајне разлике међусобно. На 70 kW/m<sup>2</sup>, узорци са 115% влаге статистички се разликују од група са 60% и сувих, док се узорци са 70% не разликују значајно ни од једне групе.

За третман са фиксним нивоом садржаја влаге од 115% код врсте *A. alba*, статистички значајна разлика у вредностима средње ефективне топлотне моћи (*AEHC*) уочена је само између узорака изложених топлотном флуksу од 60 kW/m<sup>2</sup> у поређењу са осталим нивоима топлотног флуksа. Код врсте *P. abies*, за садржај влаге од 115%, узорци

изложени топлотном флуксу од  $60 \text{ kW/m}^2$  значајно се разликују од оних изложених флуксевима од  $50$  и  $70 \text{ kW/m}^2$ . Код узорака са  $70\%$  влаге, утврђена је значајна разлика између флукса од  $70 \text{ kW/m}^2$  и осталих флуксева, док између  $50$  и  $60 \text{ kW/m}^2$  нема значајне разлике. У групи са  $60\%$  влаге, вредности *AEHC* при топлотном флуксу од  $60 \text{ kW/m}^2$  статистички се значајно разликују од вредности добијених на  $50$  и  $70 \text{ kW/m}^2$ , између којих није уочена значајна разлика.

Посматрајући просечну брзину губитка масе (*Average MLR*), резултати из табела 3.3 и 3.4 не показују јасну и доследну повезаност између овог параметра и садржаја влаге у узорцима при различитим нивоима топлотног флукса. У већини случајева, вредности *Average MLR* код обе четинарске врсте нису се статистички значајно разликовале у поређењима између група са различитим садржајем влаге и различитим топлотним флуксевима ( $p > 0,05$ ). Ипак, уочен је тренд повећања брзине губитка масе са смањењем садржаја влаге. Врста *A. alba* генерално показује веће вредности овог параметра у поређењу са врстом *P. abies*, чије резултати су стабилнији и мање варирају. Када је реч о максималној брзини губитка масе (*Peak MLR*), узорци са нижим садржајем влаге, нарочито суви, подложнији су бржем сагоревању на свим нивоима топлотног флукса. Ове разлике су најизраженије при флуксу од  $50 \text{ kW/m}^2$ , док се на  $70 \text{ kW/m}^2$  разлике између група са различитим нивоима влаге смањују и вредности постају сличније.

Као што је приказано у табелама 3.3 и 3.4, резултати *KW* теста за максималну брзину губитка масе (*Peak MLR*) показали су статистички значајне разлике између различитих нивоа садржаја влаге при топлотним флуксевима од  $50$  и  $70 \text{ kW/m}^2$  код врсте *A. alba*, и при  $50$  и  $60 \text{ kW/m}^2$  код врсте *P. abies*. Такође, утврђене су статистички значајне разлике у вредностима овог параметра између различитих нивоа топлотног флукса при фиксним вредностима садржаја влаге, и то за узорке врсте *A. alba* са  $70\%$ ,  $60\%$  и  $0\%$  садржаја влаге, као и на узорке врсте *P. Abies* са  $115\%$  и  $0\%$  влаге.

Према резултатима Дановог *post hoc* теста, *Peak MLR* вредности код врсте *A. alba* уочене су статистички значајне разлике у вредностима између различитих нивоа топлотног флукса, при фиксним нивоима садржаја влаге. За узорке са  $70\%$  влаге, вредност овог параметра при  $70 \text{ kW/m}^2$  била је статистички значајно већа у односу на  $50$  и  $60 \text{ kW/m}^2$ . Код узорака са  $60\%$  влаге, статистички значајна разлика је утврђена између флукса од  $50 \text{ kW/m}^2$  и флуксева од  $60$  и  $70 \text{ kW/m}^2$ , а који се међусобно нису значајно разликовали. У групи сувих узорака, статистички значајна разлика постоји између узорака изложених флуксу од  $50$  и  $60 \text{ kW/m}^2$ . Код врсте *P. abies*, за групу узорака са  $115\%$  садржаја влаге, статистички значајна разлика постоји између узорака изложених флуксу

од 50 и 70 kW/m<sup>2</sup>, док при 60 kW/m<sup>2</sup> није утврђена статистички значајна разлика у односу на остале нивое флукса. У групи сувих узорака, утврђена је статистички значајна разлика између флукса од 50 и 60 kW/m<sup>2</sup>.

Резултати *KW* теста за укупно ослобођену топлоту (*THR*) у периоду пламеног сагоревања, показују да код врсте *A. alba* постоје статистички значајне разлике између нивоа влаге на свим нивоима топлотног флукса ( $p > 0,05$ ). Према резултатима Дановог *post hoc* теста на флуксу од 50 kW/m<sup>2</sup> утврђена је статистички значајна разлика између сувих узорака и узорака са 115% и 70% садржаја влаге, а које међусобно не показују разлике и уједно не показују разлику у односу на узорке са 60% влаге. На флуксу од 60 kW/m<sup>2</sup>, групе узорака са 60% влаге и суви узорци значајно се разликују од узорака са 70% влаге. На флуксу од 70 kW/m<sup>2</sup>, уочен је сличан образац, где се узорци са 60% влаге и суви узорци значајно разликују од узорака са 115% и 70% влаге, док се унутар тих група међусобно не разликују. Између различитих нивоа топлотних флуксева при фиксним нивоима садржаја влаге, такође су уочене значајне разлике. За узорке са 115% влаге, вредности при флуксу од 60 kW/m<sup>2</sup> значајно се разликују од оних при 50 и 70 kW/m<sup>2</sup>. Код узорака са 70% влаге, утврђена је значајна разлика између флуксева од 60 и 70 kW/m<sup>2</sup>. У групи са 60% влаге, вредности при 50 и 70 kW/m<sup>2</sup> показују значајну разлику, док вредност при 60 kW/m<sup>2</sup> не одступа значајно ни од једне од осталих.

Код врсте *P. abies*, *KW* тест такође указује на статистички значајне разлике при свим нивоима флукса при различитим вредностима садржаја влаге ( $p > 0,05$ ). Према резултатима Дановог *post hoc* теста, на флуксу од 50 kW/m<sup>2</sup>, група узорака са 60% садржаја влаге значајно се разликује од узорака са 70%, док узорци са 115% влаге и суви узорци не показују статистички значајну разлику у односу на остале групе. На флуксу од 60 kW/m<sup>2</sup>, утврђене су разлике између група узорака са 115% и 60% влаге у односу на групе са 70% и суве узорке. При 70 kW/m<sup>2</sup>, група узорака са 70% влаге се статистички значајно разликује од свих осталих група чије вредности међусобно не показују значајну разлику. Једине значајне разлике при фиксном садржају влаге, а променљивим вредностима топлотног флукса утврђене су код сувих узорака, и то између групе узорака изложене флуксевима од 50 и 70 kW/m<sup>2</sup> у односу на узорке изложене флуксу од 60 kW/m<sup>2</sup>.

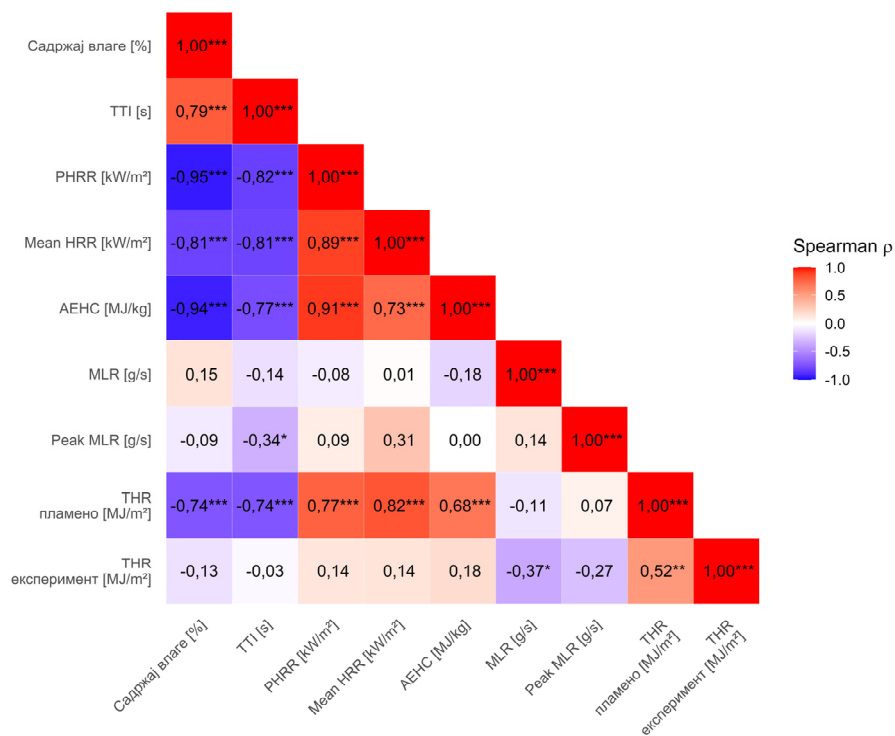
Резултати *KW* теста за укупно ослобођену топлоту (*THR*) за цео период трајања експеримента, код врсте *A. alba* утврђена је статистичка значајност између група са различитим садржајем влаге при сваком нивоу топлотног флукса ( $p < 0,05$ ). Према резултатима Дановог *post hoc* теста, при 50 kW/m<sup>2</sup> утврђена је значајна разлика између

узорака са 115% и са 60% влаге, док се групе са 70% влаге и суви узорци преклапају. На флуксу од  $60 \text{ kW/m}^2$ , утврђене су значајне разлике између група са 70% влаге и група са свим осталим нивоима садржаја влаге (115%, 60% и суви узорци). На  $70 \text{ kW/m}^2$ , утврђена је статистички значајна разлика између група са 60% у односу на узорке са 70% садржаја влаге, док се остале групе не разликују значајно од тих вредности. При фиксним вредностима садржаја влаге и променљивим вредностима топлотног флукса, статистички значајне разлике уочене су код узорака са 70% влаге између флуксева од 50 и  $60 \text{ kW/m}^2$ , као и код узорака са 60% садржаја влаге између флуксева од 50 и  $70 \text{ kW/m}^2$ .

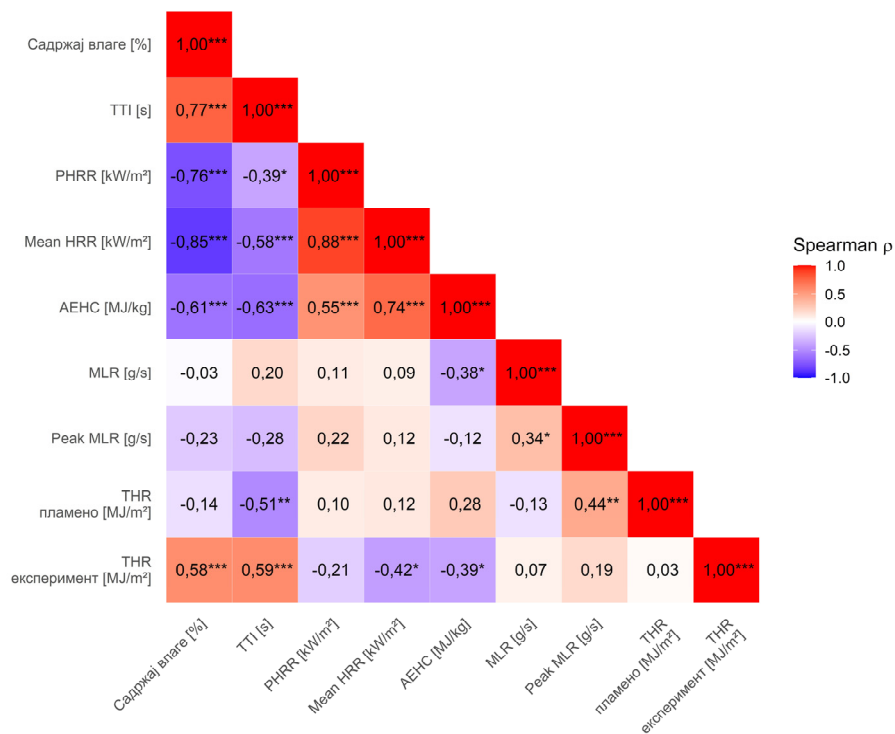
Код врсте *P. abies*, према резултатима *KW* теста утврђене су статистичке значајне разлике у вредностима укупно ослобођене топлоте (*THR*) за цео период трајања експеримента између узорака са различитим нивоима влаге при флуксу од 50 и  $70 \text{ kW/m}^2$ . Према резултатима Дановог *post hoc* теста, при флуксу од  $50 \text{ kW/m}^2$  група узорака са 60% влаге и суви узорци значајно се разликују од узорака са 115% и 70% влаге, док се унутар тих група међусобно не разликују. На флуксу од  $70 \text{ kW/m}^2$ , утврђене су значајне разлике између група са 70% влаге и група са свим осталим нивоима садржаја влаге (115%, 60% и суви узорци), а које се међусобно такође не разликују. При фиксним вредностима садржаја влаге и променљивим вредностима топлотног флукса, статистички значајне разлике овог параметра код врсте *P. abies* утврђене су међу свим нивоима садржаја влаге ( $p < 0,05$ ). На основу резултата Дановог *post hoc* теста, код узорака са 115% влаге утврђена је статистички значајна разлика између флуксева од 50 и  $70 \text{ kW/m}^2$ , док вредност на  $60 \text{ kW/m}^2$  не одступа значајно ни од једног од та два флукса. Код узорака са 70% влаге, вредност добијена при  $70 \text{ kW/m}^2$  статистички значајно се разликује од вредности на  $60 \text{ kW/m}^2$ , док резултат на  $50 \text{ kW/m}^2$  не показује значајну разлику ни са једним од осталих флуксева. За узорке са 60% влаге и суве узорке, вредност добијена на  $70 \text{ kW/m}^2$  статистички се разликује од вредности на флуксевима од 50 и  $60 \text{ kW/m}^2$ , а које међусобно не показују значајну разлику.

### **3.3.2. Корелациона анализа параметара запаљивости четинарских врста за различите нивое топлотног флукса и садржаја влаге**

На сликама 3.8 и 3.9 приказане су матрице Спирманове корелације које илуструју односе између параметара запаљивости и садржаја влаге, на основу комплетног скупа података који обухвата све нивое топлотног флукса и све нивое садржаја влаге.



Слика 3.8. Матрица Спирманове корелације између параметара запаљивости и садржаја влаге за врсту *A. alba*. Статистички значај резултата приказан је звездицама: \*\*\*-  $p < 0,001$ ; \*\*-  $p < 0,01$ ; \*-  $p < 0,05$ .



Слика 3.9. Матрица Спирманове корелације између параметара запаљивости и садржаја влаге за врсту *P. abies*. Статистички значај резултата приказан је звездицама: \*\*\*-  $p < 0,001$ ; \*\*-  $p < 0,01$ ; \*-  $p < 0,05$ .

Значајне корелације утврђене су између садржаја влаге у узорцима и параметара запаљивости, као што су време паљења (*TTI*), максимална и просечна топлотна снага (*PHRR* и *Mean HRR*), средња ефективна топлотна моћ (*AEHC*) и укупно ослобођена топлота (*THR*), код пламеног сагоревања и за цео период трајања експеримента, код обе анализираних четинарске врсте.

Код врсте *A. alba*, параметри *PHRR* ( $\rho = -0,95, p < 0,001$ ), *Mean HRR* ( $\rho = -0,81, p < 0,001$ ) и *AEHC* ( $\rho = -0,94, p < 0,001$ ) показују веома јаку негативну корелацију са садржајем влаге. Слично, код врсте *P. abies*, утврђена је јака негативна корелација између садржаја влаге и *Mean HRR* ( $\rho = -0,85, p < 0,001$ ), као и умерено јака негативна корелација са *PHRR* ( $\rho = -0,76, p < 0,001$ ) и *AEHC* ( $\rho = -0,61, p < 0,001$ ). Ови резултати указују на јасну тенденцију да са смањењем садржаја влаге наведени параметри запаљивости расту, што потврђује значај влаге као ограничавајућег фактора у процесима сагоревања.

Јака позитивна корелација је утврђена између садржаја влаге у узорцима и времена паљења (*TTI*) за обе четинарске врсте (*A. alba*:  $\rho = 0,79, p < 0,001$ ; *P. abies*:  $\rho = 0,77, p < 0,001$ ). Овај резултат је у складу са очекивањима, с обзиром на то да смањење садржаја влаге доводи до скраћења времена потребног за инцирање паљења.

Када је реч о укупно ослобођеној топлоти (*THR*), код врсте *A. alba* утврђена је јака негативна корелација између садржаја влаге и *THR* вредности у току пламеног сагоревања ( $\rho = -0,74, p < 0,001$ ). Насупрот томе за вредност *THR* измерену током целокупног трајања експеримента није утврђена статистички значајна корелација. Код врсте *P. abies* уочена је умерена позитивна корелација између садржаја влаге и укупно ослобођене топлоте (*THR*) за целокупно трајање експеримента ( $\rho = 0,58, p < 0,001$ ), а за *THR* током пламеног сагоревања није утврђена значајна повезаност са садржајем влаге.

За обе четинарске врсте није утврђена статистички значајна корелација између садржаја влаге у узорцима и просечне брзине губитка масе (*Average MLR*). Када је реч о максималној брзини губитка масе (*Peak MLR*), код врсте *P. abies* утврђена је слаба негативна корелација, али без статистичке значајности ( $\rho = -0,23, p > 0,05$ ), док код врсте *A. alba* није утврђена значајна повезаност ( $\rho \approx 0, p > 0,05$ ).

Поред анализе корелације параметара запаљивости са садржајем влаге, спроведена је и анализа међусобних корелација између самих параметара запаљивости. Код врсте *A. alba*, време паљења (*TTI*) показује веома јаку негативну корелацију са максималном топлотном снагом (*PHRR*:  $\rho = -0,82, p < 0,001$ ) и просечном топлотном снагом (*Mean HRR*:  $\rho = -0,81, p < 0,001$ ). Насупрот томе, код врсте *P. abies* утврђена је слаба (*PHRR*:  $\rho = -0,39, p < 0,05$ ) и умерено негативна корелација (*Mean HRR*:  $\rho = -0,58,$

$p < 0,001$ ) за исте параметре. Ови налази указују на то да је код врсте *A. alba* краће време паљења повезано са већим вредностима интензитета сагоревања, док је тај однос слабије изражен код врсте *P. abies*.

Када је реч о односу између времена паљења (*TTI*) и средње ефективне топлотне моћи (*AEHC*), код обе четинарске врсте утврђена је висока негативна корелација (*A. alba*:  $\rho = -0,77, p < 0,001$ ; *P. abies*:  $\rho = -0,63, p < 0,001$ ). Ови резултати указују на то да узорци који се брже запале имају тенденцију да ослобађају већу количину енергије по јединици масе током пламеног сагоревања, што је доследно присутно код обе врсте.

Време паљења (*TTI*) показује значајну повезаност са вредностима укупно ослобођене топлоте (*THR*) током фазе пламеног сагоревања код обе анализиране врсте. Код врсте *A. alba* утврђена је висока негативна корелација ( $\rho = -0,74, p < 0,001$ ), док је код врсте *P. abies* тај однос умерено негативан ( $\rho = -0,51, p < 0,01$ ). Ово указује да краће време паљења често доводи до интензивнијег ослобађања топлоте у пламеној фази сагоревања. Додатно, код врсте *P. abies* утврђена је умерена позитивна корелација између *TTI* и укупно ослобођене топлоте током целокупног трајања експеримента ( $\rho = 0,59, p < 0,001$ ), што може указивати на то да узорци ове врсте, са дужим временом паљења спорије сагоревају, али да током дужег периода могу ослободити већу количину топлоте.

Слаба, али статистички значајна негативна корелација утврђена је између времена паљења (*TTI*) и максималне брзине губитка масе (*Peak MLR*) код обе врсте. Код *A. alba* вредност корелације износи  $\rho = -0,34 (p < 0,05)$ , а код *P. abies*  $\rho = -0,28 (p < 0,05)$ . Ови резултати указују да узорци који се брже запале имају благу тенденцију да масу губе брже и интензивније.

Код обе четинарске врсте утврђена је веома јака позитивна корелација између максималне (*PHRR*) и просечне топлотне снаге (*Mean HRR*) (*A. alba*:  $\rho = 0,89, p < 0,001$ ; *P. abies*:  $\rho = 0,88, p < 0,001$ ), што указује да узорци који постижу максималну топлотну снагу током сагоревања обично имају и већу *Mean HRR*.

Поред тога, код врсте *A. alba* уочена је веома јака позитивна корелација између максималне топлотне снаге (*PHRR*) и средње ефективне топлотне моћи (*AEHC*:  $\rho = 0,91, p < 0,001$ ), што указује на то да виши интензитет сагоревања прати и већу термичку ефикасност сагоревања по јединици масе. За врсту *P. abies*, утврђена је умерена позитивна корелација ( $\rho = 0,55, p < 0,001$ ).

Такође, за обе врсте утврђена је значајна позитивна корелација између просечне топлотне снаге (*Mean HRR*) и средње ефективне топлотне моћи (*AEHC*) (*A. alba*:  $\rho = 0,73,$

$p < 0,001$ ; *P. abies*:  $\rho = 0,74$ ,  $p < 0,001$ ), што потврђује да узорци са вишим вредностима топлотне снаге имају тенденцију да уједно ослобађају више енергије по јединици масе.

Поред тога, код врсте *P. abies* утврђене су слабе, али статистички значајне негативне корелације: између средње ефективне топлотне моћи (*AEHC*) и просечне брзине губитка масе (*Average MLR*) ( $\rho = -0,38$ ,  $p < 0,05$ ), као и између просечне и максималне брзине губитка масе (*Average MLR* и *Peak MLR*) ( $\rho = -0,34$ ,  $p < 0,05$ ). Значајни корелациони односи нису уочени код врсте *A. alba*.

Када је реч о вредностима укупно ослобођене топлоте (*THR*) за период пламеног сагоревања, код врсте *A. alba* утврђена је веома јака позитивна корелација са просечном топлотном снагом (*Mean HRR*:  $\rho = 0,82$ ,  $p < 0,001$ ), јака позитивна корелација са максималном топлотном снагом (*PHRR*:  $\rho = 0,77$ ,  $p < 0,001$ ), као и умерена позитивна корелација са средњом ефективном топлотном моћи (*AEHC*:  $\rho = 0,68$ ,  $p < 0,001$ ).

Код врсте *P. abies*, вредности укупно ослобођене топлоте (*THR*) током периода пламеног сагоревања показују умерену позитивну корелацију са максималном брзином губитка масе (*Peak MLR*:  $\rho = 0,44$ ,  $p < 0,01$ ), што указује да узорци који брже губе масу ослобађају и већу количину топлоте у фази пламеног сагоревања.

Укупно ослобођена топлота (*THR*) за цео период трајања експеримента показала је слабу, али статистички значајну негативну корелацију са просечном брзином губитка масе (*Average MLR*) код врсте *A. alba* ( $\rho = -0,37$ ,  $p < 0,05$ ) и са средњом ефективном топлотном моћи (*AEHC*) код врсте *P. abies* ( $\rho = -0,39$ ,  $p < 0,05$ ). Поред тога, код врсте *P. abies* уочена је умерена негативна корелација са просечном топлотном снагом (*Mean HRR*:  $\rho = -0,42$ ,  $p < 0,05$ ), што указује на то да више вредности просечне топлотне снаге могу бити праћене мањом укупно ослобођеном топлотом током целог периода трајања експеримента.

### 3.3.3. Резултати анализе главних компоненти

Садржај воде и топлотни флуks дефинисани су као независне променљиве (енгл. *explanatory variables*), чије се варијације користе за објашњење разлика у параметрима запаљивости код четинарских врста *A. alba* и *P. abies*. На слици 3.10 приказан је биplot анализе главних компоненти (*PCA*), при чему прве две главне димензије објашњавају 67,5% и 62% укупне варијабилности у скупу података. Векторска оптерећења анализираних променљивих, дата у табели 3.5, указују на приближно исти правац и интензитет већине вектора у обе димензије, при чему се одступања у правцу и

интензитету вектора уочавају код параметара брзина губитка масе (*MLR*) и укупно ослобођене топлоте (*THR*), што указује на њихову специфичну улогу у варијацијама узорака.

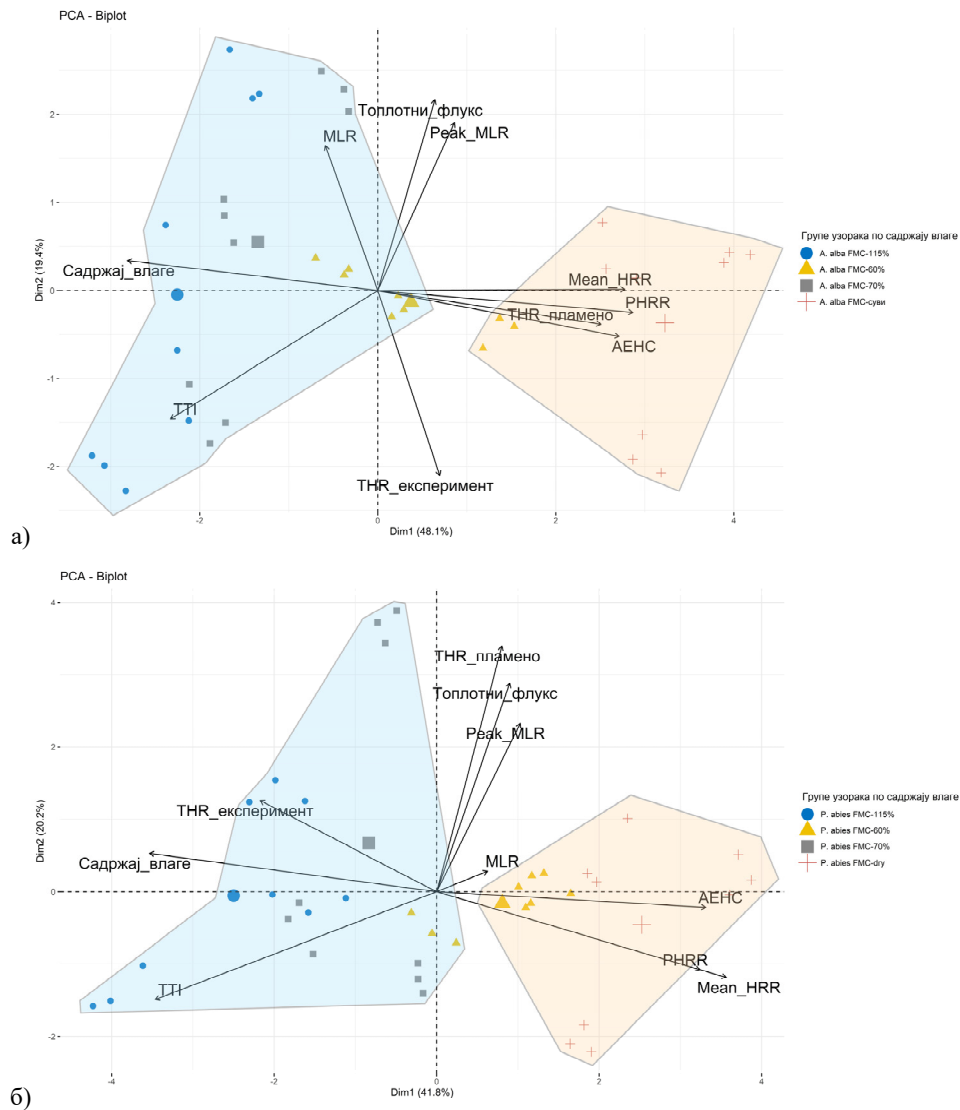
**Табела 3.5.** Векторска оптерећења анализираних варијабли према димензијама *PC1* и *PC2*

Варијабле	<i>A. alba</i>		<i>P. abies</i>	
	<i>PC1</i>	<i>PC2</i>	<i>PC1</i>	<i>PC2</i>
Садржај влаге	-0,42	0,08	-0,43	0,09
Топлотни флуks	0,10	0,51	0,11	0,51
<i>TTI</i>	-0,35	-0,34	-0,43	-0,26
<i>PHRR</i>	0,43	-0,06	0,40	-0,19
Mean <i>HRR</i>	0,41	0,00	0,44	-0,21
<i>AEHC</i>	0,40	-0,12	0,41	-0,04
<i>MLR</i>	-0,09	0,39	0,08	0,05
Peak <i>MLR</i>	0,13	0,45	0,13	0,41
<i>THR</i> - период пламеног сагоревања	0,37	-0,09	0,10	0,60
<i>THR</i> – цео период трајања експеримента	0,10	-0,49	-0,27	0,22

На *PCA* биplotовима је уочљиво јасно раздвајање узорака дуж прве главне димензије (*PC1*) за обе анализираних врсте. У позитивном смеру *PC1* доминирају високе вредности просечне топлотне снаге (*Mean HRR*), максималне топлотне снаге (*PHRR*), средње ефективне топлотне моћи (*AEHC*), као и укупно ослобођене топлоте (*THR*) током периода пламеног сагоревања. Насупрот томе, негативни смер *PC1* обележавају више вредности садржаја влаге (*FMC*) и времена паљења (*TTI*), што важи за обе анализираних врсте.

Суви узорци позиционирани су у простору виших вредности прве главне димензије (*PC1*), коју карактеришу веће вредности просечне топлотне снаге (*Mean HRR*), максималне топлотне снаге (*PHRR*) и средње ефективне топлотне моћи (*AEHC*), уз истовремено ниже вредности садржаја влаге и времена паљења (*TTI*). Насупрот њима, узорци са већим садржајем влаге налазе се у простору негативних вредности *PC1*, који се одликују нижим вредностима наведених параметара запаљивости, уз истовремено више вредности садржаја влаге и времена паљења (*TTI*).

Поред *PCA* анализе, извршена је и *K*-средишња кластеризација. Резултати кластер анализе потврдили су оно што је *PCA* анализа показала, односно да постоји груписање узорака на основу садржаја влаге. Код обе врсте четинара, један кластер садржи суве узорке и узорке са садржајем влаге од 60%, док други кластер обухвата узорке са вишим садржајем влаге (70% и 115%).



Слика 3.10. Биplot PCA анализе за параметре запаљивости у односу на различите топлотне флуksеве и садржај влаге за узорке (а) *A. alba* и (б) *P. abies*

### 3.4. Дискусија

Прелаз са површинских пожара на пожаре крошњи зависи од карактеристике шумске биомасе, топографије терена и временских услова [108]. Тип и врста шумске вегетације, заједно са структуром и обликом крошње, представљају кључне карактеристике биомасе које одређују њену улогу у динамици пожара [68]. Две анализиране врсте у овом истраживању (*A. alba* и *P. abies*) имају специфичан профил крошње чије доње гране готово додирују тло. Ова карактеристика их чини нарочито подложним паљењу услед приближавања и развоја површинског шумског пожара. Са повећаним размаком између основе крошње и тла, тј. са већом вредношћу висине основе

крошње, вероватноћа преласка пожара на крошње је мања [108], [109]. Ово носи са собом још једну важну чињеницу. У случајевима где је основа крошње висока, прелазак са површинских пожара на пожаре крошњи обично се одвија вертикалним путем, при чему гране служе као мост за пренос пожара, при чему је конвекција доминантан механизам преноса топлоте [68], [69], [110]. Супротно томе, код врста са веома ниском висином основе крошње, доминантан механизам преноса топлоте је зрачење. Овај образац је потврђен у радовима *Safdari*-а и сарадника [111]–[113], који указују на значај зрачења у условима блиског контакта вегетације са извором топлоте. За време шумских пожара, вредности емитованог топлотног зрачења могу се кретати ураспону од 50 до 250 kW/m<sup>2</sup>, при чему више вредности припадају потпуно развијеним пожарима крошњи, што није анализирано у овом истраживању [28], [114], [115].

У овом истраживању, експерименти су спроведени на калориметру за одређивање топлотне снаге, који је претходно калибрисан на три унапред дефинисана нивоа топлотног флукса, и то за 50, 60 и 70 kW/m<sup>2</sup>. Ови нивои топлотног флукса приближни су стварним условима зрачења којима је вегетација изложена у току шумских пожара, посебно код врста са ниском крошњом, где зрачење представља доминантан механизам преноса топлоте. Према доступној литератури, већина досадашњих студија спроведена је са топлотним флуksom од 50 kW/m<sup>2</sup> или нижим, док су истраживања при вишим вредностима, као што су 60 и 70 kW/m<sup>2</sup>, ређа, што овом истраживању даје додатну експерименталну вредност и научни значај.

На почетку сваког експеримента, у фази пре паљења, узорак се излаже топлотном флуксу, где долази до термичке деградације и ослобађања испарљивих једињења. Применом варничног упаљача и након достизања доње границе запаљивости волатила, узорци се пале, при чему пламен захвата целокупну површину узорка. Конструкција носача узорка омогућава константан доток кисеоника у зону сагоревања, где се меша са волатилима. Време паљења узорака директно је пропорционално времену потребном да испарљива једињења достигну своју температуру паљења током процеса сагоревања. Поред тога, водена пара која настаје у току сагоревања додатно дилутира концентрацију волатила у зони сагоревања, што може утицати на време паљења [103].

Добијени резултати овог истраживања су, како се и очекивало, показали да повећање топлотног флукса доводи до смањења времена паљења. Ово запажање је истоветно за обе четинарске врсте. За узорке са садржајем влаге од 115%, врста *P. abies* је у поређењу са *A. alba* показала краће време паљења на свим нивоима топлотног флукса, осим при 70 kW/m<sup>2</sup>.

Терпени су једињења која се често доводе у везу са запаљивошћу шумске вегетације, због ниске тачке паљења, лаке испарљивости и високе енергетске вредности [30], [116], [117]. Према резултатима *Zamponi* и сарадника, врста *P. abies* има већи удео појединих монотерпена, као што су  $\alpha$ - и  $\beta$ - пинен, у поређењу са *A. alba*, што може делимично објаснити брже паљење код свежих узорака *P. abies* [118]. Међутим, овај тренд није примећен код нижих вредности садржаја воде код обе врсте. Могуће објашњење за ове супротстављене резултате је да је током процеса сушења, у фази припреме узорака, део испарљивих терпена неконтролисано и неравномерно испаравао из узорака. Због тога, резултате за узорке са нижим вредностима садржаја воде треба тумачити са опрезом. У природним условима, ниво садржаја воде је променљив и мења се у зависности од сезоне, што утиче на количину терпена у шумској биомаси. Ова појава већ је проучена и потврђена у шумама Канаде и САД-а [108].

Према добијеним резултатима, на свим нивоима топлотног флукса уочена је снажна позитивна корелација између времена паљења (*TTI*) и садржаја воде у узорцима. Сличну везу потврдили су *McAllister* и сарадници, који су установили да садржај воде објашњава између 74% и 80% варијабилности у времену паљења свеже шумске вегетације, али су такође нагласили да хемијски састав горивог материјала има значајан утицај на процес иницирања паљења биомасе [28]. Са друге стране, рад *Cruz*-а и сарадника показује да паљење делова вегетације крошњи (листови и гране) изазваних површинским пожарима, може наступити и при високим вредностима садржаја воде (80-160%), што указује на то да топлотни утицај површинског пожара може умањити утицај воде у горивом материјалу на процес паљења [79].

У тренутку паљења, пламен се шири преко узорака, што доводи до повећања топлотне снаге (*HRR*), све до достизања максималне топлотне снаге (*PHRR*). Након тога, у фази тињања, топлотна снага опада заједно са смањењем масе узорка. Смањењем садржаја воде у узорцима скраћује се време потребно за достизање максималне топлотне снаге. Тренд опадања вредности максималне топлотне снаге са повећањем садржаја воде у узорцима био је јасно уочљив и конзистентан за обе тестиране четинарске врсте и за сва три нивоа топлотног флукса. Ово је и очекивано, с обзиром на то да се са порастом воде успорава се процес загревања и смањује се енергетску ефикасност сагоревања. При већој влажности, релативан удео суве, гориве материје у укупној маси узорака је мањи, што додатно утиче на смањење интензитета ослобођене топлоте.

Садржај влаге директно утиче на топлотну снагу ( $HRR$ ) и време паљења ( $TTI$ ) код обе четинарске врсте. Са повећањем садржаја влаге, вредност максималне топлотне снаге ( $PHRR$ ) показује негативну корелацију. Резултати *Madrigal*-а и сарадника указују да је време паљења ( $TTI$ ) при топлотном флуксу од  $50 \text{ kW/m}^2$  код неких представника породице *Pinaceae* било краће у поређењу са вредностима добијеним у овом истраживању [119]. Супротно њиховим резултатима, у овом истраживању утврђена је значајна разлика у  $TTI$  вредностима између свежих и сувих узорака код обе испитиване четинарске врсте.

Супротно очекивањима, обе четинарске врсте из суве групе узорака показале су значајно ниже вредности максималне топлотне снаге ( $PHRR$ ) при топлотном флуксу од  $70 \text{ kW/m}^2$ , у поређењу са осталим нивоима топлотног флукса. Један од могућих разлога за овакав резултат је изузетно брза термичка деградација биомасе на овом топлотном флуксу, где се испарљива једињења ослобађају доста раније и интензивније. У таквим условима, тренутак позиционирања варничног упаљача изнад узорке постаје критичан моменат, јер може доћи до паљења у фази када је већина гасовитих једињења већ испарила. Ово доводи до тога да се фаза пре паљења и фаза сагоревања одвијају готово истовремено на већим нивоима топлотног флукса, што смањује временски простор за потпуну развојну фазу пламена и достизања максималне топлотне снаге ( $PHRR$ ). Поред тога, краћи прелазак између фазе сагоревања и фазе тињања код сувих узорака додатно доприносе смањењу вредности топлотне снаге. Ови резултати указују на значајну осетљивост експерименталног поступка на услове паљења, посебно при високим нивоима топлотног флукса.

Истраживање *Madrigal*-а и сарадника, спроведено у сличним експерименталним условима, показало је да су резултати максималне топлотне снаге ( $PHRR$ ) за четинарске врсте приближне резултатима добијеним у овом истраживању ( $PHRR$  за *A. alba* =  $184 \pm 5 \text{ kW/m}^2$ ;  $PHRR$  за *P. abies* =  $120 \pm 10 \text{ kW/m}^2$ ) [101]. Супротно томе, резултати *Madrigal* и сарадници су утврдили знатно више  $PHRR$  вредности за врсте из породице *Pinaceae* при топлотним флуксевима од 50, 60 и  $70 \text{ kW/m}^2$ , у односу на резултате овог истраживања [119]. Један од разлога за уочене разлике може бити почетна маса узорака. У овом истраживању маса узорака је варирала у зависности од садржаја влаге, јер се са смањењем влаге смањивала и укупна маса, што је неминовно утицало на вредности максималне топлотне снаге. Слично запажање потврђују и *Etlinger* и *Beall*, који указују да не само маса већ и геометрија и анатомске карактеристике врста могу значајно утицати на вредности топлотне снаге, посебно при нижим садржајима влаге [120].

Међутим, када је реч о утицају масе узорка на вредност максималне топлотне снаге (*PHRR*), *Weise* и сарадници указују на значај разматрања термичког понашања биомасе, на начин да ли се она може сматрати термички танком<sup>5</sup> (енгл. *thermally thin*) или термички дебелом<sup>6</sup> у контексту сагоревања (енгл. *thermally thick*) [121]. Са друге стране, резултати *El Houssami*-а и сарадника показују да насипна густина (енгл. *bulk density*) значајно утиче на вредност *PHRR*. Већа насипна густина доводи до стабилнијег и дуготрајнијег сагоревања, док мања густина резултира бржим и мање одрживим процесом сагоревања. Ово је повезано са променом у односу површине и запремине узорка, као и различитим обрасцима преноса топлоте и дифузије кисеоника кроз порозну структуру [122]. У овом истраживању, облик криве топлотне снаге има изразит пад одмах након достизања максималне топлотне снаге (*PHRR*), што указује на сагоревање карактеристично за узорке мање насипне густине, што је вероватно допринело њеним нижим вредностима у односу на резултате других аутора. Код свежих узорка, значајан део воде испари у фази пре паљења, због чега је стварна маса која учествује у фази пламеног сагоревања знатно смањена. Након тога, у фази тињања, где углавном сагорева преостали угљеник, вредности брзине губитка масе (*MLR*) се додатно смањују.

Слична запажања наводе и *McAllister* и сарадници, који су показали да код четинарске врсте *P. contorta* не постоји значајна повезаност између садржаја влаге и просечне брзине губитка масе (*Average MLR*), што је у складу са резултатима добијеним у овом истраживању. Са друге стране, код врсте *P. menziesii*, утврђена је статистичка значајна повезаност, што указује да ефекат и утицај садржаја влаге може бити специфичан по врстама [123].

Поред тога, резултати нумеричке симулације *Yashwanth*-а и сарадника потврђују да се процеси испаравања и пиролизе одвијају у различитим фазама и да је садржај влаге кључан фактор у формирању температурног профила и стварању запаљиве гасне фазе изнад површине узорка [124]. Такође, *Pickett* и сарадници наводе да у тренутку паљења у свежим листовима може остати и до 60% почетног садржаја влаге, што указује на сложеност у одређивању стварне масе горивог материјала у фази сагоревања [95].

---

<sup>5</sup> Термички танки материјали (енгл. *thermally thin*) су они код којих током излагања топлотном флуксу температура брзо продире кроз целокупну дебљину узорка, што резултира готово истовременим загревањем и термичким одзивом кроз цео узорак.

<sup>6</sup> Термички дебели материјали (енгл. *thermally thick*) имају такву структуру да се током кратког временског периода загревају само површински слојеви, док унутрашњост остаје термички инертна, што доводи до сагоревања ограниченог на површину узорка.

Поред тога, *El Houssami* и сарадници утврдили су да се вредности максималне брзине губитка масе (*Peak MLR*) повећавају са смањењем насипне густине, што додатно повезује структуралне карактеристике узорака са вредностима *PHRR*. Ови резултати потврђују да комбинација физичких параметара, као што су маса, насипна густина и садржај влаге, представљају кључне факторе који условљавају термичко понашање биомасе током експерименталног сагоревања [122].

Обе четинарске врсте показале су статистички значајне вредности средње ефективне топлотне моћи (*AEHC*) у зависности од фиксног топлотног флуksа и различитих нивоа садржаја влаге. Са смањењем влаге у узорцима, без обзира на примењени топлотни флуks, уочен је пораст вредности *AEHC*. Ови налази су у складу са резултатима *Babrauskas*-а, који наводи да већи садржај влаге значајно умањује ефективну топлотну моћ вегетативног материјала [125].

Поређењем добијених резултата са подацима *Madrigal*-а и сарадника, може се уочити да су вредности *AEHC* код сувих експерименталних јединица врста *A. alba* (13,05–13,40 MJ/kg) и *P. abies* (10,30–13,66 MJ/kg) сличне вредностима које су аутори добили за врсте са ниским садржајем влаге. Насупрот томе, код узорака са већим садржајем влаге, добијене *AEHC* вредности у овом истраживању биле су знатно ниже (5,15–6,91 MJ/kg за *A. alba*; 6,16–10,60 MJ/kg за *P. abies*) у односу на свеже узорке у раду *Madrigal*-а и сарадника [119]. Ова разлика се може објаснити тиме да, осим садржаја влаге, на вредности средње ефективне топлотне моћи (*AEHC*) утичу и други фактори, попут топлотног утицаја и порозности узорака [126].

Разлике у *AEHC* вредностима између узорака са високим и ниским садржајем влаге у овом истраживању су сличне онима који су утврдили *Weise* и сарадници, као и *Dibble* и сарадници, чиме се поткрепљује релевантност добијених резултата у ширем контексту испитивања запаљивости свеже вегетације [121], [127].

Када је реч о вредностима укупно ослобођене топлоте (*THR*), резултати добијени за обе четинарске врсте у овом истраживању били су значајно нижи у односу на резултате наведене у радовима *Madrigal*-а и сарадника, као и *Dibble*-а и сарадника [41], [127]. Ове разлике могу се приписати различитој почетној маси и структури анализираних узорака, али и количини преостале масе након паљења која учествује у сагоревању. Како истичу *White* и сарадници, маса гориве материје и њен садржај влаге су критични фактори за постизање већих вредности укупно ослобођене топлоте (*THR*), као и максималне топлотне снаге (*PHRR*) [128].

### 3.5. Закључна разматрања

У овом истраживању експериментално су одређене карактеристике запаљивости терминалних делова грана за две доминантне четинарске врсте (*A. alba* и *P. abies*), при различитим садржајима влаге и топлотним флуксевима од 50, 60 и 70 kW/m<sup>2</sup>. Истраживање је спроведено коришћењем адаптиране конфигурације калориметра за одређивање топлотне снаге, при чему су анализирани узорци постављени на порозни правоугаони носач, специјално дизајниран да омогући репрезентативно позиционирање узорка, у складу са реалним теренским условима. На такав начин минимизирају се ефекти самог носача узорка на параметре запаљивости, чиме се доприноси тачнијем и репрезентативнијем одређивању карактеристика запаљивости анализираних врста.

За разлику од конвенционалног приступа где се тестира само лисната зелена маса, у овом истраживању су одређене карактеристике запаљивости целих терминалних делова грана крошњи. Овакав приступ омогућава добијање поузданијих и свеобухватнијих информација о својствима запаљивости анализираних врста.

Утврђена је јасна зависност између садржаја влаге и времена паљења (*TTI*): смањење влаге доводи до скраћеног времена паљења, док повећање топлотног флукса додатно утиче на убрзање процеса паљења. Добијене *TTI* вредности биле су веће од оних наведених у литератури где је тестирана запаљивост само лиснате масе четинара.

Уочено је да се вредности максималне топлотне снаге (*PHRR*) значајно разликују у зависности од садржаја влаге, при чему су највише вредности регистроване код узорака са нижом влагом, нарочито при топлотним флуксевима од 50 и 60 kW/m<sup>2</sup>. Недостатак очекиваног пораста вредности *PHRR* при флуксу од 70 kW/m<sup>2</sup> може се објаснити релативно малом количином преостале гориве масе и веома брзом термичком деградацијом, што је ограничило развој стабилнијег пламеног сагоревања. Са друге стране, просечна топлотна снага (*Mean HRR*) показује умеренију осетљивост на садржај влаге, али и она бележи пад вредности код узорака са већим садржајем влаге, што је у складу са чињеницом да влага смањује термичку ефикасност сагоревања.

Није уочен јасан тренд утицаја садржаја влаге и топлотног флукса на вредности брзине губитка масе (*MLR*). Након иницијалног паљења, брзина губитка масе расте до тренутка достизања максималне топлотне снаге, након чега опада у фази тињања.

Средња ефективна топлотна моћ (*AEHC*) показала је корелацију са садржајем влаге, али је она била слабија при вишим топлотним флуксевима. Посебно при 70 kW/m<sup>2</sup>,

термичка разградња и ослобађање испарљивих једињења били су толико брзи и интензивни, да је прелаз из фазе пре паљења у пламено сагоревање био готово тренутан.

Ниже вредности укупно ослобођене топлоте (*THR*) у поређењу са литературом, могу се објаснити малом количином преостале гориве масе након испаравања влаге и брзе пиролизе, нарочито при већим топлотним флуксевима. Ово указује да на вредности *THR* значајно утичу садржај влаге, структура и маса узорка.

Иако нису били предмет овог дела истраживања, на запаљивост шумске вегетације могу значајно утицати њене морфолошке и хемијске особине, које је детаљно је разматрано у оквиру петог поглавља ове докторске дисертације.

## 4. ЕФЕКАТ ТОПЛОТНОГ ФЛУКСА И ТИПА ПАЉЕЊА НА САГОРЕВАЊЕ СВЕЖИХ ГРАНЧИЦА ЦРНОГ БОРА (*Pinus nigra*)

### 4.1. Општи део

Процес сагоревања подразумева хемијску реакција гориве материје и кисеоника из ваздуха, што доводи до брзог ослобађања енергије у виду топлоте и резултира генерисањем продуката сагоревања [129]. Услед излагања топлотном зрачењу, температура површине узорка расте, при чему долази до термичког распада материје и деволатилизације. Са даљим порастом температуре процес деволатилизације се интензивира. Волатили почињу да се мешају са околним ваздухом, при чему се достиже њихова доња граница запаљивости. У том тренутку, насталу гасовиту смешу је могуће запалити неким од извора паљења (на пример искром или пилот пламеном) [25].

Динамика понашања и ширења шумских пожара резултат је интеракције између услова животне средине и процеса сагоревања шумске биомасе. Услови животне средине обухватају атмосферске факторе, конфигурацију терена, врсте и стање горивих материја.

Један од важних фактора који могу утицати на брзину ширења пожара су јаки ветрови и олује. Ослобођена топлота током пожара може изазвати локалне циркулације и узлазне струје, подижући дим и жар навише. Ово представља потенцијалну опасност, која може довести до иницирања нових пожара или формирања пирокумулусних (енгл. *pyrocumulus clouds*) или пирокумулонимбусних облака (енгл. *pyrocumulonimbus clouds*), који могу додатно променити доминантне временске услове. Ширење пламених фронтова могу узроковати ветрови који настају услед конвективног преноса топлоте и директног контакта са пламеном [26].

Пренос топлоте у шумским пожарима доминантно се одвија конвекцијом и зрачењем. Преовлађујући механизам преноса топлоте зависи од фактора као што су услови ветра, нагиб терена, врста и тип вегетације, као и удаљеност од пожара. Ови фактори не само да утичу на ниво преноса топлоте, већ и на временско трајање изложености топлоти [130].

Ако минимални топлотни флукс потребан за паљење на површини остане константан, тачка паљења се може дефинисати као минимална температура површине при којој је проток испарљивих једињења (волатила) довољан како би се одржао пламен на површини узорка.

Да би се постигло пламено сагоревање шумске биомасе, неопходно је разумети услове који доводе до паљења, при чему се разликују два типа паљења:

- **пилотирано паљење:** у запаљивој смеси испарљивих једињења и ваздуха, паљење се иницира помоћу иницијатора паљења (енгл. *pilot*), спољашњег извора, као што је електрична варница, независни пламен или жар, и
- **спонтано паљење:** при дуготрајном излагању спољашњем извору топлоте, пламен се спонтано развија након што се у зони сагоревања формира довољна концентрација запаљиве смеше испарљивих једињења и ваздуха, без иницијатора паљења. Спонтано паљење захтева вишу температуру за паљење гасне фазе у поређењу са пилотираним паљењем [131].

*Fernandez-Pello* је анализирао граничне вредности и критеријуме за паљење шумске вегетације, са посебним нагласком на механизме пилотираног и спонтаног паљења [132]. Такође, прегледом литературе утврђено је да су истраживања запаљивости шумске вегетације углавном била усмерена на пламено сагоревање, док је недовољна пажња посвећена процесима сагоревањима без пламена (енгл. *non-flaming combustion processes*), као што су тињање и жарење [45].

Да би се разумела динамика пилотираног паљења, *Mindykowski* и сарадници су представили како шумска вегетација реагује на паљење под утицајем различитих вредности топлотног флуksа. Установљено је да је вредност времена паљења линеарно повезана са топлотним флуksом. У истраживању је такође истакнут значај фракције запремине биомасе у динамици паљења, као и одређивање критичног топлотног флуksа који је неопходан за иницирање пламеног сагоревања [133]. *McAllister* и сарадници истраживали су сагоревање свеже шумске биомасе при пилотираном паљењу, при чему су узимали у обзир њихов садржај влаге и хемијски састав током вегетационе сезоне. Циљ истраживања био је да се испита применљивост постојећих корелација за предвиђање паљења свеже шумске биомасе искључиво на основу садржаја влаге.

*Tihay-Felicelli* и сарадници спровели су истраживање спонтаног паљења гранчица, користећи конусни калориметар, како би утврдили како пречник гранчица утиче на време паљења, динамику сагоревања и карактеристике процеса сагоревања при излагању одређеним вредностима топлотног флуksа [134]. *Reszka* и сарадници анализирали су карактеристике запаљивости свезих и сувих иглица врсте *Pinus radiata* у условима спонтаног паљења. Резултати су показали да свеже иглице имају дуже време паљења за разлику од сувих, али су утврдили да се критични топлотни флуks за њихово паљење не разликује значајно. Закључци из овог истраживања допринели су бољем

разумевању природних процеса паљења свежих и сувих врста, указујући на важност садржаја воде и пигментних промена у току процеса сушења [135].

*Rein* истиче важну улогу тињајућих шумских пожара, јер могу дуго трајати и проширити се на веће површине шуме. Тињајући пожари представљају значајан извор емисије угљен диоксида и других загађујућих материја у атмосферу. Осим тога, овај тип сагоревања може се лако активирати и прерасти у пламене пожаре на неочекиваним локацијама и у неочекиваним временима. Иако мање визуелно упадљив од пламених шумских пожара, овај тип шумских пожара значајно доприноси уништавању шумске биомасе и деградацији шумског тла [136].

*Parsons* и сарадници објашњавају доминантне факторе који утичу на прелазак тињајућег на пламено сагоревање у шумским пожарима. Посебна пажња посвећена је дотоку кисеоника и генерисању топлоте. Током тињајућег сагоревања, када је концентрација волатила унутар граница запаљивости и када се генерише довољна количина топлоте, може доћи до покретања пламеног сагоревања, са или без иницијатора паљења (пилотирано паљење) [34].

Поред пилотираног и спонтаног паљења, још један механизам који може изазвати шумске пожаре је настанак малих горућих честица (енгл. *Firebrands*). Горуће честице могу бити лако подигнуте у ваздух услед загрејаних узлазних ваздушних струја или јаких ветрова, а након што се спусте на шумско тло, могу иницирати паљење површинског вегетативног материјала. *Rivera* и сарадници су истраживали карактеристике запаљивости шумске вегетације услед изложености горућим честицама. У раду је извршена анализа утицаја горућих честица у иницирању паљења различитих врста шумске вегетације, као и утицај садржаја воде на процес паљења. Истраживање указује на важност топлотног зрачења које честице преносе на подлогу, као и њихову величину и облик у одређивању времена паљења и интензитета горења [137].

Ако запаљива површина гориве материја буде изложена довољно високом топлотном флуксу без присуства извора пилотираног паљења, испарљива једињења могу бити подвргнута спонтаном паљењу. Ово се дешава када формирана смеша испарљивих једињења и ваздуха достигне границе запаљивости и довољно високу температуру. Спонтано паљење захтева већи топлотни флукс у поређењу са пилотираним паљењем, јер је потребна већа површинска температура како би се створила довољно загрејана струја испарљивих једињења неопходна за процес паљења [131].

Узимајући у обзир претходно наведено, циљ овог дела истраживања је био у процени утицај типа паљења на параметре запаљивости и састава продуката сагоревања

свежих терминалних делова грана црног бора (*Pinus nigra*) при излагању различитим вредностима топлотног флукса (50, 60 и 70 kW/m<sup>2</sup>).

## 4.2. Материјали и методе

### 4.2.1. Припрема узорака и процедура тестирања

Крајњи изданци грана крошњи четинарске врсте *Pinus nigra* сакупљени су из шума висоравни Власине, у Србији, у јулу 2023. године. Крајњи изданци грана су резани на приближно исте дужине, око  $13 \pm 0,5$  cm. Узорци су одмах након сакупљања паковани у херметички затвореним кесе, како би се минимизирали губици влаге пре тестирања.

За одређивање садржаја влаге узорака, контролна група од пет узорака је издвојена и сушена до константне тежине у комори за сушење на температури од 60 °C. Узорци су мерени аналитичком вагом Radwag (AS 60/220.R2, Пољска) пре и после сушења, како би се на основу масе свежих и осушених узорака, одредио ниво садржаја влаге, који је износио  $120 \pm 10\%$ .

Експерименти за одређивање карактеристика запаљивости спроведени су у Лабораторији за заштиту од пожара, на Факултету заштите на раду у Нишу, Универзитета у Нишу, Србија. Испитивања су реализована на експерименталној инсталацији чији је поступак рада детаљно описан у другом поглављу ове докторске дисертације.

За потребе овог истраживања, конусни грејач калориметра за одређивање топлотне снаге је калибрисан на три вредности топлотног флукса: 50, 60 и 70 kW/m<sup>2</sup>.

На слици 4.1 приказан је носач узорка заједно са узорком. Сви узорци су прилагођени тако да одговарају димензијама носача узорка.



Слика 4.1. Носач узорка са постављеним узорком врсте *P. nigra*

#### 4.2.2. Експериментални дизајн

Спроведен је потпуни факторијални експеримент који обухвата све могуће комбинације нивоа испитиваних фактора. Фактори и нивои приказани су у табели 4.1.

Табела 4.1. Фактори и нивои у експерименталном дизајну

Фактор	Јединица	Ниво 1	Ниво 2	Ниво 3
Топлотни флуks (енгл. <i>Heat flux (HF)</i> )	kW/m <sup>2</sup>	70	60	50
Тип паљења (енгл. <i>Ignition type</i> )	-	PI ON	PI OFF	
Четинарска врста	-	<i>P. nigra</i>	-	-

При реализацији експеримента примењена су два типа паљења. *Пилотирано паљење* (означено као *PI ON*) подразумева употребу варничног упаљача у експерименту, који омогућава брже иницирање и формирање пламене фазе након достизања доње границе запаљивости испарљивих једињења. На овај начин симулира се случај где је присутан „иницијатор“ паљења, попут варница, искри, малих горућих честица, итд. Супротно томе, непилотирано паљење (означено као *PI OFF*) односи се на ситуацију када варнични упаљач није коришћен у експерименту. У овом случају, паљење се иницира искључиво акумулираном енергијом из инцидентног топлотног флуksа. Уколико температура смеше испарљивих једињења и ваздуха достигне критичну вредност, долази до спонтаног паљења. На овај начин извршена су испитивања разлика у параметрима запаљивости и састава продуката сагоревања, при различитим механизмима паљења шумске вегетације.

За први експериментални фактор усвојен је топлотни флуks (Фактор А), са три нивоа: 50, 60 и 70 kW/m<sup>2</sup>. Други фактор је био тип паљења (Фактор Б), који је подељен на два нивоа, пилотирано (*PI ON*) и непилотирано паљење (*PI OFF*).

Експеримент је био заснован на 3×2 факторијалном дизајну, који обухвата све могуће комбинације нивоа фактора. Ово резултира са шест комбинација третмана. Свака комбинација третмана поновљена је најмање три пута. Експерименти су спроведени у контролисаном окружењу са константном температуром и влажношћу, како би се минимизирали спољашњи утицаји на резултате експеримента. У току сваког експеримента праћене су параметри запаљивости шумске вегетације (зависне променљиве) и то: време паљења (енгл. *Time to Ignition – TTI*), просечна топлотна снага (енгл. *Mean Heat Release Rate – Mean HRR*), максимална топлотна снага (енгл. *Peak Heat Release Rate – PHRR*), максимална ефективна топлотна моћ (енгл. *Peak Effective Heat of*

*Combustion – Peak EHC*), брзина губитка масе (енгл. *Mass Loss Rate – MLR*) и укупна ослобођена топлота (енгл. *Total Heat Release - THR*).

Применом FTIR гасног анализатора, извршена је квалитативна и квантитативна анализа састава продуката сагоревања, за постављене услове експеримента. На основу библиотеке доступних гасова, идентификована су следећа једињења са значајним концентрацијама (такође зависне променљиве): водена пара ( $H_2O$ ), угљен-диоксид ( $CO_2$ ), угљен-моноксид ( $CO$ ), азот-моноксид ( $NO$ ), азот-диоксид ( $NO_2$ ), амонијак ( $NH_3$ ), метан ( $CH_4$ ) и етилен ( $C_2H_4$ ). Остала једињења из библиотеке нису идентификована или су била присутна испод детекционог лимита уређаја.

#### 4.2.3. Статистичка анализа

На основу постављеног циља истраживања, постављена је нулта хипотеза, која гласи: тип паљења и топлотни флуks немају значајан утицај на параметре запаљивости и састав продуката сагоревања, и не постоји међусобна интеракција ова два фактора.

Најпре је извршена провера подударности расподеле података са нормалном расподелом, коришћењем Колмогоров-Смирновог (енгл. *Kolmogorov-Smirnov*) и Шапиро-Вилковог (енгл. *Shapiro-Wilk*) теста. Резултати оба теста су показала да подаци прате нормалну дистрибуцију.

За поређење средњих вредности параметара запаљивости и састава продуката сагоревања (зависне променљиве) између два типа паљења (пилотирано и непилотирано) при одабраном нивоу топлотног флуksа, коришћен је *t*-тест за независне узорке (енгл. *independent samples t-test*). За анализу утицаја различитих комбинација нивоа топлотног флуksа и типа паљења на зависне променљиве, примењена је двофакторска анализа варијансе (енгл. *two-way ANOVA*). Овом анализом се такође пружа увид у међусобну интеракцију оба фактора, што омогућава свеобухватно разумевање њиховог утицаја на зависне променљиве.

Поред тога, за сваку зависну променљиву примењен је Тукијев *post-hoc* тест (енгл. *Tukey's post-hoc test*) ради утврђивања парова експерименталних услова (комбинације топлотног флуksа и типа паљења) између којих постоје значајне разлике.

За одређивање утицаја типа паљења на међузависност параметара запаљивости и продуката сагоревања на сваком нивоу топлотног флуksа примењена је анализа главних компоненти (енгл. *Principal Component Analysis*). PCA биplotови су генерисани како би се визуелизовало груписање експерименталних група узорака подвргнутих пилотираном

и непилотираном паљењу, чиме је омогућена лакша идентификација основних образаца и корелација између измерених варијабли и њиховог доприноса одређеној групи узорака.

За све статистичке тестове праг значајности ( $\alpha$ ) је постављен на 95%. Статистичка анализа је извршена коришћењем софтвера *R (RStudio IDE)*.

### 4.3. Резултати и дискусија

#### 4.3.1. *Интеракција топлотног флукса и типа паљења на параметре запаљивости*

У току експеримента уочене су четири различите фазе сагоревања: иницијална термичка реакција, предпаљење, пламено сагоревање и тињајуће сагоревање. У првој фази, непосредно након позиционирања узорка под конусни грејач, на површини се јављају локализоване термичке реакције у виду краткотрајних ужарених зона. Ова фаза временски се поклапа са фазом предгревања, током које долази до испаравања влаге и иницијалног издвајања волатила услед термичке деградације ћелијске структуре узорака. Фаза предпаљења представља транзитни период између предгревања и почетка стабилног горења. У овом интервалу долази до даље акумулације топлотне енергије, интензивније пиролизе и формирања запаљиве гасовите смеше у близини површине узорка. У зависности од термичких услова и концентрације гасовите смеше, паљење се може остварити спонтано, или у присуству спољашњег извора паљења. Фазу пламеног сагоревања карактерише одржив пламен који се формира на изложеној површини узорка. Пламен се шири и обухвата целокупну изложену површину узорка, сразмерно брзини ослобађања пиролизних гасова. Видљива зона пламена расте у зависности од интензитета топлотног флукса, а процес горења се наставља све док је концентрација волатила у границама запаљивости. Након гашења пламена наступа четврта фаза, фаза тињајућег сагоревања, коју карактерише споро сагоревање преосталог угљеничног материјала у условима смањеног дотока кисеоника, уз истовремено минималну продукцију дима, без пламена. Трајање и интензитет сваке од наведених фаза варирају у зависности од физичко-хемијских својстава узорка, примењеног топлотног флукса и садржаја влаге у биомаси.

У табели 4.2 приказани су добијени експериментални резултати, као и статистички налази *t*-теста за независне узорке и двофакторске ANOVA анализе. У случајевима када је *p*-вредност мања од 0,05, сматра се да постоји статистичка значајна разлика између резултата. Експоненти представљају резултате Тукијевог *post-hoc* теста. Тумачење резултата заснива се на томе да се средње вредности које не деле исто слово,

значајно разликују. Ознака *PI ON* односи се на резултате добијене применом пилотираног паљења, док *PI OFF* означава резултате добијене без употребе пилотираног паљења.

Међу свим комбинацијама експерименталних фактора и њихових међусобних интеракција, резултати двофакторске ANOVA анализе су показали у већини случајева статистички значајне резултате ( $p < 0,05$ ). Изузетак су резултати просечне брзине губитка масе (*Mean MLR*), за које није утврђена статистички значајна разлика услед промене нивоа топлотног флуksа ( $p > 0,05$ ).

За параметар време паљења (*TTI*), примена двофакторске ANOVA анализе није била могућа, јер при непилотираном паљењу на топлотним флуksевима од 50 и 60 kW/m<sup>2</sup> није дошло до формирања пламене фазе, па вредности за овај параметар нису утврђене. У табели су та поља означена као „н.д.“ (није дефинисано), и нису укључена у статистичку анализу. Са друге стране, статистичко поређење вредности времена паљења између пилотираног и непилотираног паљења спроведено је само за узорке анализирание на топлотном флуksу од 70 kW/m<sup>2</sup>, применом *t*-теста.

На топлотном флуksу од 50 kW/m<sup>2</sup>, резултати *t*-теста показали су статистички значајне разлике између пилотираног и непилотираног паљења за све параметре запаљивости ( $p < 0,05$ ). Супротно томе, *t*-тест није показао статистички значајне разлике у вредностима ниједног анализираниог параметра запаљивости за групу узорака изложених топлотном флуksу од 70 kW/m<sup>2</sup> ( $p > 0,05$ ). Такође, при флуksу од 60 kW/m<sup>2</sup>, разлике у просечној брзини губитка масе (*Mean MLR*) и укупно ослобођене топлоте (*THR*) нису биле статистички значајне ( $p > 0,05$ ), док су за остале параметре уочене значајне разлике ( $p < 0,05$ ).

**Табела 4.2.** Приказ експерименталних и статистичких резултата интеракције топлотног флукса и типа паљења на параметре запаљивости. Статистички значајни резултати су приказани подебљаним текстом ( $p < 0,05$ )

Топлотни флукс (Фактор А)	Тип паљења (Фактор Б)	Параметри запаљивости					
		TTI [s]	<i>t</i> -тест	Mean HRR [kW/m <sup>2</sup> ]	<i>t</i> -тест	PHRR [kW/m <sup>2</sup> ]	<i>t</i> -тест
			<i>p</i> -вредност		<i>p</i> -вредност		<i>p</i> -вредност
50 kW/m <sup>2</sup>	PI ON	114,14 ±17,8	-	176,26 ±15,1 <sup>A</sup>	<b>0,000</b>	229,76 ±16,5 <sup>A</sup>	<b>0,000</b>
	PI OFF	н.д. <sup>7</sup>		62,29 ±10,3 <sup>C</sup>		138,29 ±13,8 <sup>C</sup>	
60 kW/m <sup>2</sup>	PI ON	76,13 ±22,8	-	159,05 ±14 <sup>A</sup>	<b>0,000</b>	210,29 ±21,8 <sup>A</sup>	<b>0,001</b>
	PI OFF	н.д. <sup>8</sup>		68,61 ±13,2 <sup>C</sup>		141,17 ±12,3 <sup>BC</sup>	
70 kW/m <sup>2</sup>	PI ON	67,56 ±12,3	0,052	131,21 ±12,4 <sup>B</sup>	0,907	169,17 ±12,2 <sup>B</sup>	0,295
	PI OFF	83,83 ±12,2		131,05 ±21,6 <sup>B</sup>		156,68 ±23,7 <sup>BC</sup>	
<b>Резултати двофакторске ANOVA-е</b>		<b><i>p</i>-вредност</b>		<b><i>p</i>-вредност</b>		<b><i>p</i>-вредност</b>	
Топлотни флукс (Фактор А)		-		<b>0,018</b>		<b>0,012</b>	
Тип паљења (Фактор Б)		-		<b>0,000</b>		<b>0,000</b>	
Интеракција (А x Б)		-		<b>0,000</b>		<b>0,000</b>	

**Наставак табеле 6.2.**

Топлотни флукс (Фактор А)	Тип паљења (Фактор Б)	Параметри запаљивости					
		Mean MLR [g/s]	<i>t</i> -тест	THR [MJ/m <sup>2</sup> ]	<i>t</i> -тест	Peak EHC [MJ/kg]	<i>t</i> -тест
			<i>p</i> -вредност		<i>p</i> -вредност		<i>p</i> -вредност
50 kW/m <sup>2</sup>	PI ON	0,081 ±0,04 <sup>A</sup>	<b>0,011</b>	7,43 ±1,8 <sup>BC</sup>	<b>0,049</b>	36,11 ±16,5 <sup>BC</sup>	<b>0,022</b>
	PI OFF	0,02 ±0,005 <sup>C</sup>		11,53 ±2,4 <sup>A</sup>		63,04 ±8 <sup>A</sup>	
60 kW/m <sup>2</sup>	PI ON	0,064 ±0,04 <sup>AB</sup>	0,146	6,50 ±2 <sup>BC</sup>	0,150	28,70 ±16,2 <sup>C</sup>	<b>0,038</b>
	PI OFF	0,03 ±0,004 <sup>BC</sup>		9,26 ±1,5 <sup>AB</sup>		54,68 ±15 <sup>AB</sup>	
70 kW/m <sup>2</sup>	PI ON	0,05 ±0,01 <sup>ABC</sup>	0,533	7,34 ±1,2 <sup>BC</sup>	0,169	33,58 ±13,1 <sup>C</sup>	0,831
	PI OFF	0,05 ±0,02 <sup>ABC</sup>		5,97 ±1,7 <sup>C</sup>		38,01 ±7,4 <sup>BC</sup>	
<b>Резултати двофакторске ANOVA-е</b>		<b><i>p</i>-вредност</b>		<b><i>p</i>-вредност</b>		<b><i>p</i>-вредност</b>	
Топлотни флукс (Фактор А)		0,729		<b>0,001</b>		<b>0,021</b>	
Тип паљења (Фактор Б)		<b>0,000</b>		<b>0,002</b>		<b>0,000</b>	
Интеракција (А x Б)		<b>0,004</b>		<b>0,001</b>		<b>0,034</b>	

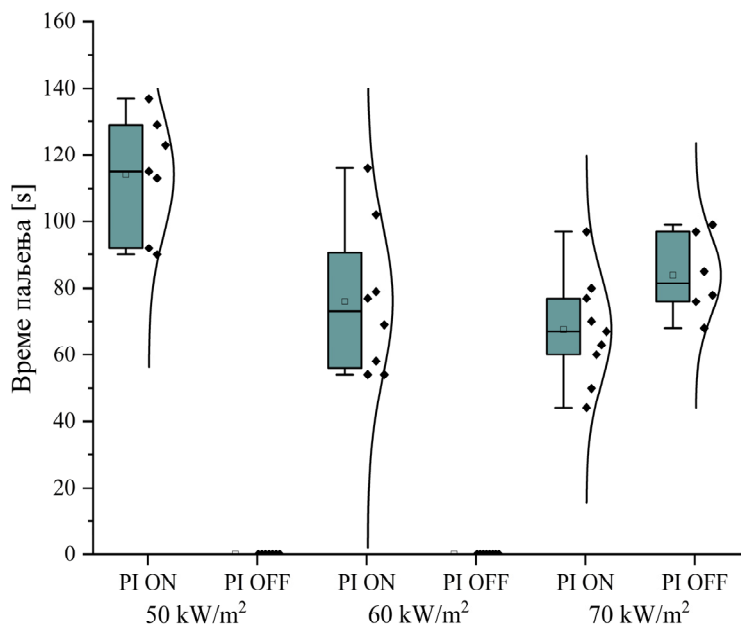
На слици 4.2 приказано је време паљења (*TTI*) при различитим нивоима топлотног флукса и за различите типове паљења. Резултати показују да је у случајевима када је коришћен варнични упаљач, дошло до паљења узорака на све три вредности топлотног флукса. Насупрот томе, када није примењен варнични упаљач, узорци се нису запалили при топлотним флуксевима од 50 и 60 kW/m<sup>2</sup>, већ је наступила само термичка деградација узорака без формирања пламене фазе. Ово може бити последица присуства влаге у узорцима, која се услед топлотног зрачења ослобађа у виду водене паре. Тако издвојена водена пара разблажује испарљива једињења у зони реакције, чиме се спречава достигање концентрација потребних за иницирање паљења.

Код пилотираног паљења, време паљења (*TTI*) износило је 114, 76 и 67 s за топлотне флуксе од 50, 60 и 70 kW/m<sup>2</sup>, респективно. Као што се очекивало, код ове врсте паљења, најкраће време забележено је при топлотном флуксу од 70 kW/m<sup>2</sup>, док је

<sup>7</sup> Није дошло до паљења узорка

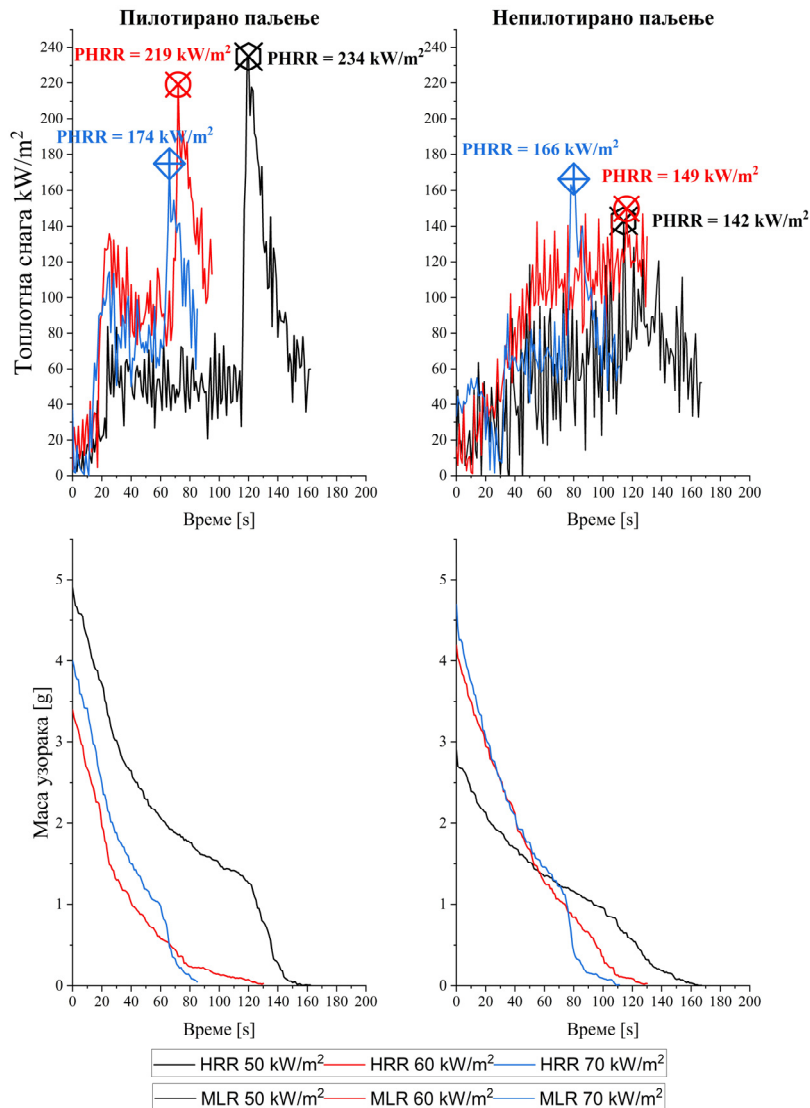
<sup>8</sup> Није дошло до паљења узорка

код експеримената у којима није примењен варнични упалаљач (непилотирано паљење), време паљења ( $T_{TI}$ ) узорака износило 83 s на топлотном флуксу од  $70 \text{ kW/m}^2$ .



Слика 4.2. Време паљења узорака за различите топлотне флуксе и типове паљења

На слици 4.3 су приказане вредности топлотне снаге ( $HRR$ ) и брзине губитка масе ( $MLR$ ) применом пилотираног и непилотираног паљења, при излагању узорака топлотним флуксевима од  $50$ ,  $60$  и  $70 \text{ kW/m}^2$ .



Слика 4.3. Графички приказ развоја топлотне снаге ( $HRR$ ) и брзине губитка масе за пилотирано и непилотирано паљење при излагању топлотном флуксу од 50, 60 и 70  $\text{kW/m}^2$

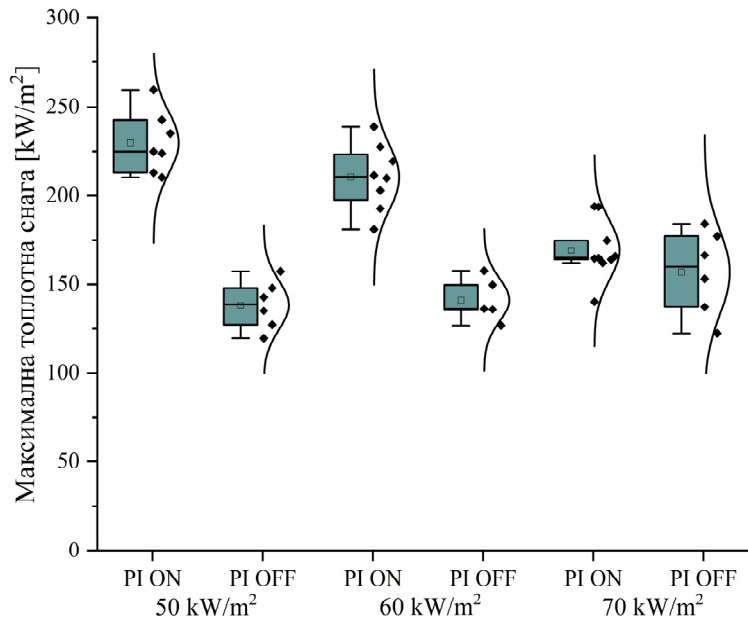
Код експеримената код којих је дошло до формирања пламене фазе, нарочито при коришћењу варничног упаљача на топлотним флуксевима од 50, 60 и 70  $\text{kW/m}^2$ , као и без његове примене на 70  $\text{kW/m}^2$ , топлотна снага ( $HRR$ ) је нагло расла до максималне вредности у тренутку паљења узорка. Максимална топлотна снага ( $PHRR$ ) достиже се као последица претходно постигнуте максималне брзине губитка масе ( $Peak\ MLR$ ), јер је интензитет ослобађања топлоте директно повезан са количином волатила која се ослобађају у току термичке деградације узорка. Непосредно након тога, вредност топлотне снаге нагло пада услед потрошње узорка, при чему се тенденција наставља до потпуног гашења пламена.

Супротно томе, код непилотираног паљења на топлотним флуксевима од 50 и 60 kW/m<sup>2</sup>, крива топлотне снаге (*HRR*) не показује нагли пораст, и њена максимална вредност је мање изражена, јер долази до постепенијег ослобађања енергије. Ова разлика указује на то да пилотирано паљење омогућава брже и интензивније сагоревање, јер присуство варничног упаљача олакшава иницирање пламене фазе.

Време потребно за достизање максималне топлотне снаге (*PHRR*) је краће код пилотираног паљења у односу на непилотирано паљење, на свим нивоима топлотног флуksа (50, 60 и 70 kW/m<sup>2</sup>). На топлотном флуksу од 50 kW/m<sup>2</sup>, просечно време достизања максималне топлотне снаге (*PHRR*) износи 117 s за пилотирано паљење, док је за непилотирано паљење дуже и износи 133,8 s. Разлика је присутна и на већим топлотним флуксевима, па тако на 60 kW/m<sup>2</sup>, код пилотираног паљења потребно је 92 s, у поређењу са 109 s за непилотирано, док је на 70 kW/m<sup>2</sup> разлика још израженија – 66 s за пилотирано паљење у односу на 88 s за непилотирано.

На основу добијених резултата експеримената приказаних у табели 4.2 и слици 4.4, код пилотираног паљења, примећено је да се вредност максималне топлотне снаге (*PHRR*) смањује са повећањем топлотног флуksа, са 229,76 kW/m<sup>2</sup> при 50 kW/m<sup>2</sup>, преко 210,29 kW/m<sup>2</sup> при 60 kW/m<sup>2</sup>, до 169,17 kW/m<sup>2</sup> при 70 kW/m<sup>2</sup>. Код непилотираног паљења, вредности *PHRR*-а су биле знатно ниже у поређењу са пилотираним паљењем на свим нивоима топлотног флуksа. За разлику од пилотираног паљења, вредност максималне топлотне снаге (*PHRR*) је расла са повећањем топлотног флуksа, при чему је највиша забележена вредност максималне топлотне снаге (*PHRR*) износила 156,68 kW/m<sup>2</sup> при топлотном флуksу од 70 kW/m<sup>2</sup>.

На топлотним флуксевима од 50 и 60 kW/m<sup>2</sup> пилотирано паљење постиже значајно веће вредности просечне топлотне снаге (*Mean HRR*) и максималне топлотне снаге (*PHRR*) у односу на непилотирано паљење. Ова разлика указује на интензивнији и бржи процес сагоревања који је омогућен применом варничног упаљача. *T*-тест је потврдио да постоје статистички значајне разлике у вредностима просечне топлотне снаге (*Mean HRR*) и максималне топлотне снаге (*PHRR*) при овим вредностима топлотног флуksа. Са друге стране, на топлотном флуksу од 70 kW/m<sup>2</sup>, резултати су показали да не постоје статистичке значајне разлике између ова два типа паљења, што значи да је при тако високом нивоу топлотног флуksа енергија зрачења довољна да иницира пламено сагоревање чак и без варничног упаљача.



Слика 4.4. Максимална топлотна снага за различите нивое топлотног флукса и типа паљења

Резултати Тукијевог *post-hoc* теста за просечну топлотну снагу (*Mean HRR*), показују да између експерименталне групе узорака изложених топлотном флуксу од 50 и 60 kW/m<sup>2</sup>, при пилотираном паљењу, не постоји статистички значајна разлика, али се ове групе статистички значајно разликују у односу на све остале експерименталне групе. Са друге стране, узорци изложени топлотном флуксу од 70 kW/m<sup>2</sup>, за оба типа паљења, такође не показују међусобно статистички значајну разлику. Међутим, у односу на узорке изложене топлотним флуксевима од 50 и 60 kW/m<sup>2</sup>, како при пилотираном, тако и при непилотираном паљењу, уочена је статистички значајна разлика.

Сличан тренд уочен је и код максималне топлотне снаге (*PHRR*). Изузетак представљају резултати који показују да се узорци изложени топлотном флуксу од 60 kW/m<sup>2</sup> при непилотираном паљењу (*PI OFF*) статистички значајно не разликују од узорака изложених топлотном флуксу од 70 kW/m<sup>2</sup> за оба типа паљења. У свим осталим случајевима, ове групе узорака (60 kW/m<sup>2</sup> – *PI OFF*, 70 kW/m<sup>2</sup> – *PI ON* и *PI OFF*), статистички се значајно разликују од свих осталих експерименталних група узорака.

На слици 4.5 може се видети да је брзина губитка масе (*MLR*) код пилотираног паљења већа у почетним фазама сагоревања у односу на непилотирано паљење, и овај тренд је посебно био изражен на топлотним флуксевима од 50 и 60 kW/m<sup>2</sup>. Код непилотираног паљења, брзина губитка масе (*MLR*) је била знатно спорија и показивала

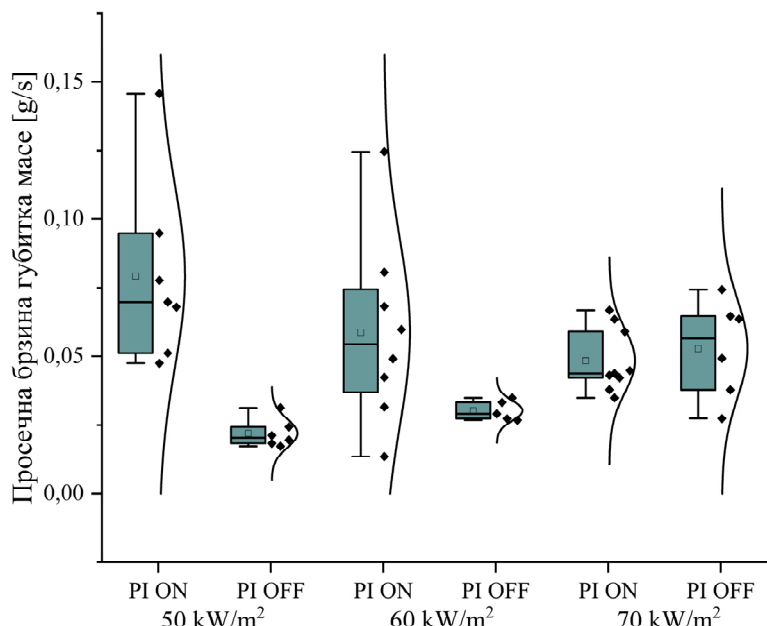
постепенији пад, што је приметно на нижим вредностима топлотног флуksа од 50 и 60 kW/m<sup>2</sup>. При топлотном флуksу од 70 kW/m<sup>2</sup> разлика у вредностима брзине губитке масе (*MLR*) између пилотираног и непилотираног паљења постајале су мање изражене.

На основу резултата Тукијевог *post-hoc* теста за просечну брзину губитка масе (*Mean MLR*) приказаних у табели 4.2, утврђена је статистички значајна разлика између експерименталних група узорака изложених топлотном флуksу од 50 kW/m<sup>2</sup>, при чему се узорци при пилотираном паљењу (PI ON) значајно разликују од узорака при непилотираном паљењу (PI OFF). Такође, уочена је статистички значајна разлика између узорака изложених топлотном флуksу од 50 kW/m<sup>2</sup> при пилотираном паљењу (PI ON) и узорака изложених топлотном флуksу од 60 kW/m<sup>2</sup> при непилотираном паљењу (PI OFF).

Додатно, може се уочити статистички значајна разлика између узорака изложених топлотном флуksу од 50 kW/m<sup>2</sup> при непилотираном паљењу (PI OFF) и узорака изложених топлотном флуksу од 60 kW/m<sup>2</sup> при пилотираном паљењу (PI ON).

У свим осталим случајевима, између експерименталних група не постоји статистички значајна разлика, што укључује и узорке изложене топлотном флуksу од 70 kW/m<sup>2</sup> (PI ON и PI OFF), који не показују значајне разлике у односу на узорке изложене топлотном флуksу од 60 kW/m<sup>2</sup> (PI ON и PI OFF).

Ово потврђује и *t*-тест, који указује да постоји статистички значајна разлика при топлотном флуksу од 50 kW/m<sup>2</sup>, где је пилотирано паљење показало значајно већу вредност за просечну брзину губитка масе (*Mean MLR*) у односу на непилотирано паљење. Насупрот томе, на топлотним флуksевима од 60 и 70 kW/m<sup>2</sup>, разлике између ова два типа паљења нису биле статистички значајне. Ово указује на то да је утицај типа паљења најизраженији при нижим нивоима топлотног зрачења (50 kW/m<sup>2</sup>), док се на високим вредностима топлотног флуksа (60 и 70 kW/m<sup>2</sup>) изједначавају разлике у брзини губитка масе (*MLR*).



Слика 4.5. Вредности просечне брзине губитка масе (*Mean MLR*) за различите нивое топлотног флуksа и типа паљења

На слици 4.6 приказани су резултати за укупно ослобођену топлоту (*THR*) и максималну ефективну топлотну моћ (*Peak EHC*).

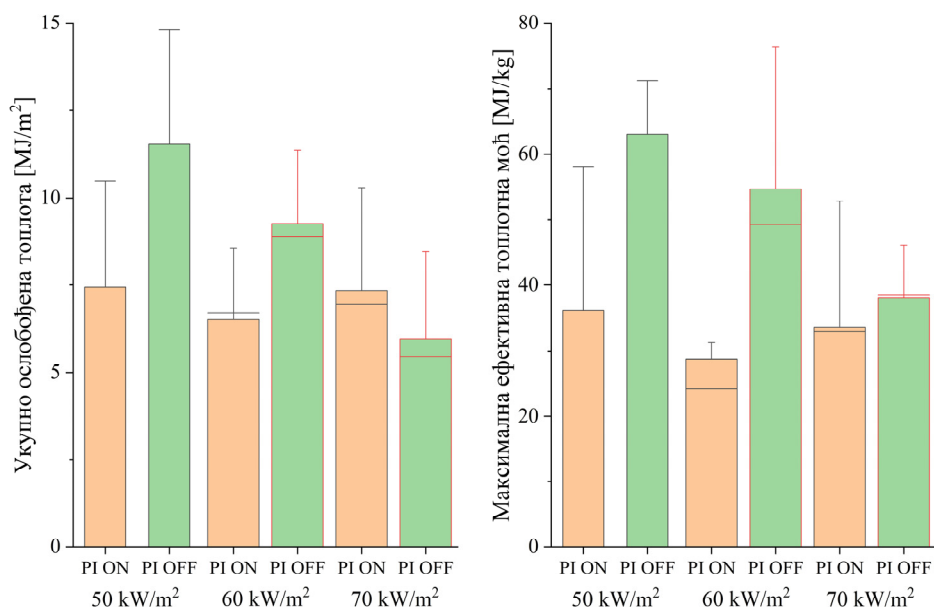
Вредности укупно ослобођене топлоте (*THR*) за непилотирано паљење су значајно веће на топлотним флуksевима од 50 и 60 kW/m<sup>2</sup> у односу на пилотирано паљење, с тим да се разлика смањује на топлотном флуksу од 70 kW/m<sup>2</sup>. Резултати Тукијевог *post-hoc* теста су показали да се узорци изложени топлотном флуksу од 50 kW/m<sup>2</sup> при непилотираном паљењу (PI OFF) статистички значајно разликују од већине експерименталних група, изузев узорака изложених топлотном флуksу од 60 kW/m<sup>2</sup> при непилотираном паљењу (PI OFF), између којих није утврђена статистички значајна разлика. Са друге стране, узорци изложени топлотном флуksу од 70 kW/m<sup>2</sup> (PI OFF) значајно се разликују од узорака изложених топлотним флуksевима од 50 и 60 kW/m<sup>2</sup> при непилотираном паљењу (PI OFF). Међутим, они не показују статистички значајну разлику у односу на узорке изложене топлотним флуksевима од 50, 60 и 70 kW/m<sup>2</sup> при пилотираном паљењу (PI ON). Поред тога, групе узорака подвргнуте пилотираном паљењу (PI ON) на свим нивоима топлотних флуksева, не показују значајне разлике међусобно.

Највиша вредност укупно ослобођене топлоте (*THR*), са просечном вредношћу од 11,53 MJ/m<sup>2</sup>, забележена је код непилотираног паљења при топлотном флуksу од 50 kW/m<sup>2</sup>. Са друге стране, најнижа вредност укупно ослобођене топлоте (*THR*) забележена

је такође код непилотираног паљења, на топлотном флуксу од  $70 \text{ kW/m}^2$ , са просечном вредношћу од  $5,67 \text{ MJ/m}^2$ .

Сличне разлике уочене су и за вредности максималне ефективне топлотне моћи (*Peak EHC*). Резултати за топлотне флуксе од  $50$  и  $60 \text{ kW/m}^2$  показују значајно веће вредности код непилотираног паљења у поређењу са пилотираним паљењем. Највећа вредност максималне ефективне топлотне моћи (*Peak EHC*) забележена је код узорaka изложених топлотном флуксу од  $50 \text{ kW/m}^2$  при непилотираном паљењу (PI OFF). Ова вредност се статистички значајно разликује од свих група, осим узорaka изложених топлотном флуксу од  $60 \text{ kW/m}^2$  при непилотираном паљењу (PI OFF). Са друге стране, најниже вредности максималне ефективне топлотне моћи (*Peak EHC*) уочене су код узорaka изложених топлотном флуксу од  $60 \text{ kW/m}^2$  при пилотираном паљењу (PI ON), који се значајно разликују од узорaka изложених топлотном флуксу од  $50$  и  $60 \text{ kW/m}^2$ , подвргнутих непилотираном паљењу.

Код узорaka изложених топлотном флуксу од  $70 \text{ kW/m}^2$ , за оба типа паљења, не постоји статистички значајна разлика. Такође, групе узорaka подвргнуте пилотираном паљењу (PI ON) на свим нивоима топлотних флуксева, не показују значајне разлике међусобно.



Слика 4.6. Вредности укупно ослобођене топлоте (*THR*) и максималне ефективне топлотне моћи (*Peak EHC*) за различите нивое топлотног флукса и типа паљења

#### 4.3.2. *Одређивање састава продуката сагоревања у зависности од вредности топлотног флукса и типа паљења*

На слици 4.7 приказан је развој концентрација идентификованих једињења продуката сагоревања у јединици времена. Такође је приказан и развој топлотне снаге (HRR), што омогућава поређење динамике емисије продуката сагоревања са променама у топлотној снази током експеримента. Да би се извршило упоређивање података добијених FTIR гасним анализатором и калориметром за одређивање топлотне снаге, било је неопходно ускладити временске интервале ових уређаја са методологијом описаном у поглављу 2.2.2.1. *Одређивање времена одзива FTIR система за узорковање продуката сагоревања.*

Стандардом ISO 19703 дефинисан је поступак израчунавања приноса (енгл. *yield*) појединачних гасова у продуктима сагоревања [138]. Један од критеријума за њихово израчунавање је и праћење запреминског протока у каналу за одвод продуката сагоревања. У научној заједници овај приступ је широко прихваћен за приказивање заступљености појединих компоненти у продуктима сагоревања, нарочито код експерименталних уређаја који раде на принципу калориметрије [42], [93].

Међутим, у периоду реализације овог дела истраживања, на постојећој експерименталној инсталацији нису постојали мерни уређаји за праћење запреминског протока, па су, уместо приказа вредности приноса састава продуката сагоревања, израчунате временски пондерисане просечне концентрације (енгл. *Time-Weighted Average Concentration - TWA*). Сличан метод примењен је и у истраживању *Akagi*-а и сарадника, који су користили FTIR гасни анализатор за мерење трагова гасова емитованих током контролисаних пожара у боровим шумама југоисточног дела САД [139].

У табели 4.3 приказане су просечне концентрације продуката сагоревања и резултати *t*-теста за њихово међусобно поређење у различитим експерименталним условима, као и резултати двофакторске ANOVA анализе, којом је испитан утицај комбинација нивоа топлотног флукса и типа паљења на концентрације продуката сагоревања. Експоненти представљају резултате Тукијевог *post-hoc* теста. Тумачење резултата заснива се на томе да се средње вредности које не деле исто слово, значајно разликују. Ознака *PI ON* односи се на резултате добијене применом пилотираног паљења, док *PI OFF* означава резултате добијене без употребе пилотираног паљења.

**Табела 4.3.** Приказ експерименталних и статистичких резултата интеракције топлотног флукса и типа паљења на концентрације продуката сагоревања. Статистички значајни резултати су приказани подељаним текстом ( $p < 0,05$ )

Топлотни флуks (Фактор А)	Тип паљења (Фактор Б)	Продукти сагоревања							
		H <sub>2</sub> O [vol%]	<i>t</i> -тест	CO <sub>2</sub> [vol%]	<i>t</i> -тест	CO [ppm]	<i>t</i> -тест	NH <sub>3</sub> [ppm]	<i>t</i> -тест
			<i>p</i> вредност		<i>p</i> вредност		<i>p</i> вредност		<i>p</i> вредност
50 kW/m <sup>2</sup>	PI ON	1,70±0,09	<b>0,028</b>	0,89±0,06 <sup>B</sup>	<b>0,000</b>	7,08±0,53 <sup>E</sup>	<b>0,000</b>	5,60±0,20 <sup>C</sup>	<b>0,000</b>
	PI OFF	1,83±0,12		0,57±0,03 <sup>D</sup>		17,33±0,61 <sup>D</sup>		7,55±0,22 <sup>A</sup>	
60 kW/m <sup>2</sup>	PI ON	1,86±0,09	0,187	0,80±0,03 <sup>C</sup>	<b>0,000</b>	91,34±4,95 <sup>B</sup>	<b>0,000</b>	5,02±0,28 <sup>D</sup>	<b>0,000</b>
	PI OFF	1,91±0,09		0,42±0,02 <sup>E</sup>		123,80±6,09 <sup>A</sup>		6,35±0,32 <sup>B</sup>	
70 kW/m <sup>2</sup>	PI ON	2,05±0,11	0,796	0,42±0,01 <sup>E</sup>	<b>0,000</b>	38,35±1,87 <sup>C</sup>	0,218	5,65±0,20 <sup>C</sup>	<b>0,000</b>
	PI OFF	2,02±0,13		1,03±0,07 <sup>A</sup>		39,56±1,57 <sup>C</sup>		7,31±0,29 <sup>A</sup>	
<b>Резултати двофакторске ANOVA-е</b>		<i>p</i> -вредност		<i>p</i> -вредност		<i>p</i> -вредност		<i>p</i> -вредност	
Топлотни флуks (Фактор А)		<b>0,000</b>		<b>0,000</b>		<b>0,000</b>		<b>0,000</b>	
Тип паљења (Фактор Б)		0,164		0,059		<b>0,000</b>		<b>0,000</b>	
Интеракција (А x Б)		0,231		<b>0,000</b>		<b>0,000</b>		<b>0,022</b>	

**Наставак табеле 6.3.**

Топлотни флуks (Фактор А)	Тип паљења (Фактор Б)	Продукти сагоревања							
		NO [ppm]	<i>t</i> -тест	NO <sub>2</sub> [ppm]	<i>t</i> -тест	CH <sub>4</sub> [ppm]	<i>t</i> -тест	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> [ppm]	<i>t</i> -тест
			<i>p</i> вредност		<i>p</i> вредност		<i>p</i> вредност		<i>p</i> вредност
50 kW/m <sup>2</sup>	PI ON	56,02±3,79 <sup>A</sup>	<b>0,007</b>	0,21±0,01 <sup>E</sup>	<b>0,000</b>	0,97±0,05 <sup>F</sup>	<b>0,000</b>	10,71±0,58 <sup>D</sup>	0,386
	PI OFF	46,59±1,96 <sup>B</sup>		6,12±0,31 <sup>A</sup>		4,75±0,16 <sup>D</sup>		11,15±0,58 <sup>D</sup>	
60 kW/m <sup>2</sup>	PI ON	45,64±2 <sup>B</sup>	<b>0,032</b>	1,05±0,06 <sup>D</sup>	<b>0,000</b>	10,71±0,52 <sup>B</sup>	<b>0,000</b>	16,57±1,20 <sup>BC</sup>	0,378
	PI OFF	41,94±3,10 <sup>B</sup>		2,29±0,11 <sup>C</sup>		17,46±1,11 <sup>A</sup>		16,08±0,70 <sup>C</sup>	
70 kW/m <sup>2</sup>	PI ON	44,70±3,25 <sup>B</sup>	0,442	2,52±0,15 <sup>C</sup>	<b>0,002</b>	3,53±0,18 <sup>E</sup>	<b>0,000</b>	21,12±1,44 <sup>A</sup>	<b>0,001</b>
	PI OFF	43,19±1,49 <sup>B</sup>		3,08±0,17 <sup>B</sup>		6,96±0,46 <sup>C</sup>		18,23±0,97 <sup>B</sup>	
<b>Резултати двофакторске ANOVA-е</b>		<i>p</i> -вредност		<i>p</i> -вредност		<i>p</i> -вредност		<i>p</i> -вредност	
Топлотни флуks (Фактор А)		<b>0,000</b>		<b>0,000</b>		<b>0,000</b>		<b>0,000</b>	
Тип паљења (Фактор Б)		<b>0,000</b>		<b>0,000</b>		<b>0,000</b>		<b>0,005</b>	
Интеракција (А x Б)		<b>0,004</b>		<b>0,000</b>		<b>0,000</b>		<b>0,000</b>	

На основу двофакторске ANOVA анализе, у односу на топлотни флуks (Фактор А) уочени су статистички значајни резултати ( $p < 0,05$ ) за све анализиране продукте сагоревања, што значи да промена нивоа топлотног флуksа, значајно утиче на концентрације продуката сагоревања. Код типа паљења (Фактор Б) су такође уочени статистички значајни резултати ( $p < 0,05$ ) у већини случајева (за CO, NH<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), што указује да тип паљења различито утиче на концентрације ових продуката сагоревања. Интеракција ова два фактора има статистички значајне ефекте на све анализиране продукте сагоревања, осим за H<sub>2</sub>O, где није статистички значајна ( $p > 0,05$ ). Осим значајних појединачних утицаја ова два фактора на продукте сагоревања уочава се и значајан ефекат интеракције, који се рефлектује кроз промену интензитета разлике просечних вредности продуката сагоревања између различитих типова паљења и при различитим топлотним флуksевима.

T-тест показао је значајне разлике за већину продуката сагоревања између типова паљења при одабраном нивоу топлотног флуksа. Изузеци су H<sub>2</sub>O на топлотном флуksу од 60 и 70 kW/m<sup>2</sup>, CO и NO на 70 kW/m<sup>2</sup>, и за C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> на 50 и 60 kW/m<sup>2</sup>.

У табели 4.3 приказане су све вредности по комбинацијама флуksа и типа паљења због потпуног приказа података. Међутим, будући да интеракција између топлотног флуksа и типа паљења није била статистички значајна ( $p = 0,231$ ), као што је случај са H<sub>2</sub>O, Тукијев *post-hoc* је интерпретиран само за фактор који има значајан ефекат, односно у овом случају по нивоу топлотног флуksа. Резултати су показали да се концентрација водене паре (H<sub>2</sub>O) значајно разликује за сва три нивоа флуksа, при чему сваки ниво припада посебној статистичкој групи. Просечне вредности за оба типа паљења, по топлотном флуksу, износиле су: 1,77% при 50 kW/m<sup>2</sup> (група А), 1,89% при 60 kW/m<sup>2</sup> (група В) и 2,04% при 70 kW/m<sup>2</sup> (група С). Ови резултати указују да се концентрација водене паре постепено и статистички значајно повећава са растом топлотног флуksа, без обзира на тип паљења.

За концентрације CO<sub>2</sub> и NO<sub>2</sub>, између свих експерименталних група утврђено је да постоји статистички значајна разлика, осим између група изложених топлотном флуksу од 60 kW/m<sup>2</sup> за непилотирано паљење и 70 kW/m<sup>2</sup> за пилотирано паљење.

Резултати указују да на концентрације CO утиче ниво топлотног флуksа и тип паљења, што и потврђује Тукијев *post-hoc* тест, који показује статистички значајне разлике између већине експерименталних група узорака изложених свим нивоима топлотног флуksа, како за пилотирано, тако и за непилотирано паљење. Са друге стране, за групу узорака изложену топлотном флуksу од 70 kW/m<sup>2</sup>, није утврђена статистички значајна разлика између пилотираног (PI ON) и непилотираног паљења (PI OFF).

Концентрације амонијака (NH<sub>3</sub>) на топлотном флуksу од 60 kW/m<sup>2</sup>, код оба типа паљења, показују статистички значајне разлике у односу на остале експерименталне услове. Поред тога, на топлотним флуksевима од 50 и 70 kW/m<sup>2</sup>, у оквиру истог типа паљења, нису уочене статистички значајне разлике. Међутим, у оквиру истог топлотног флуksа, али између пилотираног и непилотираног паљења, постоје статистички значајне разлике.

Концентрације азот монооксида (NO) на топлотном флуksу од 50 kW/m<sup>2</sup> за пилотирано паљење (PI ON), статистички се значајно разликују у односу на концентрације добијених на свим осталим експерименталним условима.

У зависности од промене топлотног флуksа и типа паљења, концентрације метана ( $\text{CH}_4$ ) значајно варирају и показују статистички значајне разлике, за све постављене експерименталне услове.

Концентрације етилена ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) на топлотном флуksу од  $50 \text{ kW/m}^2$  за оба типа паљења, не показују статистички значајну разлику међусобно, али се статистички значајно разликују у односу на све друге експерименталне услове. Сличан тренд постоји и код групе узорка изложене топлотном флуksу од  $60 \text{ kW/m}^2$ , где не постоји статистички значајна разлика у оквиру истог типа паљења, али се резултати значајно разликују у односу на узорке изложене топлотним флуksевима од  $50$  и  $70 \text{ kW/m}^2$ .

Упоредивањем трендова развоја концентрација продуката сагоревања, може се уочити да гасови  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{C}_2\text{H}_4$  прате тренд топлотне снаге ( $HRR$ ), код пилотираног паљења за сва три нивоа топлотног флуksа, и да своју максималну вредност достижу у исто време кад и максималну топлотну снагу ( $PHRR$ ).

Са друге стране, на топлотном флуksу од  $70 \text{ kW/m}^2$ , код непилотираног паљења, за исте гасове може се уочити сличан тренд. У почетној фази сагоревања долази до пораста њихових концентрација, формирања пика у тренутку паљења узорка и достизања максималне вредности истовремено са максималном топлотном снагом ( $PHRR$ ), након чега концентрације почињу да опадају.

Тренд развоја водене паре ( $\text{H}_2\text{O}$ ) показује конзистентан развој и приближно исте вредности код оба типа паљења, на сва три нивоа топлотног флуksа. Благо повећање концентрације уочава се код пилотираног паљења, на топлотним флуksевима од  $50$  и  $70 \text{ kW/m}^2$ .

Концентрације  $\text{CO}_2$  су значајно веће код пилотираног паљења, на свим топлотним флуksевима, у односу на непилотирано паљење. Ова разлика се јавља као последица формирања пламена код пилотираног паљења, при чему долази до потпунијег сагоревања, где већина угљоводоника успешно оксидише до угљен-диоксида.

Такође, уочено је да пилотирано паљење резултира значајно нижим концентрацијама  $\text{CO}$  у поређењу са непилотираним. Насупрот томе, код непилотираног паљења, где је доминантно непотпуно сагоревање, концентрације  $\text{CO}_2$  су ниже, док су концентрације  $\text{CO}$  веће, нарочито на топлотним флуksевима од  $50$  и  $60 \text{ kW/m}^2$ . Међутим, на топлотном флуksу од  $70 \text{ kW/m}^2$ , концентрације  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$  су веће код непилотираног паљења, с тим да се разлике у концентрацији  $\text{CO}$  између пилотираног и непилотираног паљења смањују.

Амонијак ( $\text{NH}_3$ ) се јавља као примарни продукт термичке разградње азотних једињења за време сагоревања. Код оба типа паљења концентрације  $\text{NH}_3$  се благо повећавају са повећањем топлотног флукса, нарочито у завршним фазама сагоревања. Овај тренд је нарочито изражен код непилотираног паљења, на сва три нивоа топлотног флукса, где су забележене веће вредности и флукуације. Са друге стране, тренд развоја концентрација  $\text{NH}_3$  код пилотираног паљења је стабилнији, са мањим варијацијама за време сагоревања.

Концентрације  $\text{NO}$  су генерално веће код пилотираног паљења, јер се постижу веће температуре, које омогућавају активно одвијање термичке дисоцијације азота и кисеоника, која доводи до већих концентрација  $\text{NO}$ . Код непилотираног паљења, температуре су ниже, и самим тим ове реакције се одвијају спорије, што резултира мањим концентрацијама  $\text{NO}$  [140].

Супротно овим наводима, примећено је да са повећањем топлотног флукса, концентрације  $\text{NO}$  опадају, код оба типа паљења. Самим тим, на топлотном флуксу од  $50 \text{ kW/m}^2$  код пилотираног паљења, забележена је максимална концентрација  $\text{NO}$  у односу на све услове експеримента. Овај ефекат може се објаснити чињеницом да је при топлотном флуксу од  $50 \text{ kW/m}^2$  трајање пламеног сагоревања најдуже у односу на остале испитиване нивое топлотног флукса. У таквим условима омогућено је задржавање гасова у зони високе температуре довољно дуго, што је неопходно за формирање  $\text{NO}$ . Код виших нивоа топлотних флуксева, процес сагоревања је бржи, и тиме гасови краће остају у подручју високих температура.

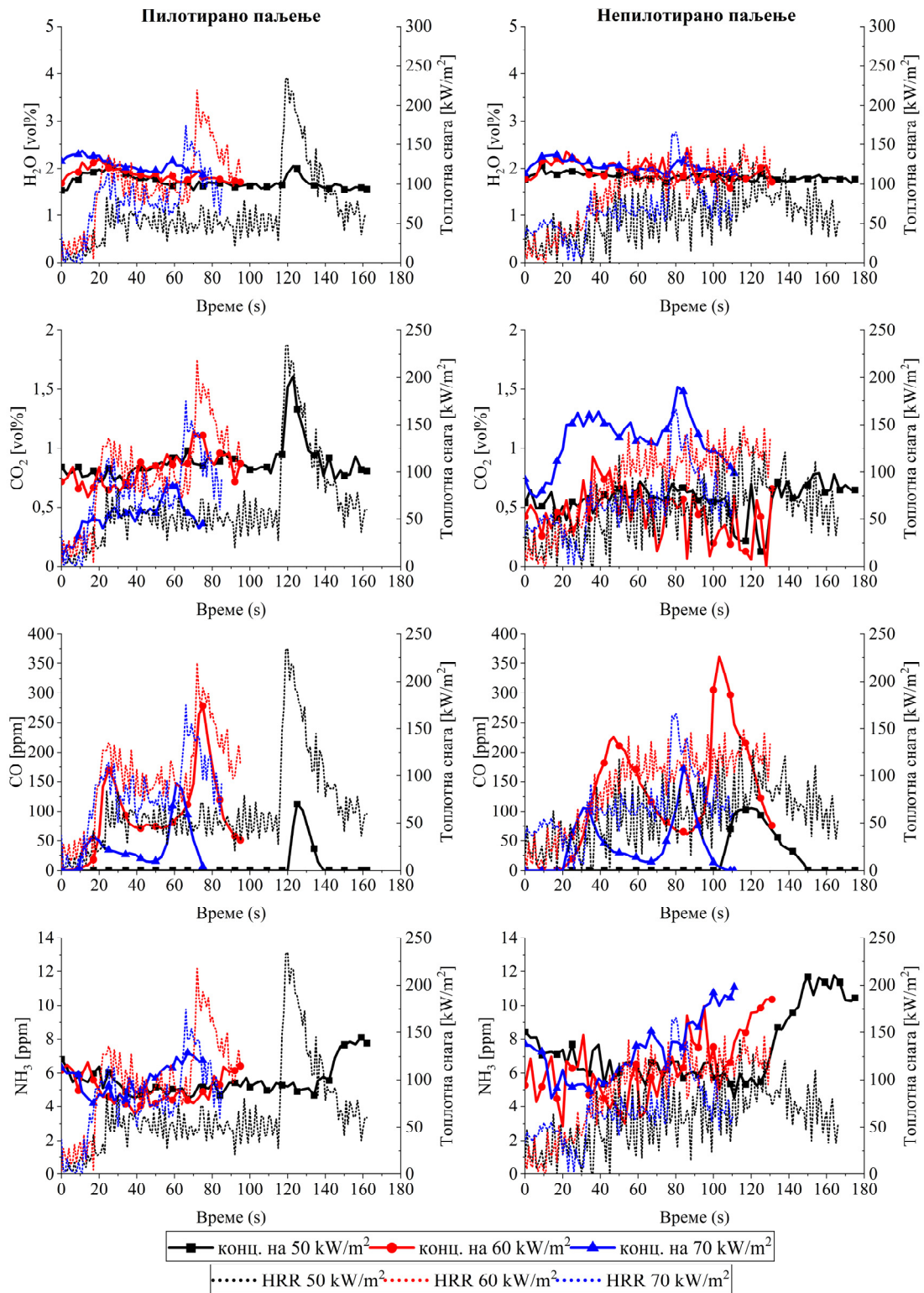
За разлику од  $\text{NO}$ , концентрације  $\text{NO}_2$  се формирају на нижим температурама, тј. у условима непотпуног сагоревања, што је јасно видљиво са графика. Концентрације  $\text{NO}_2$  су значајно веће у условима непилотираног паљења, при чему у већини случајева расту пропорционално са повећањем топлотног флукса.

Концентрације метана ( $\text{CH}_4$ ), као важног производа непотпуног сагоревања, имају више просечне и максималне вредности при непилотираном паљењу на топлотним флуксевима од  $50$  и  $60 \text{ kW/m}^2$ . Насупрот томе, при топлотном флуксу од  $70 \text{ kW/m}^2$  ове вредности су мање изражене, јер под тим условима долази до паљења узорка и потпунијег сагоревања.

Као последица непотпуног сагоревања код непилотираног паљења, које карактерише неуједначено сагоревање и накнадно ослобађање продуката, долази до формирања два пика, при чему је други пик израженији и достиже максималну вредност у току процеса сагоревања. Насупрот томе, код пилотираног паљења концентрације  $\text{CH}_4$

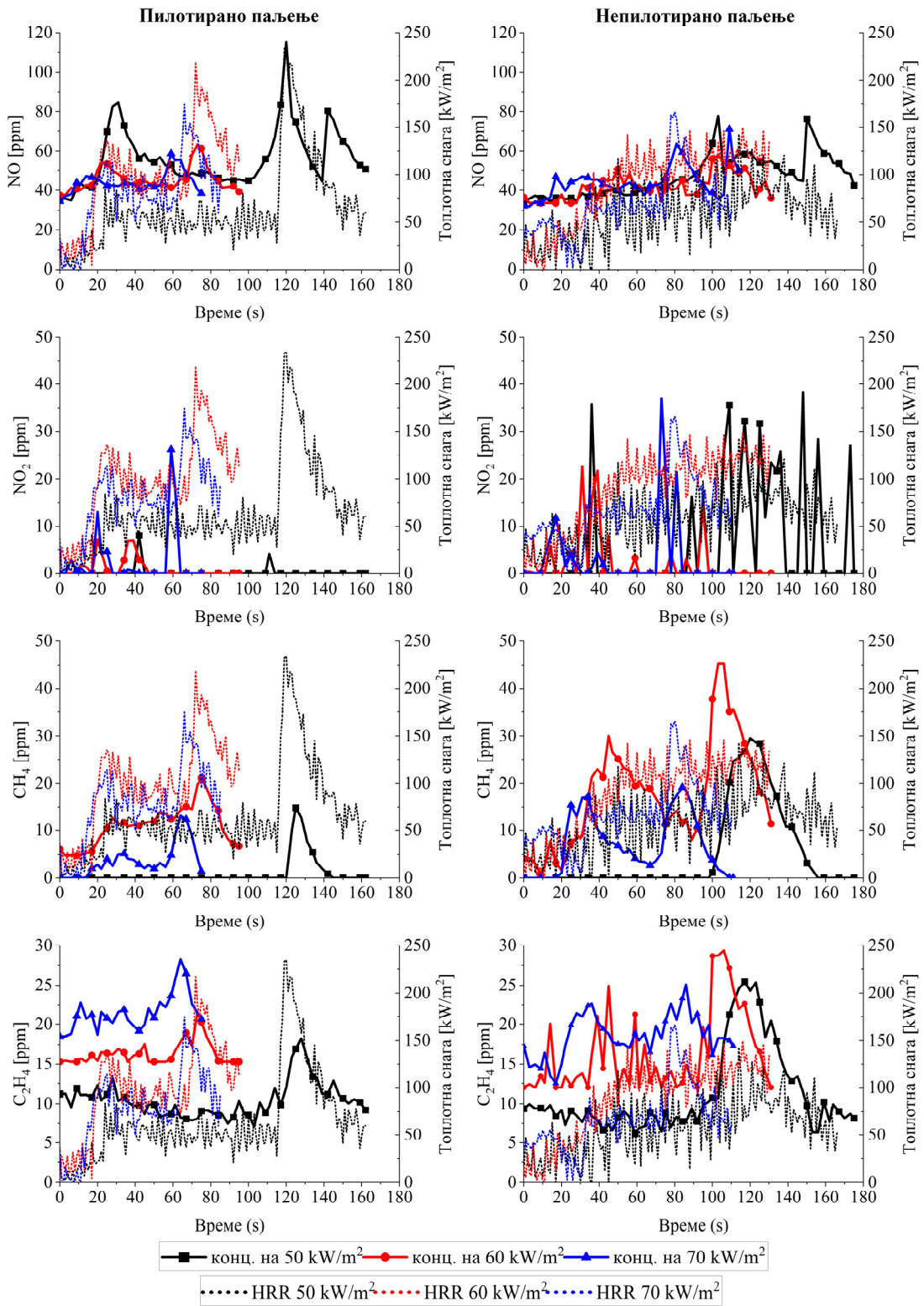
су конзистентније, при чему једини формиран пик достиже максималну вредност, и уједно прати развој максималне топлотне снаге (*PHRR*). Такође, евидентно је да на већим вредностима топлотног флуksа ( $70 \text{ kW/m}^2$ ) долази до смањења концентрација  $\text{CH}_4$ .

Сличан тренд уочен је и за концентрације етилена  $\text{C}_2\text{H}_4$ , чије су максималне концентрације веће код непилотираног паљења, на топлотном флуksу од 50 и  $60 \text{ kW/m}^2$ . Такође, као и за концентрације угљен-моноксида ( $\text{CO}$ ), на топлотном флуksу од  $70 \text{ kW/m}^2$ , разлике у максималним концентрацијама етилена ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) између пилотираног и непилотираног паљења се смањују.



Слика 4.7. Концентрације доминантних продуката сагоревања у функцији времена, за различите типове паљења, при излагању топлотним флукевима од 50, 60 и 70 kW/m<sup>2</sup>

Наставак слике 4.7.



### 4.3.3. Резултати PCA анализе параметара запаљивости и састава продуката сагоревања у зависности од типа паљења

Анализа главних компоненти (PCA) је спроведена да би се проценили међусобни односи параметара запаљивости и продуката сагоревања при различитим нивоима топлотног флукса (50, 60 и 70 kW/m<sup>2</sup>) и типовима паљења (пилотирано и непилотирано паљење). На сликама 4.8, 4.9 и 4.10 приказани су PCA биплотови за сваки појединачни топлотни флукс, којим се илуструје утицај типа паљења на међузависност између параметара запаљивости и продуката сагоревања. На свим вредностима топлотних флуксева оба типа паљења су добро раздвојена на биplotовима, чиме је наглашено да постоје различите карактеристике у сагоревању.

PCA биплотови ефективно сумирају варијансу у скупу података, омогућавајући идентификацију кључних образаца и корелације између променљивих. Ради бољег разумевања PCA биplotова, у табели 4.4 приказана су векторска оптерећења анализираних променљивих према димензијама PC1 и PC2, за све услове експеримента.

Табела 4.4. Векторска оптерећења анализираних варијабли према димензијама PC1 и PC2

Варијабле	50 kW/m <sup>2</sup>		60 kW/m <sup>2</sup>		70 kW/m <sup>2</sup>	
	PC1	PC2	PC1	PC2	PC1	PC2
TPI	0,30	-0,09	0,31	-0,06	0,33	-0,11
Mean HRR	-0,30	-0,02	-0,31	0,08	0,03	0,30
PHRR	-0,29	0,10	-0,31	0,05	-0,14	0,36
Peak EHC	0,24	0,31	0,25	0,29	0,03	-0,32
THR	0,23	0,26	0,24	-0,08	-0,14	-0,31
MLR	-0,25	-0,27	-0,19	0,51	0,10	0,42
H <sub>2</sub> O	0,19	0,40	0,17	0,68	-0,03	0,31
CO <sub>2</sub>	-0,29	0,23	-0,31	0,04	0,42	-0,05
CO	0,30	-0,12	0,29	0,07	0,17	0,44
NH <sub>3</sub>	0,30	-0,13	0,30	-0,13	0,42	0,02
NO	-0,25	0,43	-0,25	-0,35	-0,14	-0,19
NO <sub>2</sub>	0,30	-0,07	0,30	-0,05	0,38	0,04
CH <sub>4</sub>	0,30	-0,10	0,30	-0,16	0,43	-0,01
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,14	0,55	-0,12	0,04	-0,34	0,26

У наставку, приказана је анализа PCA биplotова по топлотним флуксевима.

- **Анализа PCA биplotа за топлотни флукс од 50 kW/m<sup>2</sup>**

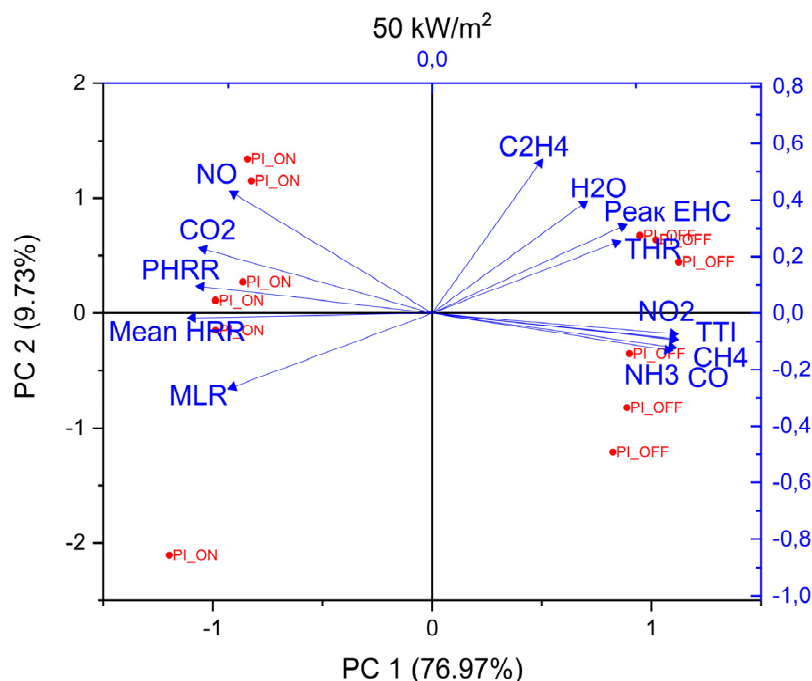
На топлотном флуксу од 50 kW/m<sup>2</sup>, прва димензија (PC1) објашњава 76,97% варијансе, док друга (PC2) чини 9,73%, при чему је кумулативна варијанса 86,7% (Слика 4.8). Ово указује да је већина варијабилности објашњена првом димензијом, што је чини доминантном компонентом.

Експерименталну групу узорака подвргнутих пилотираном паљењу (PI\_ON) карактеришу више вредности променљивих попут максималне топлотне снаге (*PHRR*), просечне топлотне снаге (*Mean HRR*), брзине губитка масе (*MLR*), и концентрације CO<sub>2</sub>, које су усмерене ка негативном крају прве димензије (*PC1*). Ови резултати указују на интензивнији процес сагоревања при пилотираном паљењу, који се одликује већом топлотном снагом и бржим процесом сагоревања. Такође, емисија CO<sub>2</sub> прати исти тренд, што додатно наводи на потпуније сагоревање у условима пилотираног паљења.

Насупрот томе, на позитивној страни прве димензије (*PC1*), експерименталну групу узорака подвргнутих непилотираном паљењу (PI OFF) карактеришу веће вредности укупне ослобођене топлоте (*THR*) и максималне ефективне топлотне моћ (*Peak EHC*), као и повећана емисија гасова попут CO, NH<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>. Ово указује да непилотирано паљење доводи до мањег интензитета сагоревања, али истовремено и до виших концентрација гасова карактеристичних за непотпуно сагоревање, што упућује на мање ефикасан процес оксидације горивог материјала. Будући да није дошло до паљења узорака на топлотном флуксу од 50 kW/m<sup>2</sup>, време паљења (*TTI*) није измерено. Зато је ова променљива оријентисана ка позитивној страни прве димензије (*PC1*), у делу где се налазе узорци подвргнути непилотираном паљењу (PI OFF).

Са друге стране, променљиве H<sub>2</sub>O и C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> су доминантне на позитивној страни друге димензије (*PC2*). Њихов положај указује да примена пилотираног паљења не утиче значајно на разлике у концентрацијама ових гасова.

Брзина губитка масе (*MLR*), има сличне коефицијенте за *PC1* и *PC2*, и с обзиром на то да *PC1* носи знатно већу варијансу, ова варијабла је првенствено повезана са већим вредностима топлотне снаге код узорака подвргнутих пилотираном паљењу (PI ON). Насупрот томе, променљиве укупно ослобођена топлота (*THR*) и максимална ефективна топлотна моћ (*Peak EHC*) такође имају сличне коефицијенте за *PC1* и *PC2*, али с тим да нису искључиво повезане са *PC1*, већ у значајној мери доприносе и другој димензији *PC2*.



Слика 4.8. Биplot приказ корелације параметара запаљивости и продуката сагоревања у зависности од типа паљења на топлотном флуксу од 50 kW/m<sup>2</sup>

- **Анализа PCA биplotа за топлотни флукс од 60 kW/m<sup>2</sup>**

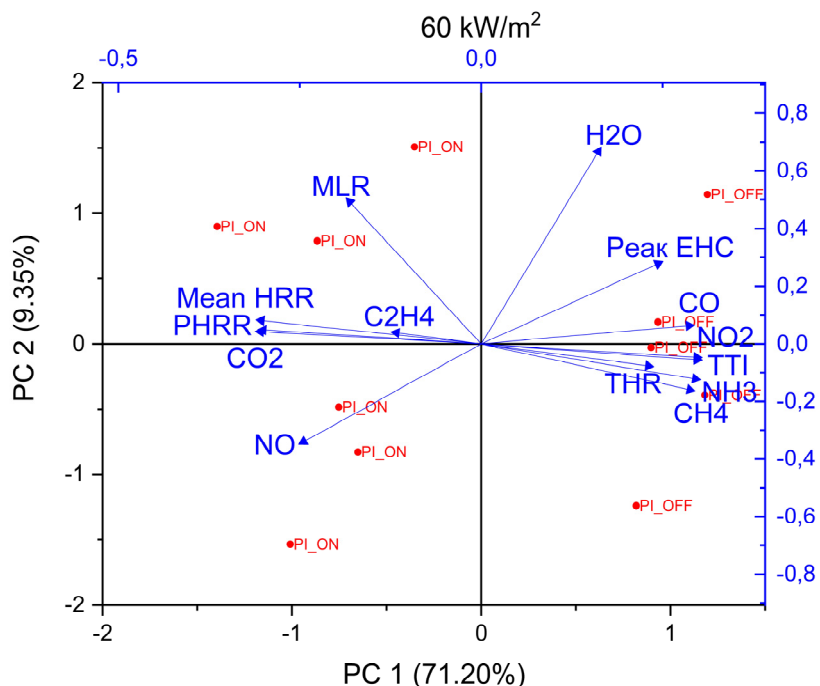
Упоређивањем PCA резултата добијених при топлотним флуксевима од 50 и 60 kW/m<sup>2</sup>, могу се уочити одређене сличности. На топлотном флуксу од 60 kW/m<sup>2</sup>, две главне димензије, PC1 и PC2, објашњавају 71,20% и 9,35% варијансе, респективно, што даје кумулативну варијансу од 80,55% (Слика 4.9).

Као и на топлотном флуксу од 50 kW/m<sup>2</sup>, распоред параметара запаљивости и продуката сагоревања на топлотном флуксу од 60 kW/m<sup>2</sup> јасно одражава разлике између узорака подвргнутих различитим типовима паљења, уз неколико кључних разлика у расподели варијабли и њиховом утицају на димензије PCA.

На овим условима, брзина губитка масе (MLR) сада има већи утицај на другу димензију (PC2), што значи да ова променљива све више зависи од других фактора који нису искључиво повезани са типом паљења. Такође, концентрација H<sub>2</sub>O има још израженију корелацију са другом димензијом (PC2), што додатно потврђује да тип паљења није пресудан фактор у одређивању концентрације водене паре. Поред тога, променљива време паљења (TTI) и даље има исти положај, што потврђују претходно наведени налази.

Додатно, за разлику од резултата на топлотном флуксу од 50 kW/m<sup>2</sup>, променљиве укупно ослобођена топлота (THR) и максимална ефективна топлотна моћ (Peak EHC) су

на топлотном флуксу од  $60 \text{ kW/m}^2$  првенствено повезане са првом димензијом ( $PC1$ ), што указује да њихов утицај зависи од интензитета ослобођене топлоте код узорака подвргнутих непилотираном паљењу (PI OFF).



Слика 4.9. Биplot приказ корелације параметара запаљивости и продуката сагоревања у зависности од типа паљења на топлотном флуксу од  $60 \text{ kW/m}^2$

- **Анализа PCA биplotа за топлотни флукс од  $70 \text{ kW/m}^2$**

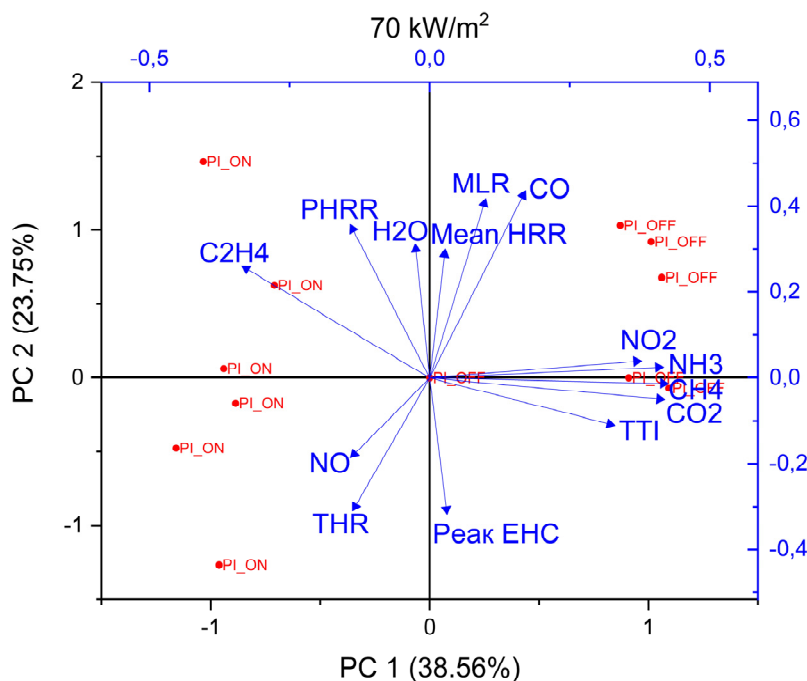
На топлотном флуксу од  $70 \text{ kW/m}^2$ , прва димензија ( $PC1$ ) чини 38,56% варијансе, док друга димензија ( $PC2$ ) објашњава 23,75%, чинећи кумулативну варијансу у скупу података од 62,31% (Слика 4.10). У поређењу са нижим топлотним флуксевима ( $50$  и  $60 \text{ kW/m}^2$ ), удео прве димензије ( $PC1$ ) је значајно мањи, што указује да друга димензија ( $PC2$ ) има значајнију улогу у разликовању узорака.

Експериментална група узорака подвргнута пилотираном паљењу (PI ON) примарно је позиционирана на негативној страни прве димензије ( $PC1$ ) и уско је повезана са већим концентрацијама етилена ( $C_2H_4$ ) и умерено већим концентрацијама NO. Овај распоред варијабли указује да узорци подвргнути пилотираном паљењу (PI ON) на  $70 \text{ kW/m}^2$  пролазе кроз интензивније процесе пиролизе, што доводи до већег ослобађања  $C_2H_4$  и NO, који се формира током високотемпературне оксидације. Варијабла NO, има сличне коефицијенте за  $PC1$  и  $PC2$ , и с обзиром на то да  $PC1$  носи већу варијансу, ова променљива је првенствено присутна код узорака подвргнутих

пилотираном паљењу (PI ON). Насупрот томе, на позитивној страни прве димензије (*PC1*), груписани су узорци подвргнути непилотираном паљењу (PI OFF), које карактеришу веће концентрације  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  и  $\text{NO}_2$ , и дуже време паљења (*TTI*).

Променљиве максимална топлотна снага (*PHRR*), просечна топлотна снага (*Mean HRR*), брзина губитка масе (*MLR*), као и гасови  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}$  су доминантне на позитивној страни друге димензије (*PC2*). Променљиве укупна ослобођена топлота (*THR*) и максимална ефективна топлотна моћ (*Peak EHC*), налазе се на негативној страни друге димензије (*PC2*).

С обзиром на то да на топлотном флуксу од  $70 \text{ kW/m}^2$  долази до паљења узорака и у условима непилотираног паљења анализа положаја варијабли у оквиру друге димензије (*PC2*) указује да узорци са вишим вредностима топлотне снаге (*PHRR* и *Mean HRR*) имају мање вредности укупно ослобођене топлоте (*THR*) и максималне ефективне топлотне моћи (*Peak EHC*). Ово може бити последица краћег времена трајања сагоревања, праћеног већом максималном и просечном топлотном снагом, што доводи до мање укупно ослобођене топлоте (*THR*) и максималне ефективне топлотне моћи (*Peak EHC*). На основу свега изложеног, овакав тренд указује на то да, како се повећава топлотни флуks и достиже праг спонтаног паљења, утицај типа паљења на разлике у вредностима ових променљивих постаје мање изражен, и да оне пре свега зависе од секундарних фактора попут пиролизе, механизма термичке разградње и физичко-хемијска својства узорака.



Слика 4.10. Биplot приказ корелације параметара запаљивости и продуката сагоревања у зависности од типа паљења на топлотном флуксу од  $70 \text{ kW/m}^2$

#### 4.4. Закључна разматрања

Истраживања запаљивости шумске вегетације углавном су фокусирана на пламена сагоревања, док се процесима тињања и ужареног сагоревања, посвећује минимална пажња. У овом делу истраживања испитана су оба процеса сагоревања, као и услови под којима ће доћи до паљења узорака без иницијације спољашњим извором.

Експерименти су изведени коришћењем калориметра за одређивање топлотне снаге (*Mass Loss Calorimeter*, Велика Британија), са и без примене варничног упаљача, који се обично користи за убрзавање процеса паљења и иницирања пламене фазе током сагоревања након излагања узорака топлотном зрачењу. Оваквим приступом омогућено је симулирање услова која доводе до пламеног или тињајућег сагоревања.

Узорци су били изложени различитим нивоима топлотног флукса (50, 60 и 70 kW/m<sup>2</sup>). Када је коришћено пилотирано паљење, развој пламене фазе био је уочен на свим нивоима топлотног флукса. Насупрот томе, код непилотираног паљења, тињајуће сагоревање је уочено на топлотним флуксевима од 50 и 60 kW/m<sup>2</sup>. Међутим, при топлотном флуксу од 70 kW/m<sup>2</sup>, и без примене варничног упаљача, код узорака је дошло до појаве пламеног сагоревања.

Применом пилотираног паљења, уочено је краће време паљења (*TTI*), што је директна последица употребе варничног упаљача, јер се омогућава брже паљење ослобођених волатила. Насупрот томе, иницирање пламене фазе код непилотираног паљења зависи искључиво од услова у окружењу, што резултира дужим временом паљења. Разлике у динамици сагоревања наглашавају ефикасност пилотираног паљења, које побољшава ефикасност процеса сагоревања, нарочито при вишим нивоима топлотног флукса, где додатно обезбеђена енергија убрзава процес сагоревања.

Присуство варничног упаљача омогућава брже иницирање пламене фазе, што доводи до већих вредности просечне и максималне топлотне снаге, као и краћег времена потребног за њихово достизање. Код непилотираног паљења долази до споријег ослобађања енергије што резултира нижим вредностима топлотне снаге на топлотним флуксевима од 50 и 60 kW/m<sup>2</sup>. Међутим, на топлотном флуксу од 70 kW/m<sup>2</sup>, разлике између пилотираног и непилотираног паљења постају минималне, што указује на то да је енергија зрачења довољна за иницирање ефективног пламеног сагоревања, чак и без варничног упаљача.

У вези са вредностима укупно ослобођене топлоте (*THR*), резултати показују да непилотирано паљење остварује више вредности на топлотним флуксевима од 50 и 60 kW/m<sup>2</sup> у поређењу са пилотираним паљењем.

Различите вредности топлотног флукса у интеракцији са типом паљења значајно утичу на концентрације продуката сагоревања. Пре свега, уочено је да гасови CO<sub>2</sub>, NO, CH<sub>4</sub> и C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, при сва три нивоа топлотног флукса у условима пилотираног паљења, као и при топлотном флуксу од 70 kW/m<sup>2</sup> у случају непилотираног паљења, имају сличан тренд као и развој топлотне снаге (*HRR*).

С обзиром на динамику сагоревања, пилотирано паљење карактерише потпуније сагоревање и веће температуре, што резултује већим концентрацијама угљен-диоксида (CO<sub>2</sub>) и азот монооксида (NO), и нижим концентрацијама угљен-монооксида (CO) и метана (CH<sub>4</sub>), што је супротно непилотираном паљењу. Ова разлика је нарочито изражена на топлотним флуксевима од 50 и 60 kW/m<sup>2</sup>.

На топлотном флуксу од 70 kW/m<sup>2</sup>, код непилотираног паљења дошло је до формирања пламене фазе, па самим тим код већине хемијских врста у продуктима сагоревања, осим за H<sub>2</sub>O, CO и NO, не постоје значајне разлике у вредностима концентрација између оба типа паљења.

На крају, резултати истичу кључну улогу типа паљења у динамици сагоревања, нарочито у погледу брзине достизања максималне топлотне снаге (*PHRR*), као кључног параметра у науци о пожарима.

## 5. ИНТЕГРАЛНА ПРОЦЕНА УТИЦАЈА МОРФОЛОШКО-ХЕМИЈСКИХ КАРАКТЕРИСТИКА НА ЗАПАЉИВОСТ СВЕЖЕ ШУМСКЕ ВЕГЕТАЦИЈЕ

### 5.1. Општи део

Запаљивост шумске вегетације представља сложен процес на који утиче више фактора и који се може квантификовати различитим параметрима. Утврђено је да запаљивост варира у зависности од биљне врсте. Додатно, функционална својства биљака, укључујући морфологију, физиологију и хемијски састав, имају значајан утицај на њихову запаљивост. *Moran* и сарадници су утврдили да је препознавање и разумевање разноликости карактеристика унутар једне врсте кључно за разумевање начина на који врсте реагују на глобалне промене. Ове разлике у карактеристикама могу значајно утицати на еколошке процесе и способност врста да се прилагоде променљивим условима животне средине [141].

Карактеристике попут величине, садржаја воде и хемијског састава листова или иглица, могу у великој мери одредити начин и интензитет сагоревања шумске биомасе. Морфолошке особине крајњих изданака шумске вегетације, као што су величина, облик, дебљина и распоред листова/иглица, утичу на густину и структуру вегетативног материјала. Ове карактеристике имају кључни утицај на вероватноћу паљења, ширење пламена и дужину трајања сагоревања. Истраживања су показала да врсте са игличастим листовима имају тенденцију да се запале брже и дуже одрже сагоревање, због свог гушћег распореда у фасцикули<sup>9</sup> (енгл. *fascicle*), док врсте са широким листовима имају могућност већег задржавања воде, па је самим тим отежана могућност паљења, чиме је интензитет пожара смањен [142], [143].

Такође, поред морфолошких особина, хемијски састав игра кључну улогу у запаљивости шумске вегетације. На пример, врсте богате монотерпенима и сесквитерпенима показују већу запаљивост због ниских тачака паљења, док висок садржај лигнина доприноси дужем сагоревању [144]. Моно-, сескви- и дитерпени, значајно утичу на запаљивост шумске вегетације, пре свега због својих ниских тачака паљења и ниске границе запаљивости [145].

---

<sup>9</sup> Фасцикула је сноп листова или цветова који расту збијено, у групама. На пример, фасцикуле су присутне код четинара, а број иглица у фасцикули представља важну карактеристику за идентификацију врсте.

Интензивније суше, узроковане климатским променама, доводе до промена хемијског састава шумске вегетације, што резултира повећаним концентрацијама терпена, и самим тим већим ризиком од пожара. Акумулација терпена као одговор на сушу повезана је са одбрамбеним механизмима од оксидативног стреса, јер ова једињења помажу у ублажавању оштећених ћелија изазваних екстремном топлотом и дефицитом воде [146]. Овај ефекат је посебно забрињавајући у медитеранским регионима, где продужене летње суше повећавају и концентрацију терпена и ризик од пожара. Студија *Blanch*-а и сарадника показала је да су интензивне суше повећале укупну концентрацију терпена за 54% код *Pinus halepensis* и за 119% код *Quercus ilex* што сугерише да ограничење воде повећава акумулацију испарљивих органских једињења у лиснатој маси [147]. Ова чињеница истиче значај стратегија за управљање шумским пожарима, са посебним фокусом на уклањање веома запаљивих врста у подручјима које представљају граничну зону шумских и насељених регија (*енгл. Wildland Urban Interface – WUI*).

С обзиром на сложеност између односа морфолошко-хемијских особина и запаљивости различитих делова шумске вегетације (шумска стеља, кора, листови, иглице, гране, гранчице, итд.), неопходне су стандардизоване методологије како би се интегрисале ове особине и њихов утицај на понашање шумских пожара. За разлику од одређивања карактеристика запаљивости читавих биљака, одређивање запаљивости на нивоу крајњих изданака, који укључују лишће, гранчице или гране, представља поуздан метод у процени ризика од шумских пожара [24], [148], [149].

*Engber* и *Varner* истичу важност разумевања међусобног односа морфолошких карактеристика листова и запаљивости, чији резултати могу пружити додатне информације у предвиђању динамике развоја шумских пожара [150]. Истраживања о запаљивости заснована на морфолошко-хемијским особинама биљака пружају вредан увид у динамику интеракције између биљака и пожара, чији резултати могу послужити у управљању шумским пожарима и очувању шумских екосистема [151].

Студија *Sampedro*-а и сарадника наглашава да на производњу и састав терпена у боровој шуми значајно утичу стресори животне средине, попут абиотичких (суша, екстремне температуре) и биотичких (сисари који се хране биљкама, патогени организми) стресора. Терпеноиди, заједно са фенолним једињењима, делују као примарна хемијска одбрана четинара и показују „пластичност“ као одговор на ове стресоре. Поред тога, доступност хранљивих материја, посебно фосфора, игра кључну улогу у модулацији производње терпена [152].

*Romero* и сарадници одређивали су садржај и састав терпена у свежим и сувим листовима оних врста које су присутне у шумско-насељеним регионима југоисточне Француске, и проценили њихову улогу у понашању вегетације приликом пожара. Резултати су показали да садржај терпена, нарочито сесквитерпена, има велики утицај на максималну температуру сагоревања и трајање пламена. Поред тога, значајан утицај има и садржај влаге и дебљина листова, који су у неким случајевима доминантнији носиоци запаљивости у односу на терпене [116].

Одређивање запаљивости шумске вегетације на основу њених морфолошко-хемијских карактеристика може бити од кључног значаја приликом планирања тампон зона у медитеранским регионима склоним шумским пожарима и избора зелених баријера, чиме би се заштитила инфраструктура и ублажили ризици од шумских пожара. Истраживање *Della Rocca* и сарадника показало је да баријере од шума чемпреса (*Cupressus sempervirens*) представљају ефикасну стратегију у смањењу ширења пожара. Резултати су показали да је мања запаљивост чемпреса последица високе способности задржавања влаге и високе вредности критичног флукса, који се креће у распону од 25 до 30 kW/m<sup>2</sup> [153].

*Della Rocca* и сарадници наглашавају значај интеграције садржаја терпена у моделе за предвиђање пожара. Њихово истраживање показује да се садржајем терпена може објаснити између 19% и 50% укупне запаљивости анализираних шумских врста. При томе се сесквитерпени истичу као кључни у одржавању процеса сагоревања, док монотерпени, посматрани изоловано, имају ограничен утицај на запаљивост (*Della Rocca* и остали, 2017).

Полазећи од претходних сазнања, основни циљ овог сегмента истраживања јесте свеобухватна анализа утицаја морфолошко-хемијских својстава на параметре запаљивости свеже шумске вегетације чиме би се унапредило разумевање односа између морфолошко-хемијских карактеристика биљака и њихове запаљивости.

## **5.2. Материјали и методе**

### **5.2.1. Анализиране биљне врсте и локације узорковања**

Узорковање одабраних врста извршено је на обронцима Старе планине, на подручју природног резервата Арбиње и планинског региона Видлич. Ово подручје карактерише умерено-континентална клима, са просечном годишњом количином

падавина од 800 до 1000 mm, понекад и више, док се просечна годишња температура креће између 6 и 9,5 °C [154].

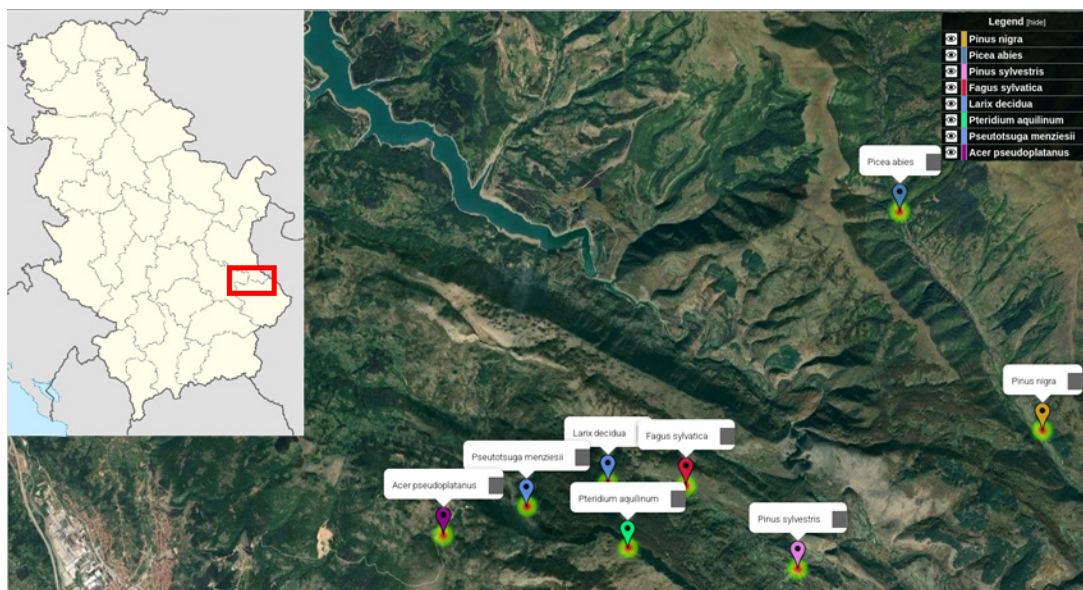
Сакупљање узорака реализовано је током августа 2024. године, у данима када је температура ваздуха била највећа. У периоду узорковања, одабране врсте су биле у фази пуног листања. Од сваке одабране врсте, са истих грана, узорци су сакупљени за: (1) одређивање морфолошких карактеристика; (2) одређивање хемијског састава; (3) одређивање параметара запаљивости.

Идентификација биљних врста је извршена према Флори СР Србије I, II и V [155]–[157]. Биљни материјал је депонован у хербаријуму Департмана за биологију и екологију Природно-математичког факултета у Нишу - Herbarium Moesiacum Niš (HMN). Ваучер бројеви обрађених врста су следећи: HMN-18792 (*F. sylvatica*), HMN-18793 (*A. pseudoplatanus*), HMN-18794 (*P. aquilinum*), HMN-18795 (*P. nigra*), HMN-18796 (*P. sylvestris*), HMN-18797 (*P. abies*), HMN-18798 (*P. menziesii*) и HMN-18799 (*L. decidua*).

Називи одабраних врста са тачним географским координатама приказани су у табели 5.1, док је на слици 5.1 дат визуелни приказ локација узорковања по врстама, што омогућава јаснији увид у географску расподелу узорковања.

**Табела 5.1.** Листа одабраних врста са координатама узорковања

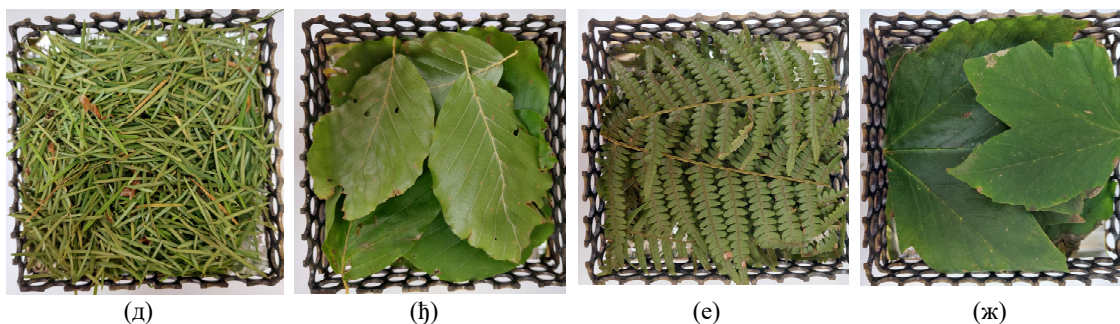
Назив врсте	Координате локације узорковања		Надморска висина [m]
	Географска ширина	Географска дужина	
<i>Pinus nigra</i> (црни бор)	43° 11' 39,49" С	22° 48' 53,77" И	835
<i>Picea abies</i> (смрча)	43° 13' 59,38" С	22° 46' 48,37" И	939
<i>Pinus sylvestris</i> (бели бор)	43° 10' 10,93" С	22° 45' 18,92" И	771
<i>Fagus sylvatica</i> (буква)	43° 11' 04,21" С	22° 43' 40,55" И	929
<i>Larix decidua</i> (ариш)	43° 11' 05,94" С	22° 42' 32,00" И	1074
<i>Pteridium aquilinum</i> (папрат)	43° 10' 24,30" С	22° 42' 49,41" И	1088
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (дуглазија)	43° 10' 50,82" С	22° 41' 20,48" И	1075
<i>Acer pseudoplatanus</i> (јавор)	43° 10' 32,56" С	22° 40' 07,47" И	1069



Слика 5.1. Локације узорковања по врстама

За сваку врсту сакупљене су потпуно здраве иглице и листови са спољашњег дела крошње. Анализирани врсте су груписане на четинарске и широколисне. У категорији широколисних, поред листопадних врста (*Fagus sylvatica* и *Acer pseudoplatanus*), укључена је и врста *Pteridium aquilinum* (папрат), која таксономски не припада лишћарима, а која је овде сврстана због морфолошке сличности листова. Имајући у виду да израз “широколисне врсте“ не представља стандардну таксономску категорију, у овој дисертацији он се користи као оперативни термин за означавање свих биљних врста које поседују сличну морфологију листа. Сакупљени узорци одмах су паковани у херметички затворене пластичне кесе, како би се очувала њихова свежина и минимизирао губитак влаге. Фотографије одабраних врста приказане су на слици 5.2. Лабораторијска испитивања су започета дан након прикупљања узорака. Одређивање параметара запаљивости спроведена су у Лабораторији за заштиту од пожара на Факултету заштите на раду у Нишу, а анализа морфолошко-хемијских карактеристика спроведена је у Лабораторији Групе за органску анализу и синтезу, Департмана за хемију, Природно-математичког факултета у Нишу, Универзитета у Нишу.





Слика 5.2. Сlike анализираних врста: (а) *Pinus nigra* - Pn (црни бор); (б) *Picea abies* - Pa (смрча); (в) *Pinus sylvestris* - Ps (бели бор); (г) *Larix decidua* - La (ариш); (д) *Pseudotsuga menziesii* - Pm (дуглазија); (ђ) *Fagus sylvatica* - Fs (буква); (е) *Pteridium aquilinum* - Paq (папрат); (ж) *Acer pseudoplatanus* - Ap (јавор)

### 5.2.2. Одређивање параметара запаљивости

Одређивање параметара запаљивости, и то: време паљења (енгл. *Time to Ignition – TTI*), просечна топлотна снага (енгл. *Mean Heat Release Rate – Mean HRR*), максимална топлотна снага (енгл. *Peak Heat Release Rate – PHRR*), максимална ефективна топлотна моћ (енгл. *Peak Effective Heat of Combustion – Peak EHC*), просечна ефективна топлотна моћ (енгл. *Mean Effective Heat of Combustion – Mean EHC*), брзина губитка масе (енгл. *Mass Loss Rate – MLR*) и укупна ослобођена топлота (енгл. *Total Heat Release - THR*), извршено је на калориметру за одређивање топлотне снаге, чији је детаљан опис и принцип рада приказан у другом поглављу дисертације - *Развој експерименталне инсталације за испитивање пожарних карактеристика и продуката сагоревања шумске вегетације*. За потребе овог истраживања, конусни грејач је калибрисан и подешен на топлотни флуks од 50 kW/m<sup>2</sup>. За сваки експеримент примењено је пилотирано паљење, уз употребу варничног упаљача.

Коришћен је наменски израђен носач узорка димензија 10 × 10 × 3,5 cm, са перфорираним странама. Перфорација бочних страна чинила је око 63% укупне површине носача узорка. Растојање носача узорка од ивице конусног грејача износила је 25 mm. Маса сваког узорка је износила приближно 10 g ± 0,5 g. За сваку анализирану врсту спроведена су најмање три понављања. Током свих експеримената, сви узорци су се успешно запалили. За време реализације експеримената, температура у лабораторији била је 28 ± 2°C, а релативна влажност ваздуха 57 ± 3%.

### 5.2.3. Одређивање морфолошких карактеристика

Анализа морфолошких и физиолошких особина листова спроведена је према протоколу *Porović* и сарадника [158]. Карактери дужина, ширина и дебљина листова

одређивани су дигиталним нонијусом. Тежина листова (свежих и осушених) мерена је аналитичком вагом; листови су сушени 48 сати на 70 °С. Површина листова одређивана је након скенирања уз употребу софтвера *ImageJ* [159]. Специфична површина листа дефинисана је као однос скениране површине листа и његове суве тежине. Индекс густине одређиван је као однос тежине листова и њихове површине. Волумен листова мерен је пикнометром. Садржај воде у листу изражен је у процентима и представља однос разлике између масе свежих и сувих листова према маси сувих листова.

#### 5.2.4. Одређивање хемијског састава

##### 5.2.4.1. Хемикалије

Све хемикалије коришћене у раду су биле *p.a.* (лат. *pro analysis* – за анализу) степена чистоће и коришћене су без претходног пречишћавања, сем растварача који су предестиловани непосредно пре коришћења.

##### 5.2.4.2. Припрема екстракта

Свеж биљни материјал је најпре уситњен, а затим екстрахован хексаном уз примену ултразвука у трајању од 30 минута. Након тога, узорак је остављен да стоји преко ноћи на тамном месту. Након што је екстракт филтриран преко слоја NaCl и осушен са анхидрованим MgSO<sub>4</sub>, растварач је уклоњен помоћу ротационог вакуум-упаривача. Маса анализираног свежег биљног материјала, као и масе и приноси екстракта дати су у табели 5.2.

**Табела 5.2.** Маса биљног материјала који је подвргнут екстракцији, маса и принос добијеног екстракта

Таксон	Маса биљног материјала [g]	Маса екстракта [g]	Принос екстракта (%)
<i>Pinus nigra</i>	167,00	1,2694	0,76
<i>Picea abies</i>	105,00	0,4434	0,42
<i>Pinus sylvestris</i>	122,00	0,6808	0,56
<i>Fagus sylvatica</i>	20,65	0,0627	0,30
<i>Larix decidua</i>	61,00	0,2272	0,37
<i>Pteridium aquilinum</i>	85,00	0,0650	0,08
<i>Pseudsotsuga menziesii</i>	158,00	0,7729	0,49
<i>Acer pseudoplatanus</i>	59,00	0,2098	0,36

#### 5.2.4.3. Гасна хроматографија са масеном спектрометријом (GC-MS)

За анализу састава хексанских екстраката одабраних биљних врста примењена је GC-MS метода. Анализа је изведена коришћењем гасног хроматографа *Hewlett-Packard* 6890N (*Hewlett-Packard*, Паоло Алто, Калифорнија, САД) директно повезаног са масеним детектором 5975В исте компаније. Гасни хроматограф је опремљен капиларном колоном DB-5MS (95% диметил-, 5% дифенил-полисилоксан, димензија 30 m × 0,25 mm, дебљине филма 0,25 µm, *Agilent Technologies*, Паоло Алто, Калифорнија, САД). Током анализе, температура ињектора и трансфер линије одржаване су на 250 и 320 °C. Температура пећи је линеарно повећавана од 70 до 315 °C брзином од 5 °C/min, након чега је задржана 30 минута на 315 °C. Као носећи гас коришћен је хелијум са константним протоком од 1,0 ml/min. Узорак, 1 µl раствора екстракта у хексану, убризган је пулсно. Што се тиче режима рада масеног спектрометра, јонизација је извршена електронским ударом при енергији од 70 eV. Масени детектор је радио у режиму потпуног скенирања у опсегу  $m/z$  35–750, брзином од 5 скенирања у секунди, при чему је трајање појединачног скенирања износило 0,34 секунде. За квантификацију је коришћен режим селективног праћења јона (SIM, енгл. *Selected Ion Monitoring*). Процентуални састав је израчунат на основу површина ТИС-пикова, без употребе корекционих фактора.

Добијени хроматограми анализирани су помоћу софтвера *MSD ChemStation* (вер. D.03.00.611, *Agilent Technologies*, Санта Клара, САД), *AMDIS* (*Automated Mass Spectral Deconvolution and Identification System*, вер. 2.68; DTRA/NIST) и *NIST MS Search* софтвера (вер. 2.0D, Национални институт за стандарде и технологију, САД). *AMDIS* је коришћен за деконволуцију масених скенова, односно екстракцију масених спектра из преклопљених пикова, док је *NIST MS Search* употребљаван за претрагу масених спектра из библиотека наведених ниже. Линеарни ретенциони индекси аналитичких састојака одређени су коињекцијом са хомологом серијом  $n$ -алкана (C<sub>9</sub>-C<sub>38</sub>) према *Van Den Dool* и *Kratz*-у [160].

Квалитативна анализа испитиваних узорака извршена је:

- поређењем експериментално добијених ретенционих индекса састојака екстраката, израчунатих у односу на ретенциона времена ко-ињектираних хомолога серије  $n$ -алкана (C<sub>9</sub>-C<sub>38</sub>) према *Van Den Dool* и *Kratz*-у са литературним вредностима [161]–[166];
- поређењем масених спектра са спектрима стандарда, као и масеним спектрима познатих једињења из библиотека: *Wiley Registry of Mass Spectral Data 10th*

*Edition, NIST/EPA/NIH Mass Spectral Library 14, MassFinder 2.3, Adams* (Adams, 2017) и MS библиотеке OSA (енгл. *Organic Synthesis and Analysis*) истраживачке групе Природно-математичког факултета у Нишу;

- анализом фрагментационих шаблона у масеним спектрима;
- коиньекцијом узорка са одговарајућим стандардом, где год је било могуће.

Релативна заступљеност састојака екстраката одређен је интеграљењем површине пикова у хроматограмима, без употребе корекционих фактора.

### 5.2.5. Експериментални дизајн и статистичка анализа

У овом истраживању примењен је потпуни случајни блок-дизајн (енгл. *randomized complete block design*). Параметри запаљивости представљају зависне променљиве, док су морфолошке и хемијске карактеристике посматране као инхерентне карактеристике сваке врсте, и представљају независне променљиве. Како би се истражио утицај ових карактеристика на зависне променљиве (параметре запаљивости), примењен је корелациони приступ заснован на регресионој анализи.

За све вредности зависних и независних променљивих израчунате су средње вредности, које су коришћене у даљој статистичкој анализи. За параметре запаљивости и морфолошких карактеристика најпре је извршена провера подударности расподеле података са нормалном расподелом применом Колмогоров-Смирновог (енгл. *Kolmogorov-Smirnov*) и Шапиро-Вилковог (енгл. *Shapiro-Wilk*) теста. Резултати оба теста показали су да подаци прате нормалну дистрибуцију.

За испитивање значајних разлика између специфичних група, за параметре запаљивости и морфолошких карактеристика, примењена је једнофакторска анализа варијансе (*one-way ANOVA*), као и Тукијев *post-hoc* тест (енгл. *Tukey's post-hoc test*). Праг значајности ( $\alpha$ ) ових статистичких тестова постављен је на 0,05.

Што се тиче хемијског састава анализираних биљних врста, заступљеност појединачних састојака изражена је у процентима (%). С обзиром на то да су хемијске карактеристике за сваку врсту представљене у виду средње вредности по врсти, није било могуће извршити статистичко поређење између појединачних врста, јер недостају поновљена мерења унутар сваке врсте. Уместо тога, врсте су класификоване у две групе, четинарске и широколисне, а статистичка анализа је спроведена на нивоу група врста. Да би се процениле разлике у хемијском саставу између ове две групе, за свако једињење

је примењен непараметарски *Mann-Whitney U* тест. Овај тест је прикладан за мале величине узорака и не захтева нормалну расподелу података.

Пре анализе утицаја морфолошко-хемијских карактеристика на параметре запаљивости испитиваних врста шумске вегетације, извршено је испитивање могућности постојања образаца за груписање врста у складу са њиховом таксономском припадношћу, на четинарске и широколисне. У ту сврху, примењена је анализа главних компонената (енгл. *Principal Component Analysis – PCA*) за параметре запаљивости. Након извршене анализе, за утврђивање квалитета издвајања кластера, примењене су методе груписања - кластеризација К-средина (енгл. *K-mean clustering*) и хијерархијска кластер анализа (енгл. *Hierarchical clustering*), а интерна валидност резултујућих група процењена је израчунавањем *Silhouette score* коефицијента.

У иницијалној фази обраде података, сви подаци су стандардизовани применом *Z-score* трансформације, како би се обезбедила упоредивост зависних и независних променљивих, јер су изражене у различитим јединицама. На тај начин подаци су истовремено центрирани и скалирани.

У наставку, применом одговарајућих статистичких метода, идентификовани су доминантни обрасци морфолошко-хемијских карактеристика који имају утицај на параметре запаљивости четинарских и широколисних врста.

Свака група врста (четинарске и широколисне врсте) и сваки скуп особина (морфолошке и хемијске карактеристике) анализирани су одвојено коришћењем комбинације *PCA* анализе и регресионе анализе са критеријумом парцијалних најмањих квадрата (енгл. *Partial Least Squares Regression – PLS*).

*PCA* анализа је најпре примењена посебно на сваки скуп особина да би се смањила димензионалност и елиминисала мултиколинearност између променљивих. За сваки скуп особина задржан је онолики број *PC* димензија који заједно обухватају 90% укупне варијансе унутар података. Затим су анализирана векторска оптерећења (*PCA loadings*) за сваку од добијених димензија, са циљем идентификације доприноса сваке појединачне независне променљиве на изабрану *PC* димензију. Након тога, примењена је *PLS* регресија како би се одредио утицај морфолошко-хемијских карактеристика на параметре запаљивости, при чему су *PC* димензије коришћене као предикторске (независне) променљиве. Коефицијенти *PLS* регресије су повезани са сваком *PC* димензијом да би се одредио утицај те димензије на варијабилност параметара запаљивости. Поред коефицијената регресије, одређен је коефицијент детерминације ( $R^2Y$ ) који показује степен објашњења варијансе зависних променљивих. Такође је

израчунат и *VIP score (Variable Importance in Projection)*, који се примењује у *PLS* регресионим моделима и служи у процени утицаја појединачних независних променљивих, односно у овом случају *PC* димензија. Вредности *VIP score*-а веће од 1 указују да је променљива од кључног значаја за модел [167].

Код одређивања доприноса сваке појединачне морфолошко-хемијске карактеристике на параметре запаљивости, њихова векторска оптерећења и коефицијенти регресије за сваку *PC* димензију, чији је *VIP score* већи од 1, су помножена и сабрана [168]. Ради једноставније интерпретације, креирана је општа формула која се односи за сваку морфолошко-хемијску карактеристику *T (trait)* и параметар запаљивости *Y*:

$$T_{\text{допринос}} \rightarrow Y = \sum_{i=1}^k (PC \text{ loading}_{T, PC_i} \times PLS \text{ coeff}_{PC_i \rightarrow Y})$$

где је:

- *PC loading<sub>T, PC<sub>i</sub></sub>* представља векторско оптерећење независне променљиве у оквиру једне *PC* димензије;
- *PLS coeff<sub>PC<sub>i</sub> - Y</sub>* представља коефицијент регресије и колико *PC* димензија утиче на параметар запаљивости;
- *k* представља број *PC* димензија.

Морфолошке и хемијске карактеристике које имају високе позитивне вредности у оквиру добијених коефицијената указују на снажан позитиван утицај на посматрани параметар запаљивости, односно веће вредности тих карактеристика доводе до повећања вредности параметра запаљивости. Насупрот томе, високе негативне вредности указују на карактеристике које имају снажан негативан утицај, што значи да више вредности тих карактеристика доводе до смањења вредности одговарајућег параметра запаљивости.

Сви статистички тестови извршени су коришћењем софтвера *R (RStudio IDE)*. За *PCA* анализу коришћени су пакети *FactoMineR* и *factoextra*, а за *PLS* регресију коришћен је пакет *ppls*.

Имајући у виду да је број испитиваних врста ограничен, посебно у групи широколисних врста ( $n = 3$ ), сви резултати који проистичу из примене мултиваријантних метода, као што су *PCA* и *PLS* регресија, треба да се тумаче као прелиминарни и оријентациони. Ради обезбеђивања уједначене структуре података за анализу, све променљиве (морфолошке, хемијске и параметри запаљивости) представљене су као средње вредности по врсти. Овакав приступ омогућио је примену заједничких

статистичких модела и интегрисану интерпретацију утицаја различитих особина на параметре запаљивости.

Примарни циљ овог приступа није потпуна статистичка предикција, већ идентификација образаца и потенцијалних односа између морфолошко-хемијских карактеристика и параметара запаљивости. Примена ових метода омогућила је да се у условима ограничених података добију квалитативни увиди који могу послужити као основа за будућа истраживања са већим бројем врста.

### 5.3. Резултати

#### 5.3.1. Анализа параметара запаљивости испитиваних врста

У табели 5.3 приказане су средње вредности параметара запаљивости за анализирани врсте. Једнофакторска *ANOVA* анализа показала је статистички значајне разлике између испитиваних врста за све параметре запаљивости ( $p < 0,05$ ). *F*-вредности<sup>10</sup> су се кретале од 4,089 (за *Mean MLR*) до 56,740 (за *Peak EHC*). Што је *F*-вредност већа, то указује да средње вредности параметара запаљивости значајно варирају између врста, док је варијација унутар сваке врсте релативно мала, односно разлике у параметрима запаљивости могу се приписати врстама, а не случајним факторима. Додатно, израчунати су и коефицијенти варијације (енгл. *coefficient of variation, CV*), који указују на релативну стабилност мерења.

Анализирани параметри запаљивости показују различит степен варијације између и унутар испитиваних врста, што омогућава процену њихове применљивости у идентификацији разлика између врста према нивоу запаљивости.

Највише *F*-вредности бележе параметри *Peak EHC* ( $F = 56,740$ ;  $CV = 18,78\%$ ) и *PHRR* ( $F = 54,996$ ;  $CV = 11,81\%$ ), што указује на њихову изразиту способност да разликују врсте у погледу интензитета сагоревања. Нарочито се истиче параметар *PHRR*, због најнижег коефицијента варијације, што га чини поузданим параметром за разликовање врста према интензитету сагоревања.

*Mean HRR* ( $F = 37,852$ ;  $CV = 13,52\%$ ) и *Peak MLR* ( $F = 10,001$ ;  $CV = 15,99\%$ ) такође показују добру способност да разликују врсте у погледу интензитета и динамике

---

<sup>10</sup> *F*-вредност је статистички показатељ који се користи у анализи варијансе (*ANOVA*) и другим тестовима за процену да ли постоји значајна разлика између две или више група. Представља однос варијансе између група и варијансе унутар група. Високе *F*-вредности сугеришу да је варијабилност између група много већа него унутар група, што може указивати на статистички значајну разлику.

сагоревања. Њихова умерено ниска унутарврстна варијабилност указује на релативну поузданост у поређењу врста по овим параметрима.

Параметри попут *Mean EHC* ( $F = 24,118$ ;  $CV = 19,73\%$ ) и *THR* ( $F = 23,140$ ;  $CV = 29,60\%$ ) имали су умерено високе  $F$ -вредности, али нешто више коефицијенте варијације, што указује на постојање значајних разлика међу врстама, али и нешто већу унутарврстну варијабилност, која може утицати на поузданост.

Са друге стране, параметри *TTI* ( $F = 7,831$ ;  $CV = 33,58\%$ ) и *Mean MLR* ( $F = 4,089$ ;  $CV = 28,07\%$ ) показују слабу способност да разликују врсте у погледу запаљивости. Њихова висока унутарврстна варијабилност смањује поузданост ових параметара и ограничава њихову примену у анализи разлика између врста.

За утврђивање специфичних група међу врстама које се значајно разликују у оквиру појединачних параметара запаљивости, примењен је Тукијев *post hoc* тест, чија су статистичка груписања приказана на слици 5.3.

**Табела 5.3.** Средње вредности резултата параметара запаљивости испитиваних врста и резултати једнофакторске ANOVA анализе. Статистички значајни резултати су приказани подељаним текстом ( $p < 0,05$ )

Анализиране врсте	Параметри запаљивости							
	TTI [s]	PHRR [kW/m <sup>2</sup> ]	Peak EHC [MJ/kg]	Peak MLR [g/s]	Mean HRR [kW/m <sup>2</sup> ]	Mean EHC [MJ/kg]	Mean MLR [g/s]	THR [MJ/m <sup>2</sup> ]
<i>P. nigra</i>	24,3 ± 3,2	131,5 ± 11,7	57,8 ± 15,9	0,28 ± 0,03	87,4 ± 13,3	9,3 ± 1,3	0,1 ± 0,02	6,4 ± 0,7
<i>P. abies</i>	38,6 ± 12,5	80,6 ± 13,3	70,1 ± 2,9	0,17 ± 0,03	55,7 ± 5,4	11,6 ± 0,7	0,05 ± 0,01	6,7 ± 0,8
<i>P. sylvestris</i>	23,2 ± 4,7	158 ± 13,5	63,4 ± 6,1	0,31 ± 0,05	112,4 ± 10,9	11,7 ± 0,7	0,1 ± 0,01	7,8 ± 0,5
<i>L. decidua</i>	19,5 ± 3,7	69 ± 5,7	8,3 ± 2,1	0,23 ± 0,02	56 ± 8,8	4,2 ± 1,1	0,14 ± 0,02	1 ± 0,4
<i>P. menziesii</i>	16,2 ± 3,1	96,8 ± 8,5	61,2 ± 12,7	0,26 ± 0,04	67,8 ± 6,2	8,5 ± 2,9	0,1 ± 0,06	5,6 ± 2,7
<i>F. sylvatica</i>	2 ± 1,4	81,7 ± 5,1	10,3 ± 2,5	0,2 ± 0,02	55,7 ± 5,8	4,4 ± 0,3	0,13 ± 0	1,2 ± 0,1
<i>P. aquilinum</i>	21,7 ± 11,7	51,2 ± 12,4	7,7 ± 2,7	0,16 ± 0,03	41,5 ± 11,3	3,8 ± 1,4	0,11 ± 0,01	0,8 ± 0,4
<i>A. pseudoplatanus</i>	10 ± 4,4	31,8 ± 9,1	3,5 ± 1,8	0,16 ± 0,02	22,3 ± 7,6	1,9 ± 0,6	0,12 ± 0	0,2 ± 0,1
<b>p-вредност</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,005</b>	<b>0,000</b>
<b>F-вредност</b>	7,831	54,996	56,740	10,001	37,852	24,118	4,089	23,140
<b>Коефицијент варијације [%]</b>	33,582	11,811	18,78	15,993	13,521	19,726	28,069	29,597

Најдуже време паљења (*TTI*) уочено је код врсте *P. abies* (38,6 ± 12,5 s) која се статистички значајно разликује од већине осталих врста, попут *P. sylvestris*, *L. decidua*, *P. menziesii*, *F. sylvatica* и *A. pseudoplatanus*, али не и од врсте *P. aquilinum*. Са друге стране, врста *F. sylvatica* (2 ± 1,4 s) је показала најкраће време паљења (*TTI*). Између врста *P. nigra* (24,3 ± 3,2 s), *P. sylvestris* (23,2 ± 4,7 s), *L. decidua* (19,5 ± 3,7 s), *P. menziesii* (16,2 ± 3,1 s), *P. aquilinum* (21,7 ± 11,7 s) и *A. pseudoplatanus* (10 ± 4,4 s) утврђено је да међу њима нема статистички значајне разлике.

Максимална вредност топлотне снаге (*PHRR*) забележена је код врсте *P. Sylvestris* (158 ± 13,5 kW/m<sup>2</sup>) која се статистички значајно разликује у односу на све остале врсте.

Врста *P. nigra* ( $131,5 \pm 11,7 \text{ kW/m}^2$ ) има мању вредност максималне топлотне снаге (*PHRR*) у односу на *P. Sylvestris*, а која се такође статистички значајно разликује у односу на остале врсте. Између врста *P. abies* ( $80,6 \pm 13,3 \text{ kW/m}^2$ ), *F. sylvatica* ( $81,7 \pm 5,1 \text{ kW/m}^2$ ), *L. decidua* ( $69 \pm 5,7 \text{ kW/m}^2$ ) и *P. menziesii* ( $96,8 \pm 8,5 \text{ kW/m}^2$ ) није утврђена статистичка значајна разлика, али се све ове врсте значајно разликују од *A. pseudoplatanus* ( $31,8 \pm 9,1 \text{ kW/m}^2$ ), која уједно има најнижу вредност максималне топлотне снаге (*PHRR*).

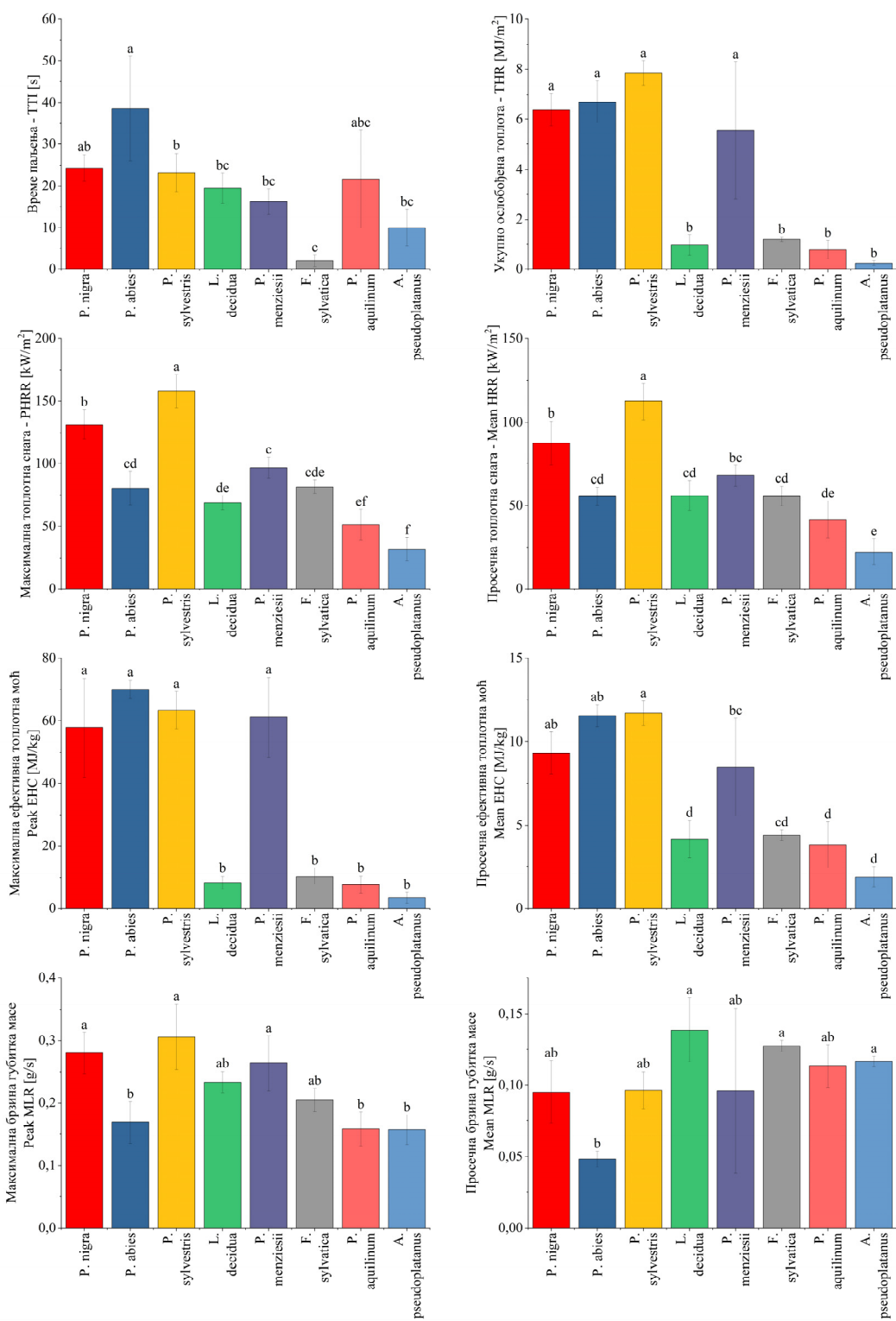
Слично као и код максималне топлотне снаге (*PHRR*), највећа просечна топлотна снага (*Mean HRR*) забележена је код врсте *P. sylvestris* ( $112,4 \pm 10,9 \text{ kW/m}^2$ ), чији резултати указују на статистички значајне разлике у односу на остале врсте. Супротно томе, најмања просечна топлотна снага (*Mean HRR*) уочена је код врсте *A. pseudoplatanus* ( $22,3 \pm 7,6 \text{ kW/m}^2$ ), која је значајно нижа у поређењу са осталим врстама, осим у поређењу са врстом *P. aquilinum*. Такође, врста *P. nigra* се статистички значајно разликује од већине осталих врста, осим од *P. menziesii*, са којом не показује значајну разлику у вредностима просечне топлотне снаге (*Mean HRR*). Између врста *P. abies*, *L. decidua*, *P. menziesii*, *F. sylvatica* и *P. aquilinum* није уочена статистичка значајна разлика у просечним вредностима топлотне снаге (*Mean HRR*).

Највеће вредности максималне ефективне топлотне моћи (*Peak EHC*) забележене су код четинарских врста *P. abies* ( $70,1 \pm 2,9 \text{ MJ/kg}$ ), *P. sylvestris* ( $63,4 \pm 6,1 \text{ MJ/kg}$ ), *P. nigra* ( $57,8 \pm 15,9 \text{ MJ/kg}$ ) и *P. menziesii* ( $61,2 \pm 12,7 \text{ MJ/kg}$ ). Са друге стране, најниже вредности су забележене код врста *A. pseudoplatanus* ( $3,5 \pm 1,8 \text{ MJ/kg}$ ), *P. aquilinum* ( $7,7 \pm 2,7 \text{ MJ/kg}$ ), *L. decidua* ( $8,3 \pm 2,1 \text{ MJ/kg}$ ) и *F. sylvatica* ( $10,3 \pm 2,5 \text{ MJ/kg}$ ). Тукијев *post-hoc* тест је показао да постоји статистичка значајна разлика између групе четинарских врста, изузев *L. decidua*, и групе коју чине врсте *F. sylvatica*, *A. pseudoplatanus*, *P. aquilinum* и *L. decidua*.

Четинарске врсте *P. sylvestris*, *P. abies*, *P. nigra* издвајају се по највишим вредностима просечне ефективне топлотне моћи (*Mean EHC*), затим следи *P. menziesii* и *F. Sylvatica*, док *L. decidua*, *P. aquilinum* и *A. pseudoplatanus* показују значајно ниже вредности. Врста *P. sylvestris* ( $11,7 \pm 0,7 \text{ MJ/kg}$ ) бележи највећу вредност просечне ефективне топлотне моћи (*Mean EHC*) и статистички се значајно разликује од свих осталих врста, осим од врста *P. abies* и *P. nigra*. Врста *P. menziesii* показује значајне сличности у резултатима са врстама *P. abies*, *P. nigra* и *F. sylvatica*. Врсте *L. decidua* ( $4,2 \pm 1,1 \text{ MJ/kg}$ ), *P. aquilinum* ( $3,8 \pm 1,4 \text{ MJ/kg}$ ) и *A. pseudoplatanus* ( $1,9 \pm 0,6 \text{ MJ/kg}$ ) показују најниже вредности просечне ефективне топлотне моћи (*Mean EHC*), и утврђено је да међу њима не постоји статистичка значајна разлика.

Највише вредности максималне брзине губитка масе (*Peak MLR*) имају четинарске врсте *P. menziesii*, *P. nigra*, *P. sylvestris* и оне износе 0,26, 0,28 и 0,31 g/s, редом. Ове вредности се значајно разликују од највиших вредности максималне брзине губитка масе врста *P. abies* (0,17 g/s), *P. aquilinum* (0,16 g/s) и *A. pseudoplatanus* (0,16 g/s). Врсте *F. sylvatica* и *L. decidua*, са максималном брзином губитка масе (*Peak MLR*) у опсегу од 0,20 и 0,23 g/s не показују статистички значајне разлике у односу на остале врсте.

Врсте са највише вредности просечне брзине губитка масе (*Mean MLR*) имају врсте *L. decidua* ( $0,14 \pm 0,02$  g/s), *F. sylvatica* (0,13 g/s) и *A. pseudoplatanus* (0,12 g/s), које се међусобно статистички не разликују. Врста са најмањом вредношћу просечне брзине губитка масе (*Mean MLR*) је *P. abies* ( $0,05 \pm 0,01$  g/s). *P. nigra*, *P. sylvestris*, *P. aquilinum*, *P. menziesii*, не показују статистички значајне разлике у односу на остале врсте, када је овај параметар запаљивости у питању.



Слика 5.3. Статистичко груписање врста према параметрима запаљивости применом Тукијевог *post-hoc* теста. Тумачење Тукијевог *post-hoc* теста заснива се на томе да се средње вредности које не деле исто слово, значајно разликују

### 5.3.2. *Анализа морфолошких карактеристика испитиваних врста*

У табели 5.4 приказане су средње вредности морфолошких карактеристика за анализиране врсте. Као и код параметара запаљивости, једнофакторска *ANOVA* анализа показала је статистички значајне разлике између испитиваних врста за све морфолошке карактеристике ( $p < 0,05$ ), што указује на њихову потенцијалну вредност као индикатора у процени запаљивости.

Највише *F*-вредности добијене су за ширину листа ( $F = 559,88$ ), дужину листа ( $F = 290,82$ ) и дебљину листа ( $F = 270,96$ ), тако да су ови параметри најпоузданији за разликовање испитиваних врста. Овако високе вредности указују на то да је варијација између врста знатно већа од унутарврстне варијабилности, чиме се повећава њихова вредност у потенцијалној корелацији са запаљивошћу. Истовремено, карактеристике дужина и дебљина листа имају ниске коефицијенте варијације (11,26% и 12,8%), што указује на високу уједначеност резултата унутар врста и добру прецизност мерења.

Специфична површина листа и индекс густине такође показују значајне *F*-вредности (66,53 и 136,98, респективно), са умереним коефицијентима варијације (28,22% и 26,18%). То указује на релативно стабилне разлике међу врстама, али и на нешто већу унутарврстну варијабилност. Ови параметри могу имати важну улогу у процени термичких својстава листа, који утичу на брзину сагоревања и пренос топлоте.

Волумен листа, са *F*-вредношћу од 58,65 и најнижим коефицијентом варијације од 8,8%, представља изузетно стабилан параметар са добром способношћу разликовања врста, што га чини потенцијално веома вредним показатељем у моделима предикције запаљивости.

Супротно томе, садржај воде показује најнижу *F*-вредност од 3,18 и највиши коефицијент варијације (42,17%), што указује на значајну унутарврстну варијабилност и смањену поузданост у процени разлика међу врстама. Иако је садржај воде кључан фактор који утиче на запаљивост, његова вредност може значајно варирати у зависности од спољашњих услова, фазе развоја ткива и времена узорковања, чиме је смањена његова поузданост.

**Табела 5.4.** Средње вредности резултата морфолошких карактеристика испитиваних врста и резултати једнофакторске ANOVA анализе. Статистички значајни резултати су приказани подебљаним текстом ( $p < 0,05$ )

Анализиране врсте	Дужина листа [mm]	Ширина листа [mm]	Дебљина листа [MJ/kg]	Специфична површина листа [cm <sup>2</sup> /g]	Индекс густине [mg/cm <sup>3</sup> ]	Волумен листа [g/ml]	Садржај влаге [%]
<i>P. nigra</i>	95,3 ± 7,1	1,3 ± 0,1	0,7 ± 0,06	37,9 ± 4,7	3,74 ± 0,64	1,03 ± 0,05	99,3 ± 23
<i>P. abies</i>	16 ± 1,7	1,2 ± 0,1	0,6 ± 0,08	67,5 ± 15	2,35 ± 0,73	0,91 ± 0,02	152,9 ± 35,6
<i>P. sylvestris</i>	37,9 ± 2,6	1,3 ± 0,1	0,62 ± 0,05	45,3 ± 4,9	2,78 ± 0,35	1 ± 0,06	102,3 ± 20,7
<i>L. decidua</i>	28,4 ± 2,7	1 ± 0,1	0,27 ± 0,04	105,8 ± 22,4	0,70 ± 0,16	0,77 ± 0,03	168,7 ± 51,6
<i>P. menziesii</i>	24,3 ± 2,6	1,5 ± 0,1	0,49 ± 0,06	67,2 ± 15,2	1,66 ± 0,23	0,87 ± 0,04	127,8 ± 50
<i>F. sylvatica</i>	72,9 ± 8,5	47,4 ± 4,1	0,09 ± 0,01	286,7 ± 65,8	0,06 ± 0,01	0,68 ± 0,12	103,1 ± 54,3
<i>P. aquilinum</i>	42,5 ± 7	12 ± 1,2	0,12 ± 0,01	197,8 ± 70,5	0,16 ± 0,04	0,73 ± 0,09	164,2 ± 111,9
<i>A. pseudoplatanus</i>	90,6 ± 8,3	106,7 ± 13,7	0,14 ± 0,01	219,9 ± 15	0,13 ± 0,01	0,51 ± 0,1	100,7 ± 14,6
<b>p-вредност</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,005</b>
<b>F-вредност</b>	290,82	559,88	270,96	66,53	136,98	58,65	3,18
<b>Коефицијент варијације [%]</b>	11,26	23,51	12,8	28,22	26,18	8,8	42,17

За утврђивање специфичних група међу врстама које се значајно разликују у оквиру појединачних морфолошких карактеристика, примењен је Тукијев *post-hoc* тест, чија су статистичка груписања приказана на слици 5.4.

Врсте *P. nigra* и *A. pseudoplatanus* имају највећу дужину листа и значајно се разликују од свих осталих. Најкраћу дужину листа има врста *P. abies* која се такође значајно разликује од осталих. Вредности дужине листа за врсте *P. sylvestris* и *P. aquilinum* се не разликују значајно, као и за врсте *L. decidua* и *P. menziesii*.

Са највећом ширином листа издваја се врста *A. pseudoplatanus*, која се значајно разликује од свих осталих. Врсте *P. nigra*, *P. sylvestris*, *P. abies*, *L. decidua* и *P. menziesii* имају најмање вредности, и међусобно се статистички значајно не разликују. Остале врсте, *F. sylvatica* и *P. aquilinum*, сврстане су у средишње групе по ширини листа, које се међусобно, а и у односу на остале врсте значајно разликују.

Највећу дебљину листа има врста *P. nigra*, која се значајно разликује од осталих врста. Сличне вредности дебљине листа имају врсте *P. abies* и *P. sylvestris*, док мање вредности дебљине листа имају врсте *F. sylvatica*, *P. aquilinum* и *A. pseudoplatanus*. Врсте *L. decidua* и *P. menziesii* налазе се у средишњим групама по дебљини листа, и значајно се разликују међусобно и од свих осталих врста.

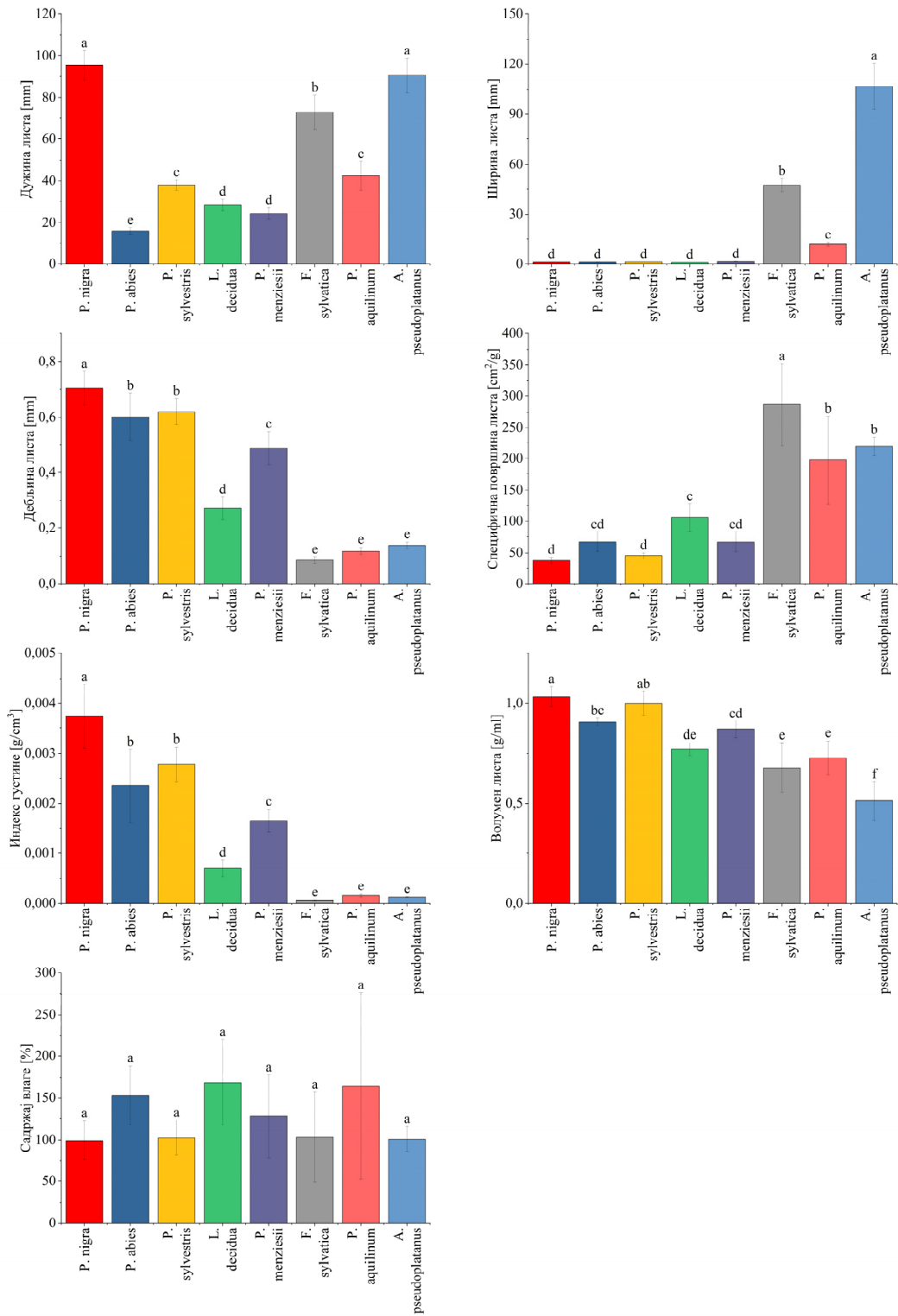
Највећу специфичну површину листа има врста *F. sylvatica*, која се значајно разликује од свих осталих врста. Врсте *P. aquilinum* и *A. pseudoplatanus* међусобно се не разликују значајно, али у односу на остале врсте, показују значајне разлике. Сличне вредности специфичне површине листа такође деле врсте *P. nigra*, *P. abies*, *P. sylvestris* и

*P. menziseii*. Такође, врста *L. decidua* издваја се по значајним разликама у односу на све врсте, осим за врсте *P. abies* и *P. menziseii*.

Вредности волумена листа међу испитиваним врстама указују на међусобне сличности. Најмања вредност уочена је код врсте *A. pseudoplatanus*, која се једина статистички значајно разликује од свих осталих врста. У осталим случајевима, значајне разлике између осталих врста нису директно истакнуте, тј. вредности указују на постојање преклапања и сличности у вредностима.

Највећу вредност индекса густине показала је врста *P. nigra* ( $3,74 \pm 0,64 \text{ mg/cm}^3$ ), која се статистички значајно разликује од свих осталих врста. Врсте *P. abies* и *P. sylvestris* међусобно не показују статистичку разлику, али се значајно разликују од осталих врста. Врсте *P. menziseii* ( $1,66 \pm 0,23 \text{ mg/cm}^3$ ) и *L. decidua* ( $0,70 \pm 0,16 \text{ mg/cm}^3$ ) значајно се разликују од свих осталих, а и међусобно. Најниже вредности овог параметра забележене су код врста *F. sylvatica* ( $0,06 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^3$ ), *P. aquilinum* ( $0,16 \pm 0,04 \text{ mg/cm}^3$ ) и *A. pseudoplatanus* ( $0,13 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^3$ ), које се међусобно статистички не разликују, али се истовремено значајно разликују од свих осталих испитиваних врста.

За вредности садржаја воде између врста нису уочене статистички значајне разлике, међутим анализиране вредности показују веома велику варијабилност, са просеком од око 127,4% и стандардном девијацијом приближно 42,2%. Највећи садржај воде утврђен је код *L. decidua* ( $168,7 \pm 51,6\%$ ) и *P. aquilinum* ( $164,2 \pm 111,9\%$ ), што указује на способност ових врста да акумулирају значајне количине воде у листовном ткиву. Са друге стране, *P. nigra* и *A. pseudoplatanus* имају најниже вредности ( $99,3 \pm 23\%$  и  $100,7 \pm 14,6\%$ , респективно). Велика варијабилност садржаја воде, посебно код неких врста (нпр. *P. aquilinum*), указује на значај унутарврстних разлика, што може бити последица стадијума развоја, изложености светлости, влажности станишта или других еколошких фактора.



Слика 5.4. Статистичко груписање врста према морфолошким карактеристикама применом Тукијевог *post-hoc* теста. Тумачење Тукијевог *post-hoc* теста заснива се на томе да се средње вредности које не деле исто слово, значајно разликују

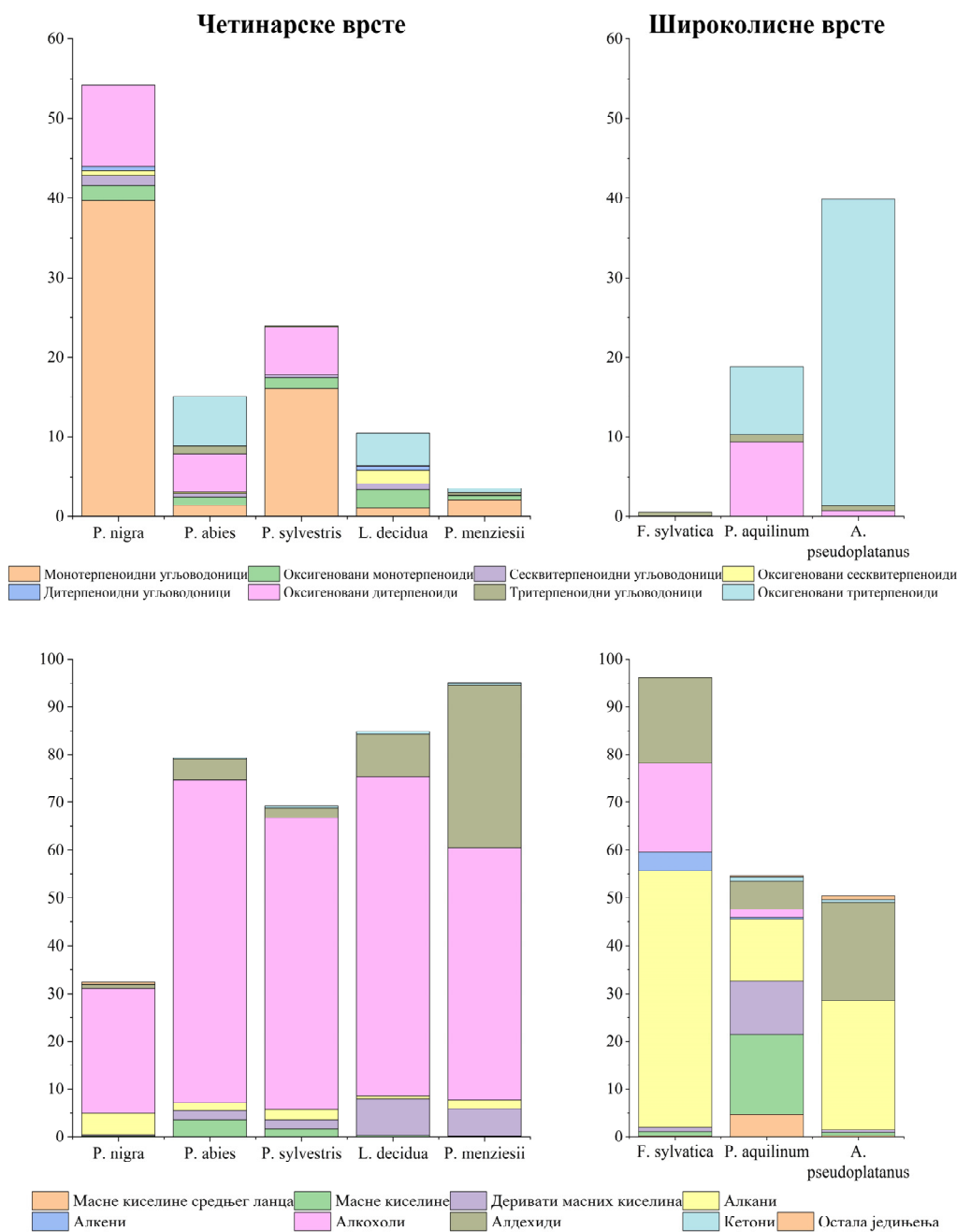
### 5.3.3. Анализа хемијских карактеристика испитиваних врста

Резултати квалитативне и квантитативне анализе хемијског састава хексанских екстраката анализираних биљних врста, методом GC-MS, приказани су у Табели 5.5 и на Слици 5.5.

Табела 5.5. Хемијски састав анализираних биљних врста

Хемијске карактеристике	Четинарске врсте					Широколисне врсте		
	<i>Pn</i>	<i>Pa</i>	<i>Ps</i>	<i>Ld</i>	<i>Pm</i>	<i>Fs</i>	<i>Paq</i>	<i>Ap</i>
<b>Монотерпеноиди</b>								
Монотерпеноидни угљоводоници	39,70	1,45	16,10	1	2,07	0	0	0
Оксигеновани монотерпеноиди	1,93	1,00	1,31	2	0,54	0	0	0
<b>Сесквитерпеноиди</b>								
Сесквитерпеноидни угљоводоници	1,20	0,47	0,41	1	0,05	0	0	0
Оксигеновани сесквитерпеноиди	0,53	0,17	0	1,64	0	0	0	0
<b>Дитерпеноиди</b>								
Дитерпеноидни угљоводоници	0,62	0	0	1	0	0	0	0
Оксигеновани дитерпеноиди	10,16	4,80	6,05	0	0	0	9	0,67
<b>Тритерпеноиди</b>								
Тритерпеноидни угљоводоници	0	0,92	0,16	0	0,37	0,48	1,04	0,71
Оксигеновани тритерпеноиди	0	6,27	0	4,09	0,45	0	8,49	38,46
<b>Деривати масних киселина и друга сродна органска једињења</b>								
Масне киселине средњег ланца	0	0	0	0	0	0,20	4,70	0,35
Масне киселине	0,21	3,47	1,75	0,43	0,16	0,91	16,68	0,61
Деривати масних киселина	0,33	2,03	1,72	7	5,75	0,92	11,22	0,60
Алкани	4,43	1,63	2,25	0,66	1,77	53,64	12,97	26,99
Алкени	0	0	0	0	0	3,91	0,34	0,06
Алкохоли	26,15	67,45	61,09	66,85	52,85	18,65	1,73	0
Алдехиди	0,64	4,44	1,95	8,95	34,01	17,84	5,93	20,51
Кетони	0,20	0,26	0,52	1	0,41	0	0,73	0,50
Остала једињења	0,46	0	0	0	0,22	0,07	0,38	0,81

У циљу бољег разумевања разлика у метаболичком профилу и могућег утицаја хемијског састава на запаљивост биљног материјала, врсте су разврстане у две групе – четинарске и широколисне. Разлике у укупном садржају појединих класа једињења додатно су статистички анализирани ради утврђивања да ли су оне значајне на нивоу група.



Слика 5.5. Визуелни приказ хемијског састава анализираних биљних врста по класама једињења

Заступљеност терпеноидних једињења је израженија код четинарских врста, за разлику од широколисних. Највећи процентуални удео међу њима имају монотерпеноидни угљоводоници (12,1%), нарочито код врста *P. nigra*, *P. Sylvestris* и *P. menziseii*. Оксијеновани ди- и три- терпеноиди су присутни у нешто умеренијим количинама код четинарских врста (4,2% и 2,2%, респективно). Код широколисних врста доминантнији су оксијеновани тритерпеноиди (15,6%).

Међу свим идентификованим једињењима, дуголанчани алкохоли су најзаступљенији код четинарских врста, са чак 54,8%, док су алдехиди и деривати масних киселина присутни у нешто умеренијим количинама (10% и 3,45%, респективно).

Са друге стране, код широколисних врста доминантни су алкани са 31,2% процентуалног удела, као и са 1,75% масних киселина средњег ланца, које код четинарских врста уопште нису идентификоване. Такође, широколисне врсте имају нешто већи удео масних киселина (6,07%) и њихових деривата (4,25%), у односу на четинаре.

У табели 5.6 приказане су средње вредности појединачних хемијских карактеристика, разврстане према припадности врста на четинарске и широколисне групе, као и резултати непараметарског *Mann-Whitney U* теста, који је показао статистички значајне разлике у неколико случајева. Четинарске врсте су имале знатно већи процентуални удео монотерпеноидних и сесквитерпеноидних угљоводоника ( $p = 0,032$ ), оксигенованих монотерпеноида ( $p = 0,032$ ) и алкохола ( $p = 0,036$ ), док су широколисне врсте показале знатно већи садржај масних киселина средњег ланца ( $p = 0,017$ ), алкена ( $p = 0,017$ ) и алкана ( $p = 0,036$ ).

**Табела 5.6.** Средње вредности резултата хемијских карактеристика разврстане према припадности врста на четинарске и широколисне групе и резултати непараметарског *Mann-Whitney U* теста. Статистички значајни резултати су приказани подебљаним текстом ( $p < 0,05$ )

Хемијске карактеристике	Четинарске врсте	Широколисне врсте	p вредност
Монотерпеноидни угљоводоници	12,084	0	<b>0,032</b>
Оксигеновани монотерпеноиди	1,404	0	<b>0,032</b>
Сесквитерпеноидни угљоводоници	0,592	0	<b>0,032</b>
Оксигеновани сесквитерпеноиди	0,468	0,013	0,341
Дитерпеноидни угљоводоници	0,228	0	0,329
Оксигеновани дитерпеноиди	4,222	3,330	0,881
Тритерпеноидни угљоводоници	0,290	0,743	0,134
Оксигеновани тритерпеноиди	2,162	15,650	0,359
Масне киселине средњег ланца	0	1,750	<b>0,017</b>
Масне киселине	1,204	6,067	0,393
Деривати масних киселина	3,454	4,247	1,000
Алкани	2,148	31,200	<b>0,036</b>
Алкени	0,000	1,437	<b>0,017</b>
Алкохоли	54,878	6,793	<b>0,036</b>
Алдехиди	9,998	14,760	0,393
Кетони	0,400	0,410	1,000
Остала једињења	0,136	0,420	0,222

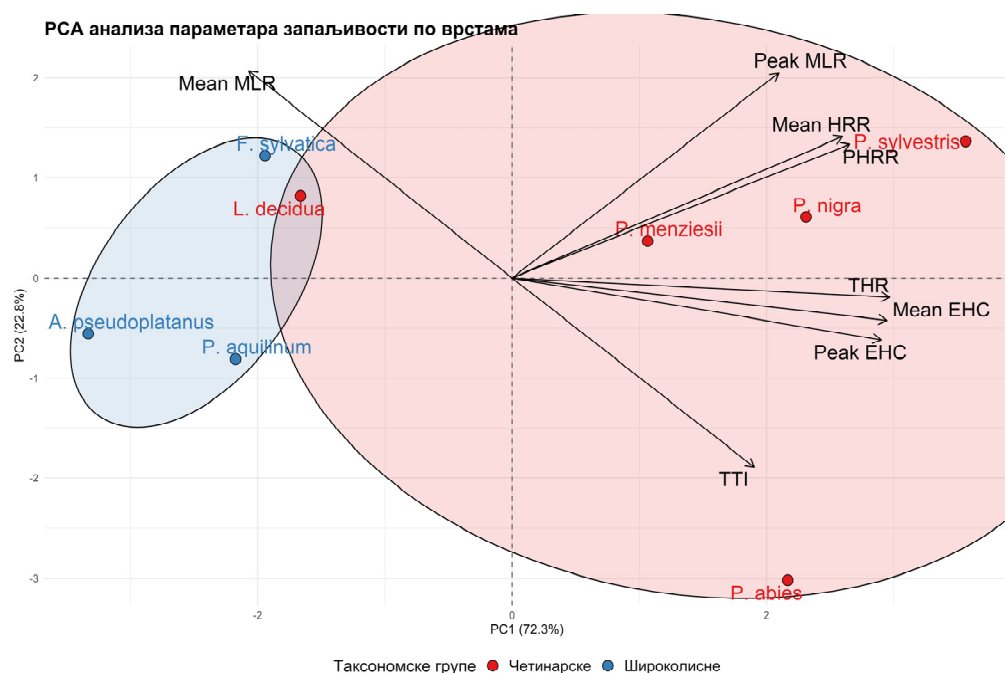
#### 5.3.4. Класификација врста по запаљивости у односу на таксономску припадност

Да би се утврдило издвајање врста по групама у односу на њихову запаљивост, примењена је анализа главних компонената (*PCA*) за параметре запаљивости.

На основу елипсе груписања на *PCA* биplotу (Слика 5.6) и векторских оптерећења (Табела 5.7), уочава се јасно раздвајање између четинарских и широколисних врста у оквиру прве две димензије (*PC1* и *PC2*). Прва димензија (*PC1*) објашњава 64,3% укупне варијансе, и у највећој мери је повезана са високим позитивним векторским оптерећењима параметара запаљивости као што су укупно ослобођена топлота (*THR*: 0,97), просечна ефективна топлотна моћ (*Mean EHC*: 0,97), максимална ефективна топлотна моћ (*Peak EHC*: 0,93), максимална топлотна снага (*PHRR*: 0,86) и просечна топлотна снага (*Mean HRR*: 0,83). Ови параметри су у великој мери пројектовани на десној страни биplotа, где су груписане четинарске врсте, што додатно указује да њих карактеришу веће вредности ослобођене топлоте и енергије у току сагоревања.

Супротно томе, широколисне врсте су распоређене на левој страни биplotа и карактеришу их ниже вредности претходно наведених параметара. Издваја се просечна брзина губитка масе (*Mean MLR*) која има уједначено и изражено оптерећење на обе димензије, и то негативно на *PC1* (-0,69) и позитивно на *PC2* (0,69). Сличан образац постоји и код параметра време паљења (*TTI*), које има умерено позитивно оптерећење на *PC1* (0,63) и истовремено негативно на *PC2* (-0,63).

Раздвајање врста по својој таксономској припадности су додатно квантитативно потврђени резултатом *Silhouette score*-а од 0,508, добијеним применом метода кластеризације *K*-средина (енгл. *K-mean clustering*) и хијерархијске кластер анализе (енгл. *Hierarchical clustering*). Вредности *Silhouette score*-а веће од 0,5 указују на постојање стабилне и добро дефинисане кластер структуре [169]. Тиме овај резултат упућује на значајно раздвајање између група, потврђујући да је подела између четинарских и широколисних врста, на основу њихових параметара запаљивости јасно изражена и статистички подржана. Раздвојена анализа ове две таксономске групе омогућиће прецизније сагледавање доприноса морфолошких и хемијских карактеристика у објашњењу запаљивости анализираних врста.



Слика 5.6. PCA биplot за параметре запаљивости за анализиране врсте

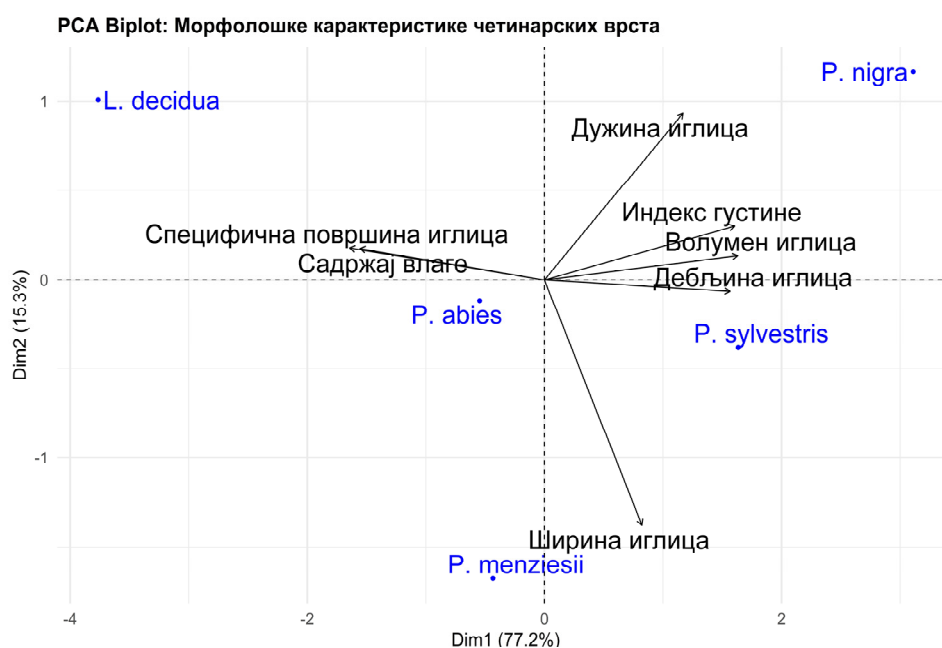
Табела 5.7. Векторска оптерећења анализираних параметара запаљивости према димензијама  $PC1$  и  $PC2$

Параметри запаљивости	PC1	PC2
TTI	0,63	-0,63
PHRR	0,88	0,45
Peak EHC	0,97	-0,21
Peak MLR	0,70	0,68
Mean HRR	0,87	0,47
Mean EHC	0,98	-0,14
Mean MLR	-0,69	0,69
THR	0,99	-0,06

### 5.3.5. Утицај морфолошких карактеристика на запаљивост четинарских врста

На основу резултата  $PCA$  анализе морфолошких карактеристика четинара (Слика 5.7), прве две димензије ( $PC1$  и  $PC2$ ) објашњавају више од 90% укупне варијансе у скупу података, указујући на висок ниво смањења димензионалности без значајног губитка информација. У табели 5.8 приказана су векторска оптерећења издвојених  $PC$  димензија за морфолошке карактеристике четинарских врста. Прва димензија ( $PC1$ ), објашњава 77,2% укупне варијабилности, и дефинисана је високим позитивним векторским оптерећењима за дебљину иглица, индекса густине и волумена иглица, као и негативним векторским оптерећењима за специфичну површину иглица и садржаја воде (Слика 5.7, Табела 5.8). Овакав распоред морфолошких карактеристика указује на јасну инверзну повезаност, да оне врсте са дебљим, гушћим и запремински већим иглицама,

карактеришу мање вредности специфичне површине иглица и мањи садржај влаге. Друга димензија (*PC2*), објашњава додатних 15,3% варијансе, и у већој мери раздваја врсте на основу облика иглица. Дужина иглица је векторски позитивно оптерећена, а ширина негативно, и на тај начин се одвајају врсте са дугачким и танким иглицама, у односу на краће и шире (Слика 5.7, Табела 5.8).



Слика 5.7. PCA биplot морфолошких карактеристика за четинарске врсте

Табела 5.8. Векторска оптерећења анализираних морфолошких карактеристика четинарских врста за издвојене PC димензије

Морфолошке карактеристике	PC1	PC2
Дужина иглица	0,71	0,56
Ширина иглица	0,50	-0,83
Дебљина иглица	0,94	-0,04
Специфична површина иглица	-0,99	0,11
Индекс густине	0,97	0,18
Волумен иглица	0,98	0,08
Садржај влаге	-0,94	0,11

На основу резултата *PLS* регресије (Табела 5.9), све вредности *VIP score*-а веће од 1 су повезане са првом димензијом (*PC1*), што указује да је ова димензија доминантна у објашњавању промена вредности параметара запаљивости.

На основу вредности коефицијената детерминације ( $R^2Y$ ) морфолошке карактеристике четинарских врста имају умерен утицај на промену вредности код неколико параметара запаљивости тј. објашњавају умерени део варијансе (Табела 7.8).

Максимална топлотна снага (*PHRR*) се може релативно добро предвидети на основу морфолошких карактеристика ( $R^2Y = 0,705$ ), док је за укупно ослобођену топлоту (*THR*) добијена још већа вредност коефицијента детерминације ( $R^2Y = 0,835$ ). Овим карактеристикама се такође у умереној мери могу предвидети и вредности параметара запаљивости попут просечне топлотне снаге (*Mean HRR*), максималне и просечне ефективне топлотне моћи (*Peak EHC* и *Mean EHC*), чији коефицијенти детерминације износе  $R^2Y_{Mean\ HRR} = 0,544$ ;  $R^2Y_{Peak\ EHC} = 0,619$ ;  $R^2Y_{Mean\ EHC} = 0,541$ . Добијени резултати указују на то да морфолошке карактеристике значајно утичу на промену вредности (варијације) ових параметара запаљивости, и могу послужити као поуздани показатељи у процењивању количине ослобођене топлоте у току сагоревања.

Са друге стране, запаљивост узорака, изражен кроз параметар време паљења (*TTI*), има веома ниску вредност коефицијента детерминације ( $R^2Y = 0,033$ ), што указује да морфолошке карактеристике немају значајан утицај на промену овог параметра. Слична запажања су уочена и за брзину губитка масе (*Peak MLR* и *Mean MLR*), где такође морфолошке карактеристике немају значајан утицај ( $R^2Y_{Peak\ MLR} = 0,274$ ;  $R^2Y_{Mean\ MLR} = 0,206$ ).

**Табела 5.9.** Резултати *PLS* регресије: предвиђање параметара запаљивости на основу морфолошких карактеристика четинарских врста

Зависне варијабле	PLS <sub>coeff.</sub> - PC1	PLS <sub>coeff.</sub> - PC2	R <sup>2</sup> Y	VIP PC1*	VIP PC2*
TTI	0,067	0,042	0,033	<b>1,292</b>	0,770
PHRR	0,323	-0,046	0,705	<b>1,413</b>	0,072
Peak EHC	0,302	-0,063	0,619	<b>1,350</b>	0,475
Peak MLR	0,201	-0,011	0,274	<b>1,408</b>	0,142
Mean HRR	0,283	-0,037	0,544	<b>1,413</b>	0,066
Mean EHC	0,282	-0,062	0,541	<b>1,345</b>	0,495
Mean MLR	-0,173	0,060	0,206	<b>1,297</b>	0,656
THR	0,320	-0,328	0,835	<b>1,354</b>	0,462

\*Коефицијенти чија је *VIP* вредност већа од 1 сматрају се значајним у објашњењу варијације зависне променљиве. Вредности чији је *VIP* > 1 означене су подељаним (**bold**) текстом.

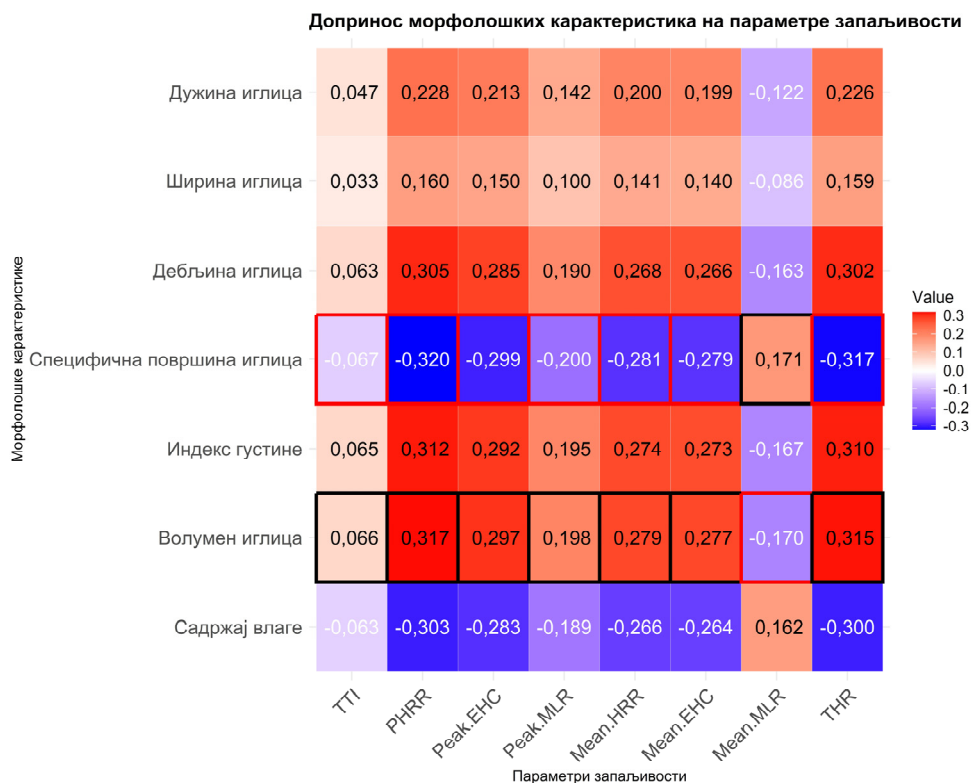
На слици 5.8 приказани су коефицијенти доприноса утицаја морфолошких карактеристика на параметре запаљивости, добијени комбиновањем векторских оптерећења *PCA* анализе (*PCA loadings*) и коефицијената *PLS* регресије. Ради јасније визуелне интерпретације, резултати су приказани у виду топлотне мапе (енгл. *heatmap*), на којој су на интуитиван начин представљене промене и смер доприноса појединачних морфолошких карактеристика на параметре запаљивости (Слика 5.8). Црвена поља указују на позитиван допринос, односно то значи да одређена карактеристика доприноси повећању вредности одговарајућег параметра запаљивости, док плава означава

негативан утицај одређене морфолошке карактеристике на параметар запаљивости, тј. указује на његово смањење. Најинтензивније боје (црвена или плава) означавају најдоминантнији утицај.

На основу резултата, примећен је јасан образац да специфична површина иглица показује значајне негативне доприносе, са највећом апсолутном вредности, за све параметре запаљивости, осим за *Mean MLR*. Најизраженији је негативан утицај на параметре као што су *PHRR*, *Peak EHC* и *THR*, што потврђује хипотезу да тање и лакше иглице, иако се лакше запале, емитују мање топлоте. Овакав тренд указује да врсте четинара са већом специфичном површином иглица имају краће време паљења, а да при том ослобађају топлоту мањег интензитета.

Са друге стране, карактеристике као што су волумен, дебљина и индекс густине иглица, показују позитивне доприносе за све параметре запаљивости, осим за *Mean MLR*, а нарочито у односу на укупно ослобођену топлоту (*THR*), што може бити повезано са већим горивим потенцијалом оваквих морфолошких структура. Ово сугерише да је за четинарске врсте са већим вредностима ових карактеристика, потребно дуже време паљења (*TTI*), с тим да након иницијалног паљења ослобађају већу количину топлоте, услед интензивнијег и дужег сагоревања масивније структуре иглица.

Занимљиво је да *Mean MLR* показује инверзан образац у односу на остале параметре, што указује на различите механизме који утичу на динамику и интензитет сагоревања.



Слика 5.8. Визуелни приказ доприноса морфолошких карактеристика на параметре запаљивости четинарских врста

### 5.3.6. Утицај хемијских карактеристика на запаљивост четинарских врста

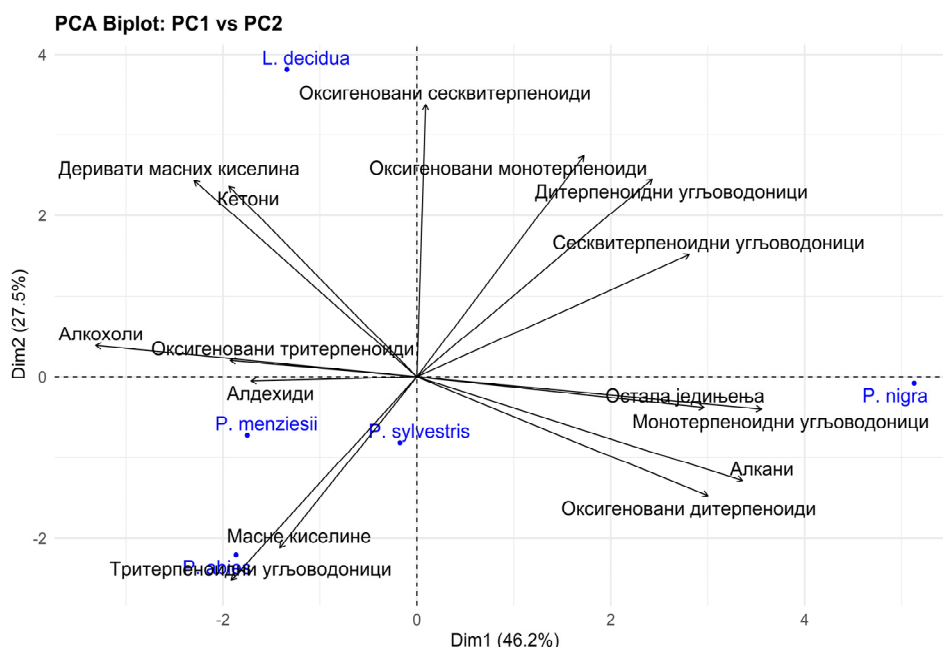
На слици 5.9 приказана су три *PCA* биплота која илуструју међусобне односе 15 различитих хемијских карактеристика четинарских врста, представљене кроз различите класе терпеноидних једињења, деривата масних киселина и сродних једињења. Прве три димензије (*PC1*, *PC2* и *PC3*) заједно објашњавају значајан део укупне варијансе хемијског састава, чак 92,5%. У табели 5.10 приказана су векторска оптерећења издвојених *PC* димензија за хемијске карактеристике.

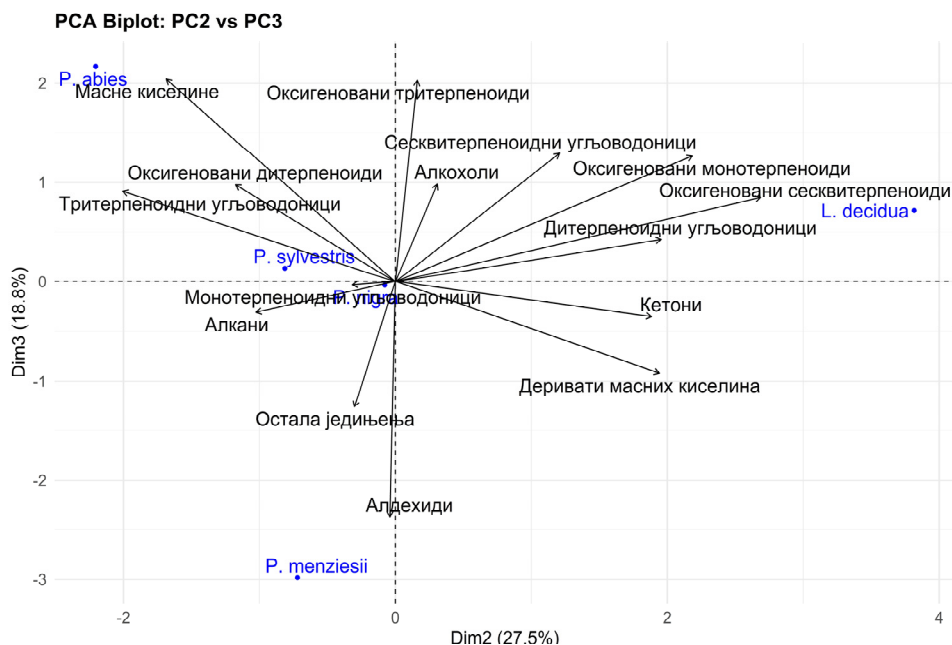
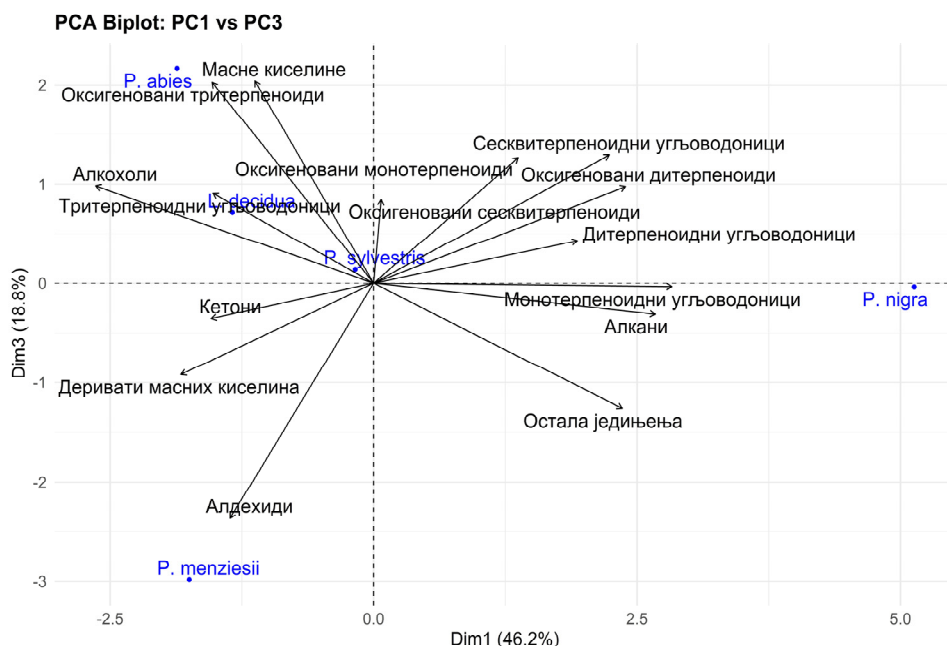
На првој димензији (*PC1*) може се уочити јасно раздвајање врста на основу њиховог садржаја хемијских једињења. На позитивној страни усмерена су једињења мале молекуларне тежине, веома испарљива, као што су моно- и сескви- терпеноидни угљоводоници, оксигеновани дитерпеноиди, алкани и остала неклассификована једињења. Овакву структуру хемијских једињења карактерише могућност брзог паљења и интензиван процес пламеног сагоревања. На негативној страни налазе се групе једињења која су богата оксигенованим функционалним групама, мање испарљива, попут алкохола, деривата масних киселина, тритерпеноидних угљоводоника, алдехида и

кетона. Њихово присуство може довести до споријег паљења, праћено фазом тињања и формирању угљеника. Овакав распоред хемијских једињења на првој димензији (*PC1*) приказује инверзан однос између врста богатих испарљивим угљоводонцима, која иницирају брже паљење и интензивно ослобађање топлоте, и оних једињења која су мање испарљива, садрже више кисеоника, која доводе до одлагања паљења и формирају већу количину угљениковог остатка након сагоревања.

На позитивној страни друге димензије (*PC2*) налазе се једињења која су умерено до високо оксигенована и која могу утицати на интензивније реакције сагоревања повећавајући температуру пламена. Ту спадају оксигеновани моно- и сесквитерпеноиди, дитерпеноидни угљоводоници, деривати масних киселина и кетони. На негативној страни усмерена су једињења попут тритерпеноидних угљоводоника и масних киселина. То су једињења високе молекуларне тежине, мање реактивна, која сагоревају спорије и могу допринети непотпуном сагоревању.

Трећа димензија (*PC3*) повезана је са присуством тешких, мање испарљивих једињења. На позитивној страни ове димензије налазе се једињења високе молекулске масе попут оксигенованих тритерпеноида и масних киселина. На негативној страни заступљена су једињења алдехида, која припадају групи средње до тешко испарљивих једињења.





Слика 5.9. PCA биplotови хемијских карактеристика за четинарске врсте (PC1-PC2; PC1-PC3; PC2-PC3)

Табела 5.10. Векторска оптерећења анализаних хемијских карактеристика четинарских врста за издвојене PC димензије

Хемијске карактеристике	PC1	PC2	PC3
Монотерпеноидни угљоводоници	0,98	-0,11	-0,01
Оксигеновани монотерпеноиди	0,48	0,76	0,44
Сесквитерпеноидни угљоводоници	0,78	0,42	0,45
Оксигеновани сесквитерпеноиди	0,03	0,93	0,29
Дитерпеноидни угљоводоници	0,67	0,68	0,15
Оксигеновани дитерпеноиди	0,83	-0,41	0,34
Тритерпеноидни угљоводоници	-0,53	-0,70	0,32

Оксигеновани тритерпеноиди	-0,53	0,06	0,70
Масне киселине	-0,39	-0,59	0,71
Деривати масних киселина	-0,64	0,67	-0,32
Алкани	0,93	-0,36	-0,11
Алкохоли	-0,92	0,11	0,34
Алдехиди	-0,47	-0,01	-0,82
Кетони	-0,54	0,65	-0,12
Остала једињења	0,82	-0,10	-0,44

Резултати *PLS* регресије за хемијске карактеристике четинарских врста показали су допунске информације у предвиђању параметара запаљивости у односу на моделе засноване на морфолошким карактеристикама. Према вредностима *VIP score*-а, на промену параметара запаљивости утичу различите *PC* димензије (Табела 5.11).

У поређењу вредности коефицијента детерминације о утицају морфолошких и хемијских карактеристика четинарских врста на параметре запаљивости, највећа разлика је уочена код параметра време паљења (*TTI*). С обзиром да морфолошке карактеристике нису показале значајну предиктивну способност овог параметра ( $R^2Y = 0,033$ ), хемијски састав четинарских врста омогућава веома поуздано предвиђање времена паљења, што потврђује висока вредност коефицијента детерминације ( $R^2Y = 0,949$ ).

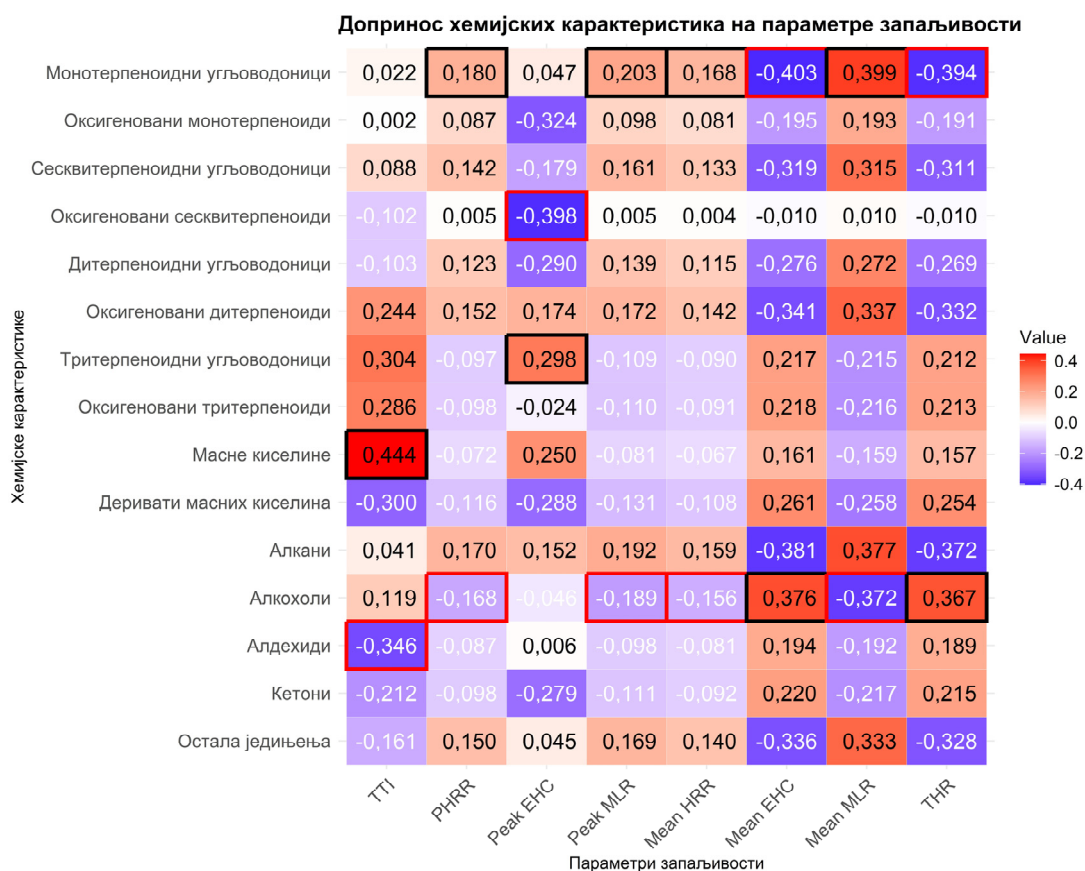
Овај резултат указује да време паљења иглица четинарских врста готово у потпуности зависи од њихових хемијских, а не од морфолошких карактеристика. Вредности максималне и просечне ефективне топлотне моћи (*Peak EHC* и *Mean EHC*), просечне брзине губитка масе (*Mean MLR*) и укупно ослобођене топлоте (*THR*) се такође могу релативно добро предвидети на основу хемијских карактеристика ( $R^2Y_{Peak\ EHC} = 0,985$ ;  $R^2Y_{Mean\ EHC} = 0,909$ ;  $R^2Y_{Mean\ MLR} = 0,946$ ;  $R^2Y_{THR} = 0,891$ ). Занимљиво је да хемијске карактеристике у мањој мери доприносе промени вредности (варијације) максималне и просечне топлотне снаге ( $R^2Y_{PHRR} = 0,456$ ;  $R^2Y_{Mean\ HRR} = 0,286$ ), за разлику од морфолошких карактеристика. Слична запажања произилазе и у вези промене вредности максималне брзине губитка масе (*Peak MLR*), чији је коефицијент детерминације  $R^2Y = 0,465$ . Ови налази сугеришу да хемијски састав није једини фактор који утиче на промене вредности ових параметара већ да оне првенствено произилазе из комбиноване интеракције хемијских и морфолошких карактеристика.

**Табела 5.11.** Резултати *PLS* регресије: предвиђање параметара запаљивости на основу хемијских карактеристика четинарских врста

Зависне варијабле	PLS <sub>coeff.</sub> PC1	PLS <sub>coeff.</sub> PC2	PLS <sub>coeff.</sub> PC3	R <sup>2</sup> Y	VIP_PC1*	VIP_PC2*	VIP_PC3*
TTI	-0,019	-0,244	0,425	0,949	0,382	<b>1,336</b>	<b>1,098</b>
PHRR	0,183	-0,162	-0,092	0,456	<b>1,645</b>	0,615	0,206
Peak EHC	0,066	-0,427	0,045	0,985	0,730	<b>1,593</b>	0,084
Peak MLR	0,207	0,041	-0,155	0,465	<b>1,658</b>	0,234	0,727
Mean HRR	0,171	-0,073	-0,038	0,286	<b>1,662</b>	0,539	0,244
Mean EHC	0,035	-0,411	0,091	0,909	0,438	<b>1,676</b>	0,185
Mean MLR	0,025	0,406	-0,162	0,946	0,339	<b>1,678</b>	0,329
THR	0,086	-0,401	-0,014	0,891	0,943	<b>1,493</b>	0,027

\*Коефицијенти чија је *VIP* вредност већа од 1 сматрају се значајним у објашњењу варијације зависне променљиве. Вредности чији је *VIP* > 1 означене су подебљаним (**bold**) текстом.

На слици 5.10 приказана је топлотна мапа са израчунатим коефицијентима доприноса утицаја хемијских карактеристика на параметре запаљивости. Запаљивост четинарских врста, кроз параметар време паљења (*TTI*), је у великој мери контролисан садржајем масних киселина и алдехида, али са супротним ефектима. Веће концентрације масних киселина доводе до дужег времена паљења, због присуства теже испарљивих једињења. Супротно томе, веће концентрације алдехида доприносе бржем паљењу. С обзиром да су идентификована једињења дуголанчаних алдехида, који имају релативно ниску испарљивост, она имају способност да се разлажу при повишеним температурама и учествују у формирању запаљивих продуката у раним фазама сагоревања. Ови резултати указују да чак и у случају хемијских једињења са ниском испарљивошћу, њихова специфична структура и термичко понашање могу значајно утицати на иницирање пламена.



**Слика 5.10.** Визуелни приказ доприноса хемијских карактеристика на параметре запаљивости четинарских врста

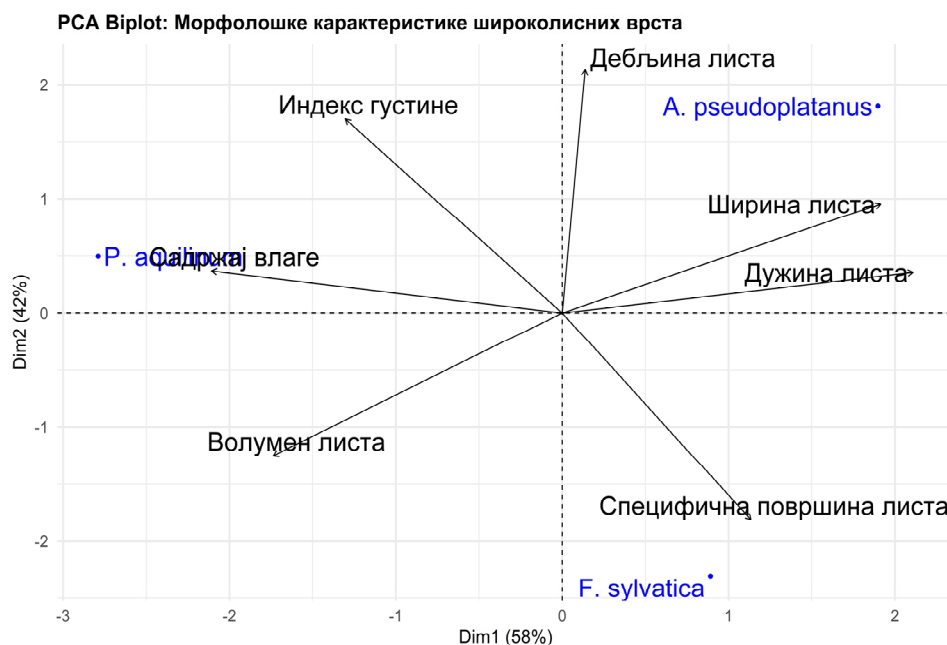
Четинарске врсте богате лако испарљивим једињењима, попут монотерпеноидних угљоводоника, али и алканама, брже и интензивније сагоревају, што се одражава већим вредностима максималне и просечне топлотне снаге (*PHRR* и *Mean HRR*), а и имају бржи губитак масе (*Peak MLR* и *Mean MLR*). Са друге стране, алкохоли испољавају супротан ефекат, где веће концентрације ових једињења су повезане са смањењем вредности претходно наведених параметара, што указује на њихову потенцијалну улогу у смањењу интензитета и брзине сагоревања.

На ефективну топлотну моћ и укупно ослобођену топлоту утичу различита хемијска једињења. Вредности максималне ефективне топлотне моћи (*Peak EHC*) се повећавају са већом концентрацијом тритерпеноидних угљоводоника. Иако ова једињења нису лако испарљива, када се запале имају могућност одрживог и ефикасног сагоревања, уз ослобађање значајне количине топлотне енергије. На смањење максималне ефективне топлотне моћи утиче већи садржај оксигенованих сесквитерпеноида.

Веће концентрације алкохола доприносе повећању вредности средње ефективне топлотне моћи (*Mean EHC*) и укупно ослобођене топлоте (*THR*). Супротно томе, монотерпеноидни угљоводоници су повезани са нижим вредностима ових параметара, јер због своје високе испарљивости доводе до бржег сагоревања, чиме је ограничена акумулација укупне топлотне енергије која се ослобађа током процеса сагоревања.

### 5.3.7. Утицај морфолошких карактеристика на запаљивост широколисних врста

Прве две димензије *PCA* анализе морфолошких карактеристика широколисних врста објашњавају целокупну варијансу из скупа података. Код ових врста, на првој димензији (*PC1*) највећи позитиван утицај имају карактеристике попут дужине и ширине листа, док негативан утицај имају садржај влаге и волумен листа. То значи да врсте са већим листовима (дужи и шири листови) имају нижи садржај влаге и мању густину, док врсте са мањим, гушћим листовима имају тенденцију да задржавају више влаге. Друга димензија (*PC2*) представља варијације између врста са дељљим, гушћим листовима, са нижим вредностима специфичне површине листа, и оних врста са танким листовима и са већом специфичном површином (Слика 5.11). У табели 5.12 приказана су векторска оптерећења анализираних морфолошких карактеристика за издвојене *PC* димензије.



Слика 5.11. *PCA* биplot морфолошких карактеристика за широколисне врсте

**Табела 5.12.** Векторска оптерећења анализираних морфолошких карактеристика широколисних врста за издвојене РС димензије

Морфолошке карактеристике	PC1	PC2
Дужина листа	0,99	0,17
Ширина листа	0,89	0,45
Дебљина листа	0,06	1,00
Специфична површина листа	0,53	-0,85
Индекс густине	-0,61	0,79
Волумен листа	-0,81	-0,58
Садржај влаге	-0,99	0,17

За разлику од четинарских врста, код широколисних врста вредности *VIP score*-а (Табела 5.13.) су првенствено били значајни за другу димензију (*PC2*) за све параметре запаљивости, осим за време паљења (*TTI*), где је прва димензија остала значајна. Ипак, слично као код четинарских врста, на основу распореда морфолошких карактеристика широколисних врста на *PCA* биplotу, кључне карактеристике су дебљина и специфична површина листа.

У поређењу са четинарским врстама, широколисне врсте показују већи и стабилнији коефицијент детерминације ( $R^2Y > 0,97$ ), што указује да морфолошке карактеристике имају веома високу предиктивну способност у поузданом објашњавању промене вредности параметара запаљивости (Табела 5.13).

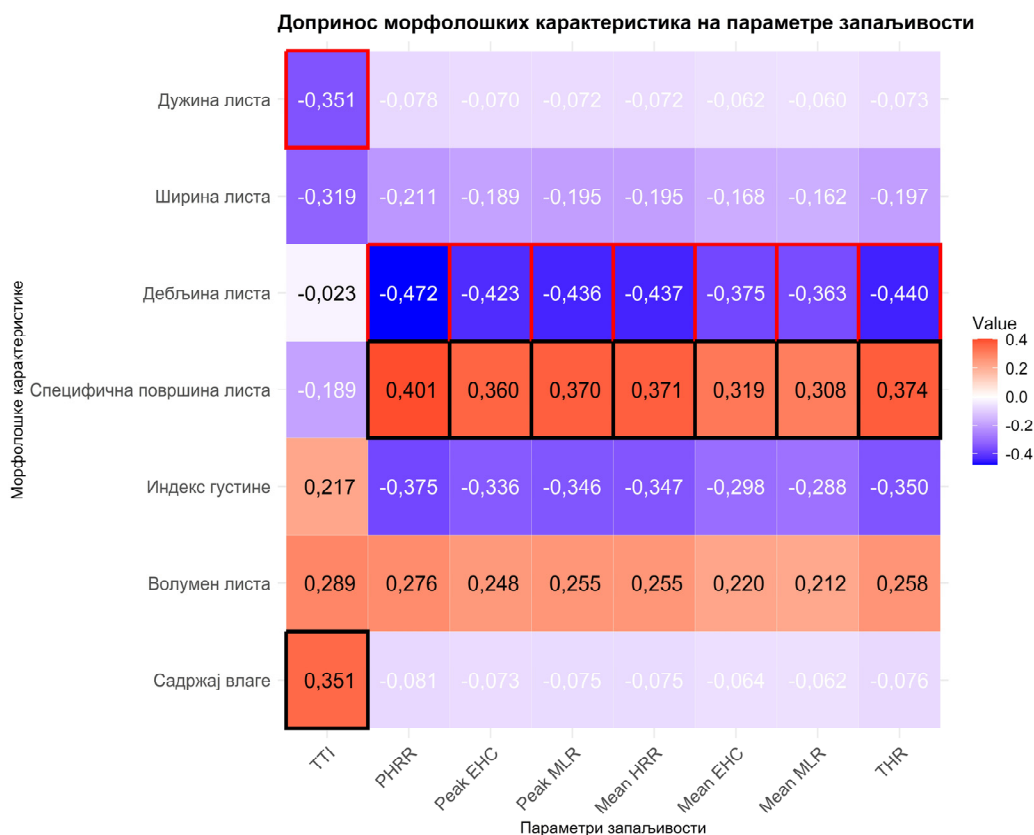
**Табела 5.13.** Резултати *PLS* регресије: предвиђање параметара запаљивости на основу морфолошких карактеристика широколисних врста

Зависне варијабле	PLS <sub>coeff.</sub> - PC1	PLS <sub>coeff.</sub> - PC2	R <sup>2</sup> Y	VIP PC1*	VIP PC2*
TTI	-0,356	0,217	0,980	<b>1,305</b>	0,577
PHRR	-0,044	-0,473	0,999	0,181	<b>1,404</b>
Peak EHC	-0,178	-0,424	0,987	0,714	<b>1,234</b>
Peak MLR	0,156	-0,436	0,990	0,631	<b>1,276</b>
Mean HRR	-0,155	-0,437	0,990	0,625	<b>1,279</b>
Mean EHC	-0,241	-0,376	0,979	0,949	<b>1,071</b>
Mean MLR	0,254	-0,364	0,977	0,995	<b>1,030</b>
THR	-0,147	-0,441	0,991	0,595	<b>1,292</b>

\*Коефицијенти чија је *VIP* вредност већа од 1 сматрају се значајним у објашњењу варијације зависне променљиве. Вредности чији је *VIP* > 1 означене су подебљаним (**bold**) текстом.

На основу вредности доприноса морфолошких карактеристика, садржај влаге позитивно доприноси времену паљења (*TTI*: 0,351), што сугерише да врстама које задржавају више влаге, потребно дуже време паљења. Са друге стране, дужи и шири листови имају негативне коефицијенте (-0,351 и -0,319), што указује да листовима са израженим овим карактеристикама је потребно мање времена да се запале. Остале карактеристике имају идентичан образац утицаја на параметре запаљивости – дебљи и

гушћи листови ослобађају значајно нижу количину топлоте, док листови са већим вредностима специфичне површине и запремине, имају интензивније сагоревање (Слика 5.12).



**Слика 5.12.** Визуелни приказ доприноса морфолошких карактеристика на параметре запаљивости широколисних врста

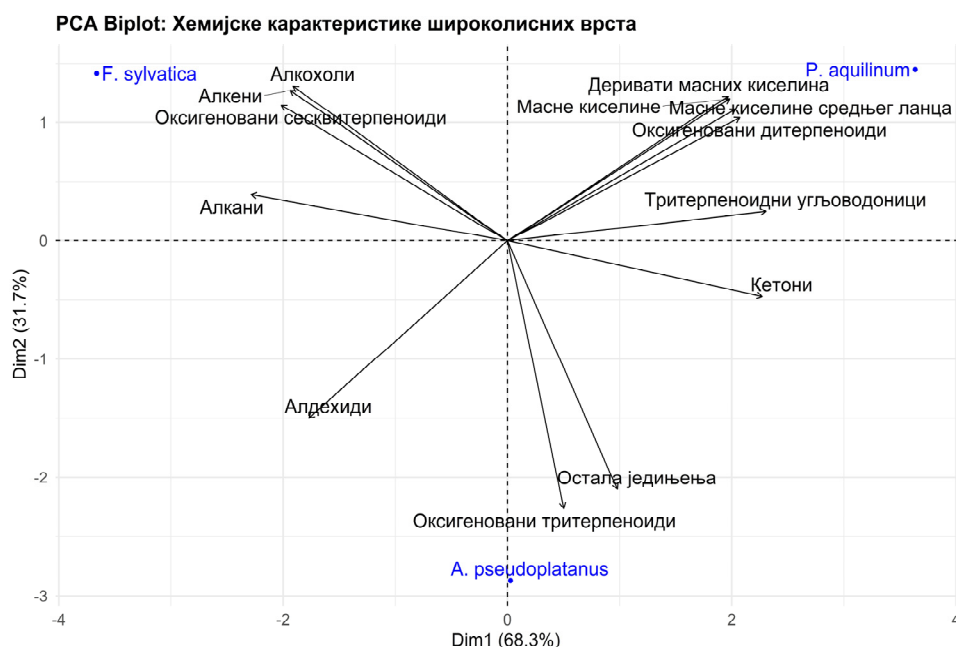
### 5.3.8. Утицај хемијских карактеристика на запаљивост широколисних врста

Широколисне врсте су показале релативно мањи диверзитет међу измереним терпеноидним једињењима. На пример нису идентификовани моно и сесквитерпеноиди, док су се ове врсте карактерисале већим садржајем једињења која су биосинтетски повезана са масним киселинама. Самим тим, резултати *PCA* анализе (Слика 5.13) и векторских оптерећења (Табела 5.14) показали су нешто другачији профил за хемијске карактеристике. Прве две димензије (*PC1* и *PC2*) објашњавају 100% укупне варијансе из скупа података. На позитивној страни прве димензије (*PC1*) усмерена су једињења већих, сложенијих, енергетски богатијих молекуларних структура, попут тритерпеноидних угљоводоника, оксигенованих дитерпеноида, кетона, масних киселина и њихових деривата. Ова једињења су мање испарљива и доприносе континуираном, продуженом

процесу сагоревања. Супротно томе, на негативној страни ове димензије налазе се дуголанчани алкани, алкени, алкохоли, алдехиди и оксигеновани сесквитерпеноиди, који су генерално повезани са бржим паљењем и утичу на ширење пламена.

На негативној страни друге димензије (*PC2*) налазе се једињења високе молекуларне тежине, ниске испарљивости, попут оксигенованих тритерпеноида, алдехида и осталих неклассификованих једињења, која доприносе споријем сагоревању и стварању већег угљениковог остатка. Позитивну страну ове димензије карактеришу умерено испарљива једињења, средње молекуларне тежине, као што су алкени, алкохоли и деривати масних киселина, који могу потенцијално допринети интензивнијем, али краћем процесу сагоревања.

На основу уочене дистрибуције хемијских карактеристика широколисних врста, структура *PCA* биплота наглашава јасну хемијску диференцијацију између врсте *A. pseudoplatanus*, која се издваја већим садржајем оксигенованих тритерпеноида, и осталих врста код којих доминирају засићени угљоводоници и оксигенована испарљива једињења, уз низак удео терпеноидних једињења.



Слика 5.13. *PCA* биplot хемијских карактеристика за широколисне врсте

**Табела 5.14.** Векторска оптерећења анализираних хемијских карактеристика широколисних врста за издвојене РС димензије

Хемијске карактеристике	PC1	PC2
Оксигеновани сесквитерпеноиди	-0,87	0,49
Оксигеновани дитерпеноиди	0,89	0,45
Тритерпеноидни угљоводоници	0,99	0,11
Оксигеновани тритерпеноиди	0,22	-0,98
Масне киселине средњег ланца	0,88	0,48
Масне киселине	0,85	0,52
Деривати масних киселина	0,85	0,53
Алкани	-0,99	0,17
Алкени	-0,84	0,55
Алкохоли	-0,82	0,57
Алдеҳиди	-0,76	-0,65
Кетони	0,98	-0,20
Остала једињења	0,42	-0,91

Резултати *PLS* регресије засновани на предвиђању параметара запаљивости према хемијским карактеристикама широколисних врста такође су приказали високе вредности коефицијената детерминације, које су се за већину параметара запаљивости кретале од 0,868 до 0,996 (Табела 5.15). На основу вредности *VIP score*-а, прва димензија (*PC1*) је најзначајнија у објашњењу промена вредности параметара запаљивости у већини случајева. Једини изузетак се односио на параметар *Mean EHC*, за који је друга димензија (*PC2*) показала највећи значај.

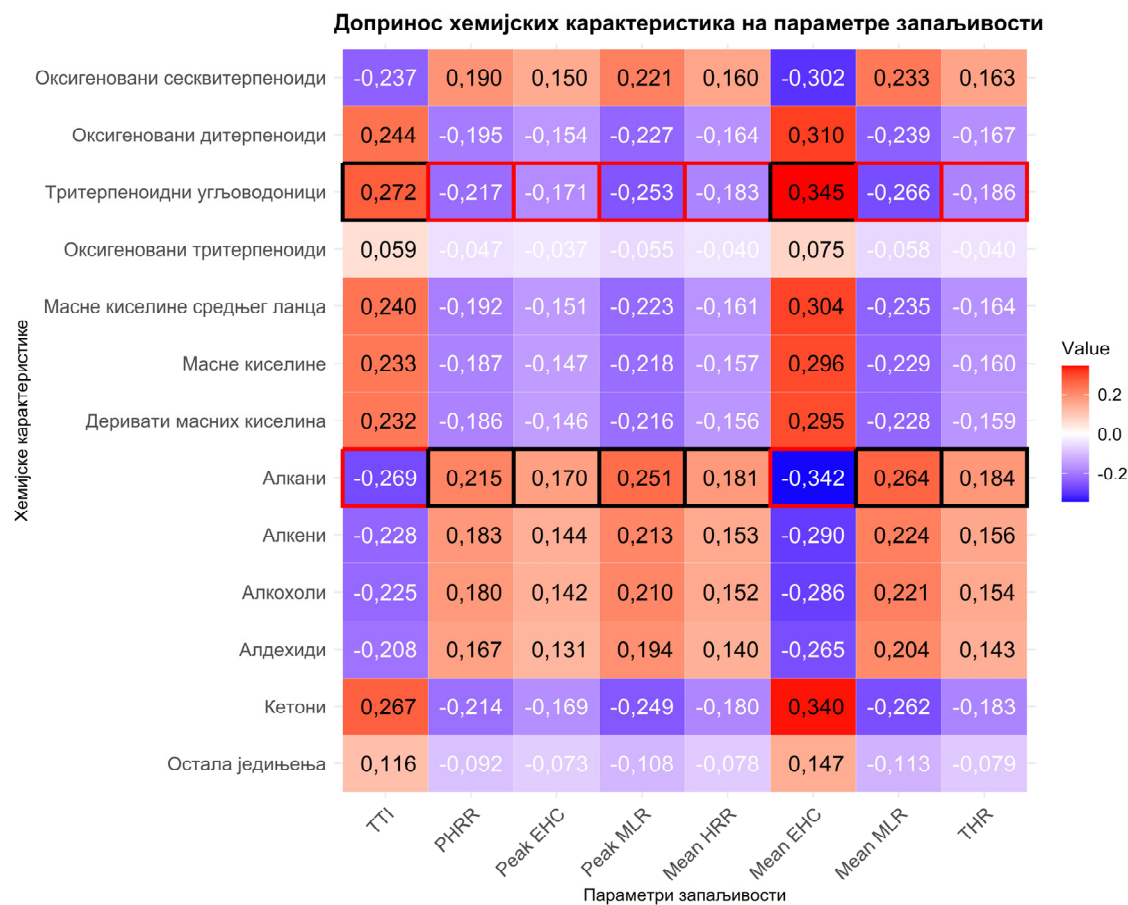
Најнижа вредност коефицијената детерминације уочена је код параметара запаљивости максималне и просечне топлотне снаге ( $R^2 Y_{PHRR} = 0,868$ ;  $R^2 Y_{Mean HRR} = 0,880$ ), максималне ефективне топлотне моћи ( $R^2 Y_{Peak EHC} = 0,891$ ) и укупно ослобођене топлоте ( $R^2 Y_{THR} = 0,878$ ). Ови резултати показују да на промену вредности ових параметара не утичу само хемијске карактеристике, већ да је присутна комбинована интеракција, заједно са морфолошким.

**Табела 5.15.** Резултати *PLS* регресије: предвиђање параметара запаљивости на основу хемијских карактеристика широколисних врста

Зависне варијабле	PLS <sub>coeff.</sub> - PC1	PLS <sub>coeff.</sub> - PC2	R <sup>2</sup> Y	VIP PC1*	VIP PC2*
TTI	0,273	0,021	0,996	<b>1,415</b>	0,051
PHRR	-0,219	0,193	0,868	<b>1,385</b>	0,569
Peak EHC	-0,172	0,283	0,891	<b>1,206</b>	0,922
Peak MLR	-0,255	0,104	0,930	<b>1,418</b>	0,268
Mean HRR	-0,184	0,264	0,880	<b>1,264</b>	0,843
Mean EHC	-0,122	0,347	0,943	0,897	<b>1,184</b>
Mean MLR	-0,268	0,056	0,976	<b>1,416</b>	0,138
THR	-0,187	0,258	0,878	<b>1,279</b>	0,819

\*Коефицијенти чија је *VIP* вредност већа од 1 сматрају се значајним у објашњењу варијације зависне променљиве. Вредности чији је *VIP* > 1 означене су подебљаним (**bold**) текстом.

На основу израчунатих доприноса хемијских карактеристика, већи садржај алкана, оксигенованих сесквитерпеноида, алкена па и алкохола, доприносе краћем времену паљења (*TTI*) и смањењу вредности просечне ефективне топлотне моћи (*Mean EHC*). Са друге стране, једињења веће молекуларне тежине и ниже испарљивости, попут тритерпеноидних угљоводоника, повезани су са дужим временом паљења и вишим вредностима просечне ефективне топлотне моћи (*Mean EHC*) (Слика 5.14).



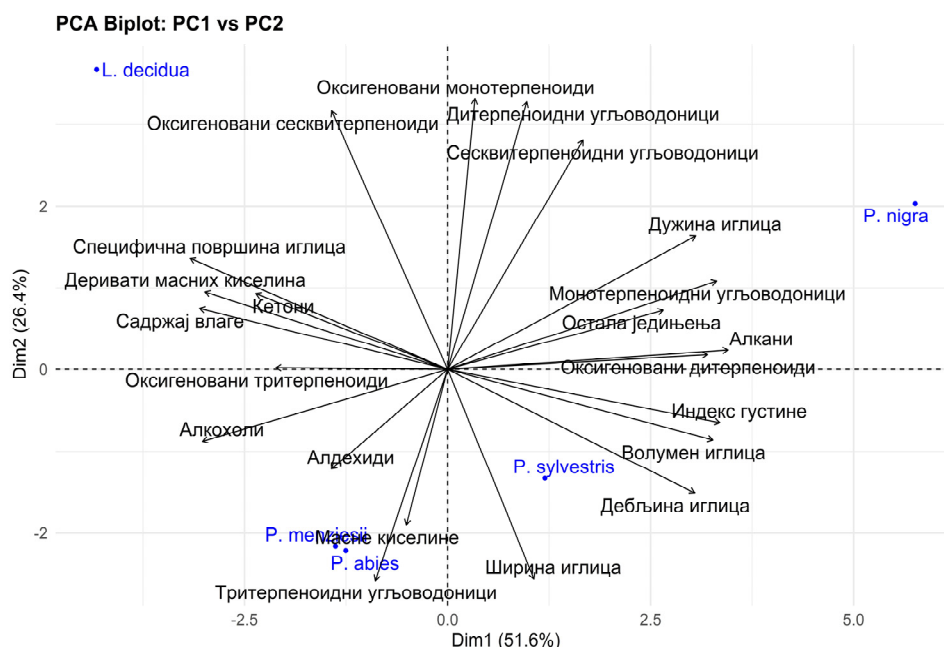
**Слика 5.14.** Визуелни приказ доприноса хемијских карактеристика на параметре запаљивости широколисних врста

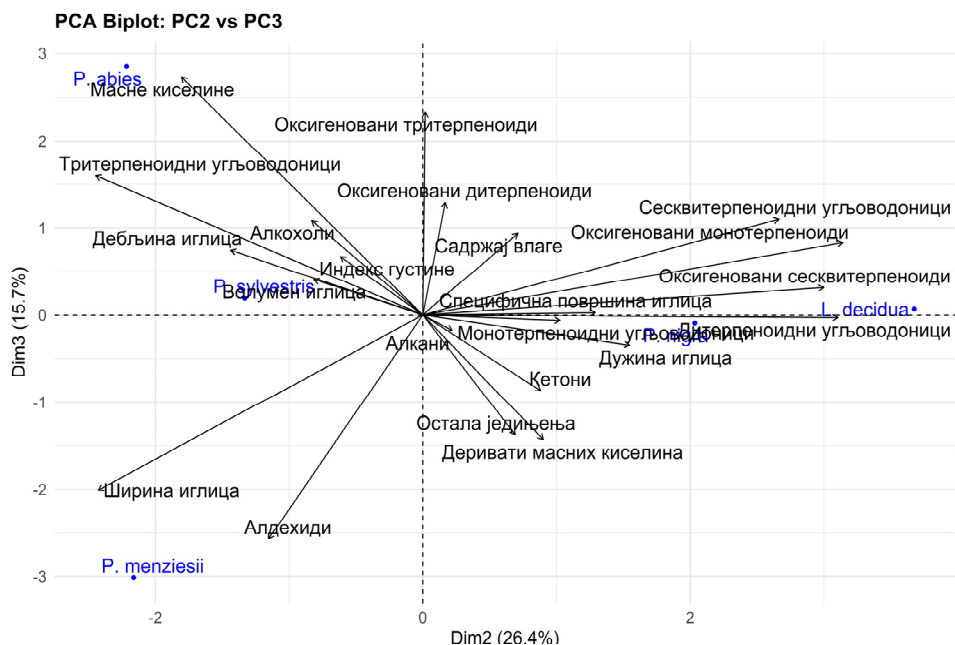
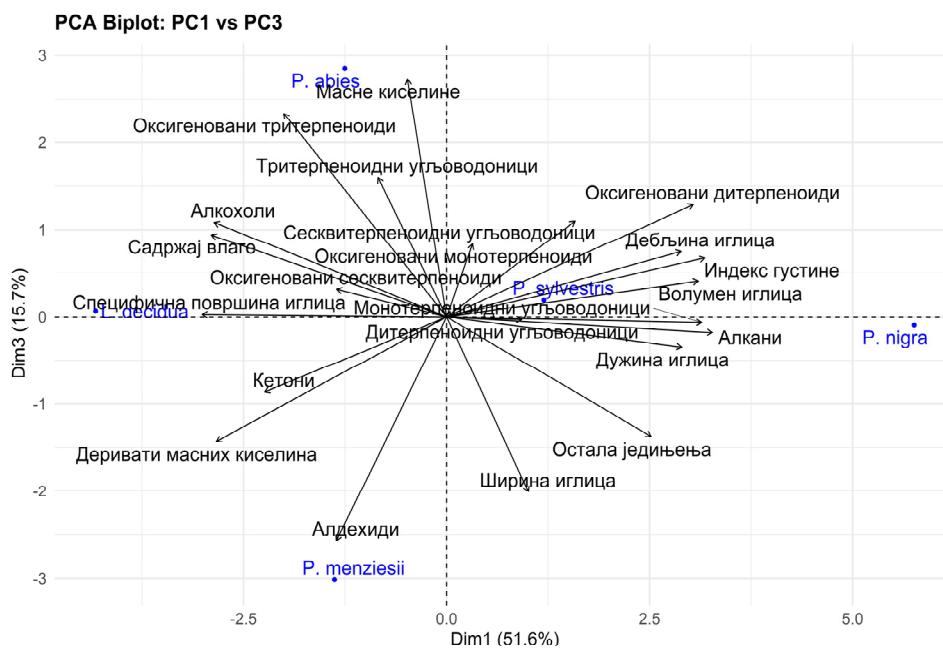
Супротан образац је примећен код осталих параметара запаљивости. Позитиван допринос алкана, оксигенованих сесквитерпеноида, алкена и алкохола указују на повећање вредности параметара запаљивости као што су максимална и просечна топлотна снага (*PHRR* и *Mean HRR*), максимална ефективна топлотна моћ (*Peak EHC*), максимална и просечна брзина губитка масе (*Peak MLR* и *Mean MLR*), као и укупно ослобођена топлота (*THR*). Ови резултати упућују да њихове веће концентрације утичу

на повећање интензитета сагоревања и ослобађања топлотне енергије. Са друге стране, на смањење вредности ових параметара може утицати већи садржај тритерпеноидних угљоводоника, који доводе до споријег процеса сагоревања.

### 5.3.9. Комбиновани утицај морфолошко-хемијских карактеристика на запаљивост четинарских врста

За обједињене морфолошко-хемијске карактеристике четинарских врста извршена је *PCA* анализа, како би се смањила димензионалност између анализираних варијабли, без значајног губитка информација (Слика 5.15). Прве три димензије (*PC1*, *PC2* и *PC3*) заједно објашњавају преко 90% укупне варијансе. Прва димензија (*PC1*) раздваја врсте на оне са дебљим, гушћим, дугим иглицама богатим алканима и монотерпенима, у односу на оне са високим вредностима специфичне површине, са високим садржајем влаге, и једињењима попут алкохола и кетона. Друга димензија (*PC2*) одваја врсте на оне богате оксигенованим терпеноидима од оних са ширим иглицама и тритерпеноидима. Трећа димензија (*PC3*) раздваја једињења велике масе попут масних киселина и оксигенованих тритерпеноида и поларних једињења попут алдехида. У табели 5.16 приказана су векторска оптерећења анализираних морфолошко-хемијских карактеристика за издвојене *PC* димензије.





Слика 5.15. PCA биplotови морфолошко-хемијских карактеристика за четинарске врсте (PC1-PC2; PC1-PC3; PC2-PC3)

Табела 5.16. Векторска оптерећења анализираних морфолошко-хемијских карактеристика четинарских врста за издвојене PC димензије

Морфолошко-хемијске карактеристике	PC1	PC2	PC3
Монотерпеноидни угљоводоници	0,95	0,31	-0,02
Оксигеновани монотерпеноиди	0,10	0,95	0,25
Сесквитерпеноидни угљоводоници	0,48	0,80	0,33
Оксигеновани сесквитерпеноиди	-0,41	0,91	0,09
Дитерпеноидни угљоводоници	0,28	0,94	-0,01
Оксигеновани дитерпеноиди	0,92	0,05	0,39

Тритерпеноидни угљоводоници	-0,25	-0,74	0,48
Оксигеновани тритерпеноиди	-0,61	0,01	0,70
Масне киселине	-0,15	-0,54	0,82
Деривати масних киселина	-0,86	0,27	-0,43
Алкани	0,99	0,07	-0,05
Алкохоли	-0,86	-0,25	0,33
Алдеҳиди	-0,41	-0,35	-0,78
Кетони	-0,68	0,27	-0,26
Остала једињења	0,76	0,21	-0,42
Дужина иглица	0,88	0,47	-0,10
Ширина иглица	0,30	-0,73	-0,61
Дебљина иглица	0,87	-0,43	0,23
Специфична површина иглица	-0,91	0,39	0,01
Индекс густине	0,96	-0,19	0,20
Волумен иглица	0,94	-0,25	0,12
Садржај воде	-0,87	0,21	0,28

Резултати *PLS* регресије су у већини случајева показали значајне вредности коефицијента детерминације ( $R^2Y > 0,94$ ) у предвиђању вредности параметара запаљивости према комбинацији морфолошко-хемијских карактеристика четинарских врста, што указује на јаку предиктивну везу између зависних и независних варијабли (Табела 5.17).

Према вредностима *VIP score*-а, прва димензија (*PC1*) је најзначајнија у објашњењу промена вредности параметара запаљивости у већини случајева. Једини изузетак се односио на параметар време паљења (*TTI*), на који је трећа димензија (*PC3*) показала највећи утицај. Такође, за параметар просечна брзина губитка масе (*Mean MLR*), поред прве димензије, и друга димензија има значаја у предвиђању вредности овог параметра.

Интеграцијом ових карактеристика у *PLS* модел значајно је побољшано објашњење промена вредности већине параметара запаљивости, као што су време паљења (*TTI*), максимална и просечна ефективна топлотна моћ (*Peak EHC* и *Mean EHC*), као и укупно ослобођена топлота (*THR*), за које је коефицијент детерминације  $R^2Y$  већи од 0,94.

Са комбиновањем ових карактеристика, вредности коефицијента детерминације за максималну и просечну топлотну снагу (*PHRR* и *Mean HRR*), као и за максималну брзину губитка масе (*Peak MLR*) су повећани на 0,607, 0,448 и 0,635 респективно, у односу на модел где су биле укључене само хемијске карактеристике. Ови резултати сугеришу на синергетски ефекат између хемијског састава анализираних врста и њихових морфолошких особина у одређивању вредности ових параметара запаљивости.

Табела 5.17. Резултати *PLS* регресије: предвиђање параметара запаљивости на основу морфолошко-хемијских карактеристика четинарских врста

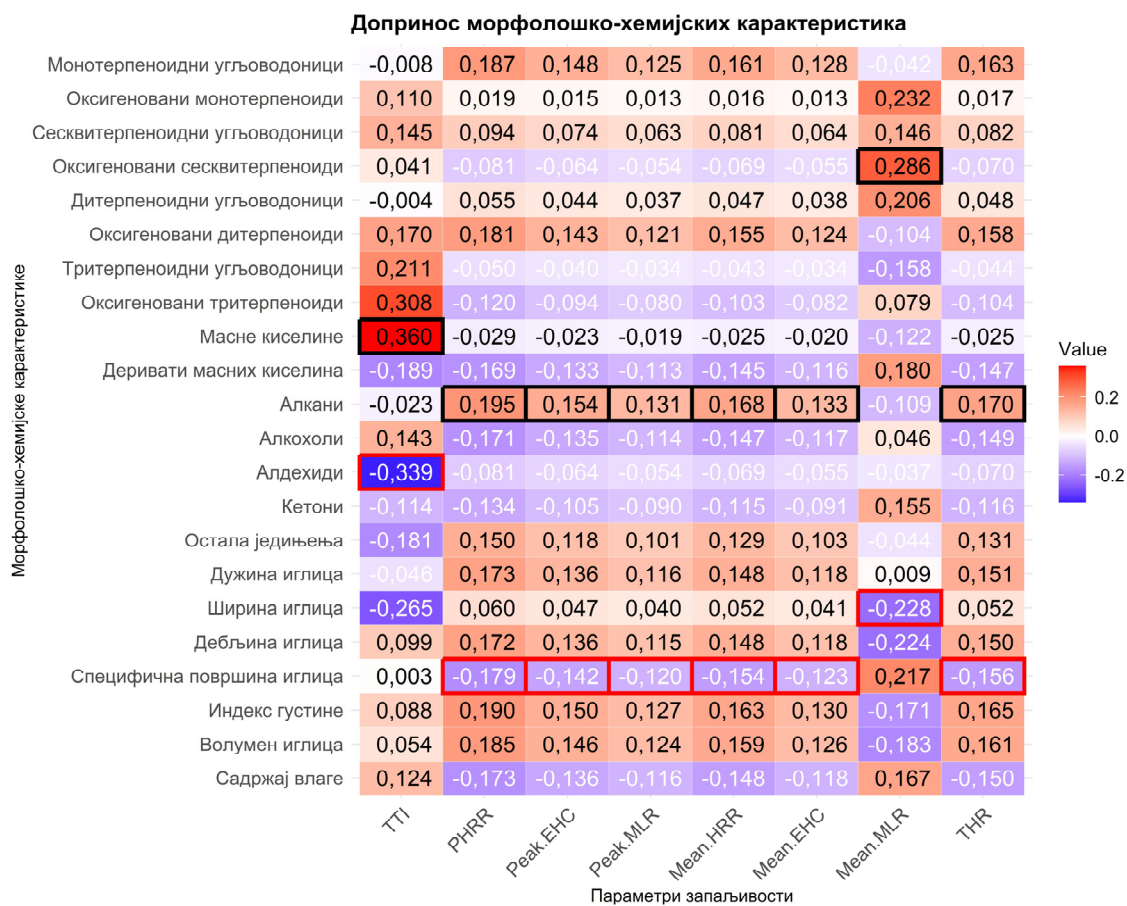
Зависне варијабле	PLS <sub>coeff.</sub> PC1	PLS <sub>coeff.</sub> PC2	PLS <sub>coeff.</sub> PC3	R <sup>2</sup> Y	VIP_PC1*	VIP_PC2*	VIP_PC3*
TTI	0,026	-0,122	0,437	0,940	0,932	0,994	<b>1,254</b>
PHRR	0,197	-0,072	-0,062	0,607	<b>1,711</b>	0,307	0,134
Peak EHC	0,156	-0,282	0,134	1,000	<b>1,598</b>	0,843	0,207
Peak MLR	0,132	0,051	-0,292	0,635	<b>1,659</b>	0,285	0,751
Mean HRR	0,170	-0,052	-0,069	0,448	<b>1,709</b>	0,293	0,188
Mean EHC	0,135	-0,284	0,170	0,969	<b>1,567</b>	0,912	0,265
Mean MLR	-0,128	0,258	-0,133	0,791	<b>1,296</b>	<b>1,242</b>	0,436
THR	0,172	-0,269	0,072	0,967	<b>1,621</b>	0,778	0,114

\*Коефицијенти чија је *VIP* вредност већа од 1 сматрају се значајним у објашњењу варијације зависне променљиве. Вредности чији је *VIP* > 1 означене су подебљаним (**bold**) текстом.

На основу израчунатих вредности доприноса појединачних морфолошко-хемијских карактеристика на параметре запаљивости четинарских врста уочен је карактеристичан образац према коме су висока запаљивост и интензитет сагоревања претежно условљени лако испарљивим, енергетски богатим хемијским једињењима. Врсте са високим садржајем алкана одликују високи позитивни доприноси за већину параметара запаљивости, као што су максимална и просечна топлотна снага (*PHRR* и *Mean HRR*), максимална ефективна топлотна моћ (*Peak EHC*), максимална брзина губитка масе (*Peak MLR*) и укупно ослобођена топлота (*THR*). Такође и монотерпеноидни угљоводоници и оксигеновани дитерпеноиди имају умерене до високе позитивне доприносе са овим параметрима запаљивости, а значајан допринос повећању вредности ових параметара имају и поједине морфолошке карактеристике као што је индекс густине и волумен иглица.

Супротно томе, веће вредности морфолошких карактеристика као што су специфична површина иглица и садржај влаге, као и садржај алкохола и деривата масних киселина, првенствено утичу на смањење ефикасности запаљивости ових врста (Слика 5.16).

Када је у питању параметар време паљења (*TTI*) четинарских врста, резултати су показали да он искључиво зависи од хемијских карактеристика, при чему укључивање морфолошких карактеристика није променило овај утицај. Доминантан утицај на дуже време паљења имају масне киселине и оксигеновани тритерпеноиди, док се краће време паљења повезује са већим садржајем алдехида.

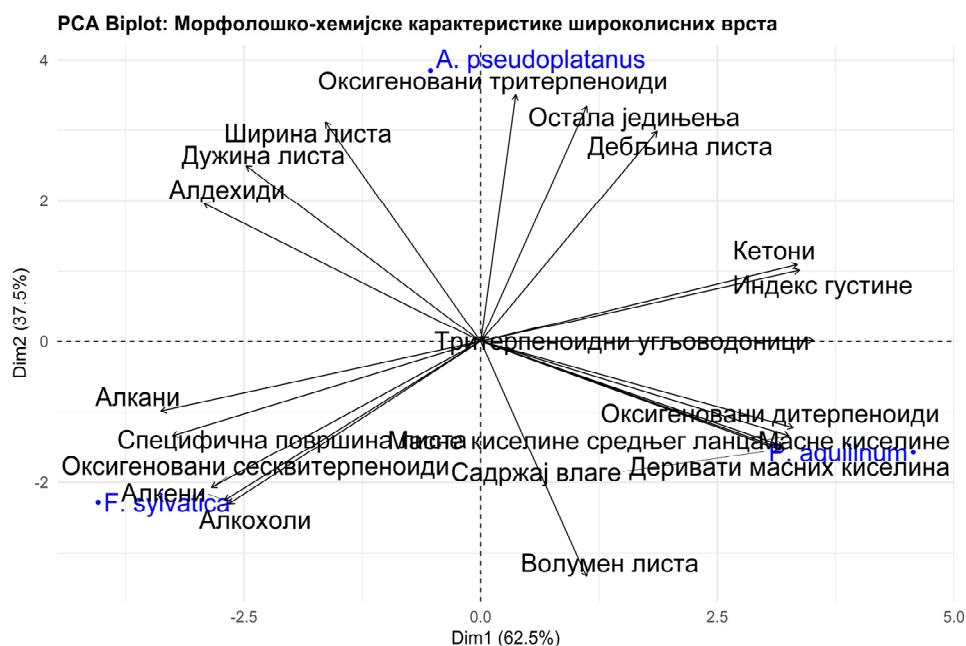


Слика 5.16. Визуелни приказ доприноса морфолошко-хемијских карактеристика на параметре запаљивости четинарских врста

### 5.3.10. Комбиновани утицај морфолошко-хемијских карактеристика на запаљивост широколисних врста

На основу *PCA* анализе морфолошко-хемијских карактеристика широколисних врста, обе димензије обухватају целокупну варијансу из скупа података. Прва димензија (*PC1*) објашњава већи део укупне варијансе, чак 62,5%, и раздваја врсте са високим концентрацијама оксигенованих, засићених једињења велике молекулске масе и густих листова са већим садржајем влаге, од оних са лако испарљивим једињењима и тањим листовима. Друга димензија (*PC2*) објашњава преостали део варијансе (37,5%) и раздваја врсте са већим, дебљим листовима са сложеним оксигенованим функционалним групама попут оксигенованих тритерпеноида и осталих једињења, од оних са високим присуством испарљивих једињења и листова већег волумена. Оваква структура *PC* димензија дефинише врсте које се могу окарактерисати на основу свог хемијског профила, и то на оне које садрже једињења мање молекулске масе наспрам оних тежих,

и засићених наспрам незасићених једињења. Са друге стране раздвајају се и врсте на основу облика листа, дебљине, густине и садржаја воде (Слика 5.17). У табели 5.18 приказана су векторска оптерећења анализираних морфолошко-хемијских карактеристика за издвојене *PC* димензије.



Слика 5.17. PCA биplot морфолошко-хемијских карактеристика за широколисне врсте

Табела 5.18. Векторска оптерећења анализираних морфолошко-хемијских карактеристика широколисних врста за издвојене *PC* димензије

Морфолошко-хемијске карактеристике	PC1	PC2
Оксигеновани сесквитерпеноиди	-0,81	-0,59
Оксигеновани дитерпеноиди	0,94	-0,35
Тритерпеноидни угљоводоници	1,00	0,00
Оксигеновани тритерпеноиди	0,11	0,99
Масне киселине средњег ланца	0,93	-0,38
Масне киселине	0,91	-0,42
Деривати масних киселина	0,90	-0,43
Алкани	-0,96	-0,28
Алкени	-0,77	-0,64
Алкохоли	-0,76	-0,65
Алдехиди	-0,83	0,56
Кетони	0,95	0,31
Остала једињења	0,32	0,95
Дужина листа	-0,70	0,71
Ширина листа	-0,47	0,88
Дебљина листа	0,53	0,85
Специфична површина листа	-0,93	-0,38
Индекс густине	0,96	0,29
Вољумен листа	0,32	-0,95
Садржај воде	0,90	-0,44

Ова *PCA* анализа пружа снажну основу за тумачење заједничког доприноса морфолошко-хемијских карактеристика на промену параметара запаљивости. На основу вредности *VIP score*-а, на промену параметара запаљивости утичу различите *PC* димензије (Табела 5.19). Интеграцијом морфолошко-хемијских карактеристика у *PLS* модел, коефицијент детерминације показује веома високу вредност за све параметре запаљивости ( $R^2Y > 0,94$ ), што указује на снажну повезаност између морфолошко-хемијских карактеристика и параметара запаљивости.

Прва димензија (*PC1*) има најзначајнији утицај на већину параметара запаљивости, нарочито на време паљења (*TTI*) и брзину губитка масе (*Peak MLR* и *Mean MLR*), за које су вредности *VIP score*-а биле изнад 1,35. Са друге стране, друга димензија (*PC2*) има најзначајнији утицај на максималну и просечну ефективну топлотну моћ (*Peak EHC* и *Mean EHC*). Што се тиче вредности топлотне снаге и укупно ослобођене топлоте (*PHRR*, *Mean HRR*, *THR*), према релативно уравнотеженим вредностима *VIP score*-а за обе димензије, може се рећи да на њихову варијабилност утиче интеракција више карактеристика.

**Табела 5.19.** Резултати *PLS* регресије: предвиђање параметара запаљивости на основу морфолошко-хемијских карактеристика широколисних врста

Зависне варијабле	PLS <sub>coeff.</sub> PC1	PLS <sub>coeff.</sub> PC2	R <sup>2</sup> Y	VIP PC1*	VIP PC2*
TTI	0,231	0,000	1,000	<b>1,414</b>	0,001
PHRR	-0,159	-0,204	0,941	<b>1,157</b>	0,891
Peak EHC	-0,098	-0,265	0,972	0,759	<b>1,227</b>
Peak MLR	-0,205	-0,121	0,951	<b>1,358</b>	0,482
Mean HRR	-0,113	-0,254	0,965	0,860	<b>1,166</b>
Mean EHC	-0,046	-0,291	0,994	0,365	<b>1,374</b>
Mean MLR	-0,221	-0,074	0,976	<b>1,397</b>	0,283
THR	-0,117	-0,251	0,963	0,889	<b>1,146</b>

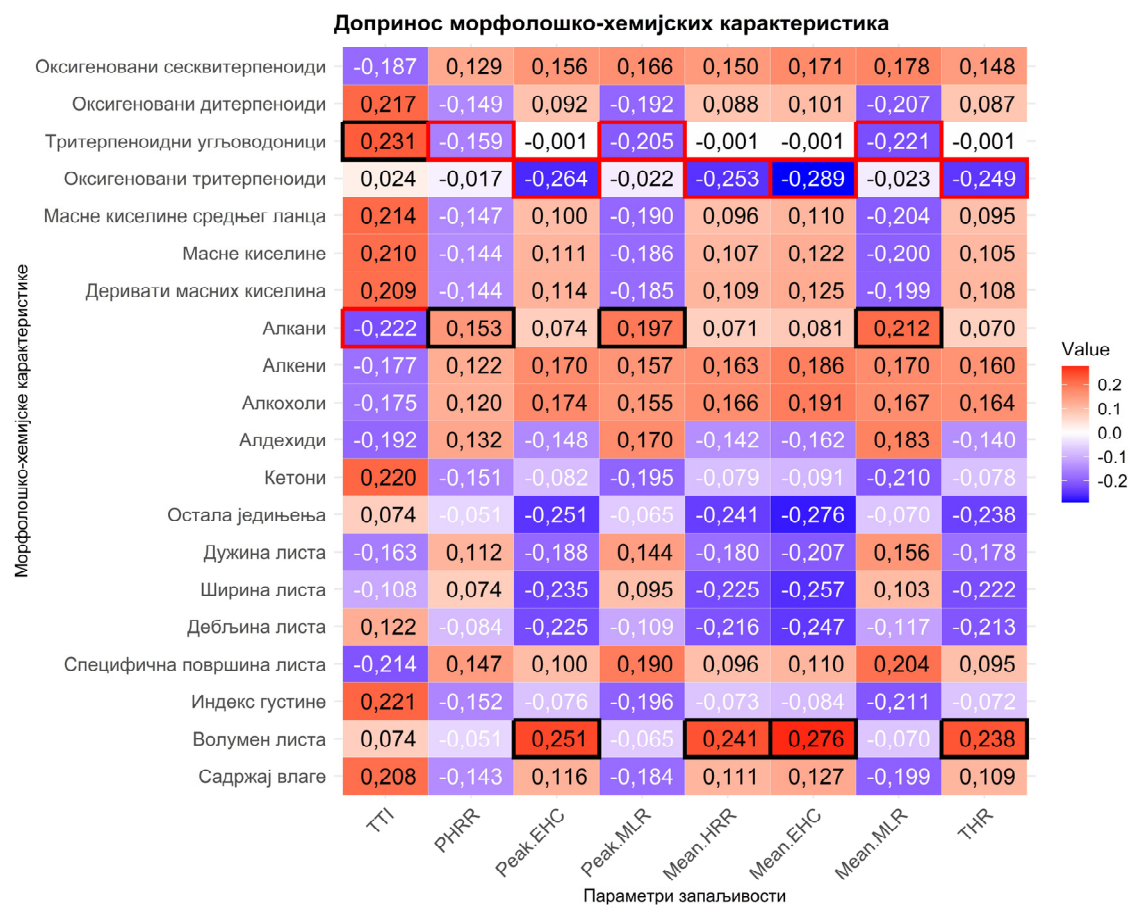
\*Коефицијенти чија је *VIP* вредност већа од 1 сматрају се значајним у објашњењу варијације зависне променљиве. Вредности чији је *VIP* > 1 означене су подељаним (**bold**) текстом.

На основу израчунатих коефицијената доприноса, уочене су сложене интеракције између морфолошких и хемијских карактеристика у односу на параметре запаљивости (Слика 5.18).

Енергетски богата једињења, као што су алкани показала су снажан позитиван утицај на запаљивост и интензитет сагоревања широколисних врста. Њихово присуство утиче на убрзано и интензивније сагоревање, што доприноси краћем времену паљења (*TTI*), повећању вредности максималне топлотне снаге (*PHRR*), као и на повећање максималне и просечне брзине губитка масе (*Peak MLR* и *Mean MLR*). Са друге стране,

присуство већег садржаја тритерпеноидних угљоводоника смањује вредности ових параметара.

Што се тиче параметара који се односе на одрживост сагоревања и укупно ослобођену топлоту, волумен листа се показао као доминантна карактеристика. Вероватно због своје улоге у повећању биомасе, показао је позитивне доприносе за максималну и просечну ефективну топлотну моћ (*Peak EHC* и *Mean EHC*), просечну топлотну снагу (*Mean HRR*) и укупно ослобођену топлоту (*THR*). Међу хемијским карактеристикама, алкохоли и алдехиди такође позитивно доприносе овим параметрима, што указује да они могу да подрже дуготрајније и енергетски ефикасније сагоревање. Са друге стране, оксигеновани тритерпеноиди су идентификовани као доминантни у смањењу вредности ових истих параметара. Додатно, морфолошке особине као што су дужина, ширина и дебљина листа представљају секундарне карактеристике које имају негативне ефекте на ове параметре запаљивости.



**Слика 5.18.** Визуелни приказ доприноса морфолошко-хемијских карактеристика на параметре запаљивости широколисних врста

## 5.4. Дискусија

Избор биљних врста за ово истраживање заснивао се на свеобухватном прегледу литературе *Поповић* и сарадника, у коме су обухваћена истраживања о утицају морфолошко-хемијских карактеристика шумске вегетације на њихову запаљивост [170]. Одабране врсте представљају доминантну вегетацију унутар подручја истраживања, а такође су и репрезентативни за шире планинске екосистеме Балканског полуострва и пружају релевантан контекст за проучавање запаљивости шумске вегетације. У складу са тим, селекција је извршена на доминантне четинарске врсте, које чине значајан део шума Старе планине, а уједно су познате по високој запаљивости. Поред тога, у истраживање су укључене и доминантне врсте које припадају листопадним шумским екосистемима, како би се обухватио диверзитет различитих типова шума и упоредиле карактеристике запаљивости разноврсне шумске вегетације. Овакав одабир врста омогућио је свеобухватније разумевање варијабилности у погледу запаљивости и морфолошко-хемијских карактеристика различитих типова шумске вегетације.

Сакупљање иглица и листова је значајно из разлога јер ови делови вегетативног материјала су најистуренији и лако запаљиви делови крошњи дрвећа. Као такви први долазе у контакт са пламеном, жаром и топлотним зрачењем за време шумског пожара. Истовремено, иглице и листови су најбројније и најраспрострањеније компоненте шумске биомасе у крошњама дрвећа, нарочито код четинарских и листопадних врста.

Добијени резултати указују на утицај хемијског састава и морфолошких карактеристика иглица/листова на запаљивост, али њихове улоге се разликују код четинарских и широколисних врста.

Четинарске врсте углавном одликују фине, танке иглице са малим односом површине-запремине, али су распоређене тако да између њих има доста простора, што омогућава лакши доток ваздуха, који утиче на интензивније сагоревање. Ове врсте садрже већу количину једињења терпеноида и смола, које додатно повећавају запаљивост, а имају и низак садржај влаге. Са друге стране, широколисне врсте имају равније листове, већих површина, и углавном немају висок садржај лако испарљивих једињења, који, између осталог, апсорбују већу количину влаге у свежем стању.

*РСА* анализа морфолошких карактеристика четинарских врста је показала да су дебљина, волумен и густина иглица усмерене на једној страни осе, док је на супротној страни специфична површина иглица. Овакав распоред је карактеристичан за четинарске врсте, а то је да врсте са дебелим и густим иглицама имају ниску специфичну површину,

док врсте са високим вредностима специфичне површине имају танке иглице. Таква морфолошка разлика директно се одражава на параметре запаљивости. Иглице са већом дебљином и запремином спорије се пале, али током сагоревања ослобађају већу количину топлоте, док се иглице са већом специфичном површином брже пале, али при томе емитују мање топлоте. На пример, врста *Pinus sylvestris* теже се пали, али има јак интензитет сагоревања када се запали, док врсте попут *Pinus halepensis*, чије су иглице танке, могу се врло брзо и лако запалити, али интензитет сагоревања је слабији [94].

Морфолошке карактеристике објашњавају само умерени део варијације у параметрима запаљивости, с тим да је коефицијент детерминације за параметар време паљења ( $TTI$ ) имао јако малу вредност ( $R^2Y = 0,033$ ). За остале параметре запаљивости, коефицијент детерминације је имао умерену вредност, при чему су се истицале вредности за максималну топлотну снагу ( $R^2Y_{PHRR} = 0,705$ ) и укупно ослобођену топлоту ( $R^2Y_{THR} = 0,835$ ), што указује да иглице веће запремине, дебљине и густине интензивније сагоревају и ослобађају већу количину топлоте за време сагоревања. Такође, резултати су показали да иглицама са таквим карактеристикама је потребно више времена да се запале. Насупрот томе, четинарске врсте са већом специфичном површином иглица имају тенденцију да се брже запале, с тим да ослобађају топлоту мањег интензитета.

Морфолошке особине четинарских врста, за разлику од широколисних, нису имале значајан допринос у иницирању паљења. То значи да је хемијски састав, а нарочито присуство лако испарљивих једињења, примарно својство које утиче на запаљивост четинарских врста. Ови налази су потврђени широм научне литературе која се бави карактеристикама запаљивости шумске вегетације. Запаљивост четинарских врста у великој мери зависи од хемијског састава, тј. садржаја терпена и смола, док запаљивост широколисних врста више зависи од морфолошких карактеристика [30], [171], [172].

$PCA$  анализа морфолошких карактеристика широколисних врста раздваја врсте на оне са великим, танким листовима, са високим вредностима специфичне површине, које карактерише краће време паљења и већа топлотна снага [173]. Резултати *Burton*-а и сарадника су показали да се листови са већим вредностима специфичне површине брже запале због њихове веће изложене површине у односу на масу, што убрзава пренос топлоте и омогућава брже ширење пламена [174]. Са друге стране, врсте са мањим, дебљим листовима и ниским вредностима специфичне површине имају дуже време паљења и мању топлотну снагу. Врста сличне структуре је врста храста, *Quercus ilex*, чији су густо листови мање запаљиви, пре свега због могућности већег задржавања влаге

и нижег садржаја испарљивих једињења, што доводи до тињајућег процеса сагоревања [175].

На основу вредности коефицијента детерминације, код широколисних врста, морфолошки параметри као што су дебљина, специфична површина, ширина и дужина листа, као и садржај воде, имали су доминантну улогу у предвиђању вредности свих параметара запаљивости ( $R^2Y > 0,97$ ). Приметно је да већи садржај воде у листовима значајно продужава време паљења ( $TTI$ ), што је у складу са бројном литературом, где је садржај воде примарно својство шумске вегетације које утиче на њену запаљивост [176]. Поред садржаја воде, такође и веће вредности густине и волумена доприносе продужавању времена паљења ових врста. Листови такве структуре имају способност да апсорбују топлоту, због веће могућности задржавања воде и самим тим показују мању склоност ка паљењу [177]. Са друге стране, листовима већих дужина и ширина је потребно мање времена да се запале. Додатно, листови са високим вредностима специфичне површине и већом запремином (волуменом) интензивније сагоревају и ослобађају већу количину топлоте. Ови резултати указују на то да велики, танки листови, мање густине брже сагоревају, док мањи, дебљи и гушћи листови, који имају могућност већег апсорбовања воде, отпорније су на паљење и спорије сагоревају [143].

Код четинарских врста, утицај морфолошких и хемијских карактеристика на параметре запаљивости је значајно другачији, при чему се хемијски састав показао као доминантан фактор запаљивости. Добијени резултати указују да она хемијска једињења, са ниском тачком паљења и која лако испаравају, у великој мери повећавају запаљивост и интензитет сагоревања четинарских врста. Због високог енергетског садржаја, веће концентрације испарљивих монотерпеноидних угљоводоника и алкана доприносе бржем паљењу и губитку масе, као и ослобађању веће вредности максималне топлотне снаге током сагоревања [178], [179]. *Ormeño* и сарадници су показали да врсте са већим садржајем терпена иницирају пламен веће висине и утичу на краће време паљења [30]. Добијени резултати ово потврђују, да четинарске врсте богате моно и сесквитерпеноидима убрзавају и интензивирају процес пламеног сагоревања. Додатно су резултати показали и да су се четинарске врсте богате алдехидима знатно брже запалиле у спроведеним експериментима, као што је то случај са врстом *P. menziesii* ( $TTI = 16,2 \pm 3,1$  s). Алдехиди често имају веома ниске тачке паљења, тако да чак умерен извор топлоте може довести до њиховог испаравања и паљења, што је у складу са наводима *Guerrero*-а и сарадника [178]. С обзиром да су добијени резултати у овом истраживању показали да време паљења ( $TTI$ ) четинарских врста искључиво зависи од њиховог хемијског састава,

то упућује на чињеницу да што брже иглице емитују запаљиве гасове услед излагања топлоти, тиме долази до бржег паљења.

Важно је напоменути да анализирани хемијске карактеристике четинарских врста не доприносе параметрима запаљивости подједнако. На пример, према коефицијенту доприноса, алкохоли имају пригушени ефекат на процес сагоревања, тј. веће концентрације алкохола утичу на мање вредности максималне и просечне топлотне снаге. Овим једињењима, потребно је више топлотне енергије за разлагање, јер у супротном доводе до успореног паљења и непотпуног сагоревања. Овај ефекат примећен је и код врста као што су *Quillaja saponaria* и *Pinus radiata*, које су, према *Guerrero*-а и сарадника, класификоване у врсте са ниском запаљивошћу [180]. Резултати су са друге стране показали да четинарске врсте богате алкохолима ослобађају већу укупно ослобођену топлоту (*THR*) и имају већу просечну ефективну топлотну моћ (*Mean EHC*). Ови налази упућују да ова једињења успоравају брзину сагоревања, док са друге стране омогућавају повећање укупно ослобођене топлотне енергије.

Истраживање *Romero*-а и *Ganteaume*-а је показало да унутар борових врста, различите групе терпена могу имати супротне ефекте на запаљивост. На пример, код врсте *P. halepensis*, сесквитерпеноиди, попут  $\beta$ - кариофилена, имали су високу корелацију са висином пламена и брзином паљења, док су одређена једињења монотерпеноида била повезана са смањеном запаљивошћу, вероватно због велике брзине испаравања [94]. Ови налази су у складу са добијеним резултатима овог истраживања, и то тако да тежа, мање испарљива једињења терпеноида, попут тритерпеноидних угљоводоника, могу допринети максималној ефективној топлотној моћи (*Peak EHC*).

Код широколисних врста, поред морфолошких, такође су и хемијске карактеристике имале значајан допринос у предвиђању вредности параметара запаљивости, за које је коефицијент детерминације ( $R^2Y$ ) био између 0,868 и 0,996. Широколисне врсте богате одређеним испарљивим једињењима пратиле су трендове четинарских врста, где су веће концентрације, посебно алкана, али и алкена и оксигенованих сесквитерпеноида повезани са краћим временом паљења (*TTI*). Ова једињења су уобичајена у саставу епикутикларних воскова широколисних врста, које доприносе повећању запаљивости и краћем времену паљења. Улога ових једињења у иницирању бржег паљења потврђена је у раду *Ormeño*-а и сарадника, који су показали да већи садржај алкана у листовима *Quercus coccifera* доприноси краћем времену паљења, нарочито у условима суше [181]. Добијени резултати су показали да већи садржај алкана

такође доприноси већим вредностима максималне и просечне топлотне снаге, ефективној топлотној моћи, бржем губитку масе и укупној ослобођеној топлоти.

Терпеноидни такође доприносе параметрима запаљивости широколисних врста. За разлику од четинара, код широколисних врста нису идентификовани лакше испарљиви терпеноиди, попут моно-, ди- и сескви- терпеноидних угљоводоника, као и оксигенованих монотерпеноида. Добијени резултати су у складу са наводима *Guerrero*-а и сарадника, да једињења попут тритерпеноидних угљоводоника могу имати значајан утицај на запаљивост [182]. Висок садржај ових једињења у анализираним узорцима повезани су са дужим временом паљења (*TTI*), и у неким случајевима доприносе слабијем интензитету сагоревања. Због своје велике молекулске масе и ниске испарљивости, ова једињења не испаравају лако, што свакако утиче на њихово одложено паљење. Међутим, након достизања границе запаљивости, ова једињења могу имати значајну ефективну топлотну моћ (*Mean EHC*). Сличне резултате добили су *Pausas* и сарадници, који су истакли да велика, тешко испарљива једињења имају тенденцију да смање запаљивост вегетације, али да са друге стране, онда када дође до паљења могу потенцијално утицати на ефикасност сагоревања кроз ослобођену топлоту [183].

Резултати овог истраживања указују да, поред уобичајеног сагледавања утицаја терпеноидних једињења на запаљивост шумске вегетације, значајну пажњу треба посветити и другим хемијским групама. Посебно се издвајају деривати масних киселина, алдехиди, алкани и алкохоли, који могу утицати на динамику сагоревања, што је у складу са наводима *Guerrero*-а и сарадника, који истичу да запаљивост не зависи искључиво од терпена, већ и од присуства ароматичних и карбонилних једињења, чиме се потврђују налази овог истраживања [178].

Једна од упечатљивих разлика између четинарских и широколисних врста огледа се у доминантним процесима који утичу на параметар време паљења (*TTI*). Код четинарских врста, хемијске карактеристике су биле доминантне, док код широколисних су морфолошке, попут садржаја воде и димензије листа. На пример, врста *P. aquilinum*, која је уједно имала и највећи садржај воде међу широколисним врстама, имала је најдуже време паљења ( $TTI = 21,7 \pm 11,7$  s). Ово указује да одређене морфолошке карактеристике, као што је садржај воде, могу преовладати хемијске по питању запаљивости. Резултати *Della Rocca* и сарадника ово потврђују, да и поред већег садржаја терпеноидних једињења, садржај воде је доминантан фактор који утиче на одложено паљење шумске вегетације. Њихово истраживање је показало да је врстама са већим садржајем терпена, као што је чемпрес, *Cupressus sempervirens*, потребан знатно нижи

садржај влаге како би се брже запалиле [184]. Добијени резултати за широколисне врсте су у складу са овим запажањима, и то тако, да и поред високог садржаја алкана или терпеноидних једињења, њихова запаљивост ће бити већа уз одговарајуће морфолошке карактеристике, као што су, на пример сувљи и тањи листови.

Са друге стране, код четинарских врста постоји комбиновани ефекат и морфолошких и хемијских карактеристика, које заједно доприносе запаљивости ових врста. Врсте са танким, малим иглицама и високим садржајем испарљивих једињења имају тенденцију бржег паљења и интензивнијег сагоревања, са високим вредностима топлотне снаге. *Alessio* и сарадници показали су интеракцију између морфолошких и хемијских карактеристика у карактеризацији запаљивости различитих медитеранских врста. Код четинарских врста, као што је *P. halepensis*, хемијске и морфолошке карактеристике се међусобно допуњују, и то тако да танке иглице са високим садржајем лако испарљивих једињења терпена, чине ову врсту јако запаљивом. Са друге стране, код широколисних врста, као што је *Q. ilex*, морфолошке карактеристике попут дебљих листова, са високим садржајем влаге, доприносе мањој запаљивошћу, без обзира на присуство лако испарљивих једињења [145]. Слична запажања истичу и *Ganteaume* и сарадници, који наводе да на запаљивост медитеранских врста не утиче садржај влаге или испарљива једињења, већ често њихова комбинација [185].

## 5.5. Закључна разматрања

Овај део истраживања пружа свеобухватну анализу како морфолошке и хемијске карактеристике доприносе запаљивости анализираних доминантних врста шумске вегетације. Интеграцијом анализе главних компонената (енгл. *Principal Component Analysis – PCA*) и регресије парцијалних најмањих квадрата (енгл. *Partial Least Squares Regression – PLS*), представљен је јединствен приступ како специфичне карактеристике утичу на кључне параметре запаљивости као што су време паљења (*TTI*), максимална и просечна топлотна снага (*PHRR* и *Mean HRR*), максимална и просечна ефективна топлотна моћ (*Peak EHC* и *Mean EHC*), брзина губитка масе (*Peak MLR* и *Mean MLR*) и укупно ослобођена топлота (*THR*).

Ово истраживање потврђује да запаљивост шумске вегетације зависи од синергијске интеракције између морфолошких и хемијских карактеристика. Запаљивост четинарских врста се ослања на лако испарљива једињења, док широколисне врсте

примарно зависе од физичке структуре и механизма задржавања влаге у својој структури листа.

Резултати су јасно показали да је хемијски састав доминантан код запаљивости четинарских врста. Лако испарљива једињења, попут монотерпена, сесквитерпена, алдехида и алкана, значајно доприносе бржем паљењу и повећавају интензитет сагоревања. Морфолошке особине код четинарских врста, као што су запремина, дебљина и густина иглица, утицале су на одрживост и интензитет пожара, али су имале мању предиктивну моћ у одређивању времена паљења.

Са друге стране, запаљивост широколисних врста је претежно одређена морфолошким карактеристикама. Својства попут високи садржај влаге, дебљина листа и густина значајно утичу на одложено паљење и утичу на смањење интензитета сагоревања. Супротно томе, велики, танки листови, са високим вредностима специфичне површине, доводе до бржег паљења и интензивнијег сагоревања. Ово указује на распон особина, од оних врста које су отпорније на дејство пламена и имају тврђе, кожасте листове, до оних које се лако пале, а имају тање, широке листове.

Добијени резултати пружају вредне налазе између анализираних карактеристика и запаљивости шумске вегетације. Међутим, познато је да се хемијски састав вегетације мења током године. С обзиром да је истраживање спроведено у контролисаним лабораторијским условима, где су коришћени узорци сакупљени током једне сезоне, будућа истраживања би требала бити усмерена на проширењу анализе карактеристика и запаљивости током различитих сезона. Тестирање запаљивости за време вегетације и током периода суше или старења могу пружити свеобухватније разумевање како фенологија и климатске флуктације утичу на запаљивост вегетације.

Упркос ограничењима у погледу величине узорка, посебно за групу широколисних врста ( $n = 3$ ), примењени статистички приступ заснован на *PCA* и *PLS* регресији омогућио је формирање иницијалног, експлораторног увида у могуће везе између морфолошко-хемијских карактеристика и параметара запаљивости. С обзиром на то да је циљ овог дела истраживања био идентификација доминантних образаца и потенцијално значајних предиктора, а не изградња потпуно предиктивног модела, примена *PCA* анализе омогућила је смањење димензионалности података и елиминацију мултиколинеарности између променљивих. Након тога, добијене *PCA* димензије коришћене су у *PLS* регресији као независне променљиве, чиме је обезбеђена стабилност модела упркос малом броју посматрања.

За анализу хемијских особина, примењена је дескриптивна анализа и *Mann-Whitney U* тест ради процене разлика између четинарских и широколисних врста. Непараметарска природа овог теста и интергрупно поређење омогућили су идентификацију једињења која показује потенцијално различите биохемијске профиле у зависности од таксономске припадности анализираних врста.

Важно је нагласити да су овакви приступи већ примењивани у ранијим истраживањима. На пример, истраживање *Ganteaume* и сарадника примењује *PLS* регресију на узорцима само четири биљне врсте како би се истражила повезаност између садржаја терпена и параметара запаљивости, уз јасну напомену да је реч о експлораторној анализи која има за циљ идентификацију образаца, а не развој општеприхваћеног модела [185].

Резултати овог истраживања представљају значајан почетни корак у разумевању односа између морфолошко-хемијских својстава и запаљивости шумске вегетације. Иако неке анализе имају ограничену статистичку снагу, посебно у оквиру широколисних врста, добијени увиди могу послужити као основ за будућа, обимнија истраживања. Сви резултати су интерпретирани са одговарајућом дозом опреза, уз јасно наглашена ограничења у тумачењу и применљивости добијених закључака.

## **6. ПРОЦЕНА ПОНОВЉИВОСТИ И ПОУЗДАНОСТИ У ПРИМЕНИ РАЗЛИЧИТИХ КОНФИГУРАЦИЈА НОСАЧА УЗОРАКА НА КАЛОРИМЕТРУ ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ ТОПЛОТНЕ СНАГЕ ПРИ ИСПИТИВАЊУ КАРАКТЕРИСТИКА ЗАПАЉИВОСТИ ШУМСКЕ ВЕГЕТАЦИЈЕ**

### **6.1. Општи део**

Одређивање карактеристика запаљивости шумске вегетације применом калориметријских уређаја у лабораторијском окружењу је све више заступљено у научној заједници. За разлику од хомогених материјала, шумска вегетације је структурно хетерогена, састављена од иглица или листова, гранчица, различитих облика и димензија, садржаја влаге и хемијске структуре, што доводи до високе варијабилности међу параметрима запаљивости. Као последица тога, доследна и поуздана мерења је тешко постићи стандардним методама.

Прецизност и поновљивост мерења су кључни сегменти у сваком експерименталном поступку, јер одређују поузданост и валидност добијених резултата. Стандард ISO 5725 пружа теоријску основу у процени прецизности методе испитивања, кроз поновљивост и репродуктивност мерења. Поновљивост се односи на степен варијације када се мерења врше у истим условима, у оквиру исте лабораторије, са истим оператором, опремом, док се репродуктивност мерења односи на степен варијације када се идентични тестови изводе у различитим лабораторијама, са другим оператором [186].

Управо на основу ових статистичких показатеља, стандардизоване методе испитивање својстава пожара одређују поузданост мерења, пратећи процедуре описане у ISO 5725-2 [187]. Ови показатељи се обично одређују преко међулабораторијских упоредних истраживања, где више лабораторија спроводи иста тестирања на идентичним материјалима. Овај процес помаже у квантификавању варијабилности која настаје унутар сваке лабораторије посебно, и између различитих лабораторија.

Генерално, калориметријски уређаји мањих размера имају тенденцију да покажу бољу поновљивост од тестова спроведених на опреми већих размера. Према резултатима упоредног тестирања, конусни калориметар мањих размера показао је знатно бољу поновљивост у мерењима топлотне снаге него калориметар средњих размера (енгл.

*Intermediate scale calorimeter*), вероватно због боље могућности контроле услова испитивања, лабораторијске поставке и смањене варијабилности оператера [188]. Ова запажања наглашавају да постизање високе прецизности у мерењима запаљивости захтева пажљиву контролу услова испитивања и методологије.

Постизање добре поновљивости и репродуктивности постоје још изазовније када се ради са узорцима шумске вегетације, које због своје физичко-хемијске структуре, могу довести до веће експерименталне варијабилности у поређењу са хомогеним узорцима. Чак и када се ради о истој врсти, са истог стабла и гране, мале разлике у начину на који је узорак припремљен за тестирање, може проузроковати значајне разлике међу параметрима запаљивости. За већину тестова за одређивање карактеристика запаљивости на лабораторијском нивоу, према препорукама ASTM/ISO стандарда, потребно је спровести најмање по три понављања за сваки третман експеримента, што често не обухвата цео опсег варијабилности за такве хетерогене материјале, као што је шумска вегетације. *Morrisset* и сарадници наглашавају да ослањање на овај минималан број понављања може утицати на статистичку несигурност међу резултатима [189].

Један од кључних приступа у побољшању поузданости испитивања запаљивости шумске вегетације код уређаја који раде на принципу калориметрије је дизајн носача узорака, прилагођен карактеристикама анализираних узорака. Носач узорка има кључну улогу у обезбеђивању доследног позиционирања вегетативног материјала, регулисању протока ваздуха и обезбеђивању равномерног излагања топлоти. Стандардни носачи узорака код ових уређаја превасходно су направљени за чврсте, грађевинске материјале, квадратног облика, димензија  $10 \times 10$  cm. Таква конфигурација носача код порозних узорака, попут борових иглица може довести до неприродних услова сагоревања, кроз, на пример, ограничавање протока кисеоника у слој горивог материјала. Додатно, положај вегетативних материјала у стандардизованим носачима узорака не одговара реалним условима и окружењу у којима се вегетација природно налази, што може утицати на поузданост добијених резултата. Препознајући ове проблеме, истраживачи су увели модификоване носаче узорака, посебно за шумску вегетацију.

*Schemel* и сарадници су били међу првима који су користили порозне носаче узорака како би спровели реалнија тестирања запаљивости шумске вегетације на уређају за испитивање ширења и развоја пожара (*Fire Propagation Apparatus – FPA*). Стандардни носач узорка заменили су цилиндричним, направљеним од перфорираног нерђајућег челика. Под условима природног и контролисаног (присилног) протока ваздуха кроз носач узорка, испитивали су утицај процентуалног удела отворених страница носача

узорка (63%, 26% и 0%) на параметре запаљивости. Добијени резултати указују да проток ваздуха у зони сагоревања значајно утиче на карактеристике сагоревања и промену параметара запаљивости [39].

*Bartoli* и сарадници су користили исти дизајн носача узорака као *Schemel* и сарадници, и утврдили да носачи узорака који омогућавају већи проток ваздуха доводе до знатно бржег паљења и веће максималне топлотне снаге, у поређењу са неперфорираним носачима [40]. Слично томе, *Madrigal* и сарадници су прерадили стандардни носач узорка у перфорирани коцкасти носач, чији отвори чине приближно 63% укупне површине. Упоредивањем резултата са стандардним носачем, аутори су потврдили да отворени носач даје репрезентативније сагоревање борових иглица [101].

У табели 6.1 дат је приказ најцитиранијих аутора који су користили калориметријске уређаје за анализу запаљивости шумске вегетације. Табела је састављена на основу четири кључна критеријума: коришћене опреме, примењеног топлотног флукса, анализираних узорака и типа носача узорака.

**Табела 6.1.** Преглед истраживања карактеристика запаљивости шумске вегетације применом лабораторијских калориметријских уређаја

Аутори	Назив уређаја	Топлотни флукс [kW/m <sup>2</sup> ]	Узорци	Тип носача узорка
<i>Schemel</i> и сарадници [39]	Уређај за испитивање ширења и развоја пожара	-	Борове иглице	Округли перфорани (са 0%, 26% и 63% отворености страница)
<i>Bartoli</i> и сарадници [40]	Уређај за испитивање ширења и развоја пожара	25	Борове иглице	Округли перфорани (са 0%, 26% и 63% отворености страница)
<i>Simeoni</i> и сарадници [92]	Уређај за испитивање ширења и развоја пожара	8,5 - 60	Борове иглице	Округли перфорани (са 26% и 63% отворености страница)
<i>Lamorlette</i> и сарадници [190]	Уређај за испитивање ширења и развоја пожара	8 - 55	Борове иглице	Округли
<i>Jervis</i> и <i>Rein</i> [96]	Уређај за испитивање ширења и развоја пожара	50	Борове иглице	Округли перфорани (са 63% отворености страница)
<i>Weise</i> и сарадници [121]	Конусни калориметар	25	Декоративна вегетације (листови и гране)	Коцкасти 100x100 mm
	Калориметар средњих размера	-		-
<i>Blank</i> и сарадници [191]	Конусни калориметар	30	Чичак трава	Коцкасти 100x100 mm
<i>Dibble</i> и сарадници [127]	Конусни калориметар	25	Инвазивне и аутохтоне врсте различитог раста	Коцкасти 100x100 mm
<i>Santoni</i> и сарадници [42]	Конусни калориметар	-	Борове иглице	Округли перфорани (са 99% отворености страница)
	Калориметар за сагоревање узорака у пуној размери			
<i>Fateh</i> и сарадници [93]	Конусни калориметар	10 - 50	Борове иглице	Округли

<i>Madrigal</i> и сарадници [41]	Калориметар за мерење топлотне снаге	50	Борове иглице Зимзелени жбунасти храст Маховина	Коцкасти перфорани (са 63% отворености страница)
<i>Madrigal</i> и сарадници [119]	Калориметар за мерење топлотне снаге	50	26 различите врсте	Коцкасти перфорани (са 63% отворености страница)
<i>Fernández-Gómez</i> и сарадници [192]	Калориметар за мерење топлотне снаге	50	Борове иглице Гранчице са листовима <i>Cistus laurifolius</i> L.	Коцкасти перфорани (са 63% отворености страница)
<i>Madrigal</i> и сарадници [193]	Калориметар за мерење топлотне снаге	50	Узорци различитих жбунастих врста	Коцкасти перфорани (са 63% отворености страница)
	Калориметар са кисеоничном бомбом	-		-
	Калориметар за сагоревање узорака у пуној размери	-		-
<i>Madrigal</i> и сарадници [101]	Калориметар за мерење топлотне снаге	25 и 50	Борове иглице	Коцкасти перфорани (са 63% отворености страница)
		50	Листови и гране жбунастих врста	
<i>Possell</i> и <i>Bell</i> [126]	Калориметар за мерење топлотне снаге	25	Листови еукалиптуса	Коцкасти перфорани (са 27% отворености страница)

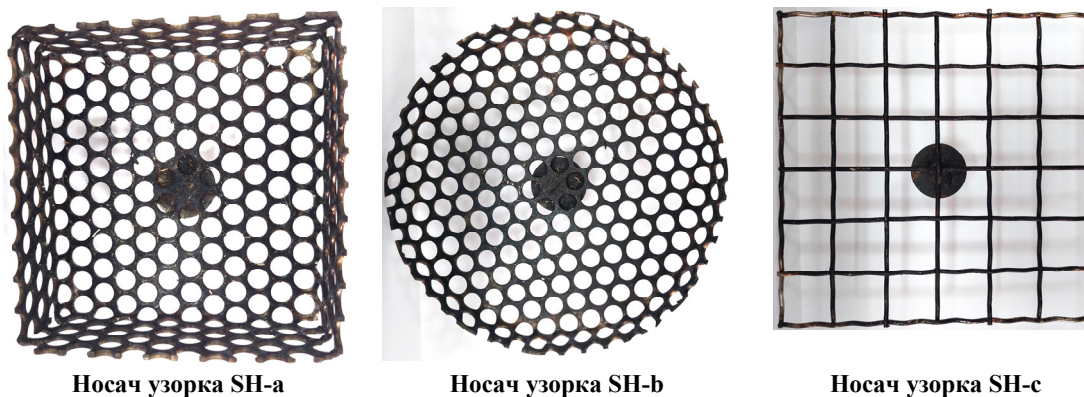
И поред ових унапређења, обезбеђивање репродуктивних података о запаљивости шумске вегетације остаје значајан изазов. Варијације у дизајну носача узорака и лабораторијским поставкама између различитих истраживања могу допринети недоследностима у добијеним резултатима. С тим у вези, постоји јак разлог за развој и стандардизацију поступака у процењивању запаљивости шумске вегетације. Један корак ка томе је адекватан дизајн носача узорка који може обезбедити оптималну репродуктивност и поузданост код различитих врста шумске вегетације. Ово истраживање директно доприноси том циљу кроз систематску процену перформанси различитих типова носача узорака, на основу које ће се извршити идентификација оне конфигурације која обезбеђује најмању варијабилност резултата.

## 6.2. Материјали и методе

### 6.2.1. Дизајн носача узорака

Да би се проценио утицај конфигурације носача узорака на поновљивост и репродуктивност мерења запаљивости шумске вегетације, направљена су и коришћена три различита типа носача узорака (енгл. *Sample Holder* – *SH*). Сваки држач је конструисан тако да обезбеди стабилну потпору узорка током сагоревања, омогућавајући устаљен, природан проток ваздуха кроз слој узорка, да одржи конзистентност у свим

повнављањима, и омогући равномерну изложеност топлотном зрачењу од стране грејача калориметра. На слици 6.1 приказан је изглед израђених носача узорака.



Слика 6.1. Изглед израђених носача узорака

Карактеристике појединачних носача узорака описане су у наставку:

- **Носач узорка SH-a – коцкасти перфорирани држач узорка**, спољашњих димензија  $10 \times 10 \times 3,5$  cm (дужина  $\times$  ширина  $\times$  дубина). Носач је израђен од нерђајућег челика, са перфорираним странама, укључујући и доњу површину. Перфорације су чиниле приближно 63% укупне површине, које омогућавају значајну размену ваздуха кроз узорак и његово задржавање на површини током сагоревања.

- **Носач узорка SH-b – округли перфорирани држач узорка**, пречника 13 cm и дубине 1,5 cm. Сличан као носач узорка А, направљен од нерђајућег челика, са 63% отворене површине са свих страна и са дна. Кружна геометрија је имала за циљ да истражи да ли облик носача, квадратни наспрам округлог, утиче на динамику сагоревања, нарочито у условима где проток ваздуха и расподела топлоте могу да варирају због ефеката ивица.

- **Носач узорка SH-c – равни коцкасти перфорирани држач узорка**, димензија  $13,5 \times 13,5$  cm. Површина овог носача узорка је израђена као високо перфорирана плоча, са више од 80% површине за проток ваздуха. Овакав дизајн носача узорка омогућава максимално излагање вегетационог материјала околном ваздуху са свих страна. Додатно, оваква конструкција спречава директну изложеност узорака загрејаним страницама носача узорака, чиме се смањује утицај бочног преноса топлоте на процес паљења, као што је случај код носача узорака SH-a и SH-b.

### 6.2.2. Експериментални дизајн

За први експериментални фактор усвојен је носач узорка, при чему су различити носачи узорака представљали различите нивое. За други фактор су изабране вегетационе врсте. Због шире применљивости, одабране су четири различите врсте, различите вегетационе структуре, које укључују четинарске и широколисне врсте, попут борових иглица (*Pinus pinaster*), гранчица смрче (*Picea abies*), листова храста (*Quercus pubescens*) и букве (*Fagus sylvatica*). Трећи експериментални фактор представља садржај влаге у узорцима, подељен на два нивоа, и то на свеже и суве узорке. Ниво садржаја влаге у свежим узорцима износио је  $124 \pm 7\%$ , док је за суве био  $0\%$ .

Експеримент је био заснован на  $3 \times 4 \times 2$  факторијалном дизајну, који обухвата све могуће комбинације нивоа фактора (Табела 6.2). Ово резултира са 24 комбинација третмана. Свака комбинација третмана поновљена је 5 до 10 пута. Експерименти су спроведени у контролисаном окружењу са константном температуром и влажношћу, како би се минимизирали спољашњи утицаји на резултате експеримента. У току сваког експеримента, зависне променљиве, односно параметри запаљивости шумске вегетације су праћени, и то: време паљења (енгл. *Time to Ignition – TTI*), максимална и просечна топлотна снага (*PHRR* и *Mean HRR*), максимална и просечна ефективна топлотна моћ (*Peak EHC* и *Mean EHC*), максимална и просечна брзина губитка масе (*Peak MLR* и *Mean MLR*) и укупна ослобођена топлота (*THR*).

Табела 6.2. Фактори и нивои у експерименталном дизајну

Фактор	Ниво 1	Ниво 2	Ниво 3	Ниво 4
Носач узорка	Носач узорка А	Носач узорка Б	Носач узорка Ц	-
Врсте	<i>P. pinaster</i>	<i>P. abies</i>	<i>Q. pubescens</i>	<i>F. sylvatica</i>
Садржај влаге	Свежи	Суви	-	-

### 6.2.3. Статистичка анализа

За процену поновљивости и репродуктивности добијених параметара запаљивости при примени различитих конфигурације носача узорака, спроведене су статистичке анализе за сваку комбинацију претходно задатих фактора и нивоа експеримента.

Као индикатор прецизности мерења, коришћен је коефицијент варијације (енгл. *Coefficient of variation – CV*) који је израчунат унутар сваког експерименталног третмана. Ниже вредности *CV* указују на већу стабилност и бољу поновљивост резултата унутар

истих експерименталних услова, док више вредности указују на већу варијабилност и потенцијалну нестабилност мерења.

За тестирање хомогености варијансе између различитих типова носача узорака, за различите нивое садржаја влажности у узорцима (свежи и осушени), примењен је Левенов тест за једнакост варијанси (енгл. *Levene's Test*). На овај начин упоређивале су се варијансе између свежих и осушених узорака, како би се утврдило да ли садржај влаге утиче на поузданост мерења у зависности на тип носача узорака. Додатно, овај тест је примењен и на комплетан скуп података за све типове носача узорака уз оба нивоа садржаја влаге, како би се утврдило да ли постоји разлика у конзистентности мерења између носача узорака. Праг статистичке значајности је постављен на  $\alpha = 0,05$ , а резултати теста су показивали на постојање или одсуство значајних разлика у варијабилности резултата за појединачне параметре запаљивости, у зависности од типа носача узорака и садржаја влаге у узорцима.

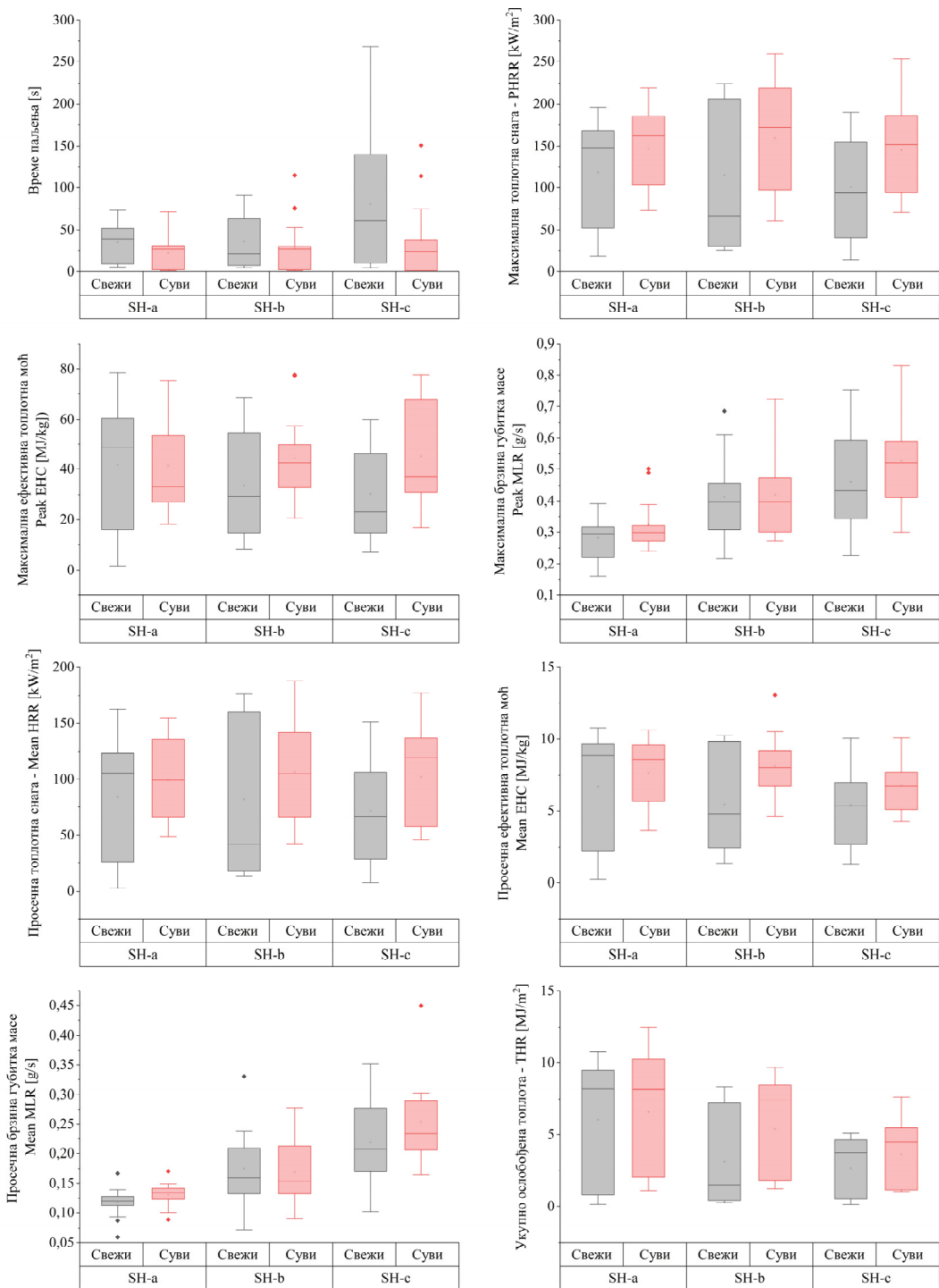
### **6.3. Резултати и дискусија**

Овај део истраживања процењује поновљивост и репродуктивност различитих носача узорака при карактеризацији запаљивости шумске вегетације применом калориметра за одређивање топлотне снаге. Резултати укључују параметре запаљивости за три различита дизајна носача узорака, за четири врсте (четинарске и широколисне), различите влажности (свеже и суве). Резултати су сумирани за сваки носач узорка, за сваки ниво садржаја влаге, кроз просечне вредности са стандардном девијацијом, коефицијентима варијације и резултатима Левеновог теста (Табела 6.3).

**Табела 6.3.** Резултати параметара запаљивости по врстама, типовима носача узорка и садржају влаге, са израчунатим вредностима коефицијента варијације и резултатима Левеновог теста.

Тип носача узорка	Садржај влаге	Врсте	TTI [s]	PHRR [kW/m <sup>2</sup> ]	Peak EHC [MJ/kg]	Peak MLR [g/s]	Mean HRR [kW/m <sup>2</sup> ]	Mean EHC [MJ/kg]	Mean MLR [g/s]	THR [MJ/m <sup>2</sup> ]
SH-a	Свежи	<i>P. pinaster</i>	43,9 ± 6,8	155,5 ± 16,4	54 ± 17,8	0,3 ± 0,01	113,4 ± 12,3	9,3 ± 1,1	0,1 ± 0,01	9,3 ± 1,5
		<i>P. abies</i>	67,3 ± 5,8	187,7 ± 12	59,6 ± 16,3	0,4 ± 0,01	140,4 ± 19,3	9,7 ± 0,2	0,1 ± 0,01	8,3 ± 0,4
		<i>Q. pubescens</i>	8,7 ± 0,6	45,8 ± 11,4	11,6 ± 3,6	0,2 ± 0,01	24,9 ± 5,7	2,3 ± 0,3	0,1 ± 0,01	0,8 ± 0,1
		<i>F. sylvatica</i>	6 ± 1	21,6 ± 3	22,1 ± 24	0,2 ± 0,01	8,2 ± 4,9	1,1 ± 0,7	0,1 ± 0,01	0,4 ± 0,3
	Средња вредност			35,1 ± 23,4	118,2 ± 67	41,9 ± 25	0,3 ± 0,01	84 ± 53,7	6,7 ± 3,9	0,12 ± 0,02
Коефицијент варијације [%]			70	57	60	27	64	58	20	70
SH-a	Суви	<i>P. pinaster</i>	29,3 ± 1,7	174 ± 12,4	46,8 ± 12,8	0,3 ± 0,01	114,4 ± 15,7	9,2 ± 0,9	0,1 ± 0,01	10,8 ± 1,2
		<i>P. abies</i>	52 ± 17,3	205,2 ± 17,8	59,1 ± 22,6	0,5 ± 0,01	145,9 ± 7,8	10,1 ± 0,5	0,1 ± 0,01	10,3 ± 1,9
		<i>Q. pubescens</i>	3 ± 1	105,8 ± 9,8	25,9 ± 6,6	0,3 ± 0,01	70,7 ± 8,9	5,3 ± 1,3	0,1 ± 0,01	1,9 ± 0,6
		<i>F. sylvatica</i>	1 ± 0	93,6 ± 19,1	31,9 ± 19	0,3 ± 0,01	59,8 ± 10,5	5,4 ± 2,2	0,1 ± 0,01	1,9 ± 1,2
	Средња вредност			21,9 ± 22,2	146,9 ± 48,9	41,4 ± 19,1	0,3 ± 0,01	99 ± 36,3	7,6 ± 2,5	0,13 ± 0,02
Коефицијент варијације [%]			101	33	46	26	37	33	17	71
<b>Коефицијент варијације по типу носача узорка, за оба нивоа садржаја влаге</b>										
Средња вредност			29,4 ± 23,5	130,6 ± 60,6	41,7 ± 22,3	0,3 ± 0,08	90,5 ± 46,8	7,1 ± 3,4	0,12 ± 0,02	6,3 ± 4,4
Коефицијент варијације [%]			80	46	53	27	52	47	19	69
Значајност Левеновог теста			0,77675	0,07383	0,23768	0,95533	<b>0,03043</b>	<b>0,00833</b>	0,94643	0,36792
SH-b	Свежи	<i>P. pinaster</i>	54,3 ± 8,5	199,5 ± 21,6	49,9 ± 8,5	0,4 ± 0,01	161,8 ± 14,4	10 ± 0,2	0,2 ± 0,01	7,7 ± 0,6
		<i>P. abies</i>	90 ± 1,4	207,3 ± 24,3	21,8 ± 10,8	0,6 ± 0,1	133,2 ± 38,2	7 ± 0,8	0,3 ± 0,1	4 ± 1,8
		<i>Q. pubescens</i>	6,7 ± 2,3	57,3 ± 10,8	30,5 ± 33,1	0,3 ± 0,1	34,4 ± 6,3	3,4 ± 1,2	0,1 ± 0,01	0,9 ± 0,5
		<i>F. sylvatica</i>	11,3 ± 8,4	27,1 ± 2,6	28,8 ± 10,6	0,3 ± 0,1	15,5 ± 2,2	2 ± 0,8	0,1 ± 0,01	0,3 ± 0,1
	Средња вредност			36,1 ± 34	115,1 ± 85,7	33,8 ± 19,6	0,4 ± 0,1	82 ± 68,1	5,4 ± 3,5	0,18 ± 0,07
Коефицијент варијације [%]			94	74	58	34	83	64	40	103
SH-b	Суви	<i>P. pinaster</i>	28,3 ± 1,3	223 ± 33,1	53 ± 18,6	0,4 ± 0,1	163,6 ± 26,7	9,1 ± 0,9	0,2 ± 0	8,4 ± 0,9
		<i>P. abies</i>	81,3 ± 31,3	210,2 ± 34,9	57,3 ± 17,8	0,6 ± 0,1	124,1 ± 18,5	10,9 ± 2,1	0,2 ± 0	8,7 ± 1
		<i>Q. pubescens</i>	1,7 ± 0,6	102 ± 6,7	32,4 ± 7,3	0,3 ± 0,1	65,9 ± 6,3	5,7 ± 1,1	0,2 ± 0	1,7 ± 0,4
		<i>F. sylvatica</i>	1,3 ± 0,6	81,3 ± 18,6	31,9 ± 13,6	0,3 ± 0	53,6 ± 13,9	6,6 ± 1,1	0,1 ± 0	1,8 ± 0,5
	Средња вредност			28,2 ± 35	159,4 ± 69,9	44,4 ± 17,9	0,4 ± 0,1	106,6 ± 50,5	8,1 ± 2,4	0,17 ± 0,05
Коефицијент варијације [%]			124	44	40	34	47	29	32	66
<b>Коефицијент варијације по типу носача узорка, за оба нивоа садржаја влаге</b>										
Средња вредност			31,8 ± 34	139,1 ± 79,1	39,5 ± 19,1	0,42 ± 0,14	95,3 ± 59,2	6,9 ± 3,2	0,17 ± 0,06	4,4 ± 3,6
Коефицијент варијације [%]			107	57	48	33	62	46	35	81
Значајност Левеновог теста			0,56649	0,08407	0,51182	0,78272	<b>0,04239</b>	0,05351	0,60799	0,23199
SH-c	Свежи	<i>P. pinaster</i>	67,3 ± 6	175,1 ± 21,1	49,2 ± 9,6	0,5 ± 0,1	129,3 ± 22,6	9,7 ± 0,4	0,2 ± 0,1	4,9 ± 0,2
		<i>P. abies</i>	199,3 ± 52,6	140,8 ± 37,6	36,9 ± 15,8	0,6 ± 0,2	99,6 ± 27,6	6,2 ± 0,8	0,3 ± 0,1	4,4 ± 0,5
		<i>Q. pubescens</i>	7,7 ± 4,6	44,8 ± 6,4	19,5 ± 11,5	0,4 ± 0,1	29,4 ± 1,4	3,3 ± 0,8	0,2 ± 0	0,5 ± 0
		<i>F. sylvatica</i>	9 ± 4,6	28,9 ± 13,7	13,6 ± 6	0,3 ± 0,1	17,6 ± 9,4	2,1 ± 0,7	0,1 ± 0	0,3 ± 0,2
	Средња вредност			80,7 ± 89,7	100,7 ± 66,8	30,3 ± 17,6	0,5 ± 0,2	71,3 ± 50,6	5,4 ± 3	0,22 ± 0,07
Коефицијент варијације [%]			111	66	58	35	71	56	33	82
SH-c	Суви	<i>P. pinaster</i>	31 ± 5,8	176,2 ± 19,7	55,3 ± 19,7	0,5 ± 0	129,6 ± 9,9	8,1 ± 0,5	0,3 ± 0	5,2 ± 0,7
		<i>P. abies</i>	113,3 ± 38	215 ± 38,9	37,3 ± 34,9	0,7 ± 0,1	153,9 ± 27,7	8,1 ± 1,8	0,3 ± 0,1	6,4 ± 1,6
		<i>Q. pubescens</i>	2,3 ± 1,2	88,4 ± 5,7	33,1 ± 3,4	0,5 ± 0,1	56,7 ± 1,6	4,8 ± 0,4	0,2 ± 0	1,1 ± 0,1
		<i>F. sylvatica</i>	1 ± 0	91,1 ± 18,2	51,6 ± 28,4	0,4 ± 0,1	59,1 ± 11,4	5,6 ± 1	0,2 ± 0	1,2 ± 0,2
	Средња вредност			36,5 ± 48,4	145,2 ± 59,1	45,2 ± 23,1	0,5 ± 0,1	102,1 ± 45,5	6,8 ± 1,8	0,25 ± 0,07
Коефицијент варијације [%]			133	41	51	28	45	26	29	70
<b>Коефицијент варијације по типу носача узорка, за оба нивоа садржаја влаге</b>										
Средња вредност			58,6 ± 74,1	123 ± 65,8	37,7 ± 21,5	0,49 ± 0,16	86,7 ± 49,7	6,1 ± 2,5	0,24 ± 0,07	3,1 ± 2,4
Коефицијент варијације [%]			127	54	57	32	57	41	31	75
Значајност Левеновог теста			<b>0,02693</b>	0,36482	0,1762	0,49071	0,56869	<b>0,04287</b>	0,73941	0,50816
Значајност Левеновог теста за све типове носача узорка, за оба нивоа садржаја влаге				<b>p &lt; 0,001</b>	0,39215	<b>0,00208</b>	0,11283	0,14206	<b>p &lt; 0,001</b>	<b>p &lt; 0,001</b>

Ради јасније визуелне интерпретације резултата, на слици 6.2 приказане су средње вредности појединачних параметара запаљивости у зависности од типа носача узорка и нивоа влажности узорка.



Слика 6.2. Средње вредност параметара запаљивости по типу носача узорака и нивоа влажности узорака

На основу резултата из табеле 6.3, за свеже узорке, може се уочити да су са носачем узорка SH-a добијени најконзистентнији резултати, што је потврђено генерално нижим вредностима коефицијента варијације (CV%) за већину параметара запаљивости

(~53%). Највећа варијабилност (~69%) измерена је код носача узорка SH-b, док су код носача узорка SH-c уочене средње вредности варијације за већину параметара запаљивости (~64%). За свеже узорке уочена су следећа запажања:

- Параметар време паљења (*TTI*) показао је мању варијабилност резултата при употреби носача узорка SH-a ( $CV = 70\%$ ) за разлику од SH-b ( $CV = 94\%$ ) и SH-c ( $CV = 111\%$ ), што указује на већу поузданост мерења овог параметра код свежих узорака при употреби носача узорка SH-a.
- Код носача узорка SH-a је и за максималну топлотну снагу (*PHRR*) регистрована најмања варијабилност ( $CV = 57\%$ ) у односу на SH-b ( $CV = 74\%$ ) и SH-c ( $CV = 66\%$ ). Слична запажања уочена су и за вредности просечне топлотне снаге (*Mean HRR*), где коефицијент варијације за SH-a износи 64%, у односу на 83% за SH-b и 71% за SH-c. Ови налази указују да носач узорка SH-a омогућава мерења топлотне снаге свежих узорака са већом поновљивошћу.
- Варијабилност за максималну ефективну топлотну моћ (*Peak EHC*) била је иста код носача узорака SH-b и SH-c ( $CV = 58\%$ ), док је нешто већа била за SH-a ( $CV = 60\%$ ), а за просечну ефективну топлотну моћ (*Mean EHC*) најмања варијабилност уочена је за носач узорка SH-c ( $CV = 56\%$ ), највећа за SH-b ( $CV = 64\%$ ), док је за SH-a у опсегу ових вредности ( $CV = 58\%$ ).
- Коефицијенти варијације за максималну и просечну брзину губитка масе (*Peak MLR* и *Mean MLR*) су доследно биле најниже код носача узорка SH-a (27% и 20%, респективно), у односу на SH-b (34%, 40%) и SH-c (35% и 33%).
- Коефицијент варијације за укупно ослобођену топлоту (*THR*) је код носача узорка SH-a имала вредност од 70%, што је знатно ниже у односу на SH-b ( $CV = 103\%$ ) и SH-c ( $CV = 82\%$ ).

Код осушених узорака, варијабилност мерења је била смањена код многих параметара запаљивости, за све типове носача узорака. Слично као код свежих узорака, носач узорка SH-a имао је најконзистентније резултате и код осушених, са просечним вредностима коефицијента варијације од око ~45%, док су за SH-b и SH-c били нешто виши (~52-53%). Уочено је следеће:

- За параметар време паљења (*TTI*), коефицијент варијације за све носаче узорака је порастао у односу на свеже узорке, нарочито за носач узорка SH-a, и то на 101%, док је за SH-b порастао на 124% и за SH-c на 133%.

- Вредности максималне и просечне топлотне снаге (*PHRR* и *Mean HRR*) су значајно побољшале конзистентност за све типове носача узорака. Коефицијент варијације за ове параметре код SH-a је опао на 33% и 37%, респективно, што је ниже него код SH-b (44% и 47%) и SH-c (41% и 45%).
- Најмања вредност коефицијента варијације за параметар максимална ефективна топлотна моћ (*Peak EHC*) уочена је код носача узорка SH-b ( $CV = 40\%$ ), у односу на SH-a ( $CV = 46\%$ ) и SH-c ( $CV = 51\%$ ). Супротно томе, за просечну ефективну топлотну моћ (*Mean EHC*), најнижи коефицијент варијације регистрован је код носача узорка SH-c ( $CV = 26\%$ ), у односу на SH-b ( $CV = 29\%$ ) и SH-a ( $CV = 33\%$ ).
- Код параметара максималне и просечне брзине губитка масе (*Peak MLR* и *Mean MLR*), најнижа вредност коефицијента варијације детектована је код носача узорка SH-a, 26% и 17% респективно, у односу на SH-b (34% и 32%) и SH-c (28% и 29%).
- Најмања вредност коефицијента варијације за укупно ослобођену топлоту (*THR*) за осушене узорке, уочена је код носача узорка SH-b ( $CV = 66\%$ ), која се значајно побољшала у односу на високу варијабилност код свежих узорака. Коефицијенти варијације за SH-a и SH-c су имали приближно исте вредности (71% и 70%).

За већину параметара запаљивости, Левенов тест није потврдио статистички значајну разлику између варијансе свежих и сувих узорака међу носачима узорака, и поред промена вредности коефицијената варијације између узорака са различитом влажношћу. На пример, параметар време паљења (*TTI*) код носача узорка SH-a се повећао са 70% код свежих, на 101% за суве узорке, али Левенов тест је показао да ова промена варијансе није статистички значајна ( $p = 0,776$ ), јер је варијанса била висока у оба услова. Слично томе, просечна ефективна топлотна моћ (*Mean EHC*) код SH-b је пала са 64% код свежих на 29% код сувих узорака, при чему је статистички тест показао благу значајност ( $p = 0,053$ ).

Са друге стране, у неколико случајева уочене су значајне промене варијансе. Код носача узорка SH-a, параметри просечна топлотна снага и ефективна топлотна моћ (*Mean HRR* и *Mean EHC*) имали су  $p$  вредности од 0,030 и 0,008, респективно, што указује да је варијанса за ове параметре, била значајно различита између свежих и сувих узорака. У оба случаја, свежи узорци су показали већу варијабилност, што потврђује да суви узорци побољшавају конзистентност носача узорка SH-a за ове параметре запаљивости. Носач узорка SH-b показао је значајну разлику код просечне топлотне снаге (*Mean HRR*;  $p =$

0,042), где су опет свежи узорци имали већу варијабилност у односу на суве. SH-c је показао значајну промену варијансе у времену паљења ( $TTI$ ;  $p = 0,027$ ) просечној ефективној топлотној моћи ( $Mean\ EHC$ ;  $p = 0,043$ ). Код овог носача узорка, варијабилност за време паљења ( $TTI$ ) се повећала код сувих узорака на 133%, у односу на 111% код свежих, док је варијабилност просечне ефективне топлотне моћи ( $Mean\ EHC$ ) за суве узорке била много нижа ( $CV = 26\%$ ) у односу на свеже ( $CV = 56\%$ ).

Генерално, свежи узорци су имали тенденцију да покажу већу варијабилност него суви, за многе параметре запаљивости, при чему је Левенов тест показао статистички значајну разлику у неколико случајева, попут просечне топлотне снаге и ефективне топлотне моћи ( $Mean\ HRR$  и  $Mean\ EHC$ ).

Комбиновање података (свежих и сувих узорака) довело је до веће варијабилности, али је свакако носач узорка SH-a, за већину параметара запаљивости имао најнижи коефицијент варијације, у просеку око 49%, док су SH-b и SH-c показали веће вредности, око 59%. За параметар време паљења ( $TTI$ ), за носач узорка SH-a коефицијент варијације је износио 80%, у односу на 107% за SH-b и 127% за SH-c. Слично томе, максимална топлотна снага је била најнижа за SH-a ( $CV = 46\%$ ).

За поједине параметре запаљивости, нешто ниже вредности уочене су код носача узорка SH-b. На пример, варијабилност максималне ефективне топлотне моћи ( $Peak\ EHC$ ) била је најнижа код SH-b ( $CV = 48\%$ ) у односу на SH-a ( $CV = 53\%$ ), док је за просечну ефективну топлотну моћ била најнижа код SH-c ( $CV = 41\%$ ), у односу на SH-a ( $CV = 47\%$ ). Свакако, ови изузеци су били ограничени на појединачне случајеве, с тим да ниједан параметар није указао на то да је коефицијент варијације за SH-b или SH-c значајно нижи у односу на SH-a.

Приликом комбиновања свих типова носача узорака уз оба нивоа садржаја влаге, Левенов тест је показао да су код неколико параметара запаљивости разлике у варијабилности биле статистички значајне. То указује да је макар један од носача узорака имао већу поновљивост од осталих. На пример, параметар време паљења ( $TTI$ ) је показао веома значајну статистичку разлику ( $p < 0,001$ ), што значи да су резултати овог параметра најмање код једног носача узорка имали значајно другачију варијансу од осталих. За овај параметар, код носача узорка SH-a, у случају када су сагледана оба нивоа садржаја влаге, коефицијент варијације је износио 80%, што је знатно ниже него код SH-b ( $CV = 107\%$ ) и SH-c ( $CV = 127\%$ ), тако да овај тест потврђује значајно бољу конзистентност у резултатима мерења овог параметра у корист SH-a. Слично томе, Левенов тест за максималну топлотну снагу ( $PHRR$ ) такође је показао статистички

значајну разлику ( $p = 0,040$ ), што указује на неједнаке варијансе између носача узорака. Коефицијент варијације је то и показао, да је код SH-a износио 46%, што је ниже од SH-b ( $CV = 57\%$ ) и SH-c ( $CV = 54\%$ ). Разлике у варијабилности код максималне брзине губитка масе (*Peak MLR*) биле су још израженије ( $p = 0,002$ ). Коефицијент варијације код SH-a износио је 27%, а код SH-b и SH-c приближно 32-33%. Иако постоји мала разлика, статистичка значајност резултата потврђује да је носач узорка SH-a пружио конзистентнија мерења ових параметара. Сличан тренд уочен је и за просечну брзину губитка масе (*Mean MLR*), где је коефицијент варијације за SH-a ( $CV = 19\%$ ) био скоро упола мањи од SH-b ( $CV = 35\%$ ), а и од SH-c ( $CV = 31\%$ ). Укупно ослобођена топлота (*THR*) је такође показала статистичке значајне разлике међу носачима узорака ( $p < 0,001$ ), где је и у овом случају носач узорка SH-a имао најнижи коефицијент варијације ( $CV = 69\%$ ), у поређењу са SH-b ( $CV = 81\%$ ), а и од SH-c ( $CV = 75\%$ ).

Супротно овим налазима, за неке параметре запаљивости Левенов тест није показао статистички значајне разлике у варијансама међу носачима узорака. Иако је коефицијент варијације за носач узорка SH-a имао најнижу вредност за просечну топлотну снагу (*Mean HRR*), разлике у варијанси нису биле довољно велике како би се одређени носач узорка статистички издвојио као поузданији у односу на остале. Слично томе, за остале параметре као што су максимална и просечна ефективна топлотна моћ (*Peak EHC* и *Mean EHC*) Левенов тест такође није показао статистички значајне разлике у варијансама ( $p > 0,05$ ).

У већини случајева, када је један од носача узорака имао нижи коефицијент варијације у односу на остале, Левенов тест је потврдио постојање статистички значајне разлике у варијансама. Супротно томе, у случајевима где су разлике међу вредностима коефицијената варијације биле мање, нису потврђене статистичке значајне разлике.

Носач узорка SH-a, не само да има ниже вредности коефицијента варијације за већину параметара запаљивости у односу на остале носаче узорака, већ и одржава статистички еквивалентну варијансу између свежих и сувих узорака. Такође, уочено је да код неколико параметара запаљивости долази до смањења вредности коефицијента варијације за суве узорке, што чини његове перформансе поузданијим и предвидљивијим. То значи да овај носач узорка даје стабилније и уједначеније резултате мерења, без обзира на то да ли су узорци свежи или суви.

Супротно томе, SH-b показује високу варијабилност међу скоро свим параметрима запаљивости, при чему нису уочена значајна смањења вредности

коэффицијента варијације код сувих узорака у односу на свеже, што га чини најмање поузданим носачем узорка.

Носач узорка SH-с, иако има високу варијабилност код већине параметара запаљивости, истиче се смањењем вредности коэффицијента варијације код сувих узорака за неколико параметара запаљивости.

Код свих типова носача узорака, садржај воде је имао значајан утицај на варијабилност мерења. Свежи узорци су генерално имали веће вредности коэффицијента варијације у односу на суве код већине параметара запаљивости. Ово је уочено за параметре попут *PHRR*, *Mean HRR*, *Peak EHC*, *Mean EHC*, где су вредности коэффицијента варијације за сваки носач опали код сувих узорака, што указује на побољшану поновљивост. Међутим, занимљив изузетак је параметар време паљења (*TTI*) који је показао супротан тренд, где је вредност коэффицијента варијације код свих носача узорака био већи у поређењу са свежим узорцима. Ово указује на већу нестабилност мерења овог параметра када је узорак потпуно сув.

#### **6.4. Закључна разматрања**

Добијени резултати јасно указују на то да избор носача узорака може утицати на доследност резултата при одређивању карактеристика запаљивости шумске вегетације. Да би се постигла најбоља поновљивост и репродуктивност при испитивању карактеристика запаљивости шумске вегетације, препоручује се дизајн носача узорка типа SH-а, нарочито за експерименте са свежим вегетативним материјалом. Носачи узорка, који дају поузданије резултате, могу смањити варијабилност у експерименталним поставкама, што је кључно при поређењу карактеристика запаљивости различитих врста. Са друге стране, носач узорка који уноси додатну варијабилност, може смањити и утицати на поузданост добијених резултата. При планирању експеримента, кључно је усвојити поставке које обезбеђују минимизирање варијабилности измерених вредности.

Поред тога, резултати су показали да смањење воде генерално побољшава поновљивост за већину параметара запаљивости, без обзира на тип носача узорка. Уочено је да чак и код сувих узорака, разлике између носача узорака и даље постоје, као и то да носач узорка SH-а и даље предњачи у односу на остале, што значи да су дизајн и начин позиционирања узорка значајни фактори у експерименталној процедури код уређаја који раде на принципу калориметрије.

Иако су налази у овом делу истраживања показали да носач узорка SH-а даје резултате са најмањом варијабилношћу под контролисаним условима, неопходна је међулабораторијска валидација добијених резултата. Ово је кључно за утврђивање репродуктивности, у складу са захтевима стандарда ISO 5725.

## 7. ФИНАЛНИ ЗАКЉУЧЦИ И ДОПРИНОСИ ИСТРАЖИВАЊА

Свеобухватна истраживања спроведена у оквиру ове докторске дисертације пружила су детаљан увид у сложене процесе који дефинишу запаљивост, горивост и емисију продуката сагоревања доминантних врста шумске вегетације у Србији. Систематском анализом кључних фактора: садржаја влаге, топлотног флукса, типа паљења, као и морфолошких и хемијских карактеристика дошло се до фундаменталних закључака.

Потврђено је да је садржај влаге критичан параметар који директно утиче на време паљења и интензитет ослобађања топлоте, што је од суштинског значаја за разумевање преласка површинских у пожаре крошњи.

Истраживање је јасно диференцирало динамику пилотираног (пламеног) и непилотираног (тињајућег) сагоревања, показујући да тип паљења не утиче само на термичке карактеристике пожара, већ и на хемијски профил емитованих продуката сагоревања.

Један од најзначајнијих закључака јесте јасна дистинкција између механизма који управљају запаљивошћу четинарских и широколисних врста. Показало се да је запаљивост четинара доминантно условљена њиховим хемијским саставом, пре свега присуством лако испарљивих једињења, док је код широколисних врста запаљивост примарно одређена морфолошким карактеристикама попут дебљине листа и садржаја влаге.

Коначно, методолошка анализа поузданости различитих конфигурација носача узорака потврдила је да адекватан експериментални дизајн има пресудну улогу у обезбеђивању поновљивости и тачности резултата. Ови закључци чине темељ за даље дефинисање научних, методолошких и практичних доприноса овог рада.

## **7.1. Научни и методолошки доприноси истраживања**

Ова докторска дисертација пружа вишеструке научне и методолошке доприносе који унапређују област науке о пожару и процене запаљивости биљних материјала:

### **1. Развој иновативне експерименталне инсталације за испитивање пожарних карактеристика шумске вегетације**

Развијена је и успешно примењена јединствена експериментална инсталација која спреже калориметар за одређивање топлотне снаге и FTIR гасни анализатор. Овај приступ омогућава симултану карактеризацију термичких параметара запаљивости (ослобађање топлоте, брзина губитка масе) и хемијског састава продуката сагоревања у реалном времену. Тиме је превазиђено ограничење традиционалних метода које ове аспекте анализирају одвојено, пружајући дубљи увид у међусобну повезаност физичко-хемијских процеса током сагоревања.

### **2. Унапређење поузданости и основе за стандардизацију метода**

Систематском проценом различитих конфигурација носача узорака, идентификован је дизајн који обезбеђује највећу поновљивост и најмању варијабилност резултата. С обзиром на недостатак стандардизованих метода за испитивање хетерогених материјала као што је шумска вегетација, овај допринос је од изузетног значаја јер поставља методолошки темељ за будућа истраживања и представља важан корак ка стандардизацији експерименталних протокола у овој области.

### **3. Формирање јединствене базе података о пожарним карактеристикама шумске вегетације за екосистеме Србије**

Истраживањем је креирана прва свеобухватна и експериментално верификована база података о параметрима запаљивости, горивости и емисије продуката сагоревања за доминантне врсте свеже шумске вегетације Србије. Ова база попуњава значајну празнину у научним сазнањима на регионалном нивоу и пружа фундаменталне улазне податке неопходне за калибрацију и развој напредних модела понашања пожара.

#### **4. Фундаментална сазнања о механизмима сагоревања вегетације**

Дисертација пружа кључне увиде у механизме који управљају запаљивошћу, укључујући:

- Квантификацију утицаја садржаја влаге и топлотног флукса на критичне параметре који дефинишу потенцијал за прелазак са површинских на пожаре крошњи;
- Јасно разграничење динамике и хемизма пламеног (пилотираног) и тињајућег (непилотираног) сагоревања, што је кључно за разумевање различитих фаза пожара и њиховог утицаја на околину;
- Идентификацију и раздвајање примарних покретача запаљивости код четинара (хемијске карактеристике) и широколисних врста (морфолошке карактеристике), што представља значајан научни допринос разумевању екологије пожара.

#### **7.2. Практични допринос и примена резултата**

Резултати ове дисертације имају директан практични значај, пружајући научно утемељену основу за унапређење стратегија управљања ризиком од шумских пожара у Србији и ширем региону. То се огледа у следећем:

##### **1. Унапређење модела за предвиђање пожара и система раног упозоравања**

Квантификовани параметри запаљивости (време паљења, топлотна снага, укупно ослобођена топлота) представљају кључне улазне податке за калибрацију, валидацију и развој напредних физичких модела за предвиђање понашања пожара, укључујући и оне засноване на нумеричкој динамици флуида (*CFD*). Прецизнији модели омогућавају поузданије прогнозе брзине, интензитета и правца ширења пожара, што је основа за ефикасне системе раног упозоравања и израду динамичких мапа ризика.

##### **2. Подршка планирању превентивних мера и одрживом управљању шумским екосистемима**

Добијени резултати пружају релевантне смернице за формулисање проактивних мера заштите од пожара:

- **Избор врста за пошумљавање и формирање заштитних појасева**

Информације о запаљивости омогућавају селекцију мање запаљивих врста (нпр. одређене широколисне врсте са високим садржајем влаге) за садњу у подручјима

високог ризика, посебно у граничном појасу између шумских и насељених области (WUI), чиме се стварају природне баријере за ширење пожара.

- **Оптимизација структуре шума**

Разумевање како морфологија вегетације утиче на запаљивост омогућава доношење одлука о мерама неге шума, попут уклањања ниских грана или проређивања, са циљем смањења вертикалне и хоризонталне повезаности горивог материјала.

Ипак, за доношење генерално примењивих закључака неопходно је проширити обухват истраживања на већи број биљних врста, како би се обезбедила већа репрезентативност и поузданост.

### **3. Интеграција у географске информационе системе (GIS) за напредну процену ризика**

Подаци о запаљивости могу се интегрисати као нови тематски слој у постојеће GIS моделе. Ово омогућава да се процене ризика, поред статичких фактора (топографија, путна мрежа), заснивају и на стварним, инхерентним карактеристикама горивог материјала, што води ка знатно прецизнијем мапирању и зонирању подручја према степену угрожености.

### **4. Основа за развој интегрисаних система подршке одлучивању**

Истраживање омогућава да се запаљивост третира као динамичан фактор, који се мења у зависности од сезоне, влажности и стања вегетације. Овакви подаци су основа за развој софистицираних система подршке одлучивању који надлежним службама помажу у ефикаснијем распоређивању ресурса, одређивању приоритета у гашењу и планирању превентивних активности, што директно доприноси заштити људских живота, имовине и животне средине.

### **7.3. Ограничења и препоруке за будућа истраживања**

Иако представљени резултати у овој докторској дисертацији доприносе унапређењу разумевања запаљивости шумске вегетације, важно је указати на ограничења и предложити смернице за будућа истраживања.

Једно од главних ограничења односи се на обим испитиваних врста и величину узорака. Експерименти су били усмерени на неколико доминантних четинарских и

широколисних врста шумске вегетације у Србији, при чему је број узорака по врсти био ограничен. То је посебно утицало на анализу односа морфолошко-хемијских карактеристика и параметара запаљивости где је статистичка снага у појединим сегментима била смањена. Због тога добијене резултате треба посматрати као оријентационе, јер указују на значајне факторе и трендове, али не обухватају пуну варијабилност шумске вегетације. Да би се потврдили и генерализовали утврђени односи између морфолошко-хемијских карактеристика и параметара запаљивости, потребна су додатна истраживања која би укључила већи број врста, што би уједно омогућило развој поузданијих предиктивних модела. Са проширеним скупом података, постоји потенцијал и за примену напредних техника моделовања, попут метода машинског учења, ради идентификације односа и интеракције особина које утичу на запаљивост шумске вегетације. Овде је посебно важно узети у обзир да се хемијски профил биљака мења у зависности од годишњег доба и периода узорковања, јер се мерењем исте врсте током различитих периода године, може добити јаснији увид у то како промена хемијске структуре може утицати на њену запаљивост. Ове информације су посебно релевантне у контексту климатских промена, јер се очекују све чешће и дуже сушне сезоне, које би довеле до драстичног смањења садржаја влаге у биомаси, што последично утиче на њену већу запаљивост.

Друго значајно ограничење је то што су сви експерименти реализовани у контролисаним лабораторијским условима. Иако такав приступ омогућава високу поновљивост и контролу експерименталних услова, он не може у потпуности да реплицира сложене услове који су присутни за време стварних шумских пожара (дејство ветра, топографија терена, метеоролошки услови и др.). Поред тога, шумска вегетација не може се сматрати хомогеним материјалом, будући да њене карактеристике варирају током године у зависности од сезонских промена. Додатно, узорковање шумске вегетације обухватило је један временски период, и то углавном у летњим месецима, када су температуре биле највеће.

Иако резултати добијени тестирањем различитих конфигурација носача узорака значајно доприносе идентификацији најпоузданијег решења, у припреми узорака за експериментална калориметријска мерења, неопходно је спровести и међулабораторијску валидацију. Према стандардима који се односе на тачност мерења (*ISO 5725-1:2023(en) Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results*), репродуктивност експерименталне методе се потврђује тек када независне лабораторије добију упоредиве резултате применом исте процедуре. Зато би наредни корак било

организовање заједничких испитивања са другим истраживачким установама у области пожара, уз примену истих конструкција носача узорака, како би се потврдили добијени резултати у овој докторској дисертацији. Оваква међулабораторијска испитивања омогућила би и процену варијабилности која се може очекивати када различити оператери учествују у испитивању.

Будућа истраживања биће усмерена ка превазилажењу претходно идентификованих ограничења. Приоритет ће бити проширење истраживања на већи број биљних врста и повећање броја узорака како би се омогућио развој поузданијих предиктивних модела. Посебна пажња посветиће се сезонском праћењу морфолошких и хемијских промена унутар истих врста, што је кључно за разумевање утицаја климатских промена и дужих сушних периода на запаљивост. Планира се и организовање међулабораторијских испитивања у сарадњи са другим истраживачким установама, чиме би се извршила валидација предложене експерименталне методологије и проценила варијабилност резултата у различитим условима. На тај начин, подаци добијени у лабораторији могли би се ефикасније повезати са теренским посматрањима и интегрисати у свеобухватне моделе понашања пожара.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] „Largest Wildfires of the Decade – BatchGeo Blog“. <https://blog.batchgeo.com/largest-wildfires/> (приступљено Феб. 19, 2025).
- [2] „Welcome to the Nation’s Logistical Support Center | National Interagency Fire Center“. <https://www.nifc.gov/> (приступљено Мај 14, 2022).
- [3] J. Q. Yao, H. R. Zhai, X. M. Tang, X. M. Gao, и X. D. Yang, „Amazon Fire Monitoring and Analysis Based on Multi-source Remote Sensing Data“, у *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, том 474, изд. 4, doi: 10.1088/1755-1315/474/4/042025.
- [4] A. Gincheva и остали, „A monthly gridded burned area database of national wildland fire data“, *Sci. Data*, том 11, изд. 1, стр. 352, 2024, doi: 10.1038/s41597-024-03141-2.
- [5] J. San-Miguel-Ayanz, J. M. Moreno, и A. Camia, „Analysis of large fires in European Mediterranean landscapes: Lessons learned and perspectives“, *For. Ecol. Manage.*, том 294, стр. 11–22, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.050>.
- [6] K. Lagouvardos, V. Kotroni, T. M. Giannaros, и S. Dafis, „Meteorological Conditions Conducive to the Rapid Spread of the Deadly Wildfire in Eastern Attica, Greece“, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, том 100, изд. 11, стр. 2137–2145, 2019, doi: 10.1175/BAMS-D-18-0231.1.
- [7] M. Qiu, D. Chen, M. Kelp, J. Li, G. Huang, и M. D. Yazdi, „The rising threats of wildland-urban interface fires in the era of climate change: The Los Angeles 2025 fires“, *Innov.*, стр. 100835, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2025.100835>.
- [8] R. Pachauri и L. Meyer, „Climate Change 2014- Synthesis Report“, 2014. Приступљено: Март 01, 2021. [На Интернету]. Available at: [http://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_wcover.pdf](http://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf).
- [9] N. Khabarov и остали, „Forest fires and adaptation options in Europe“, *Reg. Environ. Chang.*, том 16, изд. 1, стр. 21–30, 2016, doi: 10.1007/s10113-014-0621-0.
- [10] W. M. Jolly и остали, „Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013“, *Nat. Commun.*, том 6, изд. 1, стр. 7537, 2015, doi: 10.1038/ncomms8537.
- [11] N. J. Abram и остали, „Connections of climate change and variability to large and extreme forest fires in southeast Australia“, *Commun. Earth Environ.*, том 2, изд. 1, стр. 8, 2021, doi: 10.1038/s43247-020-00065-8.
- [12] A. Vuković и остали, „Global warming impact on climate change in Serbia for the period 1961-2100“, *Therm. Sci.*, том 22, изд. 6, стр. 2267–2280, 2018, doi:

<https://doi.org/10.2298/TSCI180411168V>.

- [13] I. Tošić *и остали*, „Potential influence of meteorological variables on forest fire risk in Serbia during the period 2000-2017“, *Open Geosci.*, том 11, изд. 1, стр. 414–425, 2019, doi: doi:10.1515/geo-2019-0033.
- [14] S. Milanović, N. Marković, D. Pamučar, L. Gigović, P. Kostić, и S. D. Milanović, „Forest Fire Probability Mapping in Eastern Serbia: Logistic Regression versus Random Forest Method“, *Forests*, том 12, изд. 1, 2021, doi: 10.3390/f12010005.
- [15] S. Živanović, R. Ivanović, M. Nikolić, M. Đokić, и I. Tošić, „Influence of air temperature and precipitation on the risk of forest fires in Serbia“, *Meteorol. Atmos. Phys.*, том 132, изд. 6, стр. 869–883, 2020, doi: 10.1007/s00703-020-00725-6.
- [16] P. Vranić, S. Glišović, и L. Velimirović, „Decision Support for Integrated Management of Local-Level Adaptation to Climate Changes: The Case of Serbia“, *Int. J. Disaster Risk Sci.*, том 12, изд. 4, стр. 479–494, 2021, doi: 10.1007/s13753-021-00357-3.
- [17] P. Vranić и N. Mišić, „SPATIAL DISTRIBUTION PATTERNS OF WILD-FIRES INCIDENTS IN SERBIA BASED ON VIIRS 375 M DATA FOR THE PERIOD 2013-2023“, *Facta Univ. Ser. Work. Living Environ. Prot.*, том 21, изд. 2, стр. 87–96, 2024.
- [18] J. Ciarochi, „The history of wildfire modeling“, 2020. <https://dev.to/jenciarochi/the-history-of-wildfire-modeling-5anl#:~:text=In 1946, Fons published the first mathematical model of wildfire spread.>
- [19] R. C. Rothermel, *A Mathematical Model for Predicting Fire Spread*. U.S. Department of Agriculture, 1972.
- [20] P. E. Dennison и M. A. Moritz, „Critical live fuel moisture in chaparral ecosystems: a threshold for fire activity and its relationship to antecedent precipitation“, *Int. J. Wildl. Fire*, том 18, изд. 8, стр. 1021–1027, 2009, [На Интернету]. Available at: <https://doi.org/10.1071/WF08055>.
- [21] O. Melnik, „A Proposed Experimental Methodology for Assessing the Effects of Biophysical Properties and Energy Content on Live Fuel Flammability“, 2016.
- [22] W. M. Jolly, A. M. Hadlow, и K. Huguet, „De-coupling seasonal changes in water content and dry matter to predict live conifer foliar moisture content“, *Int. J. Wildl. Fire*, том 23, изд. 4, стр. 480–489, 2014, [На Интернету]. Available at: <https://doi.org/10.1071/WF13127>.
- [23] S. Fares *и остали*, „Characterizing potential wildland fire fuel in live vegetation in the Mediterranean region“, *Ann. For. Sci.*, том 74, изд. 1, 2017, doi: 10.1007/s13595-016-0599-5.

- [24] R. H. White и W. C. Zipperer, „Testing and classification of individual plants for fire behaviour: Plant selection for the wildlandurban interface“, *Int. J. Wildl. Fire*, том 19, изд. 2, стр. 213–227, 2010, doi: 10.1071/WF07128.
- [25] M. Finney, S. McAllister, T. Grumstrup, и J. Forthofer, *Wildland Fire Behaviour*. 2021.
- [26] J. V. Celebrezze, I. Boving, и M. A. Moritz, „Tissue-Level Flammability Testing: A Review of Existing Methods and a Comparison of a Novel Hot Plate Design to an Epiradiator Design“, *Fire*, том 6, изд. 4, 2023, doi: 10.3390/fire6040149.
- [27] Y. Pérez, E. Pastor, A. Àgueda, и E. Planas, „Effect of Wind and Slope When Scaling the Forest Fires Rate of Spread of Laboratory Experiments“, *Fire Technol.*, том 47, изд. 2, стр. 475–489, 2011, doi: 10.1007/s10694-010-0168-7.
- [28] S. McAllister, I. Grenfell, A. Hadlow, W. M. Jolly, M. Finney, и J. Cohen, „Piloted ignition of live forest fuels“, *Fire Saf. J.*, том 51, стр. 133–142, 2012, doi: 10.1016/j.firesaf.2012.04.001.
- [29] J. M. Kane, J. M. Varner, и J. K. Hiers, „The burning characteristics of southeastern oaks: Discriminating fire facilitators from fire impeder“, *For. Ecol. Manage.*, том 256, изд. 12, стр. 2039–2045, 2008, doi: 10.1016/j.foreco.2008.07.039.
- [30] E. Ormeño и *остали*, „The relationship between terpenes and flammability of leaf litter“, *For. Ecol. Manage.*, том 257, изд. 2, стр. 471–482, 2009, doi: 10.1016/j.foreco.2008.09.019.
- [31] R. M. Q. de Magalhães и D. W. Schwilk, „Leaf traits and litter flammability: Evidence for non-additive mixture effects in a temperate forest“, *J. Ecol.*, том 100, изд. 5, стр. 1153–1163, 2012, doi: 10.1111/j.1365-2745.2012.01987.x.
- [32] B. Romero и *остали*, „Effect of Fire Frequency on the Flammability of Two Mediterranean Pines: Link with Needle Terpene Content“, *For. Ecol. Manage.*, том 10, изд. 10, стр. 2039–2045, 2021, doi: 10.3390/plants10102164.
- [33] P. Jaureguiberry, G. Bertone, и S. Díaz, „Device for the standard measurement of shoot flammability in the field“, *Austral Ecol.*, том 36, изд. 7, стр. 821–829, 2011, doi: 10.1111/j.1442-9993.2010.02222.x.
- [34] A. L. Parsons, J. K. Balch, R. B. De Andrade, и P. M. Brando, „The role of leaf traits in determining litter flammability of south-eastern Amazon tree species“, *Int. J. Wildl. Fire*, том 24, изд. 8, стр. 1143–1153, 2015, doi: 10.1071/WF14182.
- [35] S. Grootemaat, I. J. Wright, P. M. van Bodegom, J. H. C. Cornelissen, и W. K. Cornwell, „Burn or rot: Leaf traits explain why flammability and decomposability are decoupled across species“, *Funct. Ecol.*, том 29, изд. 11, стр. 1486–1497, 2015, doi: 10.1111/1365-

2435.12449.

- [36] V. Babrauskas и R. D. Peacock, „Heat release rate: The single most important variable in fire hazard“, *Fire Saf. J.*, том 18, изд. 3, стр. 255–272, Ян. 1992, doi: 10.1016/0379-7112(92)90019-9.
- [37] V. Babrauskas, „Ignition of Wood: A Review of the State of the Art“, *J. Fire Prot. Eng.*, том 12, изд. 3, стр. 163–189, 2002, doi: 10.1177/10423910260620482.
- [38] F. Z. Sabi и остали, „Ignition/non-ignition phase transition: A new critical heat flux estimation method“, *Fire Saf. J.*, том 119, изд. April 2020, стр. 103257, 2021, doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103257.
- [39] C. F. Schemel, A. Simeoni, H. Biteau, J. D. Rivera, и J. L. Torero, „A calorimetric study of wildland fuels“, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, том 32, изд. 7, стр. 1381–1389, 2008, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2007.11.011.
- [40] P. Bartoli, A. Simeoni, H. Biteau, J. L. Torero, и P. A. Santoni, „Determination of the main parameters influencing forest fuel combustion dynamics“, *Fire Saf. J.*, том 46, изд. 1–2, стр. 27–33, 2011, doi: 10.1016/j.firesaf.2010.05.002.
- [41] J. Madrigal, C. Hernando, M. Guijarro, C. Díez, E. Marino, и A. J. De Castro, „Evaluation of forest fuel flammability and combustion properties with an adapted mass loss calorimeter device“, *J. Fire Sci.*, том 27, изд. 4, стр. 323–342, 2009, doi: 10.1177/0734904109102030.
- [42] P. A. Santoni, E. Romagnoli, N. Chiaramonti, и T. Barboni, „Scale effects on the heat release rate, smoke production rate, and species yields for a vegetation bed“, *J. Fire Sci.*, том 33, изд. 4, стр. 290–319, 2015, doi: 10.1177/0734904115591176.
- [43] O. M. Melnik и остали, „New in-flame flammability testing method applied to monitor seasonal changes in live fuel“, *Fire*, том 5, изд. 1, стр. 1–29, 2022, doi: 10.3390/fire5010001.
- [44] H. E. Anderson, „Forest fuel ignitibility“, *Fire Technol.*, том 6, изд. 4, стр. 312–319, Нов. 1970, doi: 10.1007/BF02588932.
- [45] R. Martin, „Assessing the flammability of domestic and wildland vegetation“, *12th Conf. Fire For. Meteorol. Jekyll Island, GA, USA, Vol. pages 26-28*, изд. November, стр. 26–28, 1994, doi: 10.13140/RG.2.1.3999.3680.
- [46] „ISO 17554:2014 - Reaction to fire tests - Mass loss measurement“. стр. 21, 2014, Приступљено: Апр. 10, 2020. [На Интернету]. Available at: <https://www.iso.org/standard/55678.html>.
- [47] M. Dietenberger и C. Boardman, „HRR upgrade to Mass Loss Calorimeter and Modified

- Schlyter test for FR wood“, y *FIRE AND MATERIALS 2013, 13th INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION*, 2013, стр. 251–262.
- [48] L. E. Hasburgh, R. H. White, M. A. Dietenberger, и C. R. Boardman, „Comparison of the heat release rate from the mass loss calorimeter to the cone calorimeter for wood-based materials“, *Fire Mater. 2015 - 14th Int. Conf. Exhib. Proc.*, стр. 116–126, 2015.
- [49] „Instruction Manual Mass Loss Calorimeter“, 2017.
- [50] „ISO - ISO 5660-1:2015 - Reaction-to-fire tests — Heat release, smoke production and mass loss rate — Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement)“.
- [51] V. Babrauskas, „Development of the cone calorimeter—A bench-scale heat release rate apparatus based on oxygen consumption“, *Fire Mater.*, том 8, изд. 2, стр. 81–95, 1984, doi: 10.1002/fam.810080206.
- [52] V. Babrauskas, *Development of the Cone Calorimeter -- A Bench-Scale Heat Release Rate Apparatus Based on Oxygen Consumption*. National Institute of Standards and Technology (NIST), 1982.
- [53] „ISO/TS 21397:2021 FTIR analysis of fire effluents in cone calorimeter tests“, 2021.
- [54] „ISO 19702:2024 Sampling and analysis of toxic gases and vapours in fire effluents using Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy“. стр. 68, 2024.
- [55] S. Matthews, „Dead fuel moisture research: 1991-2012“, *Int. J. Wildl. Fire*, том 23, изд. 1, стр. 78–92, 2014, doi: 10.1071/WF13005.
- [56] P. M. Fernandes, H. S. Botelho, F. C. Rego, и C. Loureiro, „Empirical modelling of surface fire behaviour in maritime pine stands“, *Int. J. Wildl. Fire*, том 18, изд. 6, стр. 698, Сеп. 2009, doi: 10.1071/WF08023.
- [57] A. P. Dimitrakopoulos и К. К. Papaioannou, „Flammability assessment of Mediterranean forest fuels“, *Fire Technol.*, том 37, изд. 2, стр. 143–152, 2001, doi: 10.1023/A:1011641601076.
- [58] Stephen J. Pyne, P. L. Andrews, и R. D. Laven, *Introduction to wildland fire*. New York: Wiley, 1996.
- [59] J. Verbesselt, S. Fleck, и P. Coppin, „Estimation of fuel moisture content towards fire risk assessment: A review“, y *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*, Viegas DX, Ур. Millpress, Rotterdam, 2002, стр. 1–11.
- [60] M. A. Finney, J. D. Cohen, S. S. McAllister, и W. M. Jolly, „On the need for a theory of wildland fire spread“, *Int. J. Wildl. Fire*, том 22, изд. 1, стр. 25–36, 2013, doi: 10.1071/WF11117.

- [61] G. Xanthopoulos и M. Athanasiou, „Crown Fire“, *Encycl. Wildfires Wildland-Urban Interface Fires*, стр. 1–15, 2020, doi: 10.1007/978-3-319-51727-8\_13-1.
- [62] F. Moreira, M. Arrianoutsou, P. Corona, и J. D. las Heras, *Post-Fire Management and Restoration of Southern European Forests*, том 24. Springer, 2012.
- [63] F. Rodríguez y Silva и *остали*, „Assessment of crown fire initiation and spread models in Mediterranean conifer forests by using data from field and laboratory experiments“, *For. Syst.*, том 26, изд. 2, стр. 1–14, 2017, doi: 10.5424/fs/2017262-10652.
- [64] M. G. Cruz, „MODELING THE INITIATION AND SPREAD OF CROWN FIRES“, 1999.
- [65] V. . Molchanov, „Conditions for the spread of crown fire in pine forest“, *Lesn. Khozydstvo*, том 10, стр. 50–63, 1957.
- [66] C. E. Van Wagner, „Conditions for the start and spread of crown fire“, *Can. J. For. Res.*, том 7, изд. 1, стр. 23–34, Март 1977, doi: 10.1139/X77-004.
- [67] C. E. Van Wagner, „Prediction of crown fire behavior in two stands of jack pine“, *Can. J. For. Res.*, том 23, изд. 3, стр. 442–449, 1993, doi: 10.1139/x93-062.
- [68] Robert E. Keane, *Wildland Fuel Fundamentals and Applications*. Springer, 2015.
- [69] G. Xanthopoulos и R. H. Wakimoto, „A time to ignition–temperature–moisture relationship for branches of three western conifers“, *Can. J. For. Res.*, том 23, изд. 2, стр. 253–258, Феб. 1993, doi: 10.1139/X93-034.
- [70] M. G. Cruz, M. E. Alexander, и R. H. Wakimoto, „Assessing canopy fuel stratum characteristics in crown fire prone fuel types of western North America“, *Int. J. Wildl. Fire*, том 12, изд. 1, стр. 39–50, 2003, doi: 10.1071/WF02024.
- [71] M. G. Cruz, M. E. Alexander, и R. H. Wakimoto, „Modeling the likelihood of crown fire occurrence in conifer forest stands“, *For. Sci.*, том 50, изд. 5, стр. 640–658, 2004.
- [72] M. G. Cruz, M. E. Alexander, и R. H. Wakimoto, „Assessing the probability of crown fire initiation based on fire danger indices“, *For. Chron.*, том 79, изд. 5, стр. 976–983, 2003, doi: 10.5558/tfc79976-5.
- [73] M. G. Cruz, M. E. Alexander, и R. H. Wakimoto, „Development and testing of models for predicting crown fire rate of spread in conifer forest stands“, *Can. J. For. Res.*, том 35, изд. 7, стр. 1626–1639, 2005, doi: 10.1139/x05-085.
- [74] M. E. Alexander и M. G. Cruz, „Interdependencies between flame length and fireline intensity in predicting crown fire initiation and crown scorch height“, *Int. J. Wildl. Fire*, том 21, изд. 2, стр. 95–113, 2012, doi: 10.1071/WF11001.
- [75] M. G. Cruz и M. E. Alexander, „Assessing crown fire potential in coniferous forests of

- western North America: A critique of current approaches and recent simulation studies“, *Int. J. Wildl. Fire*, том 19, изд. 4, стр. 377–398, 2010, doi: 10.1071/WF08132.
- [76] M. G. Cruz, M. E. Alexander, и R. H. Wakimoto, „Predicting crown fire behavior to support forest fire management decision-making“, *For. Fire Res. Wildl. Fire Saf.*, стр. 1–11, 2002, [На Интернету]. Available at: [http://nofc.cfs.nrcan.gc.ca/bookstore\\_pdfs/21122.pdf](http://nofc.cfs.nrcan.gc.ca/bookstore_pdfs/21122.pdf).
- [77] M. Cruz, M. Alexander, и R. H. Wakimoto, „Definition of a fire behavior model evaluation protocol: a case study application to crown fire behavior models“, *Fire, Fuel Treat. Ecol. Restor.*, стр. 49–68, 2003, [На Интернету]. Available at: [http://www.cnr.uidaho.edu/for433/secure/lessons/lesson02/cruzetal\\_2003\\_RMRS\\_proc.pdf](http://www.cnr.uidaho.edu/for433/secure/lessons/lesson02/cruzetal_2003_RMRS_proc.pdf).
- [78] M. E. Alexander и M. G. Cruz, „Crown Fire Dynamics in Conifer Forests“, у *Synthesis of Knowledge of Extreme Fire Behavior: Volume I for Fire Managers*, 2011, стр. 144.
- [79] M. G. Cruz, B. W. Butler, M. E. Alexander, и D. X. Viegas, „Development and evaluation of a semi-physical crown fire initiation model“, 2006, doi: 10.1016/j.foreco.2006.08.132.
- [80] G. M. Byram, „Combustion of forest fuels“, у *Forest fire: control and use*, 1959, стр. 61–89.
- [81] F. Morandini, Y. Perez-Ramirez, V. Tihay, P. A. Santoni, и T. Barboni, „Radiant, convective and heat release characterization of vegetation fire“, *Int. J. Therm. Sci.*, том 70, стр. 83–91, 2013, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2013.03.011.
- [82] E. A. Sullivan и A. G. McDonald, „Mathematical model and sensor development for measuring energy transfer from wildland fires“, *Int. J. Wildl. Fire*, том 23, изд. 7, стр. 995–1004, 2014, doi: 10.1071/WF14016.
- [83] J. H. Scott и E. D. Reinhardt, „Stereo photo guide for estimating canopy fuel characteristics in conifer stands“, *USDA For. Serv. - Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR*, изд. 145 RMRS-GTR, стр. 1–51, 2005.
- [84] D. R. Weise, X. Zhou, L. Sun, и S. Mahalingam, „Fire spread in chaparral - ,Go or no-go?“, *Int. J. Wildl. Fire*, том 14, изд. 1, стр. 99–106, 2005, doi: 10.1071/WF04049.
- [85] D. R. Weise, E. Koo, X. Zhou, S. Mahalingam, F. Morandini, и J. H. Balbi, „Fire spread in chaparral - A comparison of laboratory data and model predictions in burning live fuels“, *Int. J. Wildl. Fire*, том 25, изд. 9, стр. 980–994, 2016, doi: 10.1071/WF15177.
- [86] C. Sanpakit, S. Omodan, D. Weise, и M. Princevac, „Laboratory Fire Behavior Measurements of Chaparral Crown Fire“, *Univ. Calif. Riverside Undergrad. Res. J.*, изд.

- 3, стр. 123–129, 2015.
- [87] J. Cobian-Iñiguez, A. H. Aminfar, S. Saha, K. Awayan, D. R. Weise, и M. Princevac, „The Transition and Spread of a Chaparral Crown Fire: Insights from Laboratory Scale Wind Tunnel Experiments“, *J. Combust.*, том 2022, стр. 1–13, 2022, doi: 10.1155/2022/5630594.
- [88] D. R. Weise, J. Cobian-Iñiguez, и M. Princevac, „Surface to Crown Transition“, у *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*, 2018, стр. 988–992.
- [89] L. Leonelli, T. Barboni, P. A. Santoni, Y. Quilichini, и A. Coppalle, „Characterization of aerosols emissions from the combustion of dead shrub twigs and leaves using a cone calorimeter“, *Fire Saf. J.*, том 91, стр. 800–810, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.048>.
- [90] A. Ganteaume, M. Jappiot, T. Curt, C. Lampin, и L. Borgniet, „Flammability of litter sampled according to two different methods: Comparison of results in laboratory experiments“, *Int. J. Wildl. Fire*, том 23, изд. 8, стр. 1061–1075, 2014, doi: 10.1071/WF13045.
- [91] M. A. Alam и остали, „Shoot flammability is decoupled from leaf flammability, but controlled by leaf functional traits“, *J. Ecol.*, том 108, изд. 2, стр. 641–653, Март 2020, doi: 10.1111/1365-2745.13289.
- [92] A. Simeoni и остали, „Flammability studies for wildland and wildland-urban interface fires applied to pine needles and solid polymers“, *Fire Saf. J.*, том 54, стр. 203–217, 2012, doi: 10.1016/j.firesaf.2012.08.005.
- [93] T. Fateh, F. Richard, B. Batiot, T. Rogaume, J. Luche, и J. Zaida, „Characterization of the burning behavior and gaseous emissions of pine needles in a cone calorimeter - FTIR apparatus“, *Fire Saf. J.*, том 82, стр. 91–100, 2016, doi: 10.1016/j.firesaf.2016.03.008.
- [94] B. Romero и A. Ganteaume, „Effect of Fire Frequency on the Flammability of Two Mediterranean Pines: Link with Needle Terpene Content“, *Plants*, том 10, изд. 10, 2021, doi: 10.3390/plants10102164.
- [95] B. M. Pickett, C. Isackson, R. Wunder, T. H. Fletcher, B. W. Butler, и D. R. Weise, „Experimental measurements during combustion of moist individual foliage samples“, *Int. J. Wildl. Fire*, том 19, изд. 2, стр. 153–162, 2010, [На Интернету]. Available at: <https://doi.org/10.1071/WF07121>.
- [96] F. X. Jervis и G. Rein, „Experimental study on the burning behaviour of *Pinus halepensis* needles using small-scale fire calorimetry of live, aged and dead samples“, *Fire and*

- Materials*, том 40, изд. 3. стр. 385–395, 2016, doi: 10.1002/fam.2293.
- [97] D. R. Prince и Т. Н. Fletcher, „Differences in burning behavior of live and dead leaves, Part 1: Measurements“, *Combust. Sci. Technol.*, том 186, изд. 12, стр. 1844–1857, 2014, doi: 10.1080/00102202.2014.923412.
- [98] S. C. Ferguson, A. Dahale, B. Shotorban, S. Mahalingam, и D. R. Weise, „The role of moisture on combustion of pyrolysis gases in wildland fires“, *Combust. Sci. Technol.*, том 185, изд. 3, стр. 435–453, 2013, doi: 10.1080/00102202.2012.726666.
- [99] D. R. Weise и остали, „Fire behavior in chaparral–Evaluating flame models with laboratory data“, *Combust. Flame*, том 191, стр. 500–512, 2018, doi: 10.1016/j.combustflame.2018.02.012.
- [100] P. Pinto и остали, „Effects of wildland fuel moisture content on radiant heat flux emitted by a laminar non-premixed flame“, *Appl. Therm. Eng.*, том 181, изд. September, стр. 115968, 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115968.
- [101] J. Madrigal, C. Hernando, и M. Guijarro, „A new bench-scale methodology for evaluating the flammability of live forest fuels“, *J. Fire Sci.*, том 31, изд. 2, стр. 131–142, 2012, doi: 10.1177/0734904112458244.
- [102] G. Zhou, Y. Zhou, S. Yu, S. Bai, и F. Lu, „Schima superba as a fuelbreak: Litter combustibility of three tree species with five water content levels using a cone calorimeter“, *Front. For. China*, том 4, изд. 2, стр. 178–184, 2009, doi: 10.1007/s11461-009-0022-6.
- [103] M. L. Ramadhan, S. Zarate, J. Carrascal, A. F. Osorio, и J. P. Hidalgo, „Effect of fuel bed size and moisture on the flammability of Eucalyptus saligna leaves in cone calorimeter testing“, *Fire Saf. J.*, том 120, изд. January, стр. 103016, 2021, doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103016.
- [104] L. Gigović, H. R. Pourghasemi, S. Drobňjak, и S. Bai, „Testing a New Ensemble Model Based on SVM and Random Forest in Forest Fire Susceptibility Assessment and Its Mapping in Serbia’s Tara National Park“, *For. 2019, Vol. 10, Page 408*, том 10, изд. 5, стр. 408, Мај 2019, doi: 10.3390/F10050408.
- [105] Т. Marković, D. Radanović, B. Nastasijević, S. Antić-Mladenović, V. Vasić, и A. Matković, „Yield, quality and safety of yellow gentian roots produced under dry-farming conditions in various single basal fertilization and planting density models“, *Ind. Crops Prod.*, том 132, изд. February, стр. 236–244, 2019, doi: 10.1016/j.indcrop.2019.02.027.
- [106] „Lode Project – Loss Data Enhancement for DDR & CCA management“. <https://www.lodeproject.polimi.it/> (приступљено Дец. 08, 2020).

- [107] J. K. McDaniel, H. D. Alexander, C. M. Siegert, и M. A. Lashley, „Shifting tree species composition of upland oak forests alters leaf litter structure, moisture, and flammability“, *For. Ecol. Manage.*, том 482, изд. December 2020, стр. 118860, 2021, doi: 10.1016/j.foreco.2020.118860.
- [108] P. A. Werth и *остали*, *Synthesis of knowledge of extreme fire behavior: Volume I for fire managers*, том I. 2011.
- [109] V. . Molchanov, „Conditions for the spread of crown fires in pine forests“, *Lesn. Khoziaistvo*, том 10, изд. 8, стр. 50–53, 1957.
- [110] R. E. Keane, „Canopy Fuel“, у *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*, S. L. Manzello, Ур. Cham: Springer International Publishing, 2019, стр. 1–12.
- [111] M. S. Safdari и *остали*, „Characterization of pyrolysis products from fast pyrolysis of live and dead vegetation native to the Southern United States“, *Fuel*, том 229, изд. February, стр. 151–166, 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2018.04.166.
- [112] M. S. Safdari, E. Amini, D. R. Weise, и T. H. Fletcher, „Comparison of pyrolysis of live wildland fuels heated by radiation vs. convection“, *Fuel*, том 268, изд. October 2019, стр. 117342, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117342.
- [113] M. S. Safdari, „Characterization of pyrolysis products from fast pyrolysis of live and dead vegetation native“, 2018.
- [114] B. W. Butler и *остали*, „Measurements of radiant emissive power and temperatures in crown fires“, *Can. J. For. Res.*, том 34, изд. 8, стр. 1577–1587, Авг. 2004, doi: 10.1139/X04-060.
- [115] X. Silvani, F. Morandini, и J.-F. Muzy, „Wildfire spread experiments: Fluctuations in thermal measurements“, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, том 36, изд. 9, стр. 887–892, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.06.008>.
- [116] B. Romero, C. Fernandez, C. Lecareux, E. Ormeño, и A. Ganteaume, „How terpene content affects fuel flammability of wildland–urban interface vegetation“, *Int. J. Wildl. Fire*, том 28, изд. 8, стр. 614–627, 2019, [На Интернету]. Available at: <https://doi.org/10.1071/WF18210>.
- [117] J. G. Pausas, G. A. Alessio, B. Moreira, и J. G. Segarra-Moragues, „Secondary compounds enhance flammability in a Mediterranean plant“, *Oecologia*, том 180, изд. 1, стр. 103–110, 2016, doi: 10.1007/s00442-015-3454-8.
- [118] L. Zamponi, M. Michelozzi, и P. Capretti, „Terpene response of *Picea abies* and *Abies alba* to infection with *Heterobasidion s.l.*“, *For. Pathol.*, том 37, изд. 4, стр. 243–250,

- Авг. 2007, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.2007.00493.x>.
- [119] J. Madrigal, M. Guijarro, C. Hernando, C. Díez, и E. Marino, „Effective Heat of Combustion for Flaming Combustion of Mediterranean Forest Fuels“, *Fire Technol.*, том 47, изд. 2, стр. 461–474, 2011, doi: 10.1007/s10694-010-0165-x.
- [120] M. G. Etlinger и F. C. Beall, „Development of a laboratory protocol for fire performance of landscape plants“, *Int. J. Wildl. Fire*, том 13, изд. 4, стр. 479–488, 2004, doi: 10.1071/WF04039.
- [121] D. R. Weise, R. H. White, F. C. Beall, и M. Etlinger, „Use of the cone calorimeter to detect seasonal differences in selected combustion characteristics of ornamental vegetation“, *Int. J. Wildl. Fire*, том 14, изд. 3, стр. 321–338, 2005, doi: 10.1071/WF04035.
- [122] M. El Houssami и *остали*, „Experimental and numerical studies characterizing the burning dynamics of wildland fuels“, *Combust. Flame*, том 168, стр. 113–126, Июнь 2016, doi: 10.1016/j.combustflame.2016.04.004.
- [123] S. McAllister и D. R. Weise, „Effects of Season on Ignition of Live Wildland Fuels Using the Forced Ignition and Flame Spread Test Apparatus“, *Combust. Sci. Technol.*, том 189, изд. 2, стр. 231–247, 2017, doi: 10.1080/00102202.2016.1206086.
- [124] B. L. Yashwanth, B. Shotorban, S. Mahalingam, C. W. Lautenberger, и D. R. Weise, „A numerical investigation of the influence of radiation and moisture content on pyrolysis and ignition of a leaf-like fuel element“, *Combust. Flame*, том 163, стр. 301–316, 2016, doi: 10.1016/j.combustflame.2015.10.006.
- [125] V. Babrauskas, „Effective heat of combustion for flaming combustion of conifers“, *Can. J. For. Res.*, том 36, изд. 3, стр. 659–663, 2006, doi: 10.1139/x05-253.
- [126] M. Possell и T. L. Bell, „The influence of fuel moisture content on the combustion of Eucalyptus foliage“, *Int. J. Wildl. Fire*, том 22, изд. 3, стр. 343–352, 2013, doi: 10.1071/WF12077.
- [127] A. C. Dibble, R. H. White, и P. K. Lebow, „Combustion characteristics of north-eastern USA vegetation tested in the cone calorimeter: Invasive versus non-invasive plants“, *Int. J. Wildl. Fire*, том 16, изд. 4, стр. 426–443, 2007, doi: 10.1071/WF05103.
- [128] R. H. White, D. R. Weise, и S. Frommer, „Preliminary evaluation of the flammability of native and ornamental plants with the cone calorimeter“, в *Proceedings of the international conference on fire safety*, 1996, стр. 256–265.
- [129] N. May и M. J. Gollner, „Fire Emissions“, в *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*, Tokyo: Springer, 2020, стр. 1210.

- [130] B. Y. Lattimer, „Heat Transfer from Fires“, у *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*, S. L. Manzello, Ур. Cham: Springer International Publishing, 2018, стр. 1–10.
- [131] M. Finney, S. McAllister, T. Grumstrup, и J. Forthofer, *Wildland Fire Behaviour: Dynamics, Principles and Processes*. 2021.
- [132] A. C. Fernandez-Pello, „Wildland fire spot ignition by sparks and firebrands“, *Fire Saf. J.*, том 91, стр. 2–10, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.04.040>.
- [133] P. Mindykowski, A. Fuentes, J. L. Consalvi, и B. Porterie, „Piloted ignition of wildland fuels“, *Fire Saf. J.*, том 46, изд. 1–2, стр. 34–40, 2011, doi: 10.1016/j.firesaf.2010.09.003.
- [134] V. Tihay-Felicelli, P. A. Santoni, T. Barboni, и L. Leonelli, „Autoignition of Dead Shrub Twigs: Influence of Diameter on Ignition“, *Fire Technol.*, том 52, изд. 3, стр. 897–929, 2016, doi: 10.1007/s10694-015-0514-x.
- [135] P. Reszka и остали, „Ignition delay times of live and dead pinus radiata needles“, *Fire Saf. J.*, том 112, изд. September 2019, 2020, doi: 10.1016/j.firesaf.2020.102948.
- [136] G. Rein, „Smouldering Combustion Phenomena in Science and Technology“, *Int. Rev. Chem. Eng.*, том 1, стр. 3–18, 2009, [На Интернету]. Available at: <http://www.era.lib.ed.ac.uk/handle/1842/1152>.
- [137] J. Rivera, N. Hernández, J. L. Consalvi, P. Reszka, J. Contreras, и A. Fuentes, „Ignition of wildland fuels by idealized firebrands“, *Fire Saf. J.*, том 120, изд. April 2020, 2021, doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103036.
- [138] ISO - International Organization for Standardization, „ISO 19703:2018 Generation and analysis of toxic gases in fire. Calculation of species yields, equivalence ratios and combustion efficiency in experimental fires“. стр. 42, 2018.
- [139] S. K. Akagi и остали, „Field measurements of trace gases emitted by prescribed fires in southeastern US pine forests using an open-path FTIR system“, *Atmos. Chem. Phys.*, том 14, изд. 1, стр. 199–215, 2014, doi: 10.5194/acp-14-199-2014.
- [140] K. T. Paul, T. R. Hull, K. Lebek, и A. A. Stec, „Fire smoke toxicity: The effect of nitrogen oxides“, *Fire Saf. J.*, том 43, изд. 4, стр. 243–251, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2007.10.003>.
- [141] E. V. Moran, F. Hartig, и D. M. Bell, „Intraspecific trait variation across scales: Implications for understanding global change responses“, *Glob. Chang. Biol.*, том 22, изд. 1, стр. 137–150, 2016, doi: 10.1111/gcb.13000.
- [142] A. Ganteaume, „Does plant flammability differ between leaf and litter bed scale? Role

- of fuel characteristics and consequences for flammability assessment“, *Int. J. Wildl. Fire*, том 27, изд. 5, стр. 342–352, 2018, doi: 10.1071/WF17001.
- [143] B. R. Murray, L. K. Hardstaff, и M. L. Phillips, „Differences in leaf flammability, leaf traits and flammability-trait relationships between native and exotic plant species of dry sclerophyll forest“, *PLoS One*, том 8, изд. 11, 2013, doi: 10.1371/journal.pone.0079205.
- [144] P. M. Fernandes и M. G. Cruz, „Plant flammability experiments offer limited insight into vegetation-fire dynamics interactions“, *New Phytologist*, том 194, изд. 3, стр. 606–609, Maj 2012, doi: 10.1111/j.1469-8137.2012.04065.x.
- [145] G. A. Alessio, J. Peñuelas, J. Llusà, R. Ogaya, M. Estiarte, и M. De Lillis, „Influence of water and terpenes on flammability in some dominant Mediterranean species“, *Int. J. Wildl. Fire*, том 17, изд. 2, стр. 274–286, 2008, doi: 10.1071/WF07038.
- [146] E. Ормеño и *остали*, „Water deficit stress induces different monoterpene and sesquiterpene emission changes in Mediterranean species. Relationship between terpene emissions and plant water potential“, *Chemosphere*, том 67, изд. 2, стр. 276–284, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.10.029>.
- [147] J. S. Blanch, J. Peñuelas, J. Sardans, и J. Llusà, „Drought, warming and soil fertilization effects on leaf volatile terpene concentrations in *Pinus halepensis* and *Quercus ilex*“, *Acta Physiol. Plant.*, том 31, изд. 1, стр. 207–218, 2009, doi: 10.1007/s11738-008-0221-z.
- [148] S. V. Wyse и *остали*, „A quantitative assessment of shoot flammability for 60 tree and shrub species supports rankings based on expert opinion“, *Int. J. Wildl. Fire*, том 25, изд. 4, стр. 466–477, 2016, doi: 10.1071/WF15047.
- [149] W. Calitz, A. J. Potts, и R. M. Cowling, „Investigating species-level flammability across five biomes in the Eastern Cape, South Africa“, *South African J. Bot.*, том 101, стр. 32–39, 2015, doi: 10.1016/j.sajb.2015.07.005.
- [150] E. A. Engber и J. M. Varner, „Patterns of flammability of the California oaks: The role of leaf traits“, *Can. J. For. Res.*, том 42, изд. 11, стр. 1965–1975, 2012, doi: 10.1139/x2012-138.
- [151] J. G. Pausas и B. Moreira, „Flammability as a biological concept“, *New Phytol.*, том 194, изд. 3, стр. 610–613, 2012, doi: 10.1111/j.1469-8137.2012.04132.x.
- [152] L. Sampedro, X. Moreira, и R. Zas, „Costs of constitutive and herbivore-induced chemical defences in pine trees emerge only under low nutrient availability“, *J. Ecol.*, том 99, изд. 3, стр. 818–827, 2011, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2011.01814.x>.

- [153] G. Della Rocca *u ostali*, „Possible land management uses of common cypress to reduce wildfire initiation risk: A laboratory study“, *J. Environ. Manage.*, том 159, стр. 68–77, 2015, doi: 10.1016/j.jenvman.2015.05.020.
- [154] B. Ivančević *u ostali*, *Biodiverzitet Stare planine u Srbiji – Rezultati projekta: „Prekogranična saradnja kroz upravljanje zajedničkim prirodnim resursima - Promocija umrežavanja i saradnje između zemalja Jugoistočne Evrope”*. Beograd: Regionalni centar za životnu sredinu za Centralnu i Istočnu Evropu, 2007.
- [155] M. Josifović, *Flora SR Srbije, Tom I*. Beograd: Srpska akademija nauka i umetnosti, Odeljenje prirodno-matematičkih nauka, 1970.
- [156] M. Josifović, *Flora SR Srbije, Tom II*. Beograd: Srpska akademija nauka i umetnosti, Odeljenje prirodno-matematičkih nauka, 1970.
- [157] M. Josifović, *Flora SR Srbije, Tom V*. Beograd: Srpska akademija nauka i umetnosti, Odeljenje prirodno-matematičkih nauka, 1973.
- [158] Z. Popović, V. Vidaković, и J. Janković, „Variability of leaf traits in natural populations of *Picea omorika* determines ignitability of fresh foliage“, *Front. For. Glob. Chang.*, том Volume 6-, 2023, doi: 10.3389/ffgc.2023.1196809.
- [159] C. A. Schneider, W. S. Rasband, и K. W. Eliceiri, „NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis“, *Nat. Methods*, том 9, изд. 7, стр. 671–675, 2012, doi: 10.1038/nmeth.2089.
- [160] H. van Den Dool и P. Dec. Kratz, „A generalization of the retention index system including linear temperature programmed gas—liquid partition chromatography“, *J. Chromatogr. A*, том 11, стр. 463–471, 1963, doi: [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(01\)80947-X](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(01)80947-X).
- [161] M. Живковић Стошић, „Идентификација и синтеза одабраних састојака воскова биљних врста *Primula veris* L., *Primula acaulis* (L.) L. (Primulaceae) и *Liriodendron tulipifera* L. (Magnoliaceae)“, Природно-математички факултет у Нишу, Универзитет у Нишу, 2022.
- [162] N. . Andriamaharavo, „Retention Data. NIST Mass Spectrometry Data Center“, 2014.
- [163] T. Ilic-Tomic *u ostali*, „Structural diversity and possible functional roles of free fatty acids of the novel soil isolate *Streptomyces* sp. NP10.“, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, том 99, изд. 11, стр. 4815–4833, Јуни 2015, doi: 10.1007/s00253-014-6364-5.
- [164] N. Radulović, P. Blagojević, и R. Palić, „Composition of diethyl ether flower extracts of *Lonicera fragrantissima* Lindl. & Paxton (caprifoliaceae)“, *Nat Prod Commun.*, том 4, изд. 11, стр. 1581–1584, 2009.

- [165] N. S. Radulović, N. D. Dordević, и R. M. Palić, „Volatiles of *Pleurospermum austriacum* (L.) Hoffm. (Apiaceae)“, *J. Serbian Chem. Soc.*, том 75, изд. 12, стр. 1653–1660, 2010, doi: 10.2298/JSC100323127R.
- [166] N. Radulović, P. Blagojević, и R. Palić, „Comparative Study of the Leaf Volatiles of *Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng. and *Vaccinium vitis-idaea* L. (Ericaceae)“, *Molecules*, том 15, изд. 9, стр. 6168–6185, 2010, doi: 10.3390/molecules15096168.
- [167] S. Wold, E. Johansson, и M. Cocchi, „PLS: Partial Least Squares Projections to Latent Structures“, 1993, [На Интернету]. Available at: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:197531798>.
- [168] W. W. C. Vincenzo Esposito Vinzi, J. Henseler, и H. Wang, *Handbook of Partial Least Squares*. Springer Berlin, Heidelberg, 2010.
- [169] P. J. Rousseeuw, „Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis“, *J. Comput. Appl. Math.*, том 20, стр. 53–65, 1987, doi: [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7).
- [170] Z. Popović, S. Bojović, M. Marković, и A. Cerdà, „Tree species flammability based on plant traits: A synthesis“, *Sci. Total Environ.*, том 800, 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149625.
- [171] S. Budha-Magar и остали, „Plant morphological traits and leaf nutrient concentration are associated with flammability and phylogenetic relationships in sub-alpine vegetation, New Zealand“, *Int. J. Wildl. Fire*, том 33, изд. 11, 2024, [На Интернету]. Available at: <https://doi.org/10.1071/WF24038>.
- [172] J. M. Varner, T. M. Shearman, J. M. Kane, E. M. Banwell, E. S. Jules, и M. C. Stambaugh, „Understanding flammability and bark thickness in the genus *Pinus* using a phylogenetic approach“, *Sci. Rep.*, том 12, изд. 1, стр. 7384, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-11451-x.
- [173] Y. Ji, R. Huang, J. Jia, J. Yin, и Y. Chen, „Study on the Combustion Characteristics of Seven Common Broadleaf Plant Species in Southern China“, *Forests*, том 16, изд. 1, 2025, doi: 10.3390/f16010044.
- [174] J. E. Burton, J. G. Cawson, A. I. Filkov, и T. D. Penman, „Leaf traits predict global patterns in the structure and flammability of forest litter beds“, *J. Ecol.*, том 109, изд. 3, стр. 1344–1355, 2021, doi: <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13561>.
- [175] B. Dehane, C. Hernando, M. Guijarro, и J. Madrigal, „Flammability of some companion species in cork oak (*Quercus suber* L.) forests“, *Ann. For. Sci.*, том 74, изд. 3, стр. 60, 2017, doi: 10.1007/s13595-017-0659-5.

- [176] L. O. Bianchi и G. E. Defossé, „Live fuel moisture content and leaf ignition of forest species in Andean Patagonia, Argentina“, *Int. J. Wildl. Fire*, том 24, изд. 3, стр. 340–348, 2015, [На Интернету]. Available at: <https://doi.org/10.1071/WF13099>.
- [177] C. Michelaki и остали, „Adaptive flammability syndromes in thermo-Mediterranean vegetation, captured by alternative resource-use strategies“, *Sci. Total Environ.*, том 718, стр. 137437, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137437.
- [178] F. Guerrero и остали, „Unraveling the chemistry of plant flammability: Exploring the role of volatile secondary metabolites beyond terpenes“, *For. Ecol. Manage.*, том 572, стр. 122269, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122269>.
- [179] R. A. Dewhurst, N. Smirnoff, и С. М. Belcher, „Pine species that support crown fire regimes have lower leaf-level terpene contents than those native to surface fire regimes“, *Fire*, том 3, изд. 2, стр. 1–19, 2020, doi: 10.3390/fire3020017.
- [180] F. Guerrero и остали, „Leaf Thermal and Chemical Properties as Natural Drivers of Plant Flammability of Native and Exotic Tree Species of the Valparaíso Region, Chile“, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, том 18, изд. 13, 2021, doi: 10.3390/ijerph18137191.
- [181] E. Ormeño и остали, „Increasing cuticular wax concentrations in a drier climate promote litter flammability“, *For. Ecol. Manage.*, том 473, стр. 118242, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118242>.
- [182] F. Guerrero и остали, „Drivers of Flammability of Eucalyptus globulus Labill Leaves: Terpenes, Essential Oils, and Moisture Content“, *Forests*, том 13, изд. 6, 2022, doi: 10.3390/f13060908.
- [183] J. G. Pausas, J. E. Keeley, и D. W. Schwilk, „Flammability as an ecological and evolutionary driver“, *J. Ecol.*, том 105, изд. 2, стр. 289–297, 2017, doi: <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12691>.
- [184] G. Della Rocca, J. Madrigal, E. Marchi, M. Michelozzi, B. Мoya, и R. Danti, „Relevance of terpenoids on flammability of Mediterranean species: An experimental approach at a low radiant heat flux“, *IForest*, том 10, изд. 5, стр. 766–775, 2017, doi: 10.3832/ifor2327-010.
- [185] A. Ganteaume, B. Romero, C. Fernandez, E. Ormeño, и С. Lecareux, „Volatile and semi-volatile terpenes impact leaf flammability: differences according to the level of terpene identification“, *Chemoecology*, том 31, изд. 4, стр. 259–275, 2021, doi: 10.1007/s00049-021-00349-1.
- [186] „ISO 5725-1:2023(en) Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 1: General principles and definitions“. 2023.

- [187] „ISO 5725-2:2019 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method“. 2019.
- [188] J. Urbas, „Precision of the Cone Calorimeter and ICAL Test Methods“, у *Uncertainty in Fire Standards and What to Do About It*, ASTM International, 2012.
- [189] D. Morrisset, G. Thorncroft, R. Hadden, A. Law, и R. Emberley, „Statistical uncertainty in bench-scale flammability tests“, *Fire Saf. J.*, том 122, стр. 103335, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103335>.
- [190] A. Lamorlette, M. El Houssami, J. C. Thomas, A. Simeoni, и D. Morvan, „A dimensional analysis of forest fuel layer ignition model: Application to the ignition of pine needle litters“, *J. Fire Sci.*, том 33, изд. 4, стр. 320–335, Јули 2015, doi: 10.1177/0734904115591177.
- [191] R. R. Blank, R. H. White, и L. H. Ziska, „Combustion properties of Bromus tectorum L.: influence of ecotype and growth under four CO<sub>2</sub> concentrations“, *Int. J. Wildl. Fire*, том 15, изд. 2, стр. 227–236, 2006, [На Интернету]. Available at: <https://doi.org/10.1071/WF05055>.
- [192] I. Fernández-Gómez и остали, „Characterization of forest fuels in a Mass Loss Calorimeter by short open-path FTIR spectroscopy“, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, том 112, изд. 3, стр. 519–530, 2011, doi: 10.1016/j.jqsrt.2010.10.004.
- [193] J. Madrigal, E. Marino, M. Guijarro, C. Hernando, и C. Díez, „Evaluation of the flammability of gorse (*Ulex europaeus* L.) managed by prescribed burning“, *Ann. For. Sci.*, том 69, изд. 3, стр. 387–397, 2012, doi: 10.1007/s13595-011-0165-0.

## БИОГРАФИЈА АУТОРА

Никола Мишић је рођен 1987. године у Нишу. Основне студије завршио је 2011. године на Факултету заштите на раду у Нишу, Универзитета у Нишу, на студијском програму Заштита од пожара. Докторске академске студије на истом факултету уписао је 2013. године, на студијском програму Инжењерство заштите на раду.

Од 2017. године запослен је као асистент на Факултету заштите на раду у Нишу, где је ангажован у настави на групи предмета из области заштите од пожара и експлозија и ванредних ситуација. Изводи вежбе на следећим предметима: Пожари и експлозије; Експерименталне методе у проучавању пожара; Теорија паљења и горења; Шумски пожари; Средства и опрема за гашење пожара; Ризик и санација удеса; Процена ризика од катастрофа; Заштита од пожара и експлозија; Цивилна заштита; Пројектовање и одржавање система за гашење пожара.

Учествовао је у реализацији националног пројекта Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије под називом „Унапређење система мониторинга и процене дуготрајне изложености становништва загађујућим супстанцама у животној средини применом неуронских мрежа“ (број пројекта: ИИИ43014).

Био је члан радне групе у оквиру две међународне *COST* акције: CA17109 *DAMOCLES - Understanding and modeling compound climate and weather events*, чије су активности биле усмерене на моделирање комплексних климатских и временских појава; и CA18135 *FIRElinks: Fire in the Earth Systems: Science & Society*, чији је циљ био повезивање научне заједнице и друштва у проучавању шумских пожара.

Реализовао је и три међународне мобилности у оквиру *ERASMUS+* програма, и то на високошколској институцији „*The Main School of Fire Service*“ у Варшави, Пољска, 2018. године, и две на „*Academy of the Ministry of Interior*“ у Софији, Бугарска, 2021. и 2023. године.

Научноистраживачки рад Николе Мишића усмерен је на проучавање процеса паљења и сагоревања у условима контролисаних експеримената, са посебним акцентом на запаљивост шумске вегетације и емисију продуката сагоревања. Аутор је и коаутор више научних радова објављених у међународним часописима и међународним конференцијама.

## **ИЗЈАВЕ АУТОРА**

## ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом

### **КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ЗАПАЉИВОСТИ, ГОРИВОСТИ И ЕМИСИЈЕ ПРОДУКАТА САГОРЕВАЊА ДОМИНАНТНИХ ВРСТА ШУМСКЕ ВЕГЕТАЦИЈЕ СРБИЈЕ**


која је одбрањена на Факултету заштите на раду у Нишу Универзитета у Нишу:

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

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

У Нишу, 30.07.2025.

Потпис аутора дисертације:

  
Никола З. Мишић

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


Наслов дисертације:

**КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ЗАПАЉИВОСТИ, ГОРИВОСТИ И ЕМИСИЈЕ  
ПРОДУКАТА САГОРЕВАЊА ДОМИНАНТНИХ ВРСТА ШУМСКЕ  
ВЕГЕТАЦИЈЕ СРБИЈЕ**

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

У Нишу, 30.07.2025.

Потпис аутора дисертације:

  
Никола З. Мишић

## ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

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

### КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ЗАПАЉИВОСТИ, ГОРИВОСТИ И ЕМИСИЈЕ ПРОДУКАТА САГОРЕВАЊА ДОМИНАНТНИХ ВРСТА ШУМСКЕ ВЕГЕТАЦИЈЕ СРБИЈЕ

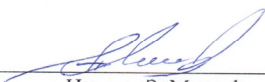
Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

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

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делим под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)
6. Ауторство – делим под истим условима (CC BY-SA)

У Нишу, 30.07.2025.

Потпис аутора дисертације:

  
Никола З. Мишић