

**РЕПУБЛИКА СРБИЈА**  
**КРИМИНАЛИСТИЧКО-ПОЛИЦИЈСКИ УНИВЕРЗИТЕТ**  
**Департман форензичког инжењерства**



Никола Б. Митровић

---

**ПРИМЕНА МЕТОДА МАШИНСКОГ УЧЕЊА**  
**У ФОРЕНЗИЧКОЈ АНАЛИЗИ УЗРОКА**  
**ПОЖАРА И ПОБОЉШАЊЕ**  
**ВАТРООТПОРНОСТИ МАТЕРИЈАЛА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Београд, 2026

REPUBLIC OF SERBIA

UNIVERSITY OF CRIMINAL INVESTIGATION AND POLICE STUDIES

Faculty of Forensic Engineering Sciences



Nikola B. Mitrović

---

**APPLICATION OF MACHINE LEARNING  
METHODS IN FORENSIC ANALYSIS OF FIRE  
CAUSES AND IMPROVEMENT OF THE FIRE  
RESISTANCE OF MATERIALS**

DOCTORAL DISSERTATION

Belgrade, 2026

*Посебну захвалност дугујем својим менторима, професору др Владици Стојановићу и доценту др Стевану Ступару, на несебичној подршци, стручном усмеравању и драгоценим саветима током израде дисертације. Њихова посвећеност и поверење у мене значајно су допринели квалитету ове дисертације и њеном успешном завршетку.*

*Велику захвалност дугујем свом професору др Драгану Млађану, који је био уз мене од самог почетка израде ове дисертације. Захвалан сам му на стрпљењу, разумевању и несебичним саветима, а посебно на подршци и поверењу које ми је пружао током целокупног процеса израде дисертације, па све до њеног завршетка.*

*Захвалан сам професорки др Невени Пуач и научном сараднику др Ненаду Селаковићу са Института за физику у Београду, Института од националног значаја за Републику Србију, у оквиру Центра за неравнотежне процесе и Центра изузетних вредности, на помоћи и стручном доприносу у реализацији масене спектрометрије у оквиру експерименталног дела истраживања.*

*Захвалан сам Марини Кнежевић из Војнотехничког института у Београду, Министарство одбране Републике Србије, на помоћи и стручном доприносу у реализацији испитивања физичко-механичких својстава текстилних материјала у оквиру експерименталног дела истраживања.*

*Такође, захваљујем и професору др Србиславу Генићу и професорки др Мирјани Стаменић са Машинског факултета Универзитета у Београду на помоћи, корисним саветима и стручном доприносу у реализацији термографских испитивања у оквиру експерименталног дела истраживања.*

*Захвалност упућујем компанији C-Coat Australia Pty Ltd из Аустралије и фирми JOGO Design из Србије на пруженој техничкој подршци током реализације експерименталног дела истраживања.*

*Захваљујем се професорима и сарадницима са Криминалистичко-полицијског универзитета у Београду који су ми током израде дисертације пружали подршку, савете и несебичну помоћ, посебно у реализацији експерименталног дела истраживања.*

*Највећу захвалност дугујем својој вереници, породици и пријатељима на безусловној љубави, разумевању, стрпљењу и подршци током израде ове дисертације. Без њихове вере у мене и подршке, овај успех не би био могућ.*

# Примена метода машинског учења у форензичкој анализи узрока пожара и побољшање ватроотпорности материјала

## САЖЕТАК

Пожари представљају један од најзначајнијих безбедносних ризика савременог друштва, јер истовремено угрожавају људске животе, материјална добра и животну средину. Због сложености њихових узрока и последица пожара, њихова анализа захтева интеграцију метода анализе података, стохастичког моделовања, машинског учења, форензичког инжењерства и науке о материјалима. Полазећи од тога, у дисертацији је развијен интегрисани приступ анализи пожарних догађаја, процени ризика по безбедност људи, форензичкој идентификацији узрока пожара и унапређењу ватроотпорности материјала.

Први део истраживања заснован је на анализи података о пожарима у Републици Србији, са посебним акцентом на повређена и смртно страдала лица. У ту сврху примењени су инфлаторна (0–1) Пуасонова расподела, минификациони (MIN-SB) стохастички процеси и GAMLSS модели, који су омогућили успешно моделирање временске динамике, структуре и демографских карактеристика људских последица пожара. Поред тога, применом метода машинског учења, укључујући кластерску анализу, CHAID алгоритам и Argioi алгоритам, идентификовани су најзначајнији фактори ризика, откривени карактеристични обрасци пожарних догађаја и издвојена асоцијативна правила повезана са повећаним ризиком. Просторном анализом идентификована су подручја повећаног пожарног ризика, чиме је обезбеђена основа за ефикасније планирање превентивних мера.

Други и трећи део истраживања усмерен је на форензичку идентификацију пожара изазваних цигаретама и унапређење ватроотпорности материјала. Циљ истраживања био је развој поузданог приступа за идентификацију пожара изазваних цигаретама и испитивање ефикасности модификованих премаза на бази  $\text{Al}(\text{OH})_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  честица за побољшање ватроотпорности материјала. За идентификацију узрока пожара примењене су FT-IR спектроскопија и EI-MS, док су за карактеризацију честица и испитивање функционалности модификованих тканина коришћене термовизијска анализа, XPS, XRD и SEM анализа. Резултати су показали да различити текстилни материјали формирају карактеристичне продукте сагоревања који омогућавају поузданију форензичку

идентификацију узрока пожара, као и да примена модификованих премаза значајно побољшава отпорност материјала на дејство пламена.

Научни допринос дисертације огледа се у развоју интегрисаног методолошког оквира који обједињује стохастичко моделовање, машинско учење, просторну анализу, форензичке инструменталне методе и инжењерство материјала у циљу свеобухватне анализе узрока, последица и превенције пожарних догађаја.

**Кључне речи:** безбедност од пожара, процена пожарног ризика, стохастичко моделовање, машинско учење, просторна анализа, форензичко инжењерство, форензичка идентификација пожара, ватроотпорни материјали

**Научна област:** Технолошко инжењерство

**Ужа научна област:** Форензичко инжењерство

# **Application of machine learning methods in forensic analysis of fire causes and improvement of the fire resistance of materials**

## **ABSTRACT**

Fire incidents represent one of the most significant safety challenges in modern society, posing serious threats to human life, property, and the environment. Due to the complexity of their causes and consequences, fire investigations require the integration of data analysis, stochastic modelling, machine learning, forensic engineering, and materials science. Accordingly, this dissertation develops an integrated approach to fire event analysis, assessment of risks to human safety, forensic identification of fire causes, and the improvement of fire-resistant materials.

The first part of the research is based on the analysis of fire incident data in the Republic of Serbia, with particular emphasis on injured and fatally injured persons. A Zero-One Inflated Poisson distribution, MIN-SB (Minification Split-BREAK) stochastic processes, and GAMLSS models were applied to model the temporal dynamics, structure, and demographic characteristics of human casualties resulting from fires. The proposed models successfully described the temporal dynamics, structure, and demographic characteristics of fire-related human losses. In addition, machine learning techniques, including cluster analysis, the CHAID algorithm, and the Apriori algorithm, were employed to identify the most significant risk factors, discover characteristic patterns of fire incidents, and extract association rules related to increased fire risk. Spatial analysis was further applied to identify high-risk areas, thereby providing a basis for more effective planning of preventive measures.

The second and third parts are focused on the forensic identification of fires caused by cigarettes and the improvement of fire-resistant materials. The study aimed to develop a reliable approach for identifying fires caused by cigarettes and to investigate the effectiveness of modified coatings based on  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$  particles in improving the fire resistance of materials. FT-IR spectroscopy and EI-MS were applied to identify the causes of fires, while thermographic analysis, XPS, XRD, and SEM analyses were used for the characterization of the particles and the investigation of the functionality of the modified fabrics. The results demonstrated that different textile materials produce characteristic combustion products that enable more reliable forensic identification of the causes of fires, while the modified coatings significantly improve the resistance of materials to flame exposure.

The scientific contribution of this dissertation lies in the development of an integrated methodological framework that combines stochastic modelling, machine learning, spatial analysis, forensic instrumental methods, and materials engineering for the purpose of a comprehensive analysis of the causes and consequences of fire incidents and their prevention.

**Keywords:** fire safety, fire risk assessment, stochastic modelling, machine learning, spatial analysis, forensic engineering, forensic fire investigation, fire-resistant materials.

**Scientific Field:** Technological Engineering

**Scientific Subfield:** Forensic Engineering

## САДРЖАЈ

|                                                                                  |             |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>САЖЕТАК</b> .....                                                             | <b>I</b>    |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                                            | <b>III</b>  |
| <b>ПОПИС КОРИШЋЕНИХ СКРАЋЕНИЦА</b> .....                                         | <b>VIII</b> |
| <b>ПОПИС ТАБЕЛА</b> .....                                                        | <b>X</b>    |
| <b>ПОПИС СЛИКА</b> .....                                                         | <b>XII</b>  |
| <b>1. УВОД</b> .....                                                             | <b>1</b>    |
| <b>2. ТЕОРИЈСКИ ДЕО</b> .....                                                    | <b>5</b>    |
| 2.1. ПОЖАР КАО ПРЕДМЕТ НАУЧНОГ И ФОРЕНЗИЧКОГ ИСТРАЖИВАЊА .....                   | 6           |
| 2.1.1. <i>Пожар као сложен научни и друштвени феномен</i> .....                  | 6           |
| 2.1.2. <i>Организациони и системски фактори безбедности од пожара</i> .....      | 8           |
| 2.1.3. <i>Дефиниција и класификација пожара</i> .....                            | 10          |
| 2.1.4. <i>Брзина развоја пожара и ризик по људску безбедност</i> .....           | 11          |
| 2.2. СТОХАСТИЧКО-МОДЕЛСКИ ПРИСТУП .....                                          | 12          |
| 2.2.1. <i>Инфлаторна (0–1) Пуасонова расподела</i> .....                         | 14          |
| 2.2.2. <i>Минификациони (случајни) процеси</i> .....                             | 15          |
| 2.2.3. <i>Континуално стохастичко моделовање применом GAMLSS модела</i> .....    | 18          |
| 2.3. ТЕХНИКЕ МАШИНСКОГ УЧЕЊА .....                                               | 21          |
| 2.3.1. <i>Сегментација (кластеризација) података</i> .....                       | 22          |
| 2.3.2. <i>Класификација података (стабла одлучивања)</i> .....                   | 26          |
| 2.3.3. <i>Асоцијативно откривање знања</i> .....                                 | 28          |
| 2.4. ПРОСТОРНА АНАЛИЗА ПРИМЕНОМ СОФТВЕРСКОГ АЛАТА ГИС .....                      | 31          |
| 2.5. ПОЖАРИ ИЗАЗВАНИ ЦИГАРЕТАМА И МЕРЕ БЕЗБЕДНОСТИ .....                         | 34          |
| 2.5.1. <i>Пожари изазвани цигаретама</i> .....                                   | 34          |
| 2.5.2. <i>Безбедност од пожара и мере превенције</i> .....                       | 35          |
| 2.6. ФОРЕНЗИЧКО УТВРЂИВАЊЕ МЕСТА НАСТАНКА И УЗРОКА ПОЖАРА .....                  | 36          |
| 2.7. ТЕКСТИЛНИ МАТЕРИЈАЛИ, СТРУКТУРА И СВОЈСТВА .....                            | 41          |
| 2.7.1. <i>Ватроотпорни текстилни материјали</i> .....                            | 43          |
| 2.8. ИНСТРУМЕНТАЛНЕ МЕТОДЕ КАРАКТЕРИЗАЦИЈЕ .....                                 | 45          |
| <b>3. МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА</b> .....                                         | <b>49</b>   |
| 3.1. УЗРОЧНО-ПОСЛЕДИЧНА АНАЛИЗА БЕЗБЕДНОСТИ ОД ПОЖАРА .....                      | 51          |
| 3.1.1. <i>Извор и структура података</i> .....                                   | 51          |
| 3.1.2. <i>Стохастичко моделовање динамике повређивања и смртних исхода</i> ..... | 61          |

|                                                                                                                                  |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1.3. Анализа фактора ризика применом техника машинског учења .....                                                             | 62        |
| 3.1.4. Просторна анализа пожарних догађаја са повређеним и погинулим лицима...<br>.....                                          | 64        |
| 3.2. ФОРЕНЗИЧКА АНАЛИЗА УЗРОКА ПОЖАРА .....                                                                                      | 65        |
| 3.2.1. Материјали .....                                                                                                          | 65        |
| 3.2.2. FT-IR спектроскопија у идентификацији трагова цигарете на текстилним материјалима.....                                    | 66        |
| 3.2.3. EI-MS у идентификацији трагова цигарете на текстилним материјалима ...<br>.....                                           | 67        |
| 3.3. СИНТЕЗА И КАРАКТЕРИЗАЦИЈА НАНОКОМПОЗИТНИХ ЧЕСТИЦА ЗА ПРИПРЕМУ<br>ВАТРООТПОРНИХ ПРЕМАЗА И ИСПИТИВАЊЕ ЊИХОВИХ СВОЈСТАВА ..... | 68        |
| 3.3.1. Припрема ватроотпорних премаза.....                                                                                       | 68        |
| 3.3.2. Методе карактеризација нанокмполитних честица .....                                                                       | 68        |
| 3.3.3. Методе испитивања физичко-механичких својстава текстилних<br>материјала .....                                             | 70        |
| 3.3.4. Испитивање запаљивости модификованих узорака.....                                                                         | 71        |
| <b>4. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА.....</b>                                                                                             | <b>73</b> |
| 4.1. ДЕСКРИПТИВНА АНАЛИЗА ПОСЛЕДИЦА ПОЖАРА .....                                                                                 | 75        |
| 4.1.1. Основне карактеристике анализираних података.....                                                                         | 75        |
| 4.1.2. Демографска структура повређених и смртно страдалих лица .....                                                            | 76        |
| 4.2. ПРИМЕНА СТОХАСТИЧКОГ МОДЕЛОВАЊА .....                                                                                       | 78        |
| 4.2.1. Примена инфлаторне (0–1) Пуасонове расподеле .....                                                                        | 79        |
| 4.2.2. Анализа временске динамике применом минификационог (MIN-SB) процеса...<br>.....                                           | 84        |
| 4.2.3. GAMLSS моделовање демографске структуре повређених и смртно<br>страдалих лица .....                                       | 86        |
| 4.3. ПРИМЕНА МЕТОДА МАШИНСКОГ УЧЕЊА .....                                                                                        | 93        |
| 4.3.1. Кластерска анализа образаца повређивања и смртних исхода .....                                                            | 94        |
| 4.3.2. Класификација узрока пожара и предикција исхода.....                                                                      | 100       |
| 4.3.3. Анализа асоцијативних правила.....                                                                                        | 107       |
| 4.4. ПРОСТОРНА АНАЛИЗА ПОЖАРНИХ ДОГАЂАЈА .....                                                                                   | 113       |
| 4.5. ПРИМЕНА ИНСТРУМЕНТАЛНИХ МЕТОДА ЗА ИДЕНТИФИКАЦИЈУ УЗРОКА ПОЖАРА .....                                                        | 118       |

|                                                                                                |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.5.1. FT-IR спектроскопија у идентификацији трагова цигарете на текстилним материјалима.....  | 118        |
| 4.5.2. EI-MS у идентификацији трагова цигарете на текстилним материјалима ...                  | 126        |
| 4.6. ИСПИТИВАЊЕ ФУНКЦИОНАЛНОСТИ МОДИФИКОВАНИХ ТКАНИНА .....                                    | 131        |
| 4.6.1. XPS анализа честица нанокомпозита $Al(OH)_3 / Al_2O_3$ .....                            | 131        |
| 4.6.2. XRD анализа честица нанокомпозита $Al(OH)_3 / Al_2O_3$ .....                            | 133        |
| 4.6.3. SEM анализа честица нанокомпозита $Al(OH)_3 / Al_2O_3$ .....                            | 134        |
| 4.6.4. Методе испитивања физичко-механичких својстава текстилних материјала .....              | 135        |
| 4.6.5. Испитивање запаљивости модификованих узорака.....                                       | 138        |
| 4.6.6. Термовизијска анализа температуре жара и термичких оштећења текстилних материјала ..... | 142        |
| 4.6.7. FT-IR анализа површине модификованих тканина .....                                      | 148        |
| <b>ЗАКЉУЧАК .....</b>                                                                          | <b>152</b> |
| <b>ПОПИС ЛИТЕРАТУРЕ .....</b>                                                                  | <b>156</b> |
| АУТОРСКИ РАДОВИ .....                                                                          | 173        |
| <b>ПРИЛОЗИ.....</b>                                                                            | <b>174</b> |
| Прилог 1. Гео-ПРОСТОРНЕ КАРТЕ .....                                                            | 175        |
| Прилог 2. СТАБЛА ОДЛУЧИВАЊА (УЗРОК D) .....                                                    | 177        |
| Прилог 3. ТЕРМОВИЗИЈА ЖАРА ЦИГАРЕТЕ.....                                                       | 179        |
| <b>БИОГРАФИЈА.....</b>                                                                         | <b>181</b> |
| <b>Изјава о ауторству .....</b>                                                                | <b>182</b> |
| <b>Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада .....</b>              | <b>183</b> |
| <b>Изјава о коришћењу .....</b>                                                                | <b>184</b> |

## ПОПИС КОРИШЋЕНИХ СКРАЋЕНИЦА

| Скраћеница / Ознака | Пун назив и значење                                                                                                         |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ACF                 | Аутокорелациона функција (енгл. Autocorrelation Function)                                                                   |
| AD                  | Андерсон–Дарлингов тест (енгл. Anderson–Darling Test)                                                                       |
| АН                  | Агрегативно-хијерархијска кластеризација (енгл. Agglomerative Hierarchical Clustering)                                      |
| AIC                 | Акаикеов информациони критеријум (енгл. Akaike Information Criterion)                                                       |
| ATR                 | Ослабљена тотална рефлексија (енгл. Attenuated Total Reflectance)                                                           |
| AUC                 | Површина испод ROC криве (енгл. Area Under the Curve)                                                                       |
| CDF                 | Кумулативна функција расподеле (енгл. Cumulative Distribution Function)                                                     |
| CHAID               | Аутоматска детекција интеракција помоћу $\chi^2$ теста (енгл. Chi-square Automatic Interaction Detection)                   |
| CTIF                | Међународно удружење ватрогасних и спасилачких служби (енгл. International Association of Fire and Rescue Services)         |
| CVM                 | Крамер–фон Мизесов тест (енгл. Cramér–von Mises Test)                                                                       |
| DM                  | Рударење података (енгл. Data Mining)                                                                                       |
| ECDF                | Емпиријска кумулативна функција расподеле (енгл. Empirical Cumulative Distribution Function)                                |
| EDS                 | Енергетски дисперзивна спектроскопија (енгл. Energy Dispersive Spectroscopy)                                                |
| FOV                 | Поље гледања (енгл. Field of View)                                                                                          |
| FT-IR               | Фуријеова трансформисана инфрацрвена спектроскопија (енгл. Fourier Transform Infrared Spectroscopy)                         |
| GAMLSS              | Генерализовани адитивни модели за локацију, скалу и облик (енгл. Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape) |
| GGD                 | Генерализована гама расподела (енгл. Generalized Gamma Distribution)                                                        |
| GND                 | Генерализована нормална расподела (енгл. Generalized Normal Distribution)                                                   |
| GOF                 | Квалитет подударања (енгл. Goodness of Fit)                                                                                 |
| GTD                 | Генерализована t-расподела (енгл. Generalized t Distribution)                                                               |
| INAR                | Ауторегресивни модел са целобројним вредностима (енгл. Integer-valued Autoregressive Model)                                 |

|           |                                                                                                                            |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| KS        | Колмогоров–Смирнов тест (енгл. Kolmogorov–Smirnov Test)                                                                    |
| LISA      | Локални индикатори просторне асоцијације (енгл. Local Indicators of Spatial Association)                                   |
| MIN-SB    | Минификациони Split-BREAK процес (енгл. Minification Split-BREAK Process)                                                  |
| EI-MS     | Масена спектрометрија са електронском јонизацијом (енгл. Electron Ionization Mass Spectrometry)                            |
| MSE       | Средња квадратна грешка (енгл. Mean Squared Error)                                                                         |
| ND        | Нормална расподела (енгл. Normal Distribution)                                                                             |
| OCR       | Оптичко препознавање карактера (енгл. Optical Character Recognition)                                                       |
| PET       | Полиетилен-терефталат (енгл. Polyethylene Terephthalate)                                                                   |
| QGIS      | Географски информациони систем ГИС (енгл. QGIS Geographic Information System)                                              |
| RefLOGND+ | Рефлектована лог-нормална расподела са позитивном подршком (енгл. Reflected Log-Normal Distribution with Positive Support) |
| RIP       | Смањена склоност ка паљењу (енгл. Reduced Ignition Propensity)                                                             |
| ROC       | Карактеристика пријемника (енгл. Receiver Operating Characteristic)                                                        |
| RR        | Релативни ризик (енгл. Relative Risk)                                                                                      |
| SEM       | Скенирајућа електронска микроскопија (енгл. Scanning Electron Microscopy)                                                  |
| SFPE      | Друштво инжењера за заштиту од пожара (енгл. Society of Fire Protection Engineers)                                         |
| SPSS      | Статистички пакет за друштвене науке (енгл. Statistical Package for the Social Sciences)                                   |
| SRPS      | Српски стандард (енгл. Serbian Standard)                                                                                   |
| SS        | Силуетни скор (енгл. Silhouette Score)                                                                                     |
| StDev     | Стандардна девијација (енгл. Standard Deviation)                                                                           |
| TD        | Студентова t-расподела (енгл. Student's t Distribution)                                                                    |
| WD        | Вајбулова расподела (енгл. Weibull Distribution)                                                                           |
| WVP       | Паропропустљивост (енгл. Water Vapour Permeability)                                                                        |
| XPS       | Рендгенска фотоелектронска спектроскопија (енгл. X-ray Photoelectron Spectroscopy)                                         |
| XRD       | Рендгенска дифракција (енгл. X-ray Diffraction)                                                                            |

## ПОПИС ТАБЕЛА

|                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Табела 2.1. Хемијски састав памука (Wakelyn et al., 2007) .....                                                                                                         | 42 |
| Табела 3.1. Стопе смртних случајева и повреда у пожарима у Републици Србији и неким другим европским земљама (извор: CTIF Centre of Fire Statistics, 2024) .....        | 52 |
| Табела 3.2. Аналитички аспекти службених евиденција коришћених у истраживању .....                                                                                      | 54 |
| Табела 3.3. Променљиве које су коришћене у истраживању .....                                                                                                            | 55 |
| Табела 3.4. Независне променљиве релевантне за анализу узрока и последица пожара .....                                                                                  | 56 |
| Табела 3.5. Груписане вредности узрока пожара (променљива „Узрок пожара”) .....                                                                                         | 57 |
| Табела 3.6. Груписане вредности објекта где је дошло до пожара (променљива „Тип објекта”) .....                                                                         | 58 |
| Табела 3.7. Груписане вредности локације пожара (променљива „Локација пожара”) .....                                                                                    | 58 |
| Табела 3.8. Груписане вредности категорија пожара по локацији (променљива „Категорија пожара по локацији”) .....                                                        | 59 |
| Табела 3.9. Циљне променљиве коришћене у истраживању .....                                                                                                              | 60 |
| Табела 3.10. Примена стохастичких модела у истраживању .....                                                                                                            | 62 |
| Табела 3.11. Примена техника машинског учења у истраживању .....                                                                                                        | 63 |
| Табела 3.12. Нумерација узорака модификованих тканина са бројем и оријентацијом наноса ватроотпорног премаза обухваћених испитивањем физичко-механичких својстава ..... | 70 |
| Табела 4.1. Дескриптивна статистика броја повређених и погинулих од пожара (свака инстанца представља пожарни догађај) .....                                            | 76 |
| Табела 4.2. Демографска расподела повреда и смртних случајева у пожарима .....                                                                                          | 77 |
| Табела 4.3. Дескриптивна статистика старосне структуре повреда и смртних случајева у пожарима .....                                                                     | 78 |
| Табела 4.4. Резултати сумирања и тестирања 0 – 1 вредности за серије $X$ и $Y$ .....                                                                                    | 80 |
| Табела 4.5. Оцењене вредности параметара Пуасонове и 1-Пуасонове расподеле, засноване на опсервираном узорку $X$ -серије .....                                          | 81 |
| Табела 4.6. Оцењене вредности параметара Пуасонове и 0-Пуасонове расподеле, засноване на опсервираном узорку $Y$ -серије .....                                          | 83 |
| Табела 4.7. Оцењене вредности конкурентских дистрибуција и њихових GOF-статистика ( $X$ – променљива) .....                                                             | 88 |

|                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Табела 4.8. Оцењене вредности конкурентских дистрибуција и њихових GOF-статистика ( $Y$ – променљива) .....                               | 90  |
| Табела 4.9. Дескриптивна статистика кластера добијених применом K-means методе .....                                                      | 96  |
| Табела 4.10. Дескриптивна статистика кластера добијених применом АН методе .....                                                          | 98  |
| Табела 4.11. Мере основних карактеристика добијених стабала одлучивања .....                                                              | 102 |
| Табела 4.12. Матрица конфузије за стабла одлучивања (узрок С) .....                                                                       | 104 |
| Табела 4.13. Матрица конфузије за стабла одлучивања (узрок D) .....                                                                       | 104 |
| Табела 4.14. Мере квалитета класификације за уочене узроке пожара и добијена стабла одлучивања .....                                      | 105 |
| Табела 4.15. Број генерисаних „великих скупова” са минималном и потпуном подршком у Apriori алгоритму .....                               | 108 |
| Табела 4.16. Уочени обрасци и метрике асоцијативних правила унутар популације повређених .....                                            | 109 |
| Табела 4.17. Уочени обрасци и метрике асоцијативних правила унутар популације погинулих .....                                             | 110 |
| Табела 4.18. Пирсонови коефицијенти корелације FT-IR спектра пепела од цигарете .....                                                     | 123 |
| Табела 4.19. Пирсонови коефицијенти корелације FT-IR спектра дувана од цигарете .....                                                     | 124 |
| Табела 4.20. Пирсонови коефицијенти корелације FT-IR спектра папира од цигарете .....                                                     | 124 |
| Табела 4.21. Пирсонови коефицијенти корелације FT-IR спектра спаљене немодификоване и модификоване тканине са компонентама цигарета ..... | 125 |
| Табела 4.22. Пирсонови коефицијенти корелације између FT-IR спектра спаљених материјала и трагова потенцијалних иницијатора пожара .....  | 125 |
| Табела 4.23. Резултати испитивања затезних својстава модификованих тканина .....                                                          | 135 |
| Табела 4.24. Резултати испитивања сирових тканина .....                                                                                   | 136 |
| Табела 4.25. Резултати испитивања модификованих тканина на отпорност на хабање према стандарду SRPS EN ISO 12947 .....                    | 137 |
| Табела 4.26. Резултати испитивања модификованих тканина на паропропустљивост .....                                                        | 138 |
| Табела 4.27. Време до појаве термичке деградације и термичког оштећења материјала .....                                                   | 138 |

## ПОПИС СЛИКА

|                                                                                                                                                                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Слика 2.1. а) Реализације иновационе серије ( $\varepsilon t$ ) са Пуасоновом расподелом, AR серије ( $Xt$ ) и MIN–SB серије ( $Yt$ ). б) Емпиријске расподеле посматраних серија. (Вредности параметара су: $\alpha = 0,5$ , $c = 1$ , $\theta = 2$ ). ..... | 17  |
| Слика 2.2. Графички приказ Elbow методе за налажење оптималног броја кластера ..                                                                                                                                                                              | 24  |
| Слика 4.1. Горњи графикон: Динамика броја повређених ( $X$ ). Графикони испод: Аутокорелациона функција променљиве $X$ (лево) и емпиријска расподела исте променљиве (десно), фитована обичном Пуасоновом и 1-Пуасоновом расподелом.....                      | 82  |
| Слика 4.2. Горњи графикон: Динамика броја погинулих ( $Y$ ). Графикони испод: Аутокорелациона функција променљиве $Y$ (лево) и емпиријска расподела исте променљиве (десно), фитована обичном Пуасоновом и 0-Пуасоновом расподелом.....                       | 84  |
| Слика 4.3. Дневна динамика броја повређених ( $X$ -серија) и смртно страдалих ( $Y$ -серија) у пожарима у Републици Србији .....                                                                                                                              | 85  |
| Слика 4.4. Леви графикон: Емпиријске и прилагођене расподеле старости повређених. Десни графикон: Q-Q графикон уклапања емпиријских података са GND расподелом .....                                                                                          | 89  |
| Слика 4.5. Леви графикон: Емпиријске и прилагођене расподеле старости смртно страдалих. Десни графикон: Q-Q графикон уклапања емпиријских података са RefLOGND+ расподелом.....                                                                               | 90  |
| Слика 4.6. Предиктивне вероватноће повреда и смртних исхода, као и одговарајући индекс релативног ризика (RR) изведен из оптимално прилагођених стохастичких модела (GND и RefLOGND+, респективно) .....                                                      | 92  |
| Слика 4.7. Зависност SS вредности у односу на број кластера ( $k$ ): а) K-Means метод; б) АН метод.....                                                                                                                                                       | 95  |
| Слика 4.8. K-Means кластеризација са оптималним бројем од $K = 9$ кластера .....                                                                                                                                                                              | 96  |
| Слика 4.9. АН кластеризација са оптималним бројем од $K = 10$ кластера .....                                                                                                                                                                                  | 97  |
| Слика 4.10. Прва грана класификације, добијена атрибутом „Узрок пожара” и циљним варијаблама: повређени .....                                                                                                                                                 | 101 |
| Слика 4.11. Прва грана класификације, добијена атрибутом „Узрок пожара” и циљним варијаблама: погинули.....                                                                                                                                                   | 101 |
| Слика 4.12. ROC области класификације стабла одлучивања за узрок С са циљним варијаблама: а) повређени; б) погинули .....                                                                                                                                     | 106 |
| Слика 4.13. ROC области класификације стабла одлучивања за узрок D са циљним варијаблама: а) повређени; б) погинули .....                                                                                                                                     | 106 |

|                                                                                                                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Слика 4.14. Логаритамски дијаграм сегментације Lift и Conviction вредности за кластере добијене применом асоцијативних правила .....                                                                                                                 | 111 |
| Слика 4.15. Просторна дистрибуција укупних пожарних догађаја са повређеним и смртно страдалим лицима по управним окрузима Републике Србије.....                                                                                                      | 114 |
| Слика 4.16. а) LISA кластеризација укупних пожарних догађаја; б) статистичка значајност локалног Морановог индекса за укупне пожарне догађаје.....                                                                                                   | 115 |
| Слика 4.17. Просторна дистрибуција пожарних догађаја узрокованих цигаретама са повређеним и смртно страдалим лицима по управним окрузима Републике Србије .....                                                                                      | 116 |
| Слика 4.18. а) LISA кластеризација пожарних догађаја узрокованих цигаретом; б) статистичка значајност локалног Морановог индекса за пожарне догађаје узроковане цигаретом .....                                                                      | 117 |
| Слика 4.19. FT-IR спектри папира, дувана и пепела цигарете за цигарете марке а) Davidoff Gold, б) Dunhill, в) Pall Mall Slim, г) Sobranie, д) мотаног домаћег дувана и ђ) шибице и пепела након сагоревања шибице .....                              | 119 |
| Слика 4.20. FT-IR спектри пре и након калцинације изазване цигаретом Dunhill материјала: а) памук 100%, б) памук/полиестар 80/20%, в) полиестар 100%, г) полиестар/памук 80/20%, д) полиуретански сунђер тип 1 и ђ) полиуретански сунђер тип 2 ..... | 122 |
| Слика 4.21. Масени спектар цигарете Dunhill Master Blend .....                                                                                                                                                                                       | 126 |
| Слика 4.22. Масени спектри остатака спаљених тканина изазваних цигаретом Dunhill Master Blend а) памук 100% б) памук / памук/полиестар 80/20% .....                                                                                                  | 127 |
| Слика 4.23. Масени спектри остатака спаљених тканина изазваних цигаретом Dunhill Master.....                                                                                                                                                         | 128 |
| Слика 4.24. Масени спектри остатака спаљених модификованих тканина изазваних цигаретом Dunhill Master Blend а) полиестар б) памук .....                                                                                                              | 129 |
| Слика 4.25. Масени спектри остатака спаљеног сунђера изазваних цигаретом Dunhill Master Blend .....                                                                                                                                                  | 130 |
| Слика 4.26. XPS спектри композитних узорака $Al(OH)_3 / Al_2O_3$ . а) Прегледни спектри узорака 75:25, 50:50 и 25:75. Високорезолуциони Al 2p спектри: б) 75:25, в) 50:50 и г) 25:75 $Al(OH)_3 / Al_2O_3$ узорака.....                               | 131 |
| Слика 4.27. XRD дифрактограми узорака са различитим односима $Al(OH)_3 / Al_2O_3$ :75:25, 50:50 и 25:75 .....                                                                                                                                        | 133 |
| Слика 4.28. SEM микрограми честица нанокмполита различитих масених односа $Al(OH)_3 / Al_2O_3$ : а) 75:25, б) 50:50 и в) 25:75.....                                                                                                                  | 134 |

|                                                                                                                                                                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Слика 4.29. Средње вредности расподеле величина честица нанокompозита $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$ од међусобног масеног односа полазних сировина .....                                                                | 134 |
| Слика 4.30. Промене на површини модификоване памучне тканине узорка при излагању отвореном пламену: а) након 23 s; б) након 95 s .....                                                                                                     | 139 |
| Слика 4.31. Промене на површини модификованог дрвеног узорка при излагању отвореном пламену: а) након 30 s; б) након 135 s .....                                                                                                           | 140 |
| Слика 4.32. Промене на површини модификованог папира узорка при излагању отвореном пламену: а) након 15 s; б) након 57 s .....                                                                                                             | 141 |
| Слика 4.33. Температура жара цигарете у функцији времена .....                                                                                                                                                                             | 142 |
| Слика 4.34. Термовизијска анализа развоја температурног поља на површини памучне тканине: а) почетна фаза загревања, б) стање непосредно пре уклањања извора топлоте (цигарете), в) стање након уклањања извора топлоте .....              | 143 |
| Слика 4.35. Квантитативна анализа површине термичког оштећења памучне тканине са издвојеним зонама (прстен и средина): а) оригинални приказ оштећења, б) резултати дигиталне анализе и сегментације оштећења .....                         | 144 |
| Слика 4.36. Термовизијска анализа развоја температурног поља на површини полиестарске тканине: а) почетна фаза загревања, б) стање непосредно пре уклањања извора топлоте (цигарете), в) стање након уклањања извора топлоте .....         | 144 |
| Слика 4.37. Квантитативна анализа површине термичког оштећења полиестарске тканине са издвојеним зонама (прстен и средина): а) оригинални приказ оштећења, б) резултати дигиталне анализе и сегментације оштећења .....                    | 145 |
| Слика 4.38. Термовизијска анализа развоја температурног поља на површини модификоване памучне тканине: а) почетна фаза загревања, б) стање непосредно пре уклањања извора топлоте (цигарете), в) стање након уклањања извора топлоте ..... | 146 |
| Слика 4.39. Квантитативна анализа површине термичког оштећења модификоване памучне тканине са издвојеним зонама (прстен и средина): а) оригинални приказ оштећења, б) резултати дигиталне анализе и сегментације оштећења .....            | 146 |
| Слика 4.40. Термовизијска анализа развоја температурног поља на модификованој полиестарске тканине: а) почетна фаза загревања, б) стање непосредно пре уклањања извора топлоте (цигарете), в) стање након уклањања извора топлоте .....    | 147 |
| Слика 4.41. Квантитативна анализа површине термичког оштећења модификоване полиестарске тканине са издвојеним зонама (прстен и средина): а) оригинални приказ оштећења, б) резултати дигиталне анализе и сегментације оштећења .....       | 148 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Слика 4.42. FT-IR спектри а) површине тканина сировинског састава 100 % памук и 100 % полиестар модификованих премазом 75:25, полиестара модификованог премазом пре и након паљења цигаретама марке б) Dunhill, в) Davidoff gold, г) Pall Mall Slim, д) Sobranie и ђ) мотаног домаћег дувана ..... | 149 |
| Слика П.1. Мапа насељених места груписаних унутар „Место настанка пожара” променљиве (циљна променљива „Повређени”) .....                                                                                                                                                                          | 175 |
| Слика П.2. Мапа насељених места груписаних унутар „Место настанка пожара” променљиве (циљна променљива „Погинули”) .....                                                                                                                                                                           | 176 |
| Слика П.3. Стабло одлучивања за циљну променљиву „Повређени” (узрок D) .....                                                                                                                                                                                                                       | 177 |
| Слика П.4. Стабло одлучивања за циљну променљиву „Погинули” (узрок D) .....                                                                                                                                                                                                                        | 178 |
| Слика П.5. Термографски приказ промене температуре при тињању цигарете у временском интервалу (0 - 10 s) .....                                                                                                                                                                                     | 179 |
| Слика П.6. Термографски приказ промене температуре при тињању цигарете у временском интервалу (11 - 20 s) .....                                                                                                                                                                                    | 180 |

# 1. УВОД

---

Безбедност у контексту пожара представља једно од најважнијих питања савременог друштва, јер пожари за веома кратко време могу проузроковати штету великих размера. Пожари су појава праћена материјалном штетом, али неретко и људским жртвама. Иако се велики број пожара званично евидентира, у значајном броју случајева узрок њиховог настанка остаје непознат или непрецизно класификован, што директно утиче на ефикасност истраге, али и превентивних мера и стратегија управљања ризиком. Код настанка пожара врло често је кључни узрок људски фактор, чији се опсег протеже од непоштовања прописаних мера заштите од пожара, преко неправилне употребе уређаја, све до неправилног одлагања отпада. Када се говори о утицају људског фактора на настанак пожара, цигарете представљају једног од значајних узрочника пожара. Пожари изазвани цигаретама најчешће се јављају у стамбеним објектима, где је ризик по безбедност људи и имовине посебно изражен. У таквим условима, последице могу бити фаталне, са великим бројем повређених и смртно страдалих лица, што захтева посебну пажњу у оквиру научног истраживања.

Ефикасно суочавање са проблематиком пожара изазваних цигаретама захтева интегрисан приступ који обједињује три комплементарне димензије. Прва се односи на разумевање статистичких образаца настанка пожара и њихових последица, друга на поуздано утврђивање узрока кроз анализу материјалних доказа, а трећа на развој превентивних мера за успоравање ширења пламена. Свака од наведених димензија представља засебан научни изазов. Интеграцијом поменутих приступа дефинисано је истраживање, које се заснива на следећим хипотезама: прва хипотеза претпоставља да је могуће идентификовати скривене обрасце и кључне факторе ризика у вези са настанком пожара применом савремених метода анализе података, чиме се превазилазе ограничења класичних статистичких приступа; друга хипотеза претпоставља да је могуће поуздано идентификовати и доказати присуство трагова цигарете као узрочника пожара на различитим материјалима применом савремених инструменталних метода, чиме се унапређује форензичка реконструкција догађаја; и трећа хипотеза претпоставља да је могуће развити материјал са побољшаним ватроотпорним својствима који успорава ширење пламена, а притом задржава своја употребна физичко-механичка својства.

Упркос томе што се пожари систематски евидентирају, анализа података о њиховим узроцима и последицама у Републици Србији до сада није спроведена на начин који омогућава идентификацију скривених образаца и предиктивних фактора. Постојећи приступи углавном се ослањају на описну статистику, која не пружа свеобухватан увид у међузависност варијабли које одређују исход пожара. Стога, први део дисертације има за

циљ развој конкретних математичко-стохастичких модела и алгоритама заснованих на тзв. претрази и учењу из података (енгл. *Machine Learning*) и рударењу података (енгл. *Data Mining* - DM). У овом делу су коришћени подаци о регистрованим пожарима и експлозијама на територији Републике Србије у периоду од 1. јануара 2009. до 31. децембра 2023. године. Основни циљ првог дела истраживања јесте детаљна и систематска анализа узрока и последица пожара на територији Републике Србије, са посебним освртом на факторе који доводе до најтежих последица по људе. Посебан акценат биће стављен на анализу пожара изазваних непажњом при употреби цигарета, будући да се овај узрок статистички издваја као један од најчешћих и најопаснијих, нарочито у стамбеним објектима.

Иако статистичка анализа омогућава разумевање образаца на макроскопском нивоу, она не може да замени форензичку анализу конкретног места догађаја. У великом броју случајева узрок пожара остаје неутврђен, што указује на значај примене поузданих инструменталних метода у анализи материјалних трагова и реконструкцији догађаја. Други део дисертације обухвата испитивање ефикасности савремених инструменталних метода у идентификацији и анализи карактеристичних трагова насталих при горењу текстилних материјала када је узрок пожара цигарета. У овом делу дисертације извршена је квалитативна анализа узорака различитих материјала пре и након спаљивања цигаретом коришћењем инфрацрвене спектроскопије са Фуријеовом трансформацијом (енгл. *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* - FT-IR) и масене спектрометрије са електронском јонизацијом (енгл. *Electron Ionization Mass Spectrometry* - EI-MS), са циљем идентификације карактеристичних спектралних трака у FT-IR спектрима и масених сигнала у EI-MS спектрима карактеристичних за продукте сагоревања цигарете.

Поред утврђивања узрока након настанка пожара, подједнако је важно деловати превентивно успоравањем ширења пламена у почетној фази и тиме омогућити правовремену евакуацију и интервенцију. Стога, циљ трећег дела дисертације јесте развој и карактеризација материјала са побољшаним ватроотпорним својствима. У овом делу, извршена је синтеза честица нанокомпозита  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$  поступком механохемијске синтезе. Карактеризација честица нанокомпозита вршена је скенирајућом електронском микроскопијом (SEM), рендгенском дифракционом анализом (*X-ray Diffraction* - XRD) и рендгенском фотоелектронском спектроскопијом (*X-ray Photoelectron Spectroscopy* - XPS). Синтетисане честице употребљене су за модификацију премаза ради побољшања својства ватроотпорности материјала. Испитивање ватроотпорности обухватило је излагање пламену узорака премаза нанетих на текстил, дрво и папир. Поред тога, испитиван је

утицај честица на физичко-механичка својства тканина (затезна својства, отпорност на хабање и паропропустљивост). Термографска испитивања обухватила су ширење топлоте при контакту ужарене цигарете са површином сирових и модификованих памучних и полиестарских тканина под контролисаним експерименталним условима.

Укупно посматрано, истраживање има за циљ да кроз интеграцију теоријске анализе и моделовања, примену инструменталних метода у форензици, као и развоја материјала допринесе побољшању безбедности становништва, заштити живота и здравља људи, имовине и животне средине, као и смањењу ризика од настанка и последица пожара. Додатно, резултати истраживања спроведеног у оквиру дисертације могу допринети подизању свести о значају правовременог реаговања у случају пожара, бољем разумевању механизма настанка пожара и унапређењу система заштите од пожара у Републици Србији. Такође, резултати истраживања могу указати на могућности ефикасније идентификације карактеристичних материјалних трагова насталих при горењу текстилних материјала када је цигарета извор паљења, као и на могућности унапређења отпорности материјала на дејство пожара.

## 2. ТЕОРИЈСКИ ДЕО

---

## 2.1. Пожар као предмет научног и форензичког истраживања

### 2.1.1. Пожар као сложен научни и друштвени феномен

Сложеност и учесталост пожара чине их једним од сталних и најозбиљнијих изазова са којима се суочава људско друштво. Стога је научно проучавање пожара од кључне важности, јер доприноси разумевању, спречавању, контроли и смањењу њихових последица. Пожари не угрожавају само животе и имовину, већ могу имати и значајне друштвене последице. Велики пожари често доводе до прекида саобраћаја, затварања школа и болница, поремећаја рада привредних и других критичних субјеката, оштећења културног наслеђа и нарушавања функционисања заједнице. Поред претходно наведених разлога за увођење научне методологије у истраживање пожара, кључно је прилагодити је потребама ефикасне форензичке анализе, тј. применити научне методе у поступцима утврђивања узрока пожара и реконструкцији самих догађаја. Оваквим приступом значајно се повећава могућност успешног утврђивања узрока пожара, као и утицаја на настанак пожара са људским жртвама или материјалном штетом. Таква анализа може подржати дефинисање различитих превентивних и осигуравајућих мера и процеса, због чега многи истраживачи, у настојању да разумеју узрочно-последичне везе пожара, посвећују значајну пажњу овој теми (Butry et al., 2010; Lerpiniere, 2020; Zou et al., 2021).

Међу научницима који су значајно допринели развоју савремене науке о пожару посебно место заузима професор Харвардског универзитета Ховард В. Емонс (*Howard W. Emmons*, 1912–1998), кога многи аутори сматрају једним од оснивача модерне науке о пожару. У свом раду „*The Further History of Fire Science*” из 1985. године, Емонс је покушао да сагледа дугорочне правце развоја ове научне дисциплине (Emmons, 1985). Полазећи од чињенице да је средином XX века јавност постала свесна озбиљности проблема пожара и значаја противпожарних прописа, стандарда и организованих система заштите, аутор је изнео визију развоја науке о пожару. Сматрао је да ће напредак природних и техничких наука омогућити све потпуније разумевање механизма настанка, развоја и гашења пожара, као и значајно смањење њихових последица по људе, имовину и животну средину.

Емонс је развој науке о пожару посматрао као вишефазни процес. Период од 1950. до 2000. године сматрао је фазом у којој ће бити постављени темељи савремене науке о пожару, развијене основне теорије и идентификовани кључни фактори који утичу на настанак и развој пожара. У том периоду посебан значај придавао је развоју законске

регулативе, техничких стандарда и норми заштите од пожара, сматрајући их основом за унапређење безбедности друштва.

За XXI век предвиђао је убрзани развој нових технологија и материјала. Посебно је истицао значај развоја незапаљивих и тешко запаљивих материјала, очекујући да ће њихова шира примена значајно смањити пожарни ризик. Као илустрација потенцијала таквог приступа често се наводи пример подметања пожара у више луксузних хотела у Кувајту, током Заливског рата 1991. године, при чему је једино хотел „*Holiday Inn*” претрпео само ограничена оштећења. Након сагоревања просутог бензина и мањег броја запаљивих елемената ентеријера, пожар се у том хотелу није проширио на остатак објекта, већ је углавном изазвао задимљавање појединих просторија. Разлог за такав исход била је претежна примена незапаљивих материјала током изградње објекта. Конструкцију су чинили армирани бетон, челик, камен, стакло, мермер и други материјали са повољним пожарним карактеристикама (незапаљиви теписи и завесе), док је удео запаљивих материјала био минималан. Захваљујући томе, хотел је након релативно једноставне санације брзо враћен у функцију. Међутим, пракса показује да је потпуно елиминисање запаљивих материјала из савремених објеката тешко оствариво, како због функционалних и естетских захтева, тако и због економских ограничења.

Даље, Емонс је сматрао да ће савремени рачунари и математичке методе омогућити детаљно проучавање сложених процеса сагоревања, прецизније предвиђање понашања пожара у различитим условима и процену ризика. Даљи развој науке, посебно у областима математике, хемије, токсикологије и рачунарског моделовања, требало је да омогући свеобухватније разумевање пожарних процеса и ефикасније мере заштите. На сличан начин, напредак у области вештачке интелигенције и машинског учења отвара нове могућности за обраду великих скупова података о пожарима, идентификацију образаца и унапређење метода предвиђања и анализе узрока пожара.

Посебно занимљив део Емонсове визије односио се на будући развој науке у XXII и XXIII веку. Он је сматрао да ће нове математичке методе, рачунари високих перформанси и напредак квантне хемије омогућити потпуно разумевање турбулентних процеса и хемијских реакција које одређују понашање пожара. Такав развој, према његовим предвиђањима, требало је да доведе до стварања прецизних физичко-хемијских модела настанка, развоја и гашења пожара, модернизације противпожарних система и уградњи незапаљивих материјала, чиме би човечанство остварило својеврсну „победу над пожаром” (Emmons, 1985).

Иако су многа Емонсова предвиђања у вези са технолошким напретком показала изузетну далековидост, пракса је показала да развој природних и техничких наука сам по себи није довољан за решавање свих проблема у области заштите од пожара. Савремена истраживања потврђују да велики број пожара и даље настаје као последица људског деловања, било да је реч о непажњи, незнању, неправилном коришћењу опреме, организационим пропустима или намерном изазивању пожара. Због тога се показало да узроци пожара не могу бити посматрани искључиво кроз техничко-технолошку призму.

Управо се у том делу уочава одређено ограничење тадашњих предвиђања. Људски фактор углавном је посматран као спољни елемент који ће технолошки напредак постепено потиснути, док су друштвени, организациони и психолошки аспекти пожарне безбедности остали у другом плану. Међутим, искуства из последњих деценија показала су да технички напредни системи могу бити недовољно ефикасни уколико нису праћени одговарајућим нивоом безбедносне културе и образовања, као и одговарајућом организацијом и управљањем ризицима.

Додатни изазов представљају глобалне климатске промене, убрзана урбанизација, раст становништва, изградња енергетски ефикасних објеката, повећана употреба нових извора енергије, производња запаљивих ентеријерских и других материјала и све већа технолошка сложеност савременог друштва. Ови процеси доприносе настанку нових ризика и повећавају вероватноћу појаве великих и катастрофалних пожара, нарочито шумских и урбаних пожара великих размера.

### **2.1.2. Организациони и системски фактори безбедности од пожара**

Пожари и други удеси се често тумаче кроз две утицајне организационе теорије: теорију високе поузданости (енгл. *High Reliability Theory* - *HRT*) и теорију нормалних удеса (енгл. *Normal Accident Theory* - *NAT*). Теорија високе поузданости полази од става да се и у сложеним и опасним системима може постићи висок ниво безбедности уколико су системи добро пројектовани и њима се ефикасно управља. Аутори теорије, ЛаПорт (*LaPorte*) и Консолини (*Consolini*), истичу значај снажне безбедносне културе, високог приоритета који руководство даје безбедности и поузданости у односу на друге циљеве организације (нпр., продуктивност), континуиране обуке, редундантности (дуплирања и преклапања) критичних компоненти и децентрализованог доношења одлука (*LaPorte & Consolini, 1991*). Према овом приступу, организације могу успешно спречавати удесе упркос неизбежности људских грешака.

Теорија нормалних удеса, коју је развио Чарлс Пероу (*Charles Perrow*), полази од супротне претпоставке да су удеси неизбежна последица функционисања високо сложених и чврсто повезаних система. У таквим системима, поузданост и безбедност нису главни приоритети, већ се преплићу са другим циљевима (нпр. већи профит и притисци конкуренције), док неочекиване интеракције између више кварова и грешака могу довести до катастрофалних последица које није могуће у потпуности предвидети или спречити. Према овој теорији, чак ни висок ниво обуке, процедура и техничких мера није довољан за потпуно елиминисање ризика од великих удеса (Perrow, 1994).

Савремени технички и организациони системи постају све ефикаснији услед континуиране оптимизације процеса, аутоматизације и стандардизације рада. Међутим, повећање ефикасности често истовремено смањује отпорност система на поремећаје, јер се уклањају резерве и сигурносне баријере које омогућавају апсорпцију неочекиваних догађаја. Због тога сложени системи могу постати посебно осетљиви на мале кварове, људске грешке или друге наизглед безначајне инциденте који могу покренути ланац догађаја са озбиљним последицама.

Овакво стање описује теорија самоорганизоване критичности, детаљно изложена у делу Пера Бака (*Per Bak*), према којој се сложени системи спонтано развијају ка стању у коме мали поремећаји могу изазвати несразмерно велике последице (Bak, 1996). У таквим условима велики катастрофални пожари често нису резултат једног пропуста, већ последица међусобног деловања већег броја мањих догађаја и скривених слабости система (Perrow, 1994). Настанак и развој пожара представљају резултат сложене интеракције техничких, организационих, људских и материјалних фактора. Због тога савремени приступи све више користе анализу великих скупова података, вештачку интелигенцију и методе машинског учења ради идентификације образаца, скривених веза и фактора који доприносе настанку пожара. Такав приступ омогућава прецизније утврђивање узрока пожара, унапређење процене ризика и развој ефикаснијих материјала и система заштите.

Баков парадокс указује да оптимизација повећава ефикасност система, али истовремено може повећати његову рањивост и могућност настанка догађаја са веома малом вероватноћом али са катастрофалним последицама – тзв. „Црни лабуди” (Lewis, 2020). Стога је један од кључних изазова савремене заштите од пожара успостављање равнотеже између ефикасности и отпорности система, како би се смањила вероватноћа настанка великих и катастрофалних пожара и њихових последица. Такође, савремена заштита од пожара не може бити заснована искључиво на развоју технологије, већ захтева мултидисциплинарни и интегрисани приступ који повезује природне, техничке и

друштвене науке. Само кроз такав приступ могуће је у потпуности разумети узроке настанка пожара, унапредити превентивне мере, повећати отпорност система на пожар и развити ефикасније системе управљања ризицима. Управо у том правцу развијају се савремена истраживања, која заштиту од пожара посматрају не само као технички, већ и као организациони, друштвени и управљачки проблем од изузетног значаја за безбедност савременог друштва.

Мултидисциплинарни и интегрисани приступ безбедности од пожара подразумева сагледавање међусобно повезаних фактора који утичу на настанак и развој пожара, безбедност људи и ефикасност интервенције. У том контексту, могу се издвојити следеће групе фактора:

- карактеристике објекта: обухватају конструктивна, грађевинска и техничка решења која утичу на развој пожара, ширење дима и топлоте, евакуацију и услове за интервенцију;
- карактеристике људи: односе се на број, способности, понашање и начин реаговања људи у условима пожара;
- карактеристике окружења: обухватају просторне, метеоролошке и друге услове који могу утицати на развој пожара и спровођење интервенције;
- карактеристике пожара: односе се на начин развоја и ширења пожара, његов интензитет, продукте сагоревања и друге специфичне појаве;
- карактеристике интервенције: обухватају припремљеност, расположиве ресурсе, време реаговања, избор тактике и координацију интервентних служби (Ваај et al., 2023).

### **2.1.3. Дефиниција и класификација пожара**

На основу досадашњих научних и стручних анализа пожара изведено је више дефиниција пожара. Јасно дефинисање појма пожара, услова за његов настанак и класификације пожара представљају основу за адекватно сагледавање превентивних и форензичких мера у оквиру узрочно-последичне анализе пожара.

Према Закону о заштити од пожара Републике Србије, пожар представља процес неконтролисаног сагоревања који угрожава живот и здравље људи, материјална добра и животну средину (Закон о заштити од пожара, 2009).

Класификација пожара представља основу за избор одговарајућих мера заштите и средстава за гашење (Млађан, 2009). Према стандарду SRPS EN 2:2011, пожари се деле на

пет класа у зависности од врсте гориве материје (SRPS EN 2:2011 Класификација пожара, 2011):

- класа А - пожари чврстих материја органског порекла које сагоревају уз стварање жара;
- класа Б - пожари запаљивих течности и чврстих материја које се топе;
- класа Ц - пожари запаљивих гасова;
- класа Д - пожари запаљивих метала;
- класа Ф - пожари јестивих уља и масти.

Поред класификације према врсти гориве материје, пожари се могу разврстати и према начину настанка топлотне енергије неопходне за иницирање процеса паљења. Најзначајнији механизми иницирања пожара могу се сврстати у следеће категорије (Mladen, 2009):

- директан контакт гориве материје са пламеном;
- самозапаљење и хемијске реакције;
- експлозије;
- претварање електричне енергије у топлотну енергију;
- атмосферско пражњење електрицитета;
- статички електрицитет и потенцијали катодне заштите;
- механички узроци;
- природни узроци.

Са становишта криминалистичке и форензичке анализе, узроци пожара могу се класификовати према начину њиховог настанка, односно околностима и радњама које су довеле до иницирања процеса паљења. У том смислу разликују се:

- пожари настали дејством природних узрока;
- пожари изазвани нехатом или непажњом;
- намерно изазвани пожари, односно паљевине;
- пожари изазвани услед дечије игре (Subošić et al., 2016).

#### **2.1.4. Брзина развоја пожара и ризик по људску безбедност**

Новија истраживања показују да се више од 90% случајева страдања људи у пожарима у стамбеним објектима дешава током првих минута развоја пожара, пре доласка ватрогасно-спасилачких јединица (Sokolov & Kostyuchenko, 2017). Илустративан пример представља пожар у ноћном клубу *The Station* у Сједињеним Америчким Државама, који

се догодио 2003. године, у којем је погинуло 100 особа и који је представљао прекретницу у прописима о заштити од пожара у угоститељским објектима. Анализа видео снимака овог пожара показала је да су услови у објекту постали смртоносни већ око 90 s након запаљења полиуретанске пене без успоривача горења. У средини плесног подијума температура је прешла 460 °C, запремински удео угљен монооксида достигао је 1%, концентрација водоник-цијанида премашила је 0,07%, садржај кисеоника пао је на 9%, а топлотни флуks зрачења премашио је 40 kW/m<sup>2</sup> (Grosshandler et al., 2005).

Трагедија у бару *Le Constellation* у у Кранс-Монтани, у Швајцарској, која се догодила 1. јануара 2026. године, додатно је потврдила колико брзо пожар може постати неконтролисан у објектима са запаљивим унутрашњим облогама. Према званичним подацима Кантоналне полиције Вале, у пожару је живот изгубила 41 особа, док је 115 особа повређено, од којих је велики број задобио тешке опекотине. Прелиминарни резултати истраге указују на то да је пожар највероватније започео паљењем запаљиве акустичне облоге плафона услед употребе унутрашњих пиротехничких средстава. Након тога је уследио изузетно брз развој пожара и настанак флешовера (енгл. *flashover*), односно наглог преласка пожара у фазу у којој долази до готово истовременог паљења већине изложених горивих материјала у простору (Police cantonale du Valais, 2026).

У постојећим условима, време доласка ватрогасно-спасилачких јединица на место пожара нема значајан утицај на величину ризика од страдања људи у пожарима у стамбеним објектима и објектима јавног окупљања (ноћни клубови, дискотеке). Разлог томе је што дим и температура почињу да делују на људе који се налазе у просторији већ у почетној фази развоја пожара, односно током другог до четвртог минута, док време од настанка пожара до доласка првих ватрогасно-спасилачких јединица на место интервенције у 80% случајева износи између 6 min и 12 min (Sokolov & Kostyuchenko, 2017). Сходно томе, за смањење ризика по људе и имовину од пожара неопходно је смањити интервал између избијања и детекције пожара, током којег страда претежан број жртава. То је могуће постићи масовним опремањем стамбених објеката средствима за рану детекцију и дојаву пожара - јављачима пожара, као и опремањем објеката јавног окупљања (ноћни клубови, дискотеке) ентеријером израђеним од незапаљивих материјала, уз правилно позиционирање и довољан број евакуационих излаза.

## 2.2. Стохастичко-моделски приступ

Стохастички приступ у изучавању и моделовању пожара представља снажан оквир за разумевање, предвиђање и управљање сложеним феноменима који укључују несигурност,

варијабилност и интеракцију више фактора. За разлику од детерминистичких модела који претпостављају фиксне улазне параметре и дају један исход, стохастички модели уводе вероватноћу као суштински елемент, чиме омогућавајући симулацију широког спектра могућих сценарија пожара. Основне карактеристике стохастичког приступа у моделовању динамике пожара јесу следеће:

- Узимање у обзир несигурности: Пожари су по природи непредвидиви, тј. зависе од временских услова, типа горива, топографије, људског фактора и других динамичких елемената. Стохастички модели третирају ове параметре као случајне променљиве, често са познатим или емпиријски процењеним расподелама.
- Генерисање сценарија: Уместо једне симулације, стохастички модел узима у обзир више реализација пожара, сваку са различитим комбинацијама улазних параметара. Ово омогућава процену распона могућих исхода, од најблажих до катастрофалних, као и прецизну квантификацију ризика.
- Моделовање просторне и временске динамике: Често се користе стохастички процеси као што су Марковљеви ланци, стохастичке диференцијалне једначине или агент-базирани модели за симулацију ширења пожара. На пример, вероватноћа да се пожар прошири са једне територије на суседну може зависити од локалне топографије, типа вегетације и тренутних временских услова.

Безбедност од пожара не подразумева само предвиђање ширења ватре, већ и разумевање људских последица, пре свега броја повређених и страдалих лица, њихове просторне и временске расподеле, као и фактора који утичу на исходе. У том контексту, стохастичко-моделски приступ пружа моћан оквир за анализу несигурности, варијабилности и сложених интеракција између физичких, социјалних и инфраструктурних компоненти. Такав приступ омогућава не само дубље разумевање динамике повређивања и страдања у пожарима, већ и развој превентивних мера, оптимизацију евакуационих планова и ефикаснију алокацију ресурса. У контексту Републике Србије, где се пожари често дешавају у руралним и урбаним срединама са различитим нивоима приступности и реаговања, овај приступ може бити основа за развој локалних стратегија безбедности и јавног здравља.

У анализи безбедносних исхода пожара, конкретно броја повређених и страдалих лица у пожарима, неопходно је применити моделски оквир који адекватно обухвата емпиријску варијабилност, структурну несигурност, временску динамику, али и реткост ових догађаја (у великом броју пожара, срећом, није било повређених и страдалих лица). У том контексту, ова студија разматра могућност коришћења различитих стохастичких

модела који би могли успешно да се примене за описивање расподеле и динамике броја повређених и страдалих у инцидентима изазваним пожарима. Ради лакшег разумевања структуре и основних идеја примене таквих модела, они се у основи могу поделити у три категорије, које ће укратко бити описане у наставку.

### 2.2.1. Инфлаторна (0–1) Пуасонова расподела

Почетна мотивација за примену инфлаторне Пуасонове расподеле произилази из емпиријских налаза који указују на приближну једнакост средње вредности и варијансе броја повређених и страдалих у пожарима. Овај однос је карактеристичан за класичну Пуасонову расподелу, али се у контексту пожара, посебно у урбаним и руралним срединама са ниском фреквенцијом инцидената, јавља специфична структурна појава: велики број пожара не резултира страдањем, док код значајног броја пожара долази до повређивања (тачно) једног лица.

Како би се овај феномен успешно моделовао, овде се предлаже тзв. *инфлаторна (0–1) Пуасонова расподела*, тј. стохастички модел који комбинује Пуасонову компоненту са структурном инфлацијом у вредностима нула и јединица. Овакав облик расподела је први пут представљен у пионирском раду (Saito & Rodrigues, 2025), а потом је 0 – 1 Пуасонова расподела детаљно анализирана у радовима (C. Zhang et al., 2016, 2020). У наредном периоду, многи аутори су развили различите типове инфлаторних 0-1 расподела и процеса (видети, нпр., Mohammadi et al., 2022; Qi et al., 2019; Stojanović et al., 2023b), а неки од ових резултата примењени су у наставку.

Формално, 0 – 1 Пуасонова расподела дефинише се као мешавина двеју расподела, са законом расподеле:

$$P(Y = y) = \phi_0 \cdot \delta_0(y) + \phi_1 \cdot \delta_1(y) + (1 - \phi_0 - \phi_1) \cdot \frac{\lambda^y e^{-\lambda}}{y!}, \quad y \in \mathbb{N} \quad (2.1)$$

где је  $\lambda$  параметар стандардне Пуасонове расподеле,  $\phi_0$  и  $\phi_1$  вероватноће структурне инфлације у вредностима 0 и 1, док је:

$$\delta_k(y) = \begin{cases} 1, & y = k \\ 0, & y \neq k \end{cases}$$

тзв. Кронекерова  $\delta$ -функција (видети, рецимо, Weisstein, n.d.). Очито, овакав стохастички модел омогућава флексибилно описивање емпиријске расподеле броја повређених, односно страдалих, уз задржавање Пуасонове интуиције о односу средње вредности и варијансе, које су нумерички једнаке код основног облика Пуасонове расподеле.

### 2.2.2. Минификациони (случајни) процеси

У претходном одељку приказани су стохастички модели засновани на класичним расподелама пребројавања, који омогућавају моделовање случајних појава са израженом инфлацијом нултих и јединичних вредности. Међутим, у анализи динамике пожара често се јавља потреба за описивањем процеса код којих, поред случајних флукуација, постоји и изражена тенденција смањења броја посматраних догађаја током времена. Такве ситуације су карактеристичне за анализу броја повређених и страдалих лица, где се након иницијалног инцидента, услед интервенције ватрогасно-спасилачких јединица, медицинске помоћи, евакуације или других заштитних мера, очекује постепено смањење броја нових случајева.

Из тог разлога, последњих година развијена је посебна класа стохастичких модела, позната под називом *минификациони (случајни) процеси* (енгл. *Minification Processes*), чија је основна идеја да се динамика система описује механизмом постепене редукције случајне променљиве, уз истовремено очување могућности појаве нових случајних флукуација. Реч је о стохастичким процесима који описују редукцију, апсорпцију или „гашење” инцидента кроз време, под утицајем интервенција, инфраструктуре, понашања људи и других фактора. У контексту пожара, минификациони процеси могу моделовати динамику броја повређених/страдалих као стохастички процес са тенденцијом ка нули, али са потенцијалом за спорадичне скокове.

За разлику од класичних INAR модела (енгл. *Integer Auto-Regressive Models*), које су разматрали бројни аутори (Huang et al., 2023; Maya et al., 2022; Yu & Tao, 2023), а који се заснивају на адитивном механизму, минификациони процеси користе оператор минимума, чиме се природно описују процеси код којих доминирају смањење интензитета, велики број нултих вредности и повремени стохастички скокови. Управо због ових особина, минификациони процеси показали су се као погодан моделски оквир за анализу динамике различитих реалних серија података (Aleksić & Ristić, 2021; Qian & Zhu, 2022; Stojanović et al., 2024a). У овој дисертацији разматра се примена посебног, новог минификационог модела под називом MIN-SB процес (енгл. *Minification Split-BREAK Process*), који је предложен у (Stojanović et al., 2026) и примењен у испитивању динамике броја повређених и погинулих лица у пожарима у Републици Србији. Формално, MIN-SB процес представља временску серију ( $Y_t$ ) са дискретним временом  $t \in T$ , облика:

$$Y_t = \min(X_t, \varepsilon_t), \quad (2.2)$$

где је  $(\varepsilon_t)$  низ независних и идентично расподељених случајних променљивих (иновација), док је  $(X_t)$  латентни („скривени”) ауторегресивни процес који задовољава релацију:

$$X_t = \alpha \circ (X_{t-1} + q_{t-1}\varepsilon_{t-1}), \quad 0 < \alpha < 1.$$

Симбол „ $\circ$ ” означава тзв. оператор негативно-биномног проређивања (енгл. *Negative Binomial Thinning – NBT*), док је:

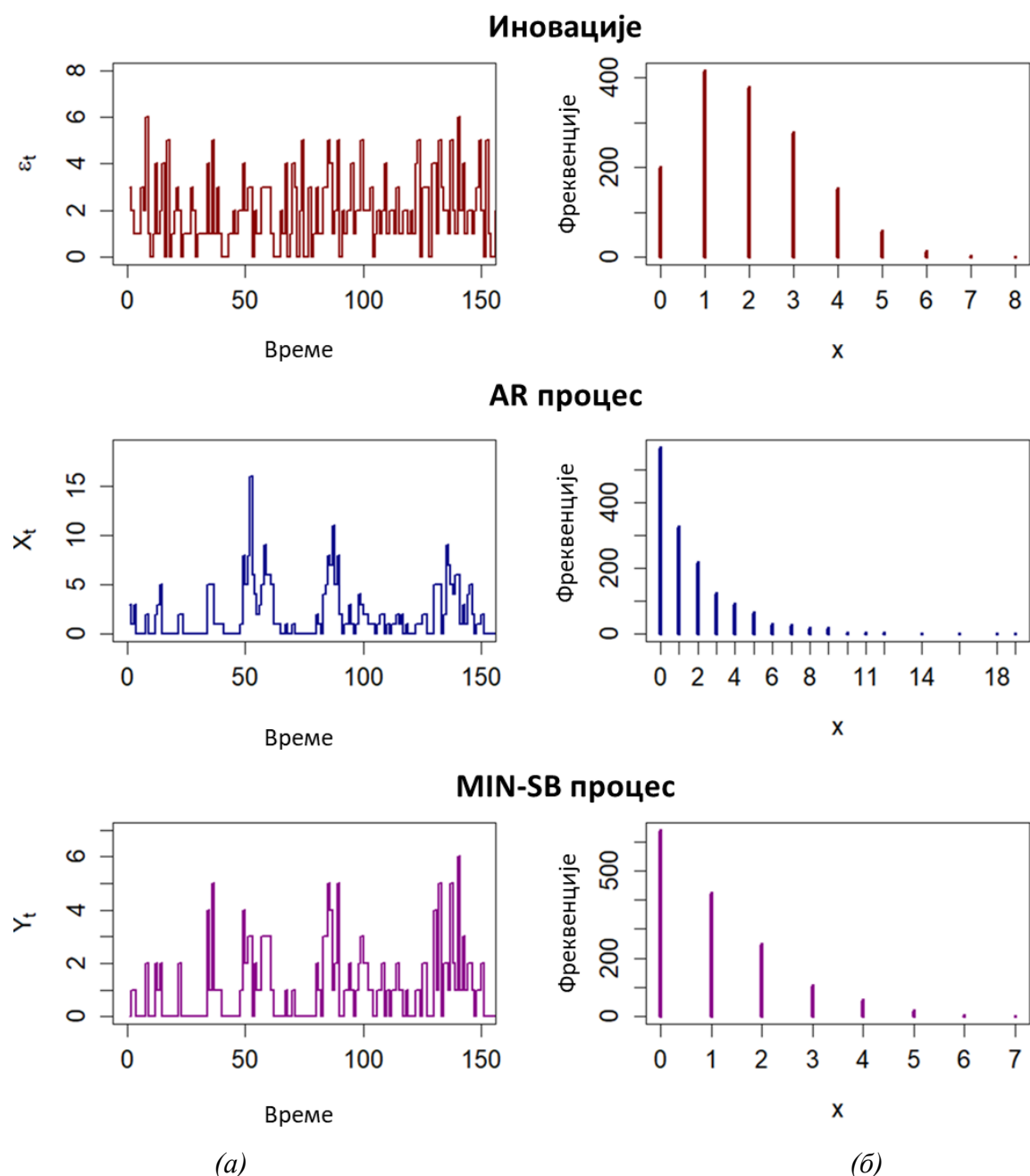
$$q_t = I(\varepsilon_{t-1} \geq c) = \begin{cases} 1, & \varepsilon_{t-1} \geq c \\ 0, & \varepsilon_{t-1} < c \end{cases}$$

индикаторска променљива са прагом  $c \in \mathbb{N}_0$ , која одређује тренутке у којима претходне иновације утичу на развој процеса. На овај начин, праг  $c$  има улогу механизма активације, односно контролише када ће случајне флукуације бити укључене у даљу еволуцију система.

Са становишта динамике система, MIN-SB модел интерполира вредности између два гранична режима. За велике вредности прага  $c$  вероватноћа активације иновационе компоненте постаје мала, па процес еволуира готово искључиво под дејством механизма проређивања. Последица тога је постепено смањење вредности процеса, при чему нулта вредност постаје природно стабилно стање. Насупрот томе, за мале вредности параметра  $c$  иновације се чешће укључују у процес, што доводи до повремених стохастичких скокова и израженије варијабилности серије. На тај начин, MIN-SB модел истовремено описује два карактеристична механизма који се јављају код анализе пожара: постепено смиривање процеса након интервенције и изненадно повећање броја инцидената услед непредвиђених околности.

На слици 2.1 приказана је реализација свих компоненти MIN-SB модела: иновација  $(\varepsilon_t)$ , латентног ауторегресивног процеса  $(X_t)$  и основног минификационог процеса  $(Y_t)$ . Може се уочити да оператор минимума природно доводи до већег броја малих вредности, уз истовремено очување могућности појаве повремених већих вредности. Оваква структура омогућава успешно моделовање временских серија код којих су присутни инфлација нултих вредности, ретки догађаји и нагле промене интензитета процеса. Штавише, са практичног становишта, комбинација расподела иновација  $(\varepsilon_t)$  и минификационог механизма процеса, датог једнакошћу (2.2), омогућава следећу практичну имплементацију:

- Флексибилно моделовање емпиријских података: узимајући у обзир тзв. инфлацију 0 и 1 вредности, која се врло често користи у стохастичким моделима „пребројавања”.
- Динамичку симулацију ризика: кроз временску еволуцију броја повређених/страдалих.
- Интеграцију са просторним и демографским подацима: омогућавајући процену ризика по регионима и типу инфраструктуре.



Слика 2.1. а) Реализације иновационе серије ( $\varepsilon_t$ ) са Пуасоновом расподелом, AR серије ( $X_t$ ) и MIN-SB серије ( $Y_t$ ). б) Емпиријске расподеле посматраних серија. (Вредности параметара су:  $\alpha = 0,5$ ,  $c = 1$ ,  $\theta = 2$ ).

Једна од најзначајнијих особина MIN–SB процеса јесте да, под условом  $0 < \alpha < 1$ , поседује јединствену стационарну расподелу, при чему су његови моменти и аутокорелациона структура експлицитно одређени. Посебно је значајно да аутокорелациона функција (енгл. *Autocorrelation Function – ACF*) латентног процеса ( $X_t$ ) има експоненцијални облик  $\rho_X(h) = \alpha^h$ ,  $h \geq 0$ , што указује на постепено опадање временске зависности и омогућава успешно моделовање процеса код којих ефекат претходних догађаја временом слаби. Ове особине представљају важну предност приликом анализе динамике пожара, јер омогућавају опис процеса који су истовремено случајни, временски зависни и изложени наглим структурним променама.

Коначно, како је већ истакнуто, минификациони процеси представљају погодан моделски оквир за анализу ретких догађаја у области заштите од пожара. Поред моделовања временске динамике броја повређених и страдалих лица, они омогућавају симулацију различитих сценарија развоја пожара, процену ризика у зависности од интензитета иновација, као и интеграцију са просторним, демографским и инфраструктурним подацима. Због тога ова класа стохастичких модела представља природну основу за каснију примену техника машинског учења и развој система за подршку одлучивању у области управљања ризицима од пожара. На тај начин, овакав моделски оквир даје додатне могућности за даљу анализу, симулацију и визуелизацију ризика, као и за развој превентивних стратегија и јавних политика, што ће бити приказано у наставку ове дисертације. Прецизније речено, у наредним одељцима ће бити представљена примена овог, као и осталих стохастичких модела над конкретним подацима, при чему су се посебно разматрају технике оцењивања параметара и симулације самих модела, засноване на реалним сценаријима пожара у Републици Србији.

### 2.2.3. Континуално стохастичко моделовање применом GAMLSS модела

Поред дискретних стохастичких модела, који су описани у претходним одељцима, у анализи форензичких података често се јавља потреба за моделовањем непрекидних случајних променљивих. Такве променљиве најчешће описују физичке, временске или демографске карактеристике анализираних појава, као што су старост страдалих лица, време настанка пожара, трајање интервенције, температура, концентрација продуката сагоревања и друге величине које могу попримити произвољне реалне вредности у оквиру посматраног интервала.

Нека је  $X: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  непрекидна случајна променљива чија је функција густине вероватноће дата изразом  $f(x; \theta)$ ,  $x \in \mathbb{R}$ , где је  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p)$  вектор непознатих

параметара расподеле. Функција густине мора задовољити услове ненегативности  $f(x; \theta) \geq 0$ , као и нормираности  $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x; \theta) dx = 1$ . На основу функције густине добија се функција расподеле:

$$F(x) = P(X < x) = \int_{-\infty}^x f(t; \theta) dt.$$

Практично, избор одговарајуће расподеле представља један од најзначајнијих корака стохастичког моделовања, јер од њега непосредно зависе квалитет процене параметара, поузданост статистичког закључивања и могућност предвиђања будућих исхода. У класичним статистичким приступима најчешће се претпоставља нормална расподела случајне променљиве. Међутим, реални форензички подаци врло често показују изражену асиметрију, повећану дисперзију, наглашене „репове” (енгл. *Tails*) или чак истовремено присуство више наведених особина. У таквим случајевима употреба једноставних модела може довести до значајног одступања између теоријске и емпиријске расподеле, што директно утиче на тачност процене ризика и доношење закључака.

Из тог разлога, последњих година све већу примену налазе тзв. генерализовани адитивни модели за локацију, дисперзију и облик (енгл. *Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape - GAMLSS*), које су предложили (Rigby & Stasinopoulos, 2005), а који представљају један од најфлексибилнијих приступа стохастичком моделовању непрекидних (континуалних) података. Основна идеја овог приступа јесте да се сваки параметар теоријске расподеле моделује независно, чиме се омогућава значајно боље прилагођавање емпиријским подацима у односу на класичне регресионе моделе.

Претпоставимо да случајна променљива  $Y$  припада некој расподели из GAMLSS класе. Тада се њена расподела означава као  $Y \sim D(\mu, \sigma, \nu, \tau)$ , где су:

- $\mu$  – параметар локације,
- $\sigma > 0$  – параметар дисперзије,
- $\nu$  – параметар асиметрије,
- $\tau$  – параметар спљоштености (куртозис).

За разлику од класичних генерализованих линеарних модела, код GAMLSS приступа сваки од наведених параметара може се моделовати засебним, тзв. функцијама везе:

$$g_1(\mu) = \eta_1, \quad g_2(\sigma) = \eta_2, \quad g_3(\nu) = \eta_3, \quad g_4(\tau) = \eta_4,$$

при чему је:

$$\eta_k = g_k(\theta_k) = X_k \beta_k + \sum_j f_{jk}(x_{jk}), \quad k = 1, 2, 3, 4. \quad (2.3)$$

У једнакости (2.3) матрица  $X_k$  представља матрицу улазних (независних) променљивих,  $\beta_k$  је вектор непознатих параметара, док су  $f_{jk}(x_{jk})$  функције везе које омогућавају описивање нелинеарних зависности између параметара расподеле и посматраних променљивих.

Овакав приступ омогућава да се не моделира само очекивана вредност случајне променљиве, већ и њена варијабилност, асиметрија и спљоштеност, што представља значајну предност приликом анализе форензичких података, код којих су наведене особине веома често изражене. Параметри изабране расподеле најчешће се процењују методом максималне веродостојности, која је укратко описана у наставку (за више детаља видети, рецимо, Joksimović & Stojanović, 2026).

Нека је  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  случајан узорак из расподеле  $f(x; \theta)$ . Тада је функција веродостојности дата као:

$$L(\theta) = \prod_{k=1}^n f(x_k; \theta),$$

док логаритамска функција веродостојности има облик:

$$\ell(\theta) = \ln L(\theta) = \sum_{k=1}^n \ln f(x_k; \theta).$$

Оцене параметара методом максималне веродостојности (енгл. *Maximum Likelihood Estimation – MLE*) добијају се решавањем система једначина:

$$\frac{\partial \ell(\theta)}{\partial \theta_j} = 0, \quad j = 1, \dots, p.$$

У пракси, због сложености већине расподела које се користе у оквиру GAMLSS приступа, овај поступак се реализује применом итеративних нумеричких алгоритама максималне веродостојности. У овој студији су параметри оцењени коришћењем тзв. методе максималне веродостојности са „кажњавањем” (Mutoh et al., 2026), док је оптимизација извршена комбинацијом Њутн-Рафсоновог и Фишеровог (скор) алгорита (Longford, 1987). Притом је за глатке функције такође коришћен тзв. алгоритам повратног уклапања, уз итеративно подешавање параметарских и непараметарских компоненти (Hastie & Tibshirani, 2014). Целокупан поступак оцењивања је софтверски реализован коришћењем тзв. пакета „*gamlss.dist*” у статистичком софтверу „R” (Rigby et al., 2019), чиме се добија потпун алгоритам оцењивања параметара GAMLSS модела.

## 2.3. Технике машинског учења

Савремени информациони системи свакодневно генеришу огромне количине података који потичу из различитих извора, као што су сензорске мреже, базе података, видео-надзор, информациони системи јавне безбедности, телекомуникациони системи и сл. У области заштите од пожара посебно су значајни подаци који се прикупљају током интервенција ватрогасно-спасилачких јединица, форензичких увиђаја, медицинских извештаја, метеоролошких мерења, географских информационих система и демографских база података. Као последица тога, савремена анализа пожара све се мање заснива искључиво на појединачним случајевима, а све више на анализи великих скупова реалних података (енгл. *Big Data*), чија величина и сложеност превазилазе могућности примене класичних статистичких метода.

Од посебне важности у анализи реалних података јесу теоријско-предикативни модели који користе различите облике *машинског учења* и *технике вештачке интелигенције*. Типичан облик таквих техника јесте тзв. рударење података (енгл. *Data Mining – DM*), као интердисциплинарна област која обухвата развој и примену алгоритама за откривање претходно непознатих, статистички значајних и практично употребљивих образаца у великим скуповима података. DM представља једну од кључних фаза ширег процеса откривања знања из база података (енгл. *Knowledge Discovery in Databases – KDD*), чији је циљ трансформација сирових података у корисне информације и знање које може подржати процес доношења одлука.

Класичан KDD процес обухвата више међусобно повезаних фаза: прикупљање података, њихову припрему и претпроцесирање, избор релевантних атрибута, примену алгоритама рударења података, евалуацију добијених резултата и њихову интерпретацију (за више детаља, видети, рецимо Stojanović, 2022). Иако је машинско учење највидљивији део овог процеса, квалитет добијених резултата у великој мери зависи од исправне припреме и квалитета улазних података. DM има посебан значај јер не захтева унапред дефинисане претпоставке о међусобним односима између променљивих. За разлику од класичних статистичких метода, код којих се најчешће тестирају претходно постављене хипотезе, алгоритми машинског учења омогућавају аутоматско откривање закономерности, зависности и скривених структура које нису непосредно уочљиве применом традиционалних аналитичких поступака. Управо због тога ове методе последњих година имају све ширу примену у области безбедности, форензике, медицине, финансија, телекомуникација и индустрије.

У области анализе пожара машинско учење омогућава идентификацију фактора који утичу на настанак и развој пожара, откривање образаца повезаних са повређивањем и страдањем лица, анализу просторне и временске динамике инцидената, као и процену ризика за различите категорије објеката и становништва. Тако добијене информације представљају важну основу за планирање превентивних мера, оптимизацију оперативног деловања ватрогасно-спасилачких јединица и развој интелигентних система за подршку одлучивању. У новије време, све је присутнија примена DM-а и различитих других техника машинског учења у анализи података и развоју посебних теоријских модела за превенцију пожара. Тако су, на пример, (Madaio et al., 2016) развили такозвани *Firebird* оквир како би идентификовали и одредили приоритет пожара у комерцијалним зградама, док (Choi et al., 2025) врше предвиђање ризика од шумских пожара користећи *Google Earth Engine* и упоређују различите моделе машинског учења. Примену оперативних статистичких метода у интервенцијама гашења пожара из ваздуха дали су (Sherry & Chaudhari, 2025), док (Gündüz et al., 2025) користе машинско учење за откривање изгорелих подручја након пожара. Треба напоменути да је општи увод у примену метода машинског учења у анализи шумских пожара дат и у бројним радовима различитих аутора (нпр. Abid, 2021; Alkhatib et al., 2023; Rubí et al., 2023). Поред њих, у неколико сродних радова (нпр., Jain et al., 2020; McNorton et al., 2024; Sun et al., 2021; Wood, 2021)), представљене су примене различитих модела машинског учења, који се и данас унапређују и развијају.

У зависности од циља анализе, технике машинског учења могу се поделити у више основних категорија. Најзначајније међу њима су *кластеризација*, чији је циљ груписање сличних објеката без претходно познатих класа, *класификација*, која омогућава изградњу модела за предвиђање припадности унапред дефинисаним категоријама, и *откривање асоцијативних правила*, чији је циљ идентификација честих комбинација атрибута и скривених зависности између њих. Управо ове три групе метода представљају основу аналитичког оквира примењеног у овој докторској дисертацији, а њихови главни теоријски аспекти укратко су представљени у наставку.

### 2.3.1. Сегментација (кластеризација) података

*Кластеризација* је процес откривања група (кластера) сличних узорака у посматраним подацима. То је облик тзв. *ненадгледаног учења* који укључује претраживање улазне базе података за идентично генерисане поделе између појединачних података. Једноставно речено, кластеризација дели податке у мање логичке групе, тзв. *кластере*, тако да су

објекти унутар истог кластера слични једни другима, док се објекти из различитих кластера међусобно разликују. Кластери се често користе за откривање промена или одступања, са примарним циљем проналажења појединачних података који се не уклапају у утврђене норме (видети, нпр., Xu & Wunsch, 2005).

Разматрањем укупног броја повреда и смртних случајева као две нумеричке променљиве, кластерска анализа пожара у Републици Србији у оквиру ове студије омогућава идентификовање различитих врста инцидената и препознавање образаца ризика који нису очигледни при једноставном прегледу података. Теоријске основе коришћених метода и техника кластеризације укратко су описане у наставку.

#### 2.3.1.1. Elbow метод

Метод „лакти” (енгл. *Elbow Method*) представља технику за одређивање оптималног броја кластера, који ће у даљем тексту бити означен са симболом  $K$ , у различитим алгоритмима кластеризације. Сам метод заснива се на праћењу тзв. *функције трошкова*, односно суме квадрата одступања тачака од одговарајућег центра кластера (енгл. *Within-Cluster Sum of Squares – WCSS*):

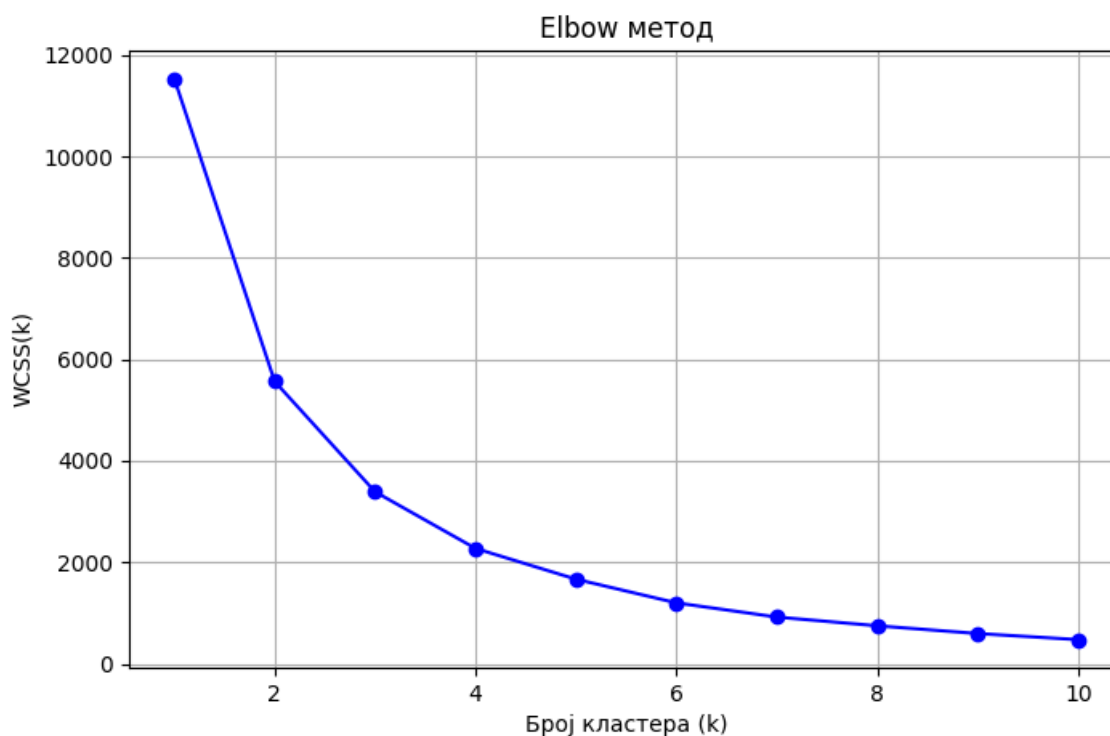
$$WCSS(k) = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} \|x - \mu_i\|^2,$$

где је  $C_i$   $i$ -ти кластер, а  $\mu_i$  његов центроид (центар кластера).

Повећањем броја кластера ( $k$ ), вредност  $WCSS(k)$  опада, јер кластери постају компактнији. Међутим, смањење вредности  $WCSS$  није равномерно, односно након одређене вредности  $k$  добит од „додавања” нових кластера није од значаја. На слици 2.2 приказан је график функције  $WCSS(k)$ , где се број кластера  $k$  налази на  $x$ -оси, а вредности саме функције на  $y$ -оси. За оптималан број кластера ( $K$ ) узима се тада „тачка прелома”, за коју важи:

$$K = \underset{k}{\operatorname{argmin}} \{ WCSS(k) \},$$

тј. за коју се појављује нагло смањење, а затим „заравњивање”  $WCSS(k)$  вредности.



Слика 2.2. Графички приказ *Elbow* методе за налажење оптималног броја кластера

Треба истаћи да је важно ограничење *Elbow* методе пре свега њена визуелна и субјективна природа, јер тзв. „лакат” није увек јасно дефинисан, нарочито код података са комплексном структуром. Због тога се овај метод често комбинује са другим методима, односно техникама и критеријумима који омогућавају прецизније налажење оптималног броја кластера. Основни циљ ових метода јесте проналажење „компромиса” између компактности и гранулираности самих кластера, које представљају њихове најважније, али дијаметрално супротне особине. У наставку ће управо бити речи о једном таквом методу избора оптималног броја кластера.

#### 2.3.1.2. *Silhouette Score (SS) метод*

*Silhouette Score (SS) метод* представља најчешће коришћену технику избора оптималног броја кластера, која уједно квантитативно изражава, тј. „мери” и сам квалитет кластеризације. За сваки елемент скупа  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , које обично интерпретирамо као тачке, *SS* метод најпре израчунава следеће две вредности:

- $a(i)$  представља просечну удаљеност тачке  $x_i$  од свих осталих тачака унутар њеног кластера (компактност),
- $b(i)$  је просечна удаљеност до тачака у најближем другом кластеру (сепарабилност).

Користећи ове вредности, за сваку тачку  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, n$  израчунава се тзв. „силуетна” вредност  $S(i)$  на следећи начин:

$$S(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} = \begin{cases} 1 - \frac{a(i)}{b(i)}, & a(i) < b(i) \\ 0, & a(i) = b(i) \\ \frac{b(i)}{a(i)} - 1, & a(i) > b(i). \end{cases}$$

Након тога, збирна (агрегатна)  $SS$ -вредност се израчунава као просек вредности  $S(i)$ , добијених за све  $x_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ . Треба напоменути да се, према претходној једнакости, све  $SS$ -вредности крећу интервалу од  $-1$  до  $1$ , при чему веће вредности (тј. вредности ближе јединици) указују на боље груписање података и обратно. Стога се, слично претходном Elbow методу, овај метод обично користи тако што се  $SS$ -вредности израчунавају за различите вредности број кластера  $k = 1, 2, \dots$ . Затим се као оптимална вредност броја кластера узима она вредност за коју је  $SS$ -вредност или највећа или се стабилизује, односно за коју се добија такозвани „ $SS$  плато”.

#### 2.3.1.3. *K-Means* алгоритам

За кластеризацију података користи се већи број алгоритама, а један од најчешће коришћених познат је као *K-Means* алгоритам. Овај алгоритам проналази одређени (унапред дефинисани) број од  $k$  кластера који су представљени раније поменутим центроидима (центрима кластера). На основу података и датог броја почетних центроида,  $K$ -means алгоритам генерише кластере, при чему се може унапред одредити број кластера, максималан број итерација, максималан број корака оптимизације, итд. Сам алгоритам је веома једноставан и састоји се од следећих корака:

1. *корак (иницијализација)*: Насумично се бира  $K$  почетних тачака за центроиде  $c_1, c_2, \dots, c_K$ .
2. *корак (додељивање)*: Формира се  $K$  кластера тако што се свака тачка  $x_i \in X$  додели кластеру чији јој је центроид најближи.
3. *корак (ажурирање)*: Израчунавају се нови центроиди као средишње тачке у сваком кластеру.
4. *корак (понављање)*: Кораци 2 и 3 се понављају све док има промена у центроидима.

Треба нагласити да је  $K$ -Means алгоритам ефикасан за велике скупове података, под претпоставком да су кластери сферног (елипсастог) облика. То значи да је сам алгоритам осетљив на тзв. изоловане податке (енгл. *outliers*), што представља његову важну потенцијалну слабост.

#### 2.3.1.4. Агрегативно-хијерархијска (АН) кластеризација

За разлику од претходног, *агрегативно-хијерархијски* (енгл. *Agglomerative-Hierarchical – АН*) алгоритам кластеризације користи тзв. приступ „одоздо нагоре”. То значи да почиње тако што сваку тачку датог скупа  $X$  посматра као засебан кластер, док се у свакој наредној итерацији два најближа кластера „спајају” све док не остане жељени број кластера. Прецизније речено, алгоритам се може описати кроз следећи низ корака (етапа):

1. *корак*: Бира се почетни скуп од  $n$  кластера, тј. свака тачка скупа  $X$  јесте кластер.
2. *корак*: Израчунају се растојања између свих кластера.
3. *корак*: Спајају се два најближа кластера у нови кластер.
4. *корак*: Поново се израчунава растојање између кластера.
5. *корак*: Понављају се кораци 3 и 4 све док се не формира задати број кластера.

Основна предност овог поступка јесте у томе што није потребно претходно дефинисати број кластера, док се једноставна визуелизација омогућава путем тзв. дендрограма (Xu & Wunsch, 2005). Ипак, са рачунске тачке гледишта, *АН* алгоритам је знатно захтевнији од претходног *K-Means* алгоритма.

#### 2.3.2. Класификација података (стабла одлучивања)

Као што је већ истакнуто раније, једна од главних идеја ове студије јесте анализа узрочно-последичних веза у пожарима, чиме се омогућава идентификација кључних фактора који утичу на најозбиљније исходе ових догађаја, односно повређивање или смртне исходе. Овде су као основни класификациони модели коришћена тзв. *стабла одлучивања*, која користе разне атрибуте (као што су узрок пожара, време и локација инцидента), на основу којих се могу открити везе између различитих врста пожара и класификовати случајеви у којима се јављају повреде и/или људске жртве. У наставку су дате основне идеје и принципе класификације, односно формирања стабала одлучивања.

##### 2.3.2.1. Основни принципи класификације

Класификација представља *технику надгледаног учења* у којој се циљна (зависна) променљива предвиђа на основу познатих улазних променљивих (предиктора, атрибута или независних променљивих). Једна од најчешће коришћених метода за класификацију јесте техника *стабала одлучивања*, која представља користан, али истовремено и веома једноставан графички алат за класификацију, предвиђање и подршку одлучивању (De Ville, 2013; Myles et al., 2004). Стабла одлучивања се најчешће формирају над великим и

високо корелисаним скуповима података тако што се они разлажу на мање скупове коришћењем одређеног скупа правила.

На тај начин, свако стабло одлучивања јесте тзв. *класификатор*, који представља функцију класификације у облику стабла, односно хијерархијски, тако да чворови на врху стабла имају највећи утицај на класификацију. Тако стабла одлучивања моделују процес доношења одлука (од „корена” до „листова” стабла), при чему се подаци „деле” преко сваког чвора на основу једног атрибута, а сваки „лист” стабла садржи специфично предвиђање (класу). Прецизније речено, конструкција сваког стабла одлучивања подразумева примену следећа два принципа:

- Избор најбољег атрибута за дељење (на основу ентропије или статистичких тестова).
- Гранање и наставак дељења док се не испуни критеријум заустављања (када су сви случајеви унутар исте класе или када се достигне максимална дубина стабла).

#### 2.3.2.2. CHAID алгоритам

CHAID (енгл. *Chi-squared Automatic Interaction Detector*) је метод анализе одлучивања која користи статистичке критеријуме, тачније хи-квадрат тест независности (видети, рецимо, Joksimović & Stojanović, 2026), за поделу података у хомогене групе. У основи, CHAID алгоритам састоји се од неколико статистичких поступака, који се примењују у више корака, почевши од избора атрибута за гранање, преко тестирања његове зависности од циљне променљиве, до формирања чворова и грана. Први корак у изградњи CHAID стабла је избор предиктора ( $X$ ) који има најјачу статистичку повезаност са циљном променљивом ( $Y$ ). У ту сврху користи се познати хи-квадрат тест независности, тј.  $\chi^2$  статистика:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \frac{(f_{ij} - f'_{ij})^2}{f'_{ij}},$$

где  $r$  и  $s$  представљају број случајева променљивих  $X$  и  $Y$  респективно, док су  $f_{ij}$  посматране (емпиријске), а  $f'_{ij}$  теоријске (очекиване) вредности за сваки случај (за више детаља видети, нпр., Ritschard, 2013).

Треба истаћи да  $\chi^2$  статистика, дефинисана претходном једнакошћу, омогућава израчунавање тзв.  $p$ -вредности, која представља вероватноћу погрешног одбацивања хипотезе о независности променљивих  $X, Y$ . Атрибут  $X$  са најнижом  $p$ -вредношћу биће изабран за поделу чвора, док се, с друге стране, чвор не дели ако  $X$  нема статистички значајан однос са зависном променљивом  $Y$ . Ово омогућава да се подела врши само када

постоји стварна статистичка основа за то, чиме се избегава прекомерна сегментација података.

Важна карактеристика CHAID алгоритма је могућност спајања сличних категорија независних променљивих. Ако неке вредности (случајеви или категорије) независне променљиве  $X$  не показују статистички значајне разлике у поређењу са зависном променљивом  $Y$ , оне се спајају. Ово се такође имплементира применом  $\chi^2$  теста за сваки могући пар категорија. Прецизније, ако  $p$ -вредност између две категорије прелази дати праг спајања ( $\alpha$ ), те категорије се спајају у једну. Овај процес се понавља док се не добије скуп категорија које се статистички значајно разликују једна од друге. На овај начин, број грана које излазе из једног чвора може бити већи од две, што резултира небинарним стаблом. Ово представља значајну предност CHAID алгоритма у односу на неке друге алгоритме, јер омогућава природнију и интерпретабилнију класификацију података.

### 2.3.3. Асоцијативно откривање знања

Једна од најзначајнијих техника машинског учења јесте *откривање асоцијативних правила* (енгл. *Association Rule Mining – ARM*), чији је циљ идентификација честих образаца и зависности између атрибута у великим скуповима података. За разлику од класификационих метода, код којих је циљ предвиђање вредности циљне променљиве, алгоритми за откривање асоцијативних правила припадају групи ненадгледаних метода машинског учења који омогућавају проналажење комбинација особина које се статистички значајно јављају заједно, без претходно дефинисаних претпоставки о њиховој међусобној повезаности.

У области форензике и заштите од пожара овај приступ има посебан значај, јер омогућава откривање сложених зависности између више фактора који утичу на настанак и последице пожара. Тако је могуће идентификовати честе комбинације карактеристика, као што су старосна структура повређених или страдалих лица, тип објекта, годишње доба, доба дана, начин настанка пожара или степен тежине последица. Добијена правила не представљају узрочно-последичне односе, већ статистички потврђене обрасце који могу послужити као основа за процену ризика, планирање превентивних мера и подршку процесу доношења одлука.

Нека је  $I = \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$  коначан скуп атрибута (особина, ставки или догађаја) унутар посматраног скупа података, док је  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  скуп трансакција, при чему свака трансакција представља подскуп скупа  $I$ , односно  $t_k \subseteq I$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ . *Асоцијативно правило* представља импликацију облика  $A \rightarrow B$ , где су  $A$  и  $B$  дисјунктни подскупови

скупа атрибута, тј. скупови са особинама  $A \subset I$ ,  $B \subset I$ ,  $A \cap B = \emptyset$ . Скуп  $A$  назива се *претходник* (енгл. *antecedent*), док скуп  $B$  представља *последницу* (енгл. *consequent*) датог асоцијативног правила. Интуитивно, правило  $A \rightarrow B$  указује да се, уколико су у трансакцији присутни сви елементи скупа  $A$ , са одређеним степеном поузданости може очекивати и појава елемената скупа  $B$ .

Практична примена асоцијативних правила заснива се на алгоритмима за претраживање честих скупова особина (атрибута или ставки), међу којима је најпознатији *Apriori алгоритам*. Основна идеја овог алгоритма заснива се на тзв. *Apriori својству*, према коме сваки подскуп честог скупа такође мора бити чест. Ово својство омогућава значајно смањење простора претраге, јер се велики број кандидатских комбинација елиминише већ у раним фазама алгоритма, што доводи до ефикаснијег откривања асоцијативних правила и код веома великих база података. Сам Apriori алгоритам функционише тако што се у низу итерација идентификују чести скупови елемената, који задовољавају унапред дефинисане услове, а затим се генеришу правила асоцијација облика  $A \rightarrow B$ . Квалитет и значај добијених асоцијативних правила процењује се применом више статистичких мера, тзв. *метрика*, при чему неке од најчешћих, које су коришћене и у овој студији, наведене у наставку (за више детаља видети, нпр., (Agrawal et al., 1993)):

1) *Подршка* (енгл. *Support*) представља релативну учесталост, тј. вероватноћу појављивања скупа ставки  $A \cup B$  у свим трансакцијама и дефинише се изразом:

$$supp(A \rightarrow B) = \frac{n(A \cup B)}{n} = P(A \cup B).$$

Овде је  $n(A \cup B)$  укупан број трансакција које садрже истовремено све елементе скупова  $A$  и  $B$ , док је  $n = n(T)$  укупан број трансакција. На тај начин, подршка представља вероватноћу реализације догађаја  $A \cup B$ . Додатно, подршка се може дефинисати и над једним скупом атрибута  $A \subset I$ , изразом:

$$supp(A) = \frac{n(A)}{n} = P(A).$$

2) *Поузданост* (енгл. *Confidence*) представља условну вероватноћу да ће се појавити последица  $B$ , уколико је њен претходник скуп  $A$ :

$$conf(A \rightarrow B) = \frac{supp(A \rightarrow B)}{supp(A)} = P(B | A).$$

Дакле, што је вредност поузданости већа, то је вероватније да ће се последица ( $B$ ) асоцијативног правила  $A \rightarrow B$  јавити након што је испуњен претходник ( $A$ ).

3) *Степен подизања* (енгл. *Lift*) процењује ниво статистичке зависности између претходника и последице, а дефинише се као однос:

$$lift(A \rightarrow B) = \frac{conf(A \rightarrow B)}{supp(B)} = \frac{P(B | A)}{P(B)}.$$

Ова мера се интерпретира на следећи начин:

- ако је  $lift(A \rightarrow B) > 1$ , онда постоји позитивна (јака) статистичка повезаност између скупова  $A$  и  $B$ ;
- ако је  $lift(A \rightarrow B) = 1$ , скупови  $A$  и  $B$  су статистички независни;
- ако је  $lift(A \rightarrow B) < 1$ , постоји негативна зависност, односно појава једног скупа умањује вероватноћу појаве другог.

4) *Одступање од независности* (енгл. *Leverage*) представља апсолутно одступање од статистичке независности претходника и последице, а дефинише се као разлика између посматране и очекиване учесталости појављивања датог правила:

$$lev(A \rightarrow B) = supp(A \rightarrow B) - supp(A) \cdot supp(B).$$

На овај начин, мера одступања од независности омогућава једноставнију процену практичног значаја добијених резултата.

5) *Убедљивост* (енгл. *Conviction*) је мера поузданости правила  $A \rightarrow B$ , која „кажњава” случајеве у којима се догађај  $A$  дешава без догађаја  $B$ :

$$conv(A \rightarrow B) = \frac{1 - supp(B)}{1 - conf(A \rightarrow B)}.$$

Дакле, ова мера процењује колико је правило  $A \rightarrow B$  убедљиво у односу на претпоставку статистичке независности. Веће вредности убедљивости указују на то да постоји јака импликација између претходника и последице, док вредност једнака јединици указује на независност посматраних скупова.

Комбинованом применом претходно наведених мера могуће је издвојити правила која су истовремено довољно честа, статистички поуздана и практично значајна. Због тога се у савременим истраживањима ретко користи само једна мера, већ се целокупна анализа заснива на њиховој заједничкој интерпретацији. У овој дисертацији асоцијативна правила примењена су ради идентификације најзначајнијих комбинација фактора повезаних са настанком и последицама пожара. На тај начин омогућено је откривање скривених образаца који нису били непосредно уочљиви применом класичних статистичких метода,

чиме је добијен додатни увид у структуру анализираних података и створена основа за формулисање препорука у области управљања ризицима и планирања превентивних мера.

## 2.4. Просторна анализа применом софтверског алата ГИС

Просторна анализа пожарних догађаја омогућава сагледавање њихове географске расподеле, идентификацију подручја са већом концентрацијом и утврђивање специфичних просторних образаца. У овом истраживању просторна анализа обухватила је пожарне догађаје са повређеним и погинулим лицима, при чему је посебна пажња усмерена на просторну расподелу догађаја код којих су цигарете идентификоване као узрок настанка пожара. Укупно је анализирано 5.769 пожарних догађаја, од којих су код 272 догађаја цигарете идентификоване као узрок настанка пожара. За потребе просторне анализе и картографске визуелизације примењени су географски информациони системи – ГИС (Longley et al., 2015; Vranić & Mišić, 2024).

QGIS представља географски информациони систем отвореног кода намењен управљању, обради, анализи и визуелизацији просторних података (QGIS.org, 2024). Омогућава рад са различитим типовима просторних података, укључујући векторске и растерске формате, као и примену различитих аналитичких поступака и израду тематских карата. У овом истраживању QGIS је коришћен за припрему просторних података и визуелизацију просторне расподеле анализираних пожарних догађаја. Примена ГИС-а омогућава повезивање просторне компоненте података са њиховим атрибутивним карактеристикама, чиме се ствара основа за анализу просторне расподеле и међусобних односа посматраних појава. У контексту овог истраживања, такав приступ омогућава повезивање броја пожарних догађаја са њиховом припадношћу одређеним просторним јединицама и њихово картографско поређење.

За приказ просторне расподеле примењена је тзв. хороплет метода, којом се вредности посматране статистичке променљиве приказују различитим интензитетима боја по дефинисаним географским јединицама (Bivand et al., 2013; Fischer & Getis, 2010). На овај начин могу се визуелно уочити просторне разлике у вредностима посматране променљиве и издвојити подручја са релативно већим или мањим бројем регистрованих догађаја. Избор начина класификације и картографске симболизације има значајну улогу у визуелној интерпретацији просторних података, јер начин приказивања може утицати на уочавање и тумачење просторних образаца (Brewer, 1994).

У овом истраживању хороплет метода је примењена на 5.769 пожарних догађаја са повређеним и погинулим лицима, као и на издвојени подскуп од 272 догађаја код којих

цигарете идентификоване као узрок настанка пожара. На тај начин омогућено је поређење просторне расподеле свих анализираних догађаја са просторном расподелом догађаја специфичних за посматрани узрок. Картографски приказ просторне расподеле представља полазну основу за даљу анализу, али сам визуелни образац не омогућава утврђивање да ли су уочене просторне концентрације последица систематске просторне повезаности или случајне варијације. Просторна статистика омогућава укључивање просторних односа између посматраних јединица у статистичку анализу и испитивање постојања просторне аутокорељације (Abdulhamedh, 2017; Anselin, 1988). Због тога је картографска анализа допуњена просторно-статистичким поступцима.

За потребе просторно-статистичке анализе коришћен је софтвер GeoDa, који омогућава примену глобалних и локалних мера просторне аутокорељације, као и графички приказ добијених просторних образаца (Abdulhamedh, 2017; Anselin, 2005; Anselin et al., 2006). Просторна аутокорељација представља степен просторне повезаности вредности посматране променљиве између просторних јединица које су међусобно повезане дефинисаним просторним односима. За процену глобалног степена просторне аутокорељације коришћен је глобални Моранов индекс, којим се испитује да ли просторне јединице са сличним или различитим вредностима показују тенденцију просторног груписања.

Глобални Моранов индекс дефинише се изразом:

$$I = \frac{n}{S_0} \cdot \frac{\sum_i^n \sum_j^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2},$$

где је  $n$  број просторних јединица,  $S_0$  збир елемената просторних тежина,  $x_i$  вредност посматране променљиве у просторној јединици  $i$ ,  $x_j$  вредност посматране променљиве у просторној јединици  $j$ ,  $\bar{x}$  средња вредност посматране променљиве, док је  $w_{ij}$  елемент просторних тежина који описује просторни однос између просторних јединица  $i$  и  $j$ . Позитивна просторна аутокорељација указује на тенденцију просторног груписања јединица са сличним вредностима, док негативна просторна аутокорељација указује на тенденцију просторног повезивања јединица са различитим вредностима. Уочена вредност глобалног Морановог индекса тумачи се у односу на нулту хипотезу о одсуству просторне аутокорељације и резултат теста статистичке значајности.

Глобални Моранов индекс даје информацију о постојању просторног обрасца на нивоу целокупног посматраног подручја, али не показује које конкретне просторне јединице доприносе уоченом обрасцу. Због тога је примењена анализа локалних

индикатора просторне асоцијације (енгл. *Local Indicators of Spatial Association – LISA*). LISA представља класу локалних показатеља просторне асоцијације која омогућава испитивање просторних образаца на нивоу појединачних просторних јединица и идентификацију локалних кластера и просторних аномалија. Локални показатељи омогућавају и повезивање локалних просторних образаца са глобалним показатељем просторне аутокорелације (Anselin, 1995; Anselin et al., 2006).

За локалну анализу, коришћен је такође и локални Моранов индекс  $I_i$ , који се за сваку просторну јединицу  $i$  може изразити као:

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S_i^2} \sum_{j=1}^n w_{ij}(x_j - \bar{x}),$$

где је  $x_i$  вредност посматране променљиве у јединици  $i$ ,  $\bar{x}$  представља средњу вредност посматране променљиве,  $w_{ij}$  је елемент просторних тежина који описује просторни однос између јединица  $i, j$ , док  $S_i^2$  представља дисперзију, која се дефинише се изразом:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}{n - 1} - \bar{x}^2.$$

Тумачење локалног Морановог индекса заснива се на односу вредности посматране просторне јединице и вредности њеног просторног окружења. На основу тог односа издвајају се четири основна типа локалне просторне асоцијације: Високо–Високо, Ниско–Ниско, Високо–Ниско и Ниско–Високо. Високо–Високо образац означава просторну јединицу са високом вредношћу која је окружена јединицама са високим вредностима, док Ниско–Ниско означава јединицу са ниском вредношћу окружену јединицама са ниским вредностима. Високо–Ниско означава високу вредност окружену ниским вредностима, док Ниско–Високо означава ниску вредност окружену високим вредностима. Високо–Ниско и Ниско–Високо обрасци тумаче се као просторне аномалије, односно просторне јединице чије вредности одступају од вредности у њиховом непосредном просторном окружењу (Abdulhafedh, 2017; Anselin, 1995; Fischer & Getis, 2010)

У овом истраживању, LISA анализа примењена је на оба посматрана скупа података: на 5.769 пожарних догађаја са повређеним и погинулим лицима и на издвојених 272 догађаја код којих су цигарете идентификоване као узрок настанка пожара. На тај начин омогућено је испитивање и поређење локалних просторних образаца укупног анализираног скупа и просторних образаца догађаја специфичних за узрок повезан са цигаретама. Само идентификовање просторног обрасца није довољно за закључивање о његовој статистичкој значајности. Због тога се значајност локалних показатеља испитује поступком случајних пермутација, при чему се посматрана вредност локалног Морановог

индекса пореди са референтном расподелом добијеном случајним прераспоређивањем вредности посматране променљиве под нултом хипотезом о случајном просторном распореду (Abdulhafedh, 2017; Anselin et al., 2006). У овом истраживању примењено је 999 случајних пермутација, а статистички значајним сматрани су просторни обрасци за које је утврђено  $p \leq 0,05$  (Fischer & Getis, 2010).

Комбиновањем картографске визуелизације и просторно-статистичке анализе добијена је целовитија слика просторне расподеле анализираних пожарних догађаја. Хороплет карте омогућиле су приказ просторних разлика у броју догађаја, док су глобална и локална просторна аутокорејација омогућиле испитивање постојања и локализације просторних образаца (Bivand et al., 2013; Fischer & Getis, 2010). На овај начин створена је основа за идентификацију статистички значајних просторних кластера и просторних аномалија, како за укупно анализираних пожарних догађаја, тако и за догађаје код којих су цигарете идентификоване као узрок настанка пожара.

## **2.5. Пожари изазвани цигаретама и мере безбедности**

### **2.5.1. Пожари изазвани цигаретама**

Упаљена цигарета представља извор топлотне енергије који може бити довољан за иницирање процеса паљења појединих горивих материјала (SFPE Task Group on Fire Risk Assessment, 2023). Ризик од настанка пожара посебно је изражен у случају контакта цигарете са горивим материјалима присутним у домаћинствима, као што су ћебад, сунђери, различите врсте текстила и други материјали (Steen-Hansen & Storesund, 2023). Температура жара цигарете није константна величина, већ зависи од више фактора који утичу на процес сагоревања, као што су начин пушења, проток ваздуха и конструкција цигарете. Због тога се у литератури могу пронаћи различите вредности максималне температуре жара. Ли и сарадници измерили су температуре од око 800 °C (Li et al., 2014), док су Бицер и сарадници забележили температуре веће од 900 °C (Bitzer et al., 2020). На основу доступних истраживања може се закључити да се максимална температура жара цигарете током активног пушења најчешће креће у опсегу од 800 °C до 900 °C (Liu & Woodcock, 2002).

На иницирање пожара, поред температуре ужареног дела цигарете, утичу и услови њеног контакта са подлогом, укључујући трајање контакта и положај цигарете, као и услови струјања ваздуха и својства материјала подлоге. Начин контакта цигарете са подлогом одређује услове преноса топлоте, док струјање ваздуха утиче на довод

кисеоника и процес тињања. Истовремено, термичка и физичка својства подлоге утичу на њено загревање и на услове под којима може доћи до иницирања тињања или пламеног горења (Baker et al., 2016). Пожари изазвани неадекватним руковањем цигаретама представљају посебан безбедносни проблем, јер се процес тињања често одвија не приметно током дужег временског периода. Због тога се пожар неретко уочава тек у фази његовог значајнијег развоја. Током процеса тињања настају продукти сагоревања и токсични гасови који, у затвореном простору, могу достићи концентрације опасне по здравље и живот људи, чак и пре појаве отвореног пламена (DeNaan et al., 2012; Rein, 2016).

### 2.5.2. Безбедност од пожара и мере превенције

Полазећи од основа безбедности од пожара, посебан акценат ставља се на мере превенције чија је сврха смањење ризика од настанка пожара изазваних цигаретама, као и умањење ризика од повређивања и страдања људи. Са повећањем старосне доби расте и ризик од оваквих пожара (Runefors, 2023). Иако се применом одговарајућих безбедносних мера ризик може значајно смањити, његово потпуно елиминисање није могуће (Mlađan, 2024). Међу мерама усмереним на смањење ризика и последица пожара изазваних цигаретама посебно се издвајају употреба цигарета са својством самогасивости, употреба ватроотпорних материјала у домаћинству, као и коришћење система за рану детекцију пожара (Runefors, 2023). Коришћењем ватроотпорних материјала може се смањити ризик од настанка пожара у случају контакта цигарете са чаршавима, тапацираним намештајем или другим запаљивим материјалима. На тај начин смањује се брзина развоја пожара, као и вероватноћа настанка флешовера (Thompson, 2024).

Цигарете са својством самогасивости (*Reduced Ignition Propensity – RIP*) користе материјале и адитиве који омогућавају гашење цигарете након одређеног времена некоришћења (DeNaan et al., 2012). Иако њихова примена смањује вероватноћу настанка пожара, ризик није у потпуности елиминисан. У случају контакта са запаљивим материјалом или присуства струјања ваздуха, и даље постоји могућност настанка пожара. Стога, RIP цигарете представљају значајну превентивну меру, али не обезбеђују потпуну заштиту од пожара (DeNaan et al., 2012).

Савада и сарадници анализирали су могућност детекције тињајућег пожара насталог контактом упаљене цигарете и памучне тканине применом гасних сензора, при чему су резултати показали да је детекција могућа у року од приближно 30 s од почетка тињања. Ови налази указују на значај система за рану детекцију у спречавању развоја пожара и

смањењу ризика по људе и имовину (Sawada et al., 2008). Синергистичким деловањем самогасивих цигарета, ватроотпорних материјала и система за рану детекцију пожара могуће је значајно смањити вероватноћу настанка пожара изазваних цигаретама, као и ограничити њихово ширење и последице.

## 2.6. Форензичко утврђивање места настанка и узрока пожара

Утврђивање места настанка, развоја и узрока пожара представља сложен форензички процес у коме се подаци прикупљени на месту догађаја повезују са законитостима сагоревања, преноса топлоте, кретања дима и врелих гасова, вентилације и развоја пожара. Савремена истрага пожара не заснива се на једном изолованом трагу нити на интуитивном „читању” оштећења, већ на примени научне методе, реконструкцији догађаја и систематском тестирању могућих хипотеза (Lentini, 2018; *NFPA 921: Guide for Fire and Explosion Investigations*, 2024).

Основни циљ је да се, у границама расположивих података и трагова, утврде подручје настанка пожара, место или тачка настанка, први запаљени материјал, извор паљења, редослед развоја и ширења пожара и, када је то могуће, његов узрок. Уколико расположиви подаци не омогућавају научно поуздано разликовање конкурентних хипотеза, место настанка или узрок пожара морају остати неутврђени (Lentini, 2018; *NFPA 921: Guide for Fire and Explosion Investigations*, 2024).

У старијој стручној литератури поступци утврђивања места настанка пожара често су описивани као статичка и динамичка метода. Статичка метода полазила је првенствено од анализе трагова затечених на месту догађаја, док је динамичка метода подразумевала реконструкцију ширења пожара уназад ка месту његовог настанка. Ова подела и даље може имати дидактичку вредност, али се у савременој форензичкој пракси ова два приступа не посматрају као независне методе. Они представљају комплементарне делове јединственог, научно заснованог поступка реконструкције пожара (DeNaan et al., 2012; Lentini, 2018). Зато је погодније говорити о интегрисаној методологији која обухвата: документовање места догађаја, анализу образаца пожара, реконструкцију почетних услова, анализу вентилације и динамике пожара, испитивање могућих извора паљења, лабораторијска и друга специјалистичка испитивања, анализу сведочења, временску линију догађаја, као и тестирање алтернативних хипотеза (Lentini, 2018; *NFPA 921 : Guide for Fire and Explosion Investigations*, 2024).

Научна метода представља основни аналитички оквир савремене истраге пожара и експлозија. Она омогућава да се разликује оно што је само могуће или привидно уверљиво

од онога што је подржано проверљивим подацима и законима науке. Према Лентинију, истрага пожара сврстава се у историјске науке: догађај се не може поновити у потпуно истоветним условима, али се његов ток и узрок могу реконструисати комбиновањем података из прошлог догађаја са експерименталним подацима, прорачунима и научно провереним законитостима (Lentini, 2018). У том смислу, примена научне методе у истрази пожара представља систематичан и итеративан процес у којем се, од дефинисања проблема и прикупљања података, преко њихове анализе и доношења могућих објашњења, долази до тестирања хипотеза и формулисања стручно заснованог закључка. Овај процес може се приказати кроз следеће основне фазе:

1. *Дефинисање проблема.* Утврђују се питања на која истрага треба да пружи одговор: где је пожар започео, како се развијао и ширио, који је материјал први запаљен, који је извор паљења могао да делује на тај материјал и које су околности довеле до његовог паљења.
2. *Прикупљање и документовање података.* Подаци се прикупљају непосредним прегледом, мерењем, фотографисањем и снимањем, скицирањем, прикупљањем и очувањем физичких доказа, увидом у документацију, системе дојаве и видео-надзора, разговорима са сведоцима и учесницима интервенције, као и лабораторијским и другим специјалистичким испитивањима.
3. *Анализа података – индуктивно закључивање.* Прикупљени подаци анализирају се применом знања из динамике пожара, сагоревања, преноса топлоте, електротехнике, грађевинских конструкција, хемије и других релевантних области. На основу појединачних запажања утврђују се односи и обрасци који могу објаснити ток догађаја.
4. *Формулисање радних хипотеза.* Формира се једна или више проверљивих хипотеза о подручју и месту настанка, првом гориву, извору паљења и механизму ширења пожара. Хипотеза мора бити физички могућа и у складу са расположивим чињеницама и научним принципима.
5. *Тестирање хипотеза – дедуктивно закључивање.* За сваку хипотезу изводе се очекиване последице и упоређују са стварно утврђеним траговима и подацима. Тестирање може бити когнитивно, аналитичко, експериментално или моделско, али мора омогућити да се хипотеза подвргне покушају оповргавања, а не само тражењу података који је потврђују.
6. *Избор коначне хипотезе и закључка.* Коначни закључак прихвата се само ако је хипотеза у складу са укупношћу поузданих података и ако су разумне алтернативе

испитане. Ако две или више хипотеза остају подједнако могуће, стручно исправан закључак је да је исход „неутврђено” (Lentini, 2018; Mlađan, 2009; *NFPA 921 : Guide for Fire and Explosion Investigations*, 2024; *NFPA 1033, Standard for professional qualifications for fire investigator*, 2021).

Утврђивање места настанка спроводи се поступним сужењем простора истраживања од објекта и просторије у којој је пожар започео, преко подручја настанка, до најмањег простора који расположиви подаци поуздано подржавају као место почетног паљења. Претерано сужење подручја настанка није оправдано ако су трагови значајно измењени услед потпуно развијеног пожаром, урушавања, интервенције или вентилационих ефеката (Lentini, 2018; *NFPA 921: Guide for Fire and Explosion Investigations*, 2024). Приликом одређивања места настанка анализирају се обрасци пожара (*fire patterns*), термичка оштећења и њихов интензитет, насlage дима и чађи, карбонизација и калцинација, заштићене површине, положај горивих материјала, електрични трагови, стање система заштите од пожара, положај врата и прозора, вентилациони токови, изјаве сведока, активности ватрогасаца и други временски подаци (DeHaan et al., 2012; Lentini, 2018; *NFPA 921 : Guide for Fire and Explosion Investigations*, 2024).

Обрасци пожара су видљиви или мерљиви ефекти који остају после пожара. Могу настати услед непосредног дејства пламена и пожарног стуба (узлазног пожарног тока - *fire plume*), топлотног зрачења, контакта са слојем врелих гасова, ужареним материјалом или услед локалних токова ваздуха. Већина образаца остаје на дводимензионалним површинама, иако их ствара пожар као тродимензионалан процес који се непрекидно мења током времена (Drysdale, 2011; Lentini, 2018; Quintiere, 2017). У фази пре флешовера могу настати карактеристични трагови пожарног стуба – троугласти, стубасти, V- и U-обрасци и радијални трагови на плафону. Најраније поуздано идентификовани образац пожарног стуба може указивати на близину места настанка, али се касније настали обрасци могу преклапати са претходнима и делимично их прикрити (Lentini, 2018).

Код пожара у затвореном простору неопходно је најпре утврдити да ли је простор био потпуно захваћен пожаром. Пре флешовера пожар је најчешће ограничен (контролисан) горивим материјалом, јер у просторији још има довољно кисеоника, па његов интензитет и развој првенствено зависе од количине, врсте, распореда и брзине укључивања горивог материјала у пожар. После флешовера и потпуног захватања простора пожар често постаје ограничен (контролисан) вентилацијом: расположивог горива има довољно, али интензитет и место пламеног сагоревања све више зависе од количине и путева дотока кисеоника кроз врата, прозоре и друге отворе. У таквим условима пламено сагоревање на

првобитном месту настанка може ослабити или престати, док се интензивно сагоревање може успоставити у подручјима са повољнијим дотоком свежег ваздуха, нарочито у близини вентилационих отвора (Drysdale, 2011; Lentini, 2018; Quintiere, 2017).

Због тога подручје најинтензивније карбонизације, најнижег сагоревања или највећег термичког оштећења није нужно место настанка пожара. Вентилационо генерисани обрасци могу бити V-облика и визуелно личити на трагове пожарног стуба или на трагове који су се у старијој пракси приписивали просутим запаљивим течностима. Савремена литература зато захтева да се вентилација анализира пре него што се таквим траговима припише значење за одређивање места настанка (Lentini, 2018; *NFPA 921: Guide for Fire and Explosion Investigations*, 2024). Посебно је непоуздано механички примењивати правила типа „најниже и најдубље оштећење показује место настанка”. Експериментална испитивања описана код Лентинија показала су да после неколико минута потпуно развијеног, вентилационо контролисаног пожара обучени форензичари могу погрешно одредити подручје настанка управо због образаца које је створила вентилација (Lentini, 2018).

Реконструкција пожара подразумева, колико је практично могуће, успостављање почетног распореда садржаја и конструктивних елемената и утврђивање вероватног временског и просторног редоследа догађаја. Овај поступак представља савременији и шири облик онога што је у традиционалној литератури називано динамичком методом (DeNaan et al., 2012; Icove & DeNaan, 2009; Lentini, 2018). При реконструкцији се разматрају: почетни услови, положај горивих материјала, могући извори паљења, геометрија простора, положај и стање отвора, развој пожарног стуба и слоја врелих гасова, пренос топлоте, укључивање нових горивих пакета, могући флешовер, прелаз у вентилационо контролисан режим, ширење пожара у друге просторе, урушавање и утицај активности гашења. За реконструкцију је посебно значајна брзина ослобађања топлоте (*Heat Release Rate - HRR*), јер ток пожара не одређује само укупна енергија горивог материјала, већ пре свега брзина којом се та енергија ослобађа. Конфигурација горивог материјала, положај извора паљења, повратна радијација од зидова и плафона и доступност кисеоника могу значајно изменити развој пожара (Drysdale, 2011; Lentini, 2018; Quintiere, 2017).

Након утврђивања подручја настанка идентификују се могући извори паљења и потенцијални први гориви материјали. Није довољно да се извор и гориви материјал само налазе у истом простору; неопходно је утврдити да је извор био способан да обезбеди потребну енергију или топлотни флуks, да је геометријски могао да делује на гориви

материјал и да постоји логички и физички одржив механизам паљења (Babrauskas, 2003; Lentini, 2018; *NFPA 921 : Guide for Fire and Explosion Investigations*, 2024). При томе је корисно систематски упарити могуће изворе паљења са могућим првим горивим материјалима и за сваки пар проверити: да ли је извор способан да изазове паљење, да ли је био довољно близу, да ли постоје трагови или други подаци који подржавају паљење и да ли тако настали пожар може објаснити касније ширење и уочене трагове (Lentini, 2018).

Елиминација представља легитиман део тестирања хипотеза, али не и самосталну методу доказивања узрока. Хипотеза може бити одбачена ако је у супротности са поузданим доказима, прорачунима, експериментима или законима науке. Међутим, чињеница да су друге могућности одбачене не доказује аутоматски преосталу могућност (Lentini, 2018; *NFPA 921 : Guide for Fire and Explosion Investigations*, 2024).

Посебно треба избегавати тзв. методологију негативног корупуса (*negative corpus*) – закључивање да је неки извор паљења или намерно изазивање пожара доказано само зато што други извори нису пронађени или су елиминисани. Свака коначна хипотеза о узроку мора имати позитивну потпору у чињеницама и логичким закључцима који произлазе из доказа. Ако таква потпора не постоји, узрок треба означити као неутврђен (Lentini, 2018; *NFPA 921 : Guide for Fire and Explosion Investigations*, 2024).

Форензичка истрага је заснована на активности увиђајне екипе стога је подложна је грешкама услед људског фактора. Према Лентинију нарочито су значајни: превиђање кључних података, погрешно тумачење релевантних и ирелевантних података, игнорисање података који противрече изабраној хипотези, дводимензионално посматрање тродимензионалног и временски променљивог процеса, лоша комуникација и грешке у хемијским или инжењерским анализама (Lentini, 2018). Посебна опасност је потврдна пристрасност (енгл. *confirmation bias*), када истражитељ прерано прихвати једно објашњење и затим несвесно фаворизује податке који га подржавају. Због тога треба експлицитно формулисати разумне конкурентне хипотезе и за сваку бележити податке који је подржавају и податке који јој противрече (Lentini, 2018). Статистички подаци, мотив, понашање лица и друга контекстуална сазнања могу бити важни за шири истражни поступак, али не смеју заменити физичке и научне доказе при утврђивању места настанка и узрока пожара.

Када сложеност догађаја то захтева, реконструкција може бити допуњена инжењерским прорачунима и рачунарским моделирањем. Могу се анализирати брзина ослобађања топлоте (HRR), висина пламена, температура слоја врелих гасова, топлотни флуks, време до паљења, кретање дима, концентрација кисеоника и утицај отвора.

Модели, међутим, нису доказ сами по себи, већ средство за тестирање хипотезе. Њихови улазни подаци, претпоставке, ограничења и степен неизвесности морају бити документовани и критички процењени (Drysdale, 2011; Lentini, 2018; *NFPA 921: Guide for Fire and Explosion Investigations*, 2024; Quintiere, 2017).

## 2.7. Текстилни материјали, структура и својства

Заступљеност текстилних материјала у свакодневном животу је велика, а својства комерцијалних производа текстилне индустрије често су ограничена у погледу ватроотпорности. Као такви, текстилни материјали у контакту са изазивачем пожара током кратког временског периода могу допринети ширењу пожара. Текстилни производи израђени су од влакана (филамената) као основних структурних елемената који одређују сва употребна, заштитна и физичко-механичка својства финалног производа (Schindler & Hauser, 2004; Wilson, 1979). Влакна се, према пореклу и начину настанка, деле на природна и синтетска, а свака група обухвата подкатеорије са специфичним хемијским, физичким и функционалним својствима (Lerpiniere, 2020; Schindler & Hauser, 2004).

Природна влакна прикупљају се из биљних, животињских или минералних извора (Schindler & Hauser, 2004). Влакна биљног порекла, као што су памук, лан, конопља и јута, су економски исплатива и технолошки најзначајнија, а своју механичку издржљивост и хигроскопност остварују захваљујући целулози, биополимеру који чини њихов најзаступљенији градивни део (Klemm, 1998; Wakelyn, 2006). Вуна и свила, као животињска влакна заснована на кератину и фиброину, одликују се еластичношћу, добрим термоизолационим својствима и способношћу природне регулације влаге (Schindler & Hauser, 2004).

Вештачка влакна производе се индустријски и деле се на полусинтетска и синтетска (Schindler & Hauser, 2004). Полусинтетска настају регенерацијом природних полимера најчешће целулозе из дрвне пулпе, а типични производи су вискоза, модал и ацетат (Klemm, 1998). Синтетска влакна, добијена полимеризацијом мономера пореклом из фосилних горива, обухватају полиестар, полиамид, полиолефине и арамиде и налазе примену у скоро свим гранама индустрије (Schindler & Hauser, 2004; Senthil Kumar et al., 2017).

Због широке примене памучних и полиестарских филамената у комерцијалним текстилним материјалима, ови материјали се издвајају као значајни у контексту анализе безбедности од пожара. Такође, наведени материјали представљају два принципијелно различита модела термичке деградације (Schindler & Hauser, 2004).

Памук при загревању подлеже пиролизи без претходног омекшавања, уз стварање запаљивих испарљивих производа (Kandola et al., 1996). Порозна структура влакна олакшава приступ кисеоника и погодује самоодрживом сагоревању, па се памук сврстава у материјале са повећаним пожарним ризиком (Dejene et al., 2025; Wakelyn, 2006). Хемијски састав памука приказан је у табели 2.1.

Табела 2.1. Хемијски састав памука (Wakelyn et al., 2007)

| Хемијски састав   | Садржај %   | Распон садржаја % |
|-------------------|-------------|-------------------|
| Целулоза          | 95,00       | 88,00 - 99,00     |
| Протеини          | 1,30        | 1,10 - 1,90       |
| Пепео             | 1,20        | 0,70 - 1,60       |
| Пектин            | 0,90        | 0,70 - 1,20       |
| Органске киселине | 0,80        | 0,50 - 1,00       |
| Воскови           | 0,60        | 0,40 - 1,00       |
| Пигмент           | у траговима | -                 |
| Остало            | 1,40        | -                 |

Полиестар се, за разлику од памука, при термичком оптерећењу прво омекшава и топи, а потом капље растопљени материјал, чиме може изазвати пожар на другим површинама (Liu et al., 2018). Динамика горења у реалним условима пожара може бити сложена и опасна, иако је температура паљења виша него код памука (Schindler & Hauser, 2004). Најзаступљенији тип поли(етилен-терефталат) (РЕТ) добија се поликондензацијом терефталне киселине и етиленгликола, а температура топљења износи око 280 °C, са температуром преласка у стакласто стање у опсегу 67-80 °C, односно просечно 75 °C (Wakelyn et al., 2007) .

Разлике у понашању памука и полиестара при загревању последица су различитих механизма термичке деградације, чији ток и интензитет зависе од састава и структуре полимера, температуре и брзине загревања, времена излагања, као и услова у погледу доступности кисеоника. Термичка деградација текстилних материјала подразумева низ међусобно повезаних структурних и хемијских трансформација које се јављају при излагању материјала повишеним температурама (Alongi & Malucelli, 2015; Ranucci & Alongi, 2025; Slobodkina et al., 2026). Код целулозних влакана, попут памука, деловање топлоте доводи до раскидања полимерних ланаца, при чему настају испарљива и гасовита једињења, уз истовремено формирање угљеничног остатка у чврстој фази (Ranucci & Alongi, 2025; Shen & Gu, 2009). У зависности од услова загревања, термичка деградација

целулозних материјала може се одвијати различитим механизмима, при чему се у условима ограниченог приступа кисеонику првенствено одвија пиролиза, док присуство кисеоника може довести до термооксидационих процеса (Price et al., 1997; Ranucci & Alongi, 2025). Последице ових промена огледају се у губитку масе, промени боје и облика, измени површинске структуре, као и у карактеристичном термичком одзиву материјала (Ranucci & Alongi, 2025; Slobodkina et al., 2026).

Побољшање термичких и других функционалних својстава текстилних материјала може се постићи применом различитих поступака модификације и дораде. Технолошки поступци модификације тканина обухватају различите физичке и хемијске третмане са циљем побољшања функционалних и естетских својстава текстилних материјала (Stupar et al., 2023a; Stupar et al., 2023b; Su et al., 2026). Посебна пажња посвећује се унапређењу ватроотпорности текстила, нарочито код памучних и полиестарских тканина (Li et al., 2026; Su et al., 2026; Zheng et al., 2026). Значајан технолошки поступак за побољшање физичко-механичких својстава текстилних материјала за примену у техничке сврхе јесте примена различитих премаза. Премази могу бити наносени у танким филмовима везаних физичким или хемијским везама или наношењем премаза на бази полимерне матрице и одређених адитива у зависности од намене производа (Fan et al., 2026; Gilmour et al., 2025). Наношење премаза може се изводити применом различитих техника, као што су наношење помоћу плазма третмана, таложењем наноса у облику атомских слојева, магнетронским распршивањем, хемијским или механичким методама (Chen et al., 2015; Ebrahimi et al., 2023; Lee et al., 2025; Lo Porto et al., 2022; Raditoiu et al., 2023; Wang et al., 2026). Одабир адекватне методе за дораду текстилних материјала зависи од захтеваних својстава материјала и дебљине нанетог слоја.

### **2.7.1. Ватроотпорни текстилни материјали**

Ватроотпорни текстилни материјали представљају значајну категорију функционалних текстилних производа са широком применом у производњи личне заштитне опреме (Shakeriaski et al., 2022), ваздухопловству (Shi et al., 2022), грађевинарству (Bouhaj et al., 2026), аутомобилској индустрији (Chen & Wang, 2024), бродоградњи (Shi et al., 2022) и домаћинствима (Lyu et al., 2026). У претходним поглављима указано је на озбиљност претње запаљивости текстилних материјала по безбедност људи и имовине, па је истраживање и развој ватроотпорних текстилних материјала постао један од приоритета савременог текстилног инжењерства (Aly, 2023).

Ватроотпорност текстилних материјала може се постићи на два начина (Hassan et al., 2024; Mokoana et al., 2023):

- применом инхерентно ватроотпорних влакана и
- накнадном дорадом природних или синтетских влакана помоћу различитих хемијских средстава за заштиту од ватре.

Оба приступа имају своје предности и ограничења, која ће бити детаљно размотрена у овом поглављу. Инхерентно ватроотпорна влакна своје својство отпорности на топлоту и пламен повлаче из хемијске структуре филамената употребљених у технологији ткања. За разлику од влакана са накнадно примењеним средствима за заштиту од ватре, код ових влакана ватроотпорност је трајна и не губи се прањем или током употребе (Aly, 2023). Типичан пример ових материјала су мета-арамидна влакна (Nomex®) која су инхерентно отпорна на пламен са тачком топљења вишом од 500 °C и примењују се за израду ватрогасних заштитних одела (Zhang et al., 2023). Следећи пример текстилних материјала инхерентно отпорних на пламен јесу текстилни материјали израђени ткањем или плетењем филамената на бази поли(бензимидазола) (*Polybenzimidazole* - *PBI*). Ови филаменти поседују одличне вредности индекса граничне запаљивости (Menczel, 2020). Текстилни производи на бази PBI мешавина влакана, попут мешавине филамената PBI и (p-арамид) Kevlar®, показују изузетну отпорност на ватру, мекани су и пријатни на додир, слично памуку (Houshyar et al., 2018). Захваљујући отпорности на ватру, механичкој отпорности и хемијској стабилности, PBI мешана влакна заузимају јединствено место међу свим инхерентно ватроотпорним влакнима (Dolez et al., 2022).

Природна и синтетска влакна која не поседују добра ватроотпорна својства могу се технолошким поступцима дораде у погону текстилне индустрије побољшати наношењем хемијских средстава за заштиту од ватре (ретардента пламена) (Hassan et al., 2024). Таква хемијска средства могу бити на бази халогених елемената, фосфора, азота и неорганских једињења, а дорада тканина овим поступцима је јефтинија од производње тканина од инхерентно ватроотпорних филамената. Интумесцентни системи ватрозаштите постали су доминантни у савременим истраживањима услед еколошке прихватљивости и ефикасности. Ови системи типично се заснивају на синергији фосфора и азота (Bailey et al., 1992). Средства на бази фосфора делују кроз механизам кондензоване фазе тако што мењају путеве разградње целулозних ланаца и промовишу стварање заштитног угљеничног слоја (Wu et al., 2023). Средства за модификацију тканина на бази азота за заштиту од ватре производе обилне незапаљиве гасове током разградње, па се углавном користе као извор гаса у интумесцентним системима. Ови незапаљиви гасови разблажују

концентрацију запаљивих гасова и промовишу ширење угљеничног слоја на површини памучних тканина, чиме се побољшава ефикасност изолације кисеоника и топлоте (Wu et al., 2023). Средства за заштиту тканина на бази неорганских једињења обухватају материјале на бази силицијума, бора и интумесцентна средства (Dejene et al., 2025). Хидроксиди метала, попут алуминијум-хидроксида, унапређују ватроотпорност ендотермном разградњом и ослобађањем воде, чиме охлаждају материјал и разблажују запаљиве гасове (Zhu et al., 2026). Материјали који могу допринети побољшању ватроотпорности текстила јесу: неорганске наночестице ( $\text{ZnO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ) (Li et al., 2025; Z. Zhang et al., 2026), наноглина (S. Zhang et al., 2026), 2D наноматеријали (графен, MXene) (Kang & Yu, 2026; J. Zhang et al., 2026), и биолошки системе (Li et al., 2026). Развој премаза на бази полимерне матрице модификоване додавањем количине ретардента пламена налази ширу примену од саме текстилне индустрије. Такви премази се користе у грађевинарству, индустријским постројењима, аутомобилској индустрији, авиоиндустрији и другим сегментима привреде осетљивим на пламен (Liang et al., 2013).

## 2.8. Инструменталне методе карактеризације

Технолошким развојем инструменталних метода значајно је повећана осетљивост и ефикасност у анализи материјала. Анализом статистичких података о пожарима на простору Републике Србије закључено је да у великом броју случајева није откривен узрок пожара. Стога је потребно унапредити процедуре истражних поступака згаришта додавањем савремених инструменталних метода традиционалним трасолошким методама које су данас у употреби. Потенцијал за примену у анализи материјалних доказа узоркованих на згаришту имају FT-IR и EI-MS (Mo et al., 2021; Paál et al., 2022).

У другом делу дисертације FT-IR спектроскопија и EI-MS примењене су за анализу продуката сагоревања текстилних материјала и цигарете, са циљем идентификације карактеристичних хемијских компоненти и утврђивања њихових сличности и разлика.

FT-IR спектроскопија представља инструменталну методу за идентификацију хемијске структуре материјала на основу апсорпције инфрацрвеног зрачења, при чему апсорпција настаје када фреквенција зрачења одговара природној фреквенцији вибрације хемијске везе (Milosavljević, 2014). Положај и интензитет апсорпционих трака омогућавају идентификацију функционалних група и праћење хемијских промена насталих термичком разградњом (Goldstein et al., 2018).

EI-MS представља моћну аналитичку методу која омогућава идентификацију и квантификацију хемијских једињења анализом јона насталих из испитиваног узорка. Масени спектрометар се састоји од извора јона, анализатора масе и детектора (Gross, 2017), а резултат анализе - масени спектар - представља дводимензионални приказ интензитета сигнала у функцији односа масе и наелектрисања ( $m/z$ ), на основу којег је могуће идентификовати молекулске јоне и јоне фрагмената (Gross, 2017). Посебан значај EI-MS има у анализи гасовите фазе, где омогућава детекцију и квантификацију испарљивих органских једињења у реалном времену, чак и у веома ниским концентрацијама (Gross, 2017).

У трећем делу дисертације, вршена је синтеза честица додаваних у полимерну матрицу чија су ватроотпорна својства испитивана наношењем на различите материјале. Инструменталне методе карактеризације честица се могу поделити у следеће три групе:

- методе карактеризације наночестица,
- методе за испитивање физичко-механичких својстава и
- термографске методе.

Ефикасне методе за одређивање микроскопске, елементарне и кристалографске структуре јесу методе рендгенске дифракције, рендгенске фотоелектронске спектроскопије и скенирајуће електронске микроскопије спрегнуте са енергнодисперзионом спектроскопијом.

Рендгенска фотоелектронска спектроскопија представља савремену површински осетљиву аналитичку методу која се користи за одређивање елементарног састава и хемијских стања елемената на површини материјала (Palavai et al., 2026). Метода се заснива на фотоелектричном ефекту, при чему долази до емисије фотоелектрона са површине узорка након озрачивања X-зрацима одговарајуће енергије. Анализом кинетичке енергије емитованих електрона могуће је одредити енергију везивања електрона, која је карактеристична за одређени елемент и његово хемијски облик (van der Heide, 2012).

Анализа XPS може се представити помоћу Ајнштајнове једначине фотоелектричног ефекта (Briggs, 1998):

$$KE = h\nu - BE - \phi,$$

где је  $KE$  кинетичка енергија фотоелектрона,  $h\nu$  енергија упадног X-зрачења,  $BE$  енергија везивања електрона, а  $\phi$  рад изласка електрона из материјала. На основу вредности енергије везивања могуће је извршити идентификацију елемената и анализу њихових хемијских стања (van der Heide, 2012).

XPS метода омогућава квалитативну и квантитативну анализу површинских слојева материјала до дубине од неколико нанометара, због чега има значајну примену у карактеризацији наноматеријала, танких филмова, полимера, металних оксида и различитих врста премаза. Посебна предност методе огледа се у могућности одређивања хемијских веза и оксидационих стања елемената присутних на површини материјала (van der Heide, 2012).

XRD метода заснива се на дифракцији X-зрака на кристалним равнима материјала, при чему настаје карактеристичан дифракциони спектар описан Браговим (енгл. *Sir William Lawrence Bragg*) законом (Briggs, 1998; Pecharsky & Zavalij, 2005):

$$n\lambda = 2d \sin \theta,$$

где је  $\lambda$  таласна дужина X-зрака,  $d$  међураванско растојање, а  $\theta$  угао дифракције (Briggs, 1998; Pecharsky & Zavalij, 2005). Метода омогућава идентификацију кристалних фаза, одређивање параметара кристалне решетке и процену степена кристаличности поликристалних узорака (Waseda et al., 2011). XRD анализа има широку примену у карактеризацији поликристалних материјала, наноматеријала и металних оксида. Метода омогућава идентификацију кристалних фаза, одређивање параметара кристалне решетке, процену степена кристаличности и праћење структурних промена материјала (Pecharsky & Zavalij, 2005).

SEM представља методу за испитивање морфологије материјала засновану на интеракцији фокусираног снопа електрона са површином узорка (Goldstein et al., 2018). Секундарни електрони пружају информације о топографији површине, док повратно расути електрони омогућавају уочавање разлика у хемијском саставу материјала (Goldstein et al., 2018). У комбинацији са EDS анализом могуће је одредити елементарни састав узорка (Goldstein et al., 2018).

Физичко-механичка испитивања текстилних материјала представљају неизоставан део процене испуњења квалитативних и квантитативних захтева прописаних за примену одређених текстилних производа. Посебно је значајно испитивање физичко-механичких својстава када су текстилни материјали подвргнути хемијским модификацијама како би се утврдио утицај модификације на функционалност текстилних материјала (Basak & Ali, 2020; Shi et al., 2026). Наношење ватрозаштитних препарата може значајно утицати на физичко-механичке карактеристике материјала, па је систематско испитивање ових промена од суштинског значаја за процену функционалности третираних текстила (Schwartz, 2008, 2019). Понашање тканине при механичком оптерећењу условљено је врстом влакана, структуром предива, начином преплитања нити и густином тканине, а

хемијски третман додатно мења међувлаканске интеракције и површинска својства (Causa & Netravali, 2008). Међу најзначајнијим испитиваним својствима издвајају се затезна чврстоћа, издужење при кидању, отпорност на савијање, цепање и хабање (Causa & Netravali, 2008). Отпорност на цепање посебно је осетљива на модификације које утичу на покретљивост нити унутар тканине. (Causa & Netravali, 2008; Hu & Xin, 2019). Адекватним избором методологије испитивања могуће је утврдити у којој мери примењени третман нарушава или мења механичке карактеристике полазних тканина, што представља основу за оптимизацију процеса модификације (Causa & Netravali, 2008).

Термографске методе представљају поуздан приступ за анализу просторне и временске расподеле температуре током термичког оптерећења материјала, укључујући и праћење процеса сагоревања (Minkina & Dudzik, 2009). Употребом термовизијске камере могуће је континуално снимати промене температуре, означити зоне термичког оптерећења и пратити динамику процеса сагоревања. Термовизијска камера представља уређај за бесконтактно мерење температуре који функционише на принципу детекције инфрацрвеног зрачења емитованог са површине материјала (Minkina & Dudzik, 2009). Сва тела чија је температура изнад апсолутне нуле емитују инфрацрвено зрачење, чији интензитет зависи од температуре и емисивности материјала (Minkina & Dudzik, 2009). Камера помоћу инфрацрвених детектора региструје емитовано зрачење и претвара га у електрични сигнал, који се софтверски обрађује и приказује у облику термограма (Minkina & Dudzik, 2009).

### **3. МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА**

У овом поглављу приказана је методологија емпиријског истраживања примењена у докторској дисертацији. Како је већ поменуто, истраживање је усмерено на анализу пожара са аспекта безбедности људи, са посебним нагласком на факторе који утичу на настанак повређивања и смртних исхода. Стога се полазна идеја заснива на претпоставци да се применом савремених метода анализе података могу идентификовати статистички значајни обрасци и фактори ризика који нису непосредно уочљиви применом класичних дескриптивних анализа.

Методолошки приступ истраживању заснован је на интеграцији више међусобно комплементарних аналитичких метода. У циљу описивања расподела и динамике анализираних променљивих, поред основне статистичке анализе података, у истраживању су примењени методи стохастичког моделовања, као и технике машинског учења, које омогућавају идентификацију скривених образаца, класификацију ризичних ситуација и откривање статистички значајних зависности између карактеристика пожара и њихових последица. Комбинованом применом наведених приступа формиран је јединствен аналитички оквир погодан за анализу сложених форензичких података.

Емпиријско истраживање реализовано је у више међусобно повезаних фаза. У првој фази описани су мотивација, извор, структура и основне статистичке карактеристике анализираних података, као и променљиве које су коришћене у даљој анализи. Како би се испитала међузависности између карактеристика пожара и њихових последица по безбедност људи, у другој фази дефинисан је аналитички поступак, који обухвата интегрисану примену стохастичких модела и техника машинског учења. Резултати примене предложених метода, њихова анализа и дискусија приказани су у наредном поглављу.

У наставку овог поглавља, а на основу закључака донетих у анализи реалних случајева пожара у дефинисаном периоду на простору Републике Србије, извршена је анализа могућности примене инструменталних метода у успешном откривању узрока пожара. У ту сврху примењене су FT-IR спектроскопија и EI-MS. Комбинованом применом FT-IR спектроскопије и EI-MS омогућено је поуздано утврђивање узрочника настанка пожара и идентификација продуката термичке деградације материјала. Термовизијским снимањем праћен је процес интеракције запаљене цигарете и текстилних материјала, са посебним освртом на температурна поља и динамику ширења топлоте.

У последњем делу обухваћена је модификација површине различитих материјала коришћењем премаза адитивираног помоћу наноккомпозитних честица  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$  масеног односа 25:75, 50:50 и 75:25 добијених механохемијском синтезом, у циљу

побољшања отпорности на запаљивост. Добијене модификоване честице окарактерисане су применом XPS, XRD и SEM анализе. Поред тога, испитана су и својства запаљивости различитих материјала чија је површина модификована премазима. Поред наведених испитивања, испитана су и физичко-механичка својства модификованих текстилних материјала ради одређивања нивоа функционализације модификованих текстила. Термовизијским снимањем праћене су промене температуре на површини текстила током дејства запаљене цигарете, ради процене утицаја модификације на загревање и ширење топлоте.

### **3.1. Узрочно-последична анализа безбедности од пожара**

У овом делу описује се методолошки приступ безбедносној анализи узрочно-последичних веза на основу опсервираних података. У складу са раније наведеним, подаци су обрађени кроз два аналитичка аспекта, предложена у ауторским радовима (Mitrović et al., 2025, 2026; Stojanović et al., 2026), а који ће бити детаљније описани у наставку.

#### **3.1.1. Извор и структура података**

Поузданост сваког аналитичког модела у великој мери зависи од квалитета, обима и структуре података на којима се заснива истраживање. У области заштите од пожара овај захтев је посебно изражен, јер су пожарни инциденти последица истовременог дејства великог броја међусобно повезаних техничких, просторних, временских и људских фактора. Из тог разлога, анализа ризика по безбедност људи не може се заснивати искључиво на посматрању броја пожара или материјалне штете, већ захтева истовремену анализу карактеристика самог пожара, окружења у коме је настао и последица које је изазвао.

Полазну основу овог истраживања чине подаци прикупљени из службених евиденција Министарства унутрашњих послова Републике Србије, који садрже информације о пожарним инцидентима са последицама по људе. База података обухвата већи број међусобно повезаних атрибута који описују околности настанка пожара, карактеристике објеката, временске и просторне услове, као и демографске карактеристике повређених и страдалих лица. Оваква структура података омогућава да се проблем безбедности људи анализира са више различитих аспеката применом статистичких, стохастичких и алгоритамских метода.

С обзиром на различите циљеве појединих аналитичких поступака, из расположиве базе података формирани су *аналитички подскупови*, прилагођени захтевима примењених метода. При томе је сваки аналитички подскуп формиран из јединствене изворне базе података, али је његова структура зависила од конкретног истраживачког питања и природе анализираних променљивих. На овај начин обезбеђена је методолошка доследност свих спроведених анализа, уз истовремено максимално искоришћење расположивих информација. У наставку овог поглавља дат је детаљан опис структуре анализираних података, основних статистичких карактеристика посматраних променљивих, као и критеријума на основу којих су формирани аналитички подскупови коришћени у даљем истраживању.

### 3.1.1.1. Значај анализе података о пожарима

Као што је већ истакнуто, пожари представљају један од најзначајнијих безбедносних ризика савременог друштва, не само због материјалне штете коју проузрокују, већ пре свега због тога што непосредно угрожавају живот и здравље људи. Иако се највећи број пожарних инцидената завршава без људских жртава, повреде и смртни исходи представљају најтежу последицу пожара, због чега њихова анализа има посебан значај за планирање превентивних мера и унапређење система заштите и спасавања.

Табела 3.1. Стопе смртних случајева и повреда у пожарима у Републици Србији и неким другим европским земљама (извор: CTIF Centre of Fire Statistics, 2024)

| Држава        | Број страдалих на 100.000 становника | Број повређених на 100.000 становника |
|---------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Бугарска      | 2,39                                 | 4,4                                   |
| Хрватска      | 0,88                                 | 4,1                                   |
| Финска        | 0,92                                 | 6,6                                   |
| Грчка         | 0,67                                 | 0,9                                   |
| Мађарска      | 0,97                                 | 8,0                                   |
| Португалија   | 0,52                                 | 13,2                                  |
| Србија        | 1,50                                 | 4,9                                   |
| <b>Просек</b> | <b>1,14</b>                          | <b>3,2</b>                            |

Према последњем извештају Међународног техничког комитета за спречавање и гашење пожара (фран. *Comité Technique International de prévention et d'extinction du Feu* – CTIF) за 2024. годину, стопа смртности од пожара стандардизована по старости у Републици Србији (кодови ICD-10 X00-X09) износи 1,5 на 100.000 становника (CTIF Centre of Fire Statistics, 2024). Ова вредност, као што је приказано у табели 3.1, јесте виша од светског просека, као и у поређењу са већином европских земаља са упоредивом

густином насељености. Такође, стопа повређивања износи 4,9 на 100.000 становника, што је изнад просечних вредности, односно више него у већини осталих анализираних земаља.

Иако су пожари са људским последицама релативно ретки у односу на укупан број регистрованих пожарних инцидената, њихов друштвени значај је изузетно велики. Према расположивим подацима (Marić et al., 2018), у периоду 2009-2017. године у 99,7% регистрованих пожара није било смртно страдалих лица, док у 98,8% пожара није било повређених. Са друге стране, управо релативно мали број пожара са тешким последицама представља највећи изазов за анализу, јер класичне статистичке методе често нису довољне за идентификацију фактора који доводе до оваквих догађаја. Из тог разлога, у овој докторској дисертацији примењен је интегрисани аналитички приступ који комбинује стохастичко моделовање и технике машинског учења у циљу идентификације фактора ризика и откривања скривених зависности између карактеристика пожара и њихових последица по безбедност људи.

Узимајући све ово у обзир, као и дугорочни статистички тренд раста ових индикатора у Србији (Marić et al., 2018), јасно је да смртни случајеви и повреде у пожарима представљају значајан проблем, што указује на потребу за унапређењем превентивних мера и мера јавне безбедности. На тај начин, сви ови показатељи указују на потребу за детаљнијом анализом фактора који доводе до повређивања и смртних исхода, као и за развојем аналитичких модела који могу допринети бољем разумевању ризика и планирању ефикаснијих мера превенције. У наставку ће стога бити детаљније описан скуп опсервираних података, као и основни начин примене.

### *3.1.1.2. Извор података*

Полазну основу емпиријског истраживања чине службене евиденције Министарства унутрашњих послова (МУП) Републике Србије, које представљају примарни национални извор информација о пожарима, експлозијама и њиховим последицама по људе. Подаци су прикупљени и обрађени у оквиру информационог система Сектора за аналитику, телекомуникационе и информационе технологије (САТИТ), који обезбеђује јединствену методологију евидентирања и систематизације података о ванредним догађајима на територији Републике Србије. Овакве евиденције садрже велики број просторних, временских, техничких и демографских обележја, што омогућава њихову примену како у класичним статистичким анализама, тако и у савременим приступима стохастичког моделовања и машинског учења.

С обзиром на то да су циљеви појединих анализа различити, расположиве службене евиденције посматране су са два међусобно комплементарна аналитичка аспекта, при чему је у оба случаја полазиште представљала јединствена база података Министарства унутрашњих послова:

- Први аналитички аспект усмерен је на анализу пожарних догађаја, при чему сваки запис представља један регистровани пожарни инцидент са припадајућим просторним, временским и оперативним карактеристикама.
- Други аналитички аспект односи се на лица која су повређена или смртно страдала у пожарима и експлозијама, где сваки запис представља једно лице са одговарајућим демографским и другим релевантним обележјима.

На овај начин омогућено је да се исти проблем безбедности људи анализира на нивоу самог догађаја, али и на нивоу његових непосредних последица. Избор аналитичког аспекта био је условљен природом примењених метода и постављеним истраживачким циљем. Анализа пожарних догађаја коришћена је у поступцима откривања узрочно-последичних зависности између карактеристика пожара и њихових последица, док је анализа појединачних лица омогућила детаљније испитивање демографских карактеристика повређених и страдалих, као и примену стохастичких модела и техника машинског учења које захтевају индивидуални ниво посматрања.

Иако се ова два аналитичка аспекта разликују по јединици посматрања, структури расположивих променљивих и временском обухвату, они представљају комплементарне приказе истих службених евиденција и заједно чине јединствену емпиријску основу ове дисертације. Ради јаснијег приказивања начина на који су службене евиденције коришћене у овом истраживању, у табели 3.2 дат је преглед оба горе наведена аспекта обраде и анализе података, њихових основних карактеристика и улоге у примењеним аналитичким поступцима.

Табела 3.2. Аналитички аспекти службених евиденција коришћених у истраживању

| Аналитички аспект        | Пожарни догађај                                              | Повређени / страдали                                                               |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Основна јединица анализе | Појединачни пожар                                            | Појединачно лице                                                                   |
| Основни циљ              | Анализа карактеристика пожара                                | Анализа ризика по људе                                                             |
| Тип променљивих          | Просторне, временске и оперативне                            | Демографске и форензичке                                                           |
| Примењене методе         | Расподеле дискретног типа, кластеризација, стабла одлучивања | Дескриптивна статистика, Расподеле непрекидног типа (GAMLSS), асоцијативна правила |
| Аналитички исход         | Карактеристике пожара                                        | Карактеристике повређених и страдалих                                              |

### 3.1.1.3. Променљиве коришћене у истраживању

Полазећи од постављених циљева истраживања, у даљој анализи укључене су променљиве (варијабле) које описују како карактеристике пожарних догађаја, тако и демографска и друга обележја лица која су повређена или страдала у пожарима. Избор променљивих извршен је тако да омогући свеобухватну анализу узрочно-последичних односа између услова настанка пожара и њихових последица по безбедност људи, о чему ће бити више речи у наредном делу дисертације. У зависности од аналитичког аспекта и примењене методе, поједине променљиве коришћене су као описне, док су, рецимо, број повређених лица и број смртних исхода посматрани као основне циљне променљиве у овом истраживању. Као што се може уочити из табеле 3.3, анализиране променљиве обухватају просторне, временске, техничке и демографске карактеристике пожарних догађаја, као и обележја која описују њихове последице по људе. Оваква структура података омогућава свеобухватну анализу међусобних зависности између карактеристика пожара и ризика од повређивања или смртог исхода, што представља основни предмет истраживања у овој дисертацији.

Табела 3.3. Променљиве које су коришћене у истраживању

| Група променљивих                 | Променљива                    | Опис                                                                                 |
|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Просторне карактеристике</b>   | Локација пожара               | Локација пожарног догађаја                                                           |
|                                   | Тип објекта                   | Стамбени, индустријски, јавни...                                                     |
|                                   | Место настанка пожара         | Град у коме се пожар догодио                                                         |
| <b>Временске карактеристике</b>   | Година                        | Година настанка пожара                                                               |
|                                   | Годишње доба                  | Пролеће, лето, јесен, зима                                                           |
|                                   | Интервал времена              | Временски интервал (део дана) када је пожар настао (0-6 h, 6-12 h, 12-18 h, 18-24 h) |
|                                   | Категорија дана               | Радни/нерадни дан                                                                    |
|                                   | Дојава настанка пожара        | Редни број сата када се пожар догодио                                                |
|                                   | Дојава/Долазак                | Време од обавештења до доласка ватрогасне службе                                     |
|                                   | Дојава/Гашење                 | Време од обавештења до гашења пожара                                                 |
| <b>Карактеристике пожара</b>      | Узрок пожара                  | Утврђени узрок пожара                                                                |
|                                   | Категорија пожара по локацији | Различите категорије пожара                                                          |
| <b>Демографске карактеристике</b> | Пол                           | Мушки / женски                                                                       |
|                                   | Старост                       | Године живота                                                                        |
|                                   | Старосна група                | Категорисана старост                                                                 |
| <b>Последице пожара</b>           | Број повређених               | Број лица                                                                            |
|                                   | Број смртно страдалих         | Број лица                                                                            |
|                                   | Тежина повреде                | Категорије повреда (лакше / теже)                                                    |

### 3.1.1.4. Независне променљиве

У даљем истраживању, посебно је издвојен и анализиран скуп од дванаест улазних (независних) променљивих које су сада анализиране са методолошког становишта, пре свега, на основу различитих скупова вредности које оне могу узети. Разлог томе је првенствено могућност њихове даље DM-анализе, пре свега у смислу класификације у односу на вредност излазних (циљних) варијабли, као и примене асоцијативних правила, о чему ће више речи бити у наставку. Основне карактеристике свих улазних варијабли дате су у наредној табели 3.4.

*Табела 3.4. Независне променљиве релевантне за анализу узрока и последица пожара*

| Ред. бр. | Варијабла (Атрибут)           | Тип       | Вредности                  | ID        |          |
|----------|-------------------------------|-----------|----------------------------|-----------|----------|
|          |                               |           |                            | Повређени | Погинули |
| 1.       | Узрок пожара                  | Номинална | A, B, C, D, E              | 0,0602    | 0,0562   |
| 2.       | Тип објекта                   | Номинална | /                          | 0,0549    | 0,0549   |
| 3.       | Локација пожара               | Номинална | Позиција I–III             | 0,0212    | 0,0197   |
| 4.       | Категорија пожара по локацији | Номинална | Категорија I–IV            | 0,0230    | 0,0227   |
| 5.       | Годишње доба                  | Номинална | Зима, Пролеће, Лето, Јесен | 0,0086    | 0,0090   |
| 6.       | Тип дана                      | Номинална | Радни дан, Викенд          | 0,0004    | 0,0002   |
| 7.       | Интервал времена              | Номинална | Интервал I–IV              | 0,0130    | 0,0130   |
| 8.       | Место настанка пожара         | Номинална | Група I–VIII               | 0,0086    | 0,0075   |
| 9.       | Година                        | Ординална | 2009, ..., 2023            | 0,0040    | 0,0044   |
| 10.      | Дојава настанка пожара        | Ординална | 1, ..., 24 [h]             | 0,0082    | 0,0094   |
| 11.      | Дојава/Долазак                | Нумеричка | 0, ..., 186 [min]          | 0,0063    | 0,0055   |
| 12.      | Дојава/Гашење                 | Нумеричка | 0, ..., 1432 [min]         | 0,0152    | 0,0187   |

Приметимо да је за све горе наведене улазне променљиве (обично назване атрибутима) приказана њихова информациона добит (ID) израчуната у односу на две излазне променљиве „Повређени” и „Погинули”, које су детаљније описане у наставку. Ове вредности су такође приказане у табели 3.4 и представљају разлику у ентропији између стања пре и после избора одређеног атрибута (A). Прецизније речено, ID вредности се израчунавају према следећој формули:

$$ID(A) = H(S) - H(A|S),$$

где је:

$$H(S) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i$$

ентропија различитих класа  $S_1, \dots, S_n$  унутар скупа  $S$ , при чему су  $p_1, \dots, p_n$  тзв. апостериорне вероватноће избора класа  $S_1, \dots, S_n$ . Најзад, израз:

$$H(A|S) = \sum_{i=1}^n \frac{|S_i|}{|S|} \cdot H(S_i)$$

представља ентропију насталу након поделе скупа  $S$  на класе  $S_i$ , у односу на атрибут  $A$ . Као што се може видети у табели 3.4, највећу  $ID$  вредност има атрибут „Узрок пожара”, који се стога узима као примарни током класификације, тј. формирања одговарајућих стабала одлучивања (видети Одељак 4.3.2).

Као што се такође може видети у табели 3.4, међу горе наведеним улазним променљивима, осам променљивих је номиналног типа, две су ординалне, а две нумеричке. Њихов кратак опис може се дати на следећи начин:

1. Променљива „Узрок пожара” садржи пет група вредности, означених са А, В, С, D и Е, које идентификују узроке који су довели до пожара, као што су људски фактори, технички фактори или природни узроци. Метод груписања различитих узрока пожара заснива се на класификацији применом тзв. стабала одлучивања која је спроведена у следећем одељку, док је њихова детаљнија структура приказана у наредној табели 3.5.

Табела 3.5. Груписане вредности узрока пожара (променљива „Узрок пожара”)

| Вредности | Узрок пожара                                                                                                     | Број случајева |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| А         | Неутврђено; електрични проводници; други узроци; судар; егзотермна реакција                                      | 3504           |
| В         | Експлозија; трење; оштећења-дефекти                                                                              | 268            |
| С         | Отворени пламен; конструкцијски недостаци; камини; прегревање проводника услед преоптерећења; електрични уређаји | 1619           |
| D         | Опушак цигарете                                                                                                  | 272            |
| Е         | Заваривање; природне појаве; брушење; самопаљење; статички електрицитет                                          | 106            |

2. Променљива „Тип објекта” описује категорију објекта у коме је дошло до пожарног догађаја (нпр. стамбени, индустријски, пословни, јавни, пољопривредни и други објекти), чиме се класификује објекат у коме је настао пожар према

његовој намени и функционалним карактеристикама. На тај начин, ова променљива представља један од значајних фактора у анализи узрока пожара, начина његовог ширења и ризика од повређивања или смртог исхода. Категорисане вредности ове променљиве приказане у табели 3.6.

*Табела 3.6. Груписане вредности објеката где је дошло до пожара (променљива „Тип објекта“)*

| Вредности                                                          | Категорија пожара по локацији                                                                                                                                      | Број случајева |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Стамбени објекти                                                   | Стамбена кућа, стамбена зграда, викендица, барака, брвнара, камп                                                                                                   | 1753           |
| Индустријски и производни објекти                                  | Фабрика, погон, радионица, млин, сушара, рафинерија, силос, пекара, перионица, складиште                                                                           | 215            |
| Пољопривредни објекти                                              | Фарма, економија, пчелињак, остало                                                                                                                                 | 76             |
| Јавни и институционални објекти / здравствене и социјалне установе | Болница, здравствена установа, дом за старе, бања, клиника, помоћна болница, Црвени крст, школа, полицијска станица, општина, касарна, пијаца, суд, студентски дом | 32             |
| Угоститељски и комерцијални објекти                                | Хотел, ресторан, кафана, клуб, тржни центар, продавница, месара, киоск, трафика, пословна зграда / пословни простор / компанија                                    | 216            |
| Саобраћај, возила и пловила                                        | Авион, возило, локомотива, брод, чамац, пловило, гаража, бензинска станица                                                                                         | 232            |
| Енергетски и инфраструктурни објекти                               | Гасовод, трафостаница, топлана                                                                                                                                     | 10             |
| Спортеки и културни објекти                                        | Стадион, спортски центар, позориште                                                                                                                                | 4              |
| Отворени простори / остало                                         | Двориште, гробље, отворени простор, депонија                                                                                                                       | 390            |

3. Променљива „Локација пожара” је класификована у три групе и има сличну функцију као наредна променљива „Категорија пожара по локацији”. Поред тога, ова променљива пружа детаљније информације о локацији пожара у стамбеним зградама, на пример, пожар у приземљу, пожар на другом спрату итд. Структура појединачних вредности ове променљиве приказана је у табели 3.7.

*Табела 3.7. Груписане вредности локације пожара (променљива „Локација пожара“)*

| Вредности    | Локација пожара                                                                                                      | Број случајева |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Позиција I   | Приземље                                                                                                             | 2758           |
| Позиција II  | Подрум-подрум, Спрат од 1. до 4. спрата, Поткровље, Поткровље-кров                                                   | 1532           |
| Позиција III | Спратови од 4. до 7. спрата, Спратови од 8. до 15. спрата, Спратови виши од 16. спрата, Високо поткровље, Неодређено | 1479           |

4. Променљива „Категорија пожара по локацији” такође садржи четири групе, које представљају информације о локацији пожара (отворени простор/унутрашњи простор) и типу зграде. Детаљна структура појединачних вредности ове променљиве приказана је у табели 3.8.

Табела 3.8. Груписане вредности категорија пожара по локацији (променљива „Категорија пожара по локацији”)

| Вредности      | Категорија пожара по локацији                                                                                                                                                                                                                                    | Број случајева |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Категорија I   | Стамбена зграда; Стамбено-пословна зграда; Трговинска и занатска радња; Угоститељски објекат; Пословна зграда; Верски објекат; Здравствена установа; Вртић/школа/факултет; Хотел/мотел; Биоскоп/позориште; Дом за старе; Робна кућа; Дом за негу незбринуте деце | 3502           |
| Категорија II  | Аутобус; Цистерна; Друмско возило; Остала друмска возила; Теретно друмско возило; Пољопривредне машине; Путнички аутомобил; Теретни вагон; Возило за превоз воде; Електрична локомотива; Средство ваздушног превоза; Дизел локомотива                            | 562            |
| Категорија III | Четинарска шума; Воћњак; Макија (ниско растиње); Мешовита шума; Ливада; Други отворени простор; Житарице; Листопадна шума; Виноград                                                                                                                              | 716            |
| Категорија IV  | Касарна/шупа; Пољопривредна зграда; Остали грађевински објекти; Депонија смећа; Контејнер; Силос; Паркинг-гаража; Производни погон; Трафо станица; Складишта; Димњак; Градилиште; Гасна фабрика; Грађевинске машине; Радне машине; Рафинерија                    | 989            |

5. Променљива „Годишње доба” је класификована у четири групе; подаци указују на подложност годишњег доба и временских услова на појаву пожара.
6. Променљива „Тип дана” је класификована у две групе; подаци указују на пожаре током радних дана и током викенда.
7. Променљива „Интервал времена” је категоричка променљива која означава део дана у коме је настао пожар, при чему су временски интервали дефинисани као: 00:00–06:00 h, 06:00–12:00 h, 12:00–18:00 h и 18:00–24:00 h.
8. Променљива „Место настанка пожара” користи се за класификацију просторних података, идентификацију критичних локација и географску анализу пожара. Вредности ове променљиве су подељене у осам група, коришћењем софтвера *Quantum Geographic Information System – QGIS* (QGIS.org, 2024). Ове групе су представљене у облику мапа (слике П.1 и П.2) које се налазе у Прилогу 1 ове студије.
9. Променљива „Година настанка пожара” служи за временску класификацију података, чије се вредности анализирају у годишњим интервалима.

10. Променљива „Дојава настанка пожара” користи се за временску класификацију података, чије се вредности посматрају у броју и учесталости пожарних аларма у одређеним временским интервалима.
11. Променљива „Дојава/Долазак” идентификује процену ефикасности реаговања на пожар. Она приказује временски интервал између пријема обавештења о пожару и доласка ватрогасно-спасилачке јединице на локацију.
12. Најзад, променљива „Дојава/Гашење” идентификује интервал од тренутка доласка ватрогасно-спасилачке јединице на локацију до тренутка гашења пожара.

На крају, потребно је истаћи да описане променљиве представљају потенцијалне факторе који могу утицати на настанак повреда и смртних исхода у пожарима. Њихов међусобни однос са посматраним исходима биће анализиран применом стохастичких модела и техника машинског учења у наставку овог поглавља.

### 3.1.1.5. Циљне (зависне) променљиве

У претходном одељку описане су независне променљиве које карактеришу пожарне догађаје и представљају потенцијалне факторе ризика за настанак последица по људе. Међутим, основни циљ овог истраживања није само опис ових карактеристика, већ испитивање њиховог утицаја на последице пожара по безбедност људи. Из тог разлога, у наставку истраживања посебна пажња посвећена је анализи *циљних (зависних) променљивих*, које описују последице пожарних догађаја по људе. У зависности од природе анализе и примењене методе, ове променљиве имају различиту улогу, али њихов заједнички именитељ јесте да оне представљају основне показатеље ризика који се настоје објаснити и предвидети применом стохастичког моделовања и техника машинског учења.

Табела 3.9. Циљне променљиве коришћене у истраживању

| Циљна променљива | Опис                                                                    | Аналитички аспект |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Број повређених  | Број лица повређених у оквиру једног пожарног догађаја.                 | пожарни догађај   |
| Број погинулих   | Број лица која су смртно страдала услед пожарног догађаја.              | пожарни догађај   |
| Пол              | Пол повређеног или страдалог лица (код анализа на индивидуалном нивоу). | појединачно лице  |
| Старост          | Старост лица у годинама (код стохастичког моделовања).                  | појединачно лице  |
| Старосна група   | Категорисана старост лица (код DM анализа).                             | појединачно лице  |
| Тежина повреде   | Категорија повреде (лакша/тежа), коришћена у анализи последица пожара.  | појединачно лице  |

Као што се може уочити из табеле 3.9, циљне променљиве обухватају различите аспекте последица пожарних догађаја по људе. Док број повређених и број смртно страдалих лица представљају основне показатеље ризика на нивоу пожарног догађаја, демографске карактеристике и тежина повређивања омогућавају детаљнију анализу структуре и интензитета последица на нивоу појединачних лица. На тај начин формиран је јединствен аналитички оквир који омогућава сагледавање проблема безбедности људи са више међусобно повезаних аспеката.

### 3.1.2. Стохастичко моделовање динамике повређивања и смртних исхода

Стохастичко моделовање представља прву фазу интегрисане анализе ризика по безбедност људи од пожара и има за циљ квантитативни опис случајности, неизвесности и варијабилности које карактеришу пожарне догађаје и њихове последице. За разлику од класичних дескриптивних статистичких метода, које пружају увид у основне карактеристике анализираних података, стохастички модели омогућавају идентификацију закономерности у појави ретких догађаја, анализу временске динамике и моделовање статистичких расподела посматраних величина. На тај начин се добија поуздана основа за разумевање ризика од повређивања и смртних исхода, као и за њихово касније повезивање са карактеристикама пожарних догађаја.

Полазећи од природе анализираних података и постављених циљева истраживања, у раду су примењена три међусобно комплементарна стохастичка приступа, при чему сваки од њих обухвата различит аспект анализе последица пожара по људе:

1. Најпре, за анализу дискретних променљивих које карактерише изражена појава нултих и јединичних вредности броја повређених, односно погинулих лица, примењена је *инфлаторна*  $(0 - 1)$  *Пуасонова расподела*, која омогућава адекватније моделовање ретких и неуравнотежених догађаја.
2. Други приступ заснован је на *минификационим (MIN-SB) случајним процесима*, који су коришћени за моделовање временске динамике броја повређених и смртно страдалих лица, узимајући у обзир механизам постепене редукције и могућност појаве случајних скокова.
3. Најзад, за моделовање демографских карактеристика повређених и страдалих лица, као и за избор најадекватнијих параметарских расподела, примењен је *GAMLSS (Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape) приступ*, који омогућава флексибилно моделовање параметара расподеле и избор модела који најбоље описује емпиријске податке.

Ради прегледнијег приказа, основне карактеристике примењених стохастичких приступа приказане су у табели 3.10.

Табела 3.10. Примена стохастичких модела у истраживању

| Стохастички приступ                  | Предмет анализе                                                            | Основни циљ                                                                 |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Инфлаторна (0–1) Пуасонова расподела | Дискретне променљиве са израженом инфлацијом нултих и јединичних вредности | Моделовање ретких догађаја и процена вероватноћа њиховог настанка.          |
| Минификациони (MIN-SB) процес        | Број повређених и број смртно страдалих лица                               | Анализа временске динамике последица пожара и моделовање њихове еволуције.  |
| GAMLSS модел                         | Старост, пол и демографске карактеристике повређених и страдалих лица      | Избор најадекватнијих параметарских расподела и процена њихових параметара. |

Као што се може уочити из табеле 3.10, примењени стохастички приступи нису коришћени изоловано, већ као међусобно комплементарне методе које омогућавају анализу различитих аспеката пожарних последица. Инфлаторна Пуасонова расподела обезбеђује адекватно моделовање ретких догађаја (тј. пожара са повређеним и погинулим лицима), минификациони процеси описују временску динамику и еволуцију броја повређених и смртно страдалих лица, док GAMLSS приступ омогућава детаљно моделовање демографских карактеристика лица и избор најадекватнијих стохастичких расподела. Заједно посматрани, ови модели чине јединствен стохастички оквир за анализу ризика по безбедност људи од пожара.

Притом, треба истаћи да резултати добијени применом наведених стохастичких приступа не представљају коначан циљ истраживања, већ полазну основу за наредну фазу анализе. Наиме, након квантитативног описа и моделовања последица пожара по безбедност људи, примењене су технике машинског учења са циљем идентификације најзначајнијих фактора ризика и откривања узрочно-последичних зависности између карактеристика пожарних догађаја и њихових последица по људску безбедност.

### 3.1.3. Анализа фактора ризика применом техника машинског учења

Након квантитативног описа последица пожара по људе применом стохастичког моделовања, наредну фазу истраживања представља анализа међусобних зависности између карактеристика пожарних догађаја и њихових последица применом техника машинског учења. То се, пре свега, односи на откривања знања из података, са циљем идентификације фактора ризика и откривања законитости које није могуће уочити

применом класичних статистичких метода. Док стохастички модели омогућавају статистички опис и моделовање појединачних променљивих, ове технике усмерене су на откривање сложених образаца, зависности и правила која нису непосредно уочљива класичном статистичком анализом. У складу са постављеним циљевима истраживања, слично као у претходном делу, примењене су три међусобно комплементарне групе техника машинског учења:

1. Прва група обухвата *кластерску анализу*, чији је циљ идентификација хомогених група пожарних догађаја са сличним карактеристикама и последицама по безбедност људи. Формирањем кластера омогућено је издвајање типичних образаца пожара и њихова међусобна упоредна анализа.
2. Другу групу чине *класификациони модели*, пре свега стабла одлучивања заснована на CHAID алгоритму, која су примењена ради идентификације најзначајнијих фактора који утичу на настанак повреда и смртних исхода. За разлику од дескриптивне статистичке анализе, класификациони модели омогућавају рангирање значаја појединих променљивих и формирање правила одлучивања која имају практичну примену у процени ризика и планирању превентивних мера.
3. Посебан значај у истраживању има *анализа асоцијативних правила*, реализована применом Apriori алгоритма. За разлику од класификационих метода, које полазе од унапред дефинисане циљне променљиве, анализа асоцијација омогућава откривање честих истовремених појава и скривених зависности између анализираних карактеристика пожарних догађаја и последица по људску безбедност. На овај начин идентификована су правила која указују на комбинације фактора повезане са повећаним ризиком од повређивања или смртог исхода.

Табела 3.11. Примена техника машинског учења у истраживању

| Примењена техника       | Предмет анализе                  | Основни циљ                                                                                              |
|-------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Кластерска анализа      | Карактеристике пожарних догађаја | Груписање сличних пожара и идентификација типичних ризичних образаца.                                    |
| CHAID стабла одлучивања | Независне и циљне променљиве     | Идентификација најзначајнијих фактора ризика и класификација пожарних догађаја.                          |
| Apriori алгоритам       | Категорисане променљиве          | Откривање асоцијативних правила и скривених зависности између карактеристика пожара и њихових последица. |

Ради прегледнијег приказа, основне технике машинског учења примењене у истраживању приказане су у наредној табели 3.11. Као што се може уочити из саме табеле, примењене технике машинског учења имају различите, али међусобно комплементарне улоге у анализи ризика по безбедност људи од пожара. Кластерска анализа омогућава препознавање типичних група пожарних догађаја, класификациони модели идентификују променљиве које највише доприносе настанку ризичних сценарија по безбедност становништва, док анализа асоцијативних правила открива комбинације фактора које су најчешће повезане са повредама и смртним исходима. Интеграцијом резултата добијених применом ових техника обезбеђује се свеобухватно сагледавање ризика и формирање аналитичке основе за дефинисање мера превенције и унапређење система заштите од пожара.

#### **3.1.4. Просторна анализа пожарних догађаја са повређеним и погинулим лицима**

За потребе просторне анализе коришћен је слој административних округа Републике Србије (Републички геодетски завод, n.d.), а пројекција карте дефинисана је у координатном референтном систему WGS 84 / UTM Zone 34N (EPSG:32634). Анализом је обухваћено 24 округа и Град Београд Републике Србије, с напоменом да за подручје Аутономне покрајине Косова и Метохије подаци нису били доступни у посматраном периоду (Vranić & Mišić, 2024).

Прва тематска карта приказује укупну просторну расподелу пожарних догађаја са повређеним и погинулим лицима, без кластеризовања према узроку настанка пожара. Укупан број анализираних догађаја у посматраном петнаестогодишњем периоду износио је 5.769. Картографска визуелизација израђена је применом хороплет методе, при чему је апсолутан број догађаја по округу представљен градацијом боја у распону од светлобеж до тамноцрвене нијансе.

Применом исте методологије израђена је и друга тематска карта, која приказује пожарне догађаје са повређеним и погинулим лицима код којих су као узрок настанка пожара идентификоване цигарете. У оквиру ове анализе обухваћена су 272 догађаја из истог временског периода, док је интензитет просторне расподеле представљен градацијом боја у распону од свесатлоплаве до тамноплаве нијансе. Наведена метода омогућила је упоредни визуелни приказ укупних пожарних догађаја и догађаја специфичних по узроку настанка, чиме је обезбеђена основа за даљу просторну и статистичку анализу (Abdulhafedh, 2017; Vranić & Mišić, 2024).

Поред хороплет карата, у оквиру просторне анализе израђене су четири карте засноване на локалном Морановом индексу (LISA). Карта кластеризације и карта статистичке значајности, приказују просторне обрасце укупних пожарних догађаја без разматрања узрока настанка пожара. Друге две карте израђене су за пожарне догађаје код којих су цигарете идентификоване као узрок настанка пожара (Abdulhafedh, 2017; Vranić & Mišić, 2024). За разлику од претходних карата израђених на нивоу управних округа, ове карте приказују тачне локације настанка догађаја. Прва карта приказује пожарне догађаје са повређеним лицима, а друга карта приказује пожарне догађаје са погинулим лицима. Обе карте израђене су у софтверу QGIS уз коришћење растерске подлоге. Догађаји су означени различитим симболима, при чему сваки симбол одговара одређеној групи добијеној из анализе стабла одлучивања. Карта повређених лица израђена је у зелено-наранџастој боји, док је карта погинулих лица приказана у тамноплавој боји са различитим нијансама интензитета. Карте су израђене комбинованом применом софтвера QGIS и GeoDa, при чему је у QGIS-у припремљен просторни слој са бројем догађаја по управним окрузима, док су LISA анализа и израчунавање локалног Морановог индекса спроведени у софтверу GeoDa (Abdulhafedh, 2017).

## **3.2. Форензичка анализа узрока пожара**

У циљу повећања ефикасности форензичке обраде места догађаја пожара и обезбеђивања материјалних доказа за даљи судски поступак, овај одељак дисертације обухвата испитивање примене инструменталних метода анализе остатака сагоревања. Посебна пажња посвећена је испитивању могућности примене савремених инструменталних метода у идентификације карактеристичних хемијских промена у материјалима након термичког оптерећења и утврђивању специфичних компоненти продуката сагоревања које могу указивати на присуство цигарете као могућег извора паљења. У ту сврху примењене су FT-IR спектроскопија и EI-MS.

### **3.2.1. Материјали**

Одабир материјала за испитивање хемијских промена након термичког оптерећења вршен је на основу доступности у домаћинству. Такође, одабрани су материјали различитог хемијског састава како би се испитале промене настале услед термичког оптерећења. У оквиру студије коришћени су следећи материјали:

- памучна тканина (100%), ХК ПК „YUMCO” АД Врање, Србија,

- полиестарска тканина (100%), ХК ПК „YUMCO” АД Врање, Србија,
- тканина памук/полиестар (80/20), *Blue Bell d.o.o.*, Београд, Србија,
- тканина памук/полиестар (20/80), *Blue Bell d.o.o.*, Београд, Србија,
- сунђер тип 1, *КАЕМ Sp. z o.o.*, Бараново, Пољска,
- сунђер тип 2, *КАЕМ Sp. z o.o.*, Бараново, Пољска,
- папир (200 g/m<sup>2</sup>), *Mondi Neusiedler GmbH, Hausmening*, Аустрија,
- дрво од липе, Јела мега д.о.о., Београд,
- цигарете, *Sobranie gold, Pall mall slim, Davidoff Gold, Dunhill Master Blend* и ручно мотане цигарете од сеченог домаћег дувана.

У фази модификације површине различитих материјала, коришћен је водоразредиви премаз *Printperfect blanc 670* произвођача *CHT Gruppe*, као матрица за адитиве за повећање ватроотпорности. Као сировине за добијање нових честица поступком механичке активације коришћене су честице алуминијум-оксида (99,97%,  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3  $\mu$ m, 80-120 m<sup>2</sup>/g *ThermoFisher*, Немачка) и алуминијум-хидроксид (Центрохем, Србија).

За испитивање остатака сагоревања применом FT-IR спектроскопије коришћене су цигарете марке *Sobranie Gold, Pall Mall Slim, Davidoff Gold* и *Dunhill Master Blend*, као и ручно мотане цигарете од домаћег сеченог дувана и шибице, при чему су узорци припремани у димензијама 5 × 5 cm. За анализу применом EI-MS коришћена је цигарета марке *Dunhill Master Blend* као референтни узорак, док су узорци припремани у димензијама 2 × 2 cm. Испитивања су обухватила памучну тканину (100%), полиестарску тканину (100%), тканине памук/полиестар (80/20 и 20/80), сунђер типа 1 и типа 2, као и модификоване узорке памучне и полиестарске тканине.

### 3.2.2. FT-IR спектроскопија у идентификацији трагова цигарете на текстилним материјалима

Промене у структури материјала након спаљивања жаром различитих цигарета, као и промене у структури модификованих материјала, утврђене су применом FT-IR спектроскопије. Инструментална мерења су вршена FT-IR спектрометром ALPHA II (*Brücker*, Немачка). Структурне промене праћене FT-IR методом снимање су у опсегу таласних бројева од 4000 cm<sup>-1</sup> до 400 cm<sup>-1</sup>, са резолуцијом од 2 cm<sup>-1</sup> и акумулацијом 32 скена. Анализа је извршена у моду пригушене тоталне рефлексије (енгл. *Attenuated Total Reflection - ATR*) технике, при чему су узорци директно постављени на кристал без додатне припреме. Пре сваког мерења сниман је позадински спектар, а добијени резултати обрађени су уз примену стандардне корекције базне линије. У циљу утврђивања

могућности развоја форензичке методе за утврђивање извора пожара, додатне упоредне анализе вршене су применом FT-IR уређаја Nicolet iS10 (енгл. *Thermo Scientific*, САД) при истим условима мерења.

За квантитативно поређење FT-IR спектра примењен је Пирсонов коефицијент корелације ( $r$ ), статистичка мера која изражава степен линеарног слагања интензитета апсорпционих трака између два спектрална профила (Bílková, 2012; Morozov et al., 2015). Коефицијент се израчунава према изразу (Stojanović, 2022):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

где  $x_i$  и  $y_i$  представљају интензитете апсорпције на одговарајућим таласним бројевима два упоређена спектра, а  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  њихове средње вредности. Добијене вредности  $r$  крећу се у распону од  $-1$  до  $+1$ . Вредности које се приближавају  $+1$  указују на изражену подударност спектралних профила, док вредности око нуле упућују на одсуство линеарне повезаности између посматраних спектра. Негативне вредности, које теже  $-1$ , сведоче о супротном тренду промене интензитета дуж спектра.

### **3.2.3. EI-MS у идентификацији трагова цигарете на текстилним материјалима**

За експериментална мерења коришћен је масени спектрометар Hiden HPR-60 EQP, вишенаменски квадруполни систем за анализу гасова и резидуалних гасова. Овај уређај је специјално дизајниран за анализу хемијских врста (неутрала, позитивних и негативних јона, као и њихових енергија) у гасној фази при атмосферском притиску (Čech et al., 2017). У циљу анализе продуката сагоревања, инструменту је прикључена наменски конструисана комора за сагоревање, из које су гасовити производи усисавани кроз улазни отвор (инлет) у масени спектрометар. Мерења су извршена у масеном опсегу од 1 аму до 100 аму, са минималним инкрементом од 1 аму, у режиму скенирања Global (RGA). Јонизација је вршена методом електронског удара при енергији електрона од 70 eV, уз емисиону струју од 5  $\mu$ A. Параметри јонског извора подешени су на следеће вредности: напон на плочама 7,27 V, напон кавеза 3,0 V, напон сочива -145 V и напон фокуса извора -269 V, док су корекције по хоризонталној и вертикалној оси износиле -4 % и -7%, респективно, уз померај енергије од 0,35 V. Током мерења активирани су напредне опције скенирања које укључују аутоматско подешавање опсега, скенирање преко дефинисаног опсега, приказ резултата након завршетка скена и акумулацију сигнала, чиме је омогућено поуздано праћење масеног спектра неутралних компоненти у анализираној гасној фази.

Пре уношења узорак извршено је мерење неутралне коморе, тј. идентификован је хемијски састав атмосфере унутар коморе пре додавања узорка, након чега је анализирана цигарета као референтни узорак. Затим су испитивани узорци различитих тканина, при чему су добијене вредности кориговане одузимањем вредности неутралне коморе. Тако кориговани резултати упоређени су са вредностима добијеним за цигарету, у циљу идентификације производа сагоревања. За сваку врсту тканине, као и за цигарету, анализирано је по пет идентичних узорак, при чему је снимање извршено у три циклуса, ради обезбеђивања поузданости и репродуктивности резултата.

### **3.3. Синтеза и карактеризација нанокompозитних честица за припрему ватроотпорних премаза и испитивање њихових својстава**

#### **3.3.1. Припрема ватроотпорних премаза**

Прахови синтетисани механохемијским поступком просејани су кроз метално сито величине отвора 200  $\mu\text{m}$  пре даље припреме. Након просејавања, честице су дозиране у складу са дефинисаним масеним односима. За однос 25:75 коришћено је 1,25 g  $\text{Al}(\text{OH})_3$  и 3,75 g  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , за однос 50:50 коришћено је 2,25 g  $\text{Al}(\text{OH})_3$  и 2,25 g  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , док је за однос 75:25 коришћено 3,75 g  $\text{Al}(\text{OH})_3$  и 1,25 g  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Наведене количине честица су дисперговане у 45 g матрице водоразредивог премаза. Мешање је извршено применом стубне мешалице MICROSTAR 15 control (ИКА, Немачка).

Премази су наносени на тканину помоћу лабораторијског апликатора за премазе (Byko Drive, ВУК, Немачка). На картон формата А4 премаз је наносен ручно, ваљком (произвођача *beorol*) за акрилне боје, док је на узорке дрвета липе димензија 40 mm  $\times$  25 mm  $\times$  100 mm премаз наносен четком за акрилне боје. Сви узорци су остављени да се суше на собној температури ( $21 \pm 2$  °C) у трајању од 72 h, до постизања потпуног сушења.

#### **3.3.2. Методе карактеризација нанокompозитних честица**

Као полазне сировине за механохемијску синтезу честица коришћени су прахови  $\text{Al}(\text{OH})_3$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , без даљег пречишћавања. Смеше су припремљене мерењем одговарајућих количина полазних компоненти, како би се постигли масени односи  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$  од 25:75, 50:50 и 75:25. Серије узорак су млевене у планетарном кугличном млину (*PQ-N04 Gear Drive 4-Station Planetary Ball Mill, Across International*,

САД), коришћењем Y-стабилизованих  $ZrO_2$  куглица и посуда, у атмосфери ваздуха, при односу масе куглица и праха 10:1, у трајању од 10 min.

### 3.3.2.1. XPS и XRD анализа честица нанокompозита $Al(OH)_3 / Al_2O_3$

Узорци су анализирани применом система произвођача SPECS (Немачка) опремљеног XP50M рендгенским извором и Focus 500 монохроматором, повезаног са PHOIBOS 100/150 хемисферичним анализатором. Током мерења коришћено је Al K $\alpha$  зрачење (1486,74 eV), при напону од 12,5 kV и струји од 32 mA.

Прегледни спектри снимљени су у опсегу енергија везивања од 800 eV до 0 eV, при константној пропусној енергији од 40 eV, са кораком од 0,5 eV и временом задржавања од 0,2 s у FAT режиму. Високорезолуциони спектри за Al 2p и O 1s нивое језгра снимљени су при константној пропусној енергији од 20 eV, уз корак од 0,1 eV и временом задржавања од 2 s, такође у FAT режиму.

Базни притисак током аквизиције података одржаван је на нивоу од  $5 \cdot 10^{-8}$  mbar. Енергије везивања су калибрисане реферисањем C 1s пика на 284,8 eV.

Структурна карактеризација честица нанокompозита  $Al(OH)_3 / Al_2O_3$  спроведена је помоћу рендгенске дифракције како би се идентификовале фазе и анализирала промена кристалне структуре у зависности од односа алуминијум-хидроксида и алуминијум-оксида. XRD анализа омогућава праћење трансформације фаза и квантитативну оцену релативног садржаја компоненти у композиту.

### 3.3.2.2. SEM анализа честица нанокompозита

Микрографска структура честица нанокompозита  $Al(OH)_3 / Al_2O_3$  у различитим масеним односима прашкастих компоненти  $Al(OH)_3 / Al_2O_3$  испитиван је скенирајућом електронском микроскопијом. SEM анализе извршене су коришћењем електронског микроскопа Mira3 XMU произвођача Tescan, Чешка република. Припремљене формулације праха снимљене су у сувом стању након поступка механохемијске синтезе. Испитивањем су обухваћене честице добијене у различитим масеним односима  $Al(OH)_3 / Al_2O_3$  (25:75, 50:50 и 75:25). Електропроводљивост прахова постигнута је напаривањем честица легуром злата/платине (15/85) под вакуумом, коришћењем Polaron SC502 распршивача. Величина честица одређена је анализом снимљених SEM микрограма при увећању од 100.000 пута, помоћу софтвера ImageJ.

### 3.3.3. Методе испитивања физичко-механичких својстава текстилних материјала

Одређивање физичко-механичких својстава текстилних материјала обухватило је испитивање затезних својстава, паропропустљивости и отпорности материјала на хабање. Испитивањем су обухваћени текстилни материјали (100% памук и 100% полиестар) чије су површине модификоване премазом адитивираним нанокомпозитима  $Al(OH)_3 / Al_2O_3$  у различитим масеним односима (25:75, 50:50 и 75:25). У табели 3.12. приказана је нумерација узорка текстилних материјала са основним карактеристикама који су примењени у испитивањима физичко-механичких својстава.

Табела 3.12. Нумерација узорка модификованих тканина са бројем и оријентацијом наноса ватроотпорног премаза обухваћених испитивањем физичко-механичких својстава

| Број узорка | Број слојева | Број страна | Сировни састав |
|-------------|--------------|-------------|----------------|
| 1           | 2            | 1           | 100% полиестар |
| 2           | 2            | 1           | 100% памук     |
| 3           | 1            | 2           | 100% полиестар |
| 4           | 1            | 2           | 100% памук     |
| 5           | 2            | 2           | 100% полиестар |
| 6           | 2            | 2           | 100% памук     |
| 7           | 1            | 1           | 100% полиестар |
| 8           | 1            | 1           | 100% памук     |

Испитивање затезних својстава извршено је применом универзалне машине за испитивање материјала H50KT (*Tinius Olsen*) помоћу софтвера (*QMat Professional*). Испитивање је спроведено у контролисаним лабораторијским условима, при стандардној атмосфери температури од  $21 \pm 1$  °C и релативној влажности од  $39 \pm 1\%$ , у складу са стандардом (SRPS EN ISO 139). За испитивање су коришћени узорци у облику „траке”, при чему је испитивање извршено на пет узорка основе и потке за сваки тип материјала, а као вредност је узета средња вредност пет мерења. Током испитивања узорци су били изложени постепено растућем затезном оптерећењу до момента кидања, при чему су одређивани максимална сила кидања, издужење при кидању и затезно напрезање.

Паропропустљивост текстилних материјала испитана је применом методе за одређивање пропустљивости водене паре (*Water Vapor Permeability – WVP*), коришћењем уређаја *Water Vapor Permeability Tester M261* произвођача *SDL Atlas*, Велика Британија. Израчунавање паропропустљивости водене паре извршено је применом следеће формуле:

$$WVP = \frac{24M}{A \cdot t},$$

где је  $M$  губитак масе склопа (система за испитивање) током временског периода, изражен у грамима (g),  $A$  је површина изложеног дела испитног узорка, а  $t$  време излагања.

Одређивање параметра паропропустљивости се заснива на одређивању губитка масе воде кроз узорак у контролисаним условима, при чему се резултати изражавају у  $\text{g/m}^2/24\text{h}$  и израчунавају према односу губитка масе и површине узорка. Током испитивања узорак је изложен дифузији водене паре кроз своју структуру, што омогућава процену способности материјала да омогући транспорт влаге са површине тела у околину. Испитивање отпорности текстилних површина на хабање извршено је применом Мартиндејл (*Martindale*) методе, у складу са стандардом SRPS EN ISO 12947. Током испитивања праћене су промене на површини узорака након одређеног броја циклуса трења.

### 3.3.4. Испитивање запаљивости модификованих узорака

Испитивање запаљивости материјала спроведено је методом површинског паљења, у складу са стандардом EN ISO 15025. Узорци су током испитивања били постављени у вертикалном положају на носачу, при чему је као извор пламена коришћен Бунзенев пламеник са могућношћу регулације дотока ваздуха. Бунзенев пламеник је позициониран тако да оса пламена буде нормална на површину узорка, односно под углом од  $90^\circ$ . Растојање између врха пламена и површине узорка износило је приближно 17 mm, чиме су обезбеђени стандардизовани услови деловања извора паљења.

Пре почетка излагања узрока пламену, Бунзенев пламеник је стабилизovan предгревањем, након чега је висина пламена подешена на око 25 mm. Након припреме пламеника, узорци материјала постављени су на одговарајуће носаче, чиме су обезбеђени услови за равномерно деловање пламена и елиминисање утицаја секундарног загревања, у складу са захтевима стандарда EN ISO 15025. Димензије узорака за испитивање ватроотпорности биле су: тканине 220 mm  $\times$  80 mm, папир 210 mm  $\times$  148 mm и дрво 40 mm  $\times$  25 mm.

Пламен је деловао на површину узорка у трајању од 10 s, након чега су праћени параметри релевантни за оцену запаљивости, укључујући време накнадног пламена, време накнадног жарења, ширење пламена ка ивицама узорка, као и појаве деградације материјала, као што су формирање отвора или одвајање делова материјала (EN ISO 15025). Узорци премазаних материјала били су директно изложени пламену у дефинисаним временским интервалима, при чему је анализирано њихово понашање у условима термичког оптерећења. По истеку периода анализе од 10 s, узорци су задржани у зони дејства пламена до тренутка појаве самосталног пламена на узорку.

#### 3.3.4.1. Термовизијско испитивање ширења пламена на комерцијалним и модификованим тканинама

Прецизно праћење развоја температурног поља и процеса оштећења тканина у реалном времену извршена су камером *FLIR E49001*, произвођача *FLIR Systems*, САД, што је омогућило прецизно праћење развоја температурног поља у реалном времену.

Параметри термовизијског испитивања су: емисивност ( $\epsilon$ ) је износила 0,95, рефлектована температура 20 °C, удаљеност мерења 1 m, релативна влажност ваздуха 43%, атмосферска температура 24 °C, док је поље гледања (FOV) било 45°. Овако дефинисани услови омогућили су поуздану калибрацију и тачну интерпретацију измерених температурних вредности током излагања узорака отвореном пламену.

У термовизијским испитивањима ватроотпорности модификованих и немодификованих текстилних материјала, као извор топлоте коришћена је цигарета *Dunhill Master Blend* произвођача *British American Tobacco*, Врање, Република Србија. Наведеним испитивањима обухваћене су сирове тканине (100% памук и 100% полиестар) и тканине модификоване наносом ватроотпорног премаза са честица нанокомпозита  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$  у различитим масеним односима (25:75, 50:50 и 75:25). За сваку врсту тканине испитано је пет узорака, при чему су термовизијским испитивањем праћене промене температуре и развој термичког оштећења, а за квантитативну анализу одабран је узорак са највећом утврђеном површином термичког оштећења.

Видео-записи су анализирани издвајањем термограма у временским интервалима од једне секунде, чиме је омогућено праћење температуре у функцији времена. Температура је одређивана применом методе оптичког препознавања карактера *Tesseract OCR*, директним читавањем вредности са термовизијских снимака. На основу добијених термограма и видео-записа, применом програмског језика *Python*, извршена је анализа зона оштећења текстилних материјала, као и анализа промене температуре у дефинисаним временским интервалима.

## **4. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА**

---

У овом поглављу су најпре приказани резултати добијени применом предложене методологије над подацима о пожарним догађајима у Републици Србији. Полазећи од циља дисертације, анализа је усмерена ка свеобухватном сагледавању ризика по безбедност људи од пожара, кроз интеграцију стохастичког моделовања, метода машинског учења и просторне анализе. На овај начин је омогућено да се, поред идентификације основних карактеристика пожарних догађаја, анализирају и фактори који утичу на настанак повреда и смртних исхода, као најзначајнијих последица пожара.

У складу са методолошким оквиром представљеним у претходном поглављу, резултати су организовани у неколико међусобно повезаних целина. У првом делу су приказане дескриптивне статистичке карактеристике анализираних података и основна обележја циљних променљивих. Потом су изложени резултати стохастичког моделовања, који обухватају анализу дискретних и континуалних променљивих, избор најадекватнијих расподела и моделирање демографске структуре повређених и смртно страдалих лица. Након тога следе резултати примене метода машинског учења, који омогућавају идентификацију типичних образаца пожарних догађаја, откривање асоцијативних зависности и издвајање најзначајнијих фактора ризика применом алгоритама кластеризације, CHAID стабала одлучивања и Apriori алгорита.

У наредном делу овог поглавља приказани су резултати просторне анализе пожарних догађаја, којима се идентификују просторни обрасци и ризичне зоне, као и експерименталних испитивања ватроотпорности одабраних материјала, чији је циљ процена њихових противпожарних својстава и могућности примене у унапређењу система заштите од пожара. Применом различитих инструменталних метода испитиване су могућности идентификације узрока пожара, са посебним фокусом на пожаре изазване цигаретом. Истовремено, испитивана је функционалност модификованих тканина у погледу побољшања њихове ватроотпорности при дејству извора паљења.

На овај начин, интеграцијом аналитичких, просторних и експерименталних резултата формира се целовит приступ процени пожарног ризика, који представља основу за предлагање мера превенције, унапређење стандарда заштите и повећање нивоа безбедности људи, животиња и материјалних добара. Њиховим заједничким разматрањем добијају се поузданији закључци о факторима који утичу на безбедност људи од пожара и формира научна основа за дефинисање превентивних мера и унапређење система управљања ризиком од њиховог настанка. Посебан значај овог поглавља огледа се у интеграцији резултата добијених применом различитих аналитичких приступа.

## 4.1. Дескриптивна анализа последица пожара

Пре примене стохастичког моделовања и метода машинског учења неопходно је сагледати основне карактеристике анализираних података и структуру последица пожарних догађаја по људе. Дескриптивна статистичка анализа представља полазну основу за разумевање расподеле анализираних променљивих, идентификацију основних демографских обележја повређених и смртно страдалих лица, као и уочавање потенцијалних закономерности које ће бити детаљније испитиване у наставку применом стохастичких модела и метода машинског учења. Имајући у виду да су у претходним поглављима дефинисана два аналитичка аспекта расположивих података, резултати дескриптивне анализе организовани су тако да обухвате како основне карактеристике пожарних догађаја, тако и демографску структуру лица која су у пожарима повређена или смртно страдала. На тај начин обезбеђена је јединствена основа за каснију интеграцију статистичких, стохастичких и алгоритамских резултата.

### 4.1.1. Основне карактеристике анализираних података

У првом аналитичком аспекту, предложеном у ауторском раду (Mitrović et al., 2025), сваки запис појединачног пожара тумачи се као инстанца посматраног скупа података, тј. као појединачни догађај са информацијама о узроку, локацији пожара, врсти објекта, месту настанка, времену обавештавања, доласку ватрогасно-спасилачке јединице и гашење пожара, као и броју погинулих и броју повређених лица. Истовремено, као што је већ раније поменуто, главни мотив овог истраживања јесте утврђивање међузависности одговарајућих улазних варијабли са бројем повређених и жртава, које се посматрају као излазне (циљне) варијабле.

У ту сврху, уведене су две посебне нумеричке променљиве, број повређених ( $X$ ), као и смртних случајева ( $Y$ ) у сваком од посматраних пожара. На овај начин, оне се могу тумачити као позитивне целобројне случајне променљиве, а могу се применити и неки од добро познатих поступака за оцењивање њихових параметара и стохастичко моделовање, које је већ познато у савременој литератури (видети, нпр., Stojanović et al., 2023a; Stojanović et al., 2024b). Истовремено, треба истаћи да је осим стохастичког моделовања за променљиве  $X$  и  $Y$  касније извршена сегментација (кластеризација) скупова њихових вредности. Коначно, прекодирањем вредности ових променљивих са ДА/НЕ (пожари са или без повреда и смртних случајева), оне се такође могу посматрати као излазне (циљне)

променљиве у класификацији узрочних случајева пожара. Основни статистички индикатори ових променљивих дати су у наредној табели 4.1.

Табела 4.1. Дескриптивна статистика броја повређених и погинулих од пожара (свака инстанца представља пожарни догађај)

| Променљива    | Min | 25% | 50% | 75% | Max | Модус | Просек | Var   | StDev | Асим. | Сума |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|--------|-------|-------|-------|------|
| Повређени (X) | 0   | 1   | 1   | 1   | 30  | 1     | 1,042  | 1,041 | 1,020 | 7,862 | 6013 |
| Погинули (Y)  | 0   | 0   | 0   | 0   | 7   | 0     | 0,237  | 0,238 | 0,488 | 2,855 | 1370 |

На основу података приказаних у табели може се уочити да променљива  $X$  садржи углавном вредности које указују на једно повређено лице у пожарима, иако је њена екстремна вредност (колона  $Max$ ) чак 30 повређених. Слично томе, променљива  $Y$ , која описује број смртно страдалих, углавном садржи нулте вредности, што указује на пожаре без смртно страдалих. Истовремено, забележени су и пожарни догађаји са максималним бројем од 7 смртно страдалих.

Додатно, треба напоменути да су за обе излазне променљиве средње вредности (колона означена са *Просек*) приближно једнаке њиховим варијансама (колона  $Var$ ). Стога се претпоставља да се емпиријске дистрибуције ове две променљиве могу уклопити (фитовати) коришћењем добро познате Пуасонове расподеле, односно њене модификације познате као *инфлаторна 0 – 1 Пуасонова расподела*. Ипак, како је већ раније речено, у циљу спровођења DM анализе посматраних података коришћењем техника класификације, тј. стабала одлучивања, такође је извршена трансформација излазних вредности променљивих  $X, Y$  у облику две класе. Прецизније речено, вредности ових променљивих су кодиране као „ДА” (ако постоје повреде, тј. смртни исходи) или „НЕ” (ако нема повреда, тј. смртних исхода).

#### 4.1.2. Демографска структура повређених и смртно страдалих лица

У овом одељку приказане су демографске и дескриптивне карактеристике лица која су повређена или смртно страдала у пожарима, са фокусом на њихову старост, пол и тежину повреда. Како је већ наведено у претходном поглављу (Одељак 3.1.1), ове карактеристике представљају још једну важну групу излазних (циљних) променљивих, која је детаљно анализирана са другог аналитичког аспекта, предложеног у ауторском раду (Mitrović et al., 2026). Дескриптивна статистичка анализа емпиријске расподеле претходно описаних променљивих приказана је у табели 4.2. Из приказаних резултата може се уочити значајно већа заступљеност мушкараца међу повређеним лицима, што указује на њихову већу

изложеност пожарним ризицима. Као што ће бити детаљније анализирано у наставку, ова појава може бити повезана са професионалним активностима и занимањима у којима су мушкарци чешће изложени опасности од настанка пожара. С друге стране, учешће жена међу смртно страдалим лицима знатно је веће него међу повређенима, што указује на другачију структуру ризика. Наиме, приказани резултати такође упућују и на чињеницу да су смртни исходи у већој мери повезани са повећаном рањивошћу одређених категорија становништва, пре свега старијих лица, што је у складу са резултатима стохастичког моделовања приказаним у наставку ове студије.

Табела 4.2. Демографска расподела повреда и смртних случајева у пожарима

| Променљиве                              | Повређени   |          | Погинули    |          |
|-----------------------------------------|-------------|----------|-------------|----------|
|                                         | Фреквенције | Проценат | Фреквенције | Проценат |
| <b>Пол</b>                              |             |          |             |          |
| Женски                                  | 510         | 24,6%    | 305         | 35,8%    |
| Мушки                                   | 1565        | 75,4%    | 548         | 64,2%    |
| <b>Старосне групе<br/>(по годинама)</b> |             |          |             |          |
| 0-9                                     | 53          | 2,5%     | 28          | 3,3%     |
| 10-19                                   | 80          | 3,8%     | 8           | 0,9%     |
| 20-34                                   | 442         | 21,3%    | 56          | 6,6%     |
| 35-49                                   | 551         | 26,6%    | 81          | 9,5%     |
| 50-64                                   | 508         | 24,5%    | 178         | 20,9%    |
| 65-79                                   | 319         | 15,4%    | 248         | 29,0%    |
| 80+                                     | 122         | 5,9%     | 254         | 29,8%    |
| <b>Тежина повреда</b>                   |             |          |             |          |
| Лакше                                   | 1356        | 65,3%    | —           | —        |
| Теже                                    | 719         | 34,7%    | —           | —        |

Што се тиче старости повређених, доминантна група је група од 20 до 64 године, која чини 72,4% свих повређених лица. Међу смртно страдалима, доминантна је група лица старијих од 65 година, која чини скоро 59% свих смртно страдалих. Дакле, повреде су концентрисане у радно способном становништву, док смртни исходи несразмерно погађају старије особе, што истиче старост као критични фактор ризика. Коначно, у већини случајева повреде имају мање последице, али значајан удео озбиљних повреда указује на потребу за превенцијом и заштитом у радном окружењу.

Поред тога, старост повређених и смртно страдалих лица такође се посматрају као две одвојене нумеричке променљиве. У ту сврху, слично као раније, израчунати су њихови статистички индикатори, као што су мере централне тенденције, дисперзије и облика расподеле. Ове вредности су приказане у табели 4.3, где се могу извући слични закључци

као у претходној дескриптивној анализи. Другим речима, повреде су груписане око становништва радно способног узраста, са симетричном дистрибуцијом (средња вредност је приближно једнака медијани, асиметрија је приближно једнака нули) и умереном варијабилношћу. Насупрот томе, смртни исходи су значајно концентрисани у старијој популацији, са израженом негативно асиметричном дистрибуцијом (средња вредност  $\approx 65$ , медијана = 71, асиметрија  $< 0$ ) и израженим куртозисом ( $> 3$ ). Ова чињеница указује на концентрацију дистрибуције лица старије животне доби, али и на значајно присуство екстремних случајева, тј. могућност страдања и код најмлађе и код најстарије популације. Дакле, већ овде се уочава фундаментална демографска разлика између повређених и смртно страдалих лица у пожарима. Наиме, повреде претежно погађају економски активно становништво, док су смртни случајеви несразмерно заступљени међу члановима старије популације.

Табела 4.3. Дескриптивна статистика старосне структуре повреда и смртних случајева у пожарима

| Променљива    | Min | 25% | 50% | 75% | Max | Просек | Var   | StDev | Асим.                 | Курт. | Сума |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|--------|-------|-------|-----------------------|-------|------|
| Повређени (X) | 0   | 33  | 47  | 62  | 92  | 47,66  | 384,8 | 19,62 | $3.84 \times 10^{-4}$ | 2,394 | 2075 |
| Погинули (Y)  | 1   | 53  | 71  | 81  | 98  | 64,52  | 461,7 | 21,49 | -1.061                | 3,606 | 853  |

Добијени резултати указују да последице пожара по безбедност људи нису равномерно распоређене у анализираној популацији. Уочене разлике према полу, старости и тежини повреда указују на постојање више међусобно повезаних фактора ризика, чији утицај није могуће у потпуности објаснити применом дескриптивне статистике. Из тог разлога, у наставку истраживања најпре су примењени стохастички модели, којима се испитују статистичка својства и расподеле анализираних променљивих, а затим методе машинског учења, које омогућавају идентификацију најзначајнијих фактора ризика и откривање њихових међусобних зависности.

## 4.2. Примена стохастичког моделовања

Након приказа основних дескриптивних карактеристика анализираних података, у наставку је извршена детаљнија анализа примене стохастичких модела описаних у Поглављу 2. Основни циљ ове фазе истраживања био је да се квантитативно опишу статистичке законитости које карактеришу последице пожарних догађаја по људе, као и да се идентификују модели који најадекватније описују њихову структуру и динамику.

Полазећи од различите природе анализираних променљивих, примењена су три међусобно комплементарна стохастичка приступа. *Инфлаторна* (0 – 1) *Пуасонова расподела* коришћена је за моделовање дискретних променљивих са израженом инфлацијом нултих и јединичних вредности, *минификациони (MIN-SB) процес* за анализу временске динамике броја повређених и смртно страдалих лица, док је *GAMLSS приступ* примењен ради моделирања демографских карактеристика повређених и страдалих лица и избора најадекватнијих параметарских расподела.

Иако сваки од наведених приступа анализира различит аспект пожарних последица, њихова заједничка примена, како је већ истакнуто, омогућава свеобухватније сагледавање ризика по безбедност људи. Док прва два модела описују случајност и временску динамику анализираних појава, GAMLSS омогућава детаљну анализу расподеле старости и других демографских карактеристика, чиме се добија потпунија слика механизма који доводе до повређивања и смртних исхода.

#### 4.2.1. Примена инфлаторне (0–1) Пуасонове расподеле

Како би се успешно моделовале емпиријске расподеле прве групе уведених циљних променљивих, тј. серија  $X$  и  $Y$ , које, како је раније објашњено, приказују редом број повређених и страдалих лица у пожарима, користи се чињеница да су средње вредности и варијансе посматраних серија приближно једнаке (видети табелу 4.1). Стога се може претпоставити да се дистрибуције засноване на Пуасоновој расподели могу користити у овој врсти стохастичког моделовања. Дакле, основна идеја јесте да се емпиријске дистрибуције променљивих  $X$  и  $Y$  моделују тзв. *инфлаторном* (0 – 1) *Пуасоновом расподелом*, приказаној једнакошћу (2.1).

За оба скупа посматраних варијабли, у табели 4.4 приказане су сумарне вредности броја нула и јединица, проценат њиховог појављивања, као и тзв. индекси нула и јединица ( $I_0, I_1$ ). Према овоме, јасно се види да променљива  $X$  има посебно честе вредности 1, док променљива  $Y$  углавном има вредности 0. Штавише, значај инфлаторног присуства 0 – 1 вредности додатно је тестиран коришћењем такозваних 0 – 1 индекса (видети, нпр., Weiß et al., 2019):

$$I_0 = \frac{\hat{p}_0 \exp(\bar{X}_n) - 1}{\hat{\sigma}_0}, \quad I_1 = \frac{\hat{p}_1 \bar{X}_n \exp(\bar{X}_n) - 1}{\hat{\sigma}_1}.$$

Овде је  $n = 5.769$  обим посматраног узорка,  $\bar{X}_n = n^{-1} \sum_{i=1}^n x_i$  је средина узорка, док су  $\hat{\sigma}_0$ ,  $\hat{\sigma}_1$  стандардне девијације статистика  $Z_0 = \hat{p}_0 \exp(\bar{X}_n)$  и  $Z_1 = \hat{p}_1 \bar{X}_n \exp(\bar{X}_n)$ , респективно.

Притом је очигледно да у случају стандардне Пуасонове расподеле важе „очекиване” једнакости  $I_0 = 0$  и  $I_1 = 1$ . Најзад, на основу неких општих асимптотских резултата (видети, нпр., Weiß et al., 2019), може се показати да обе статистике  $Z_0$  и  $Z_1$  имају асимптотски Гаусову (нормалну) расподелу.

Из тих разлога, применом уобичајеног поступка заснованог на стандардној Гаусовој расподели, могуће је тестирати хипотезу  $H_0$  да присуство 0 – 1 вредности у овим серијама није значајно наглашено. Резултати таквог тестирања такође су приказани у табели 4.4, где је приметно да је хипотеза  $H_0$  одбачена у случају индекса  $I_1$  за  $X$ -променљиву, односно индекса  $I_0$  у случају  $Y$ -променљиве. Дакле, закључује се да серија  $X$  има значајно присуство вредности 1, док серија  $Y$  има значајно присуство вредности 0, тако да се обе могу моделовати коришћењем инфлаторне Пуасонове 0 – 1 расподеле.

Табела 4.4. Резултати сумирања и тестирања 0 – 1 вредности за серије  $X$  и  $Y$

| Променљива           | Збир 0-<br>вредности | $\hat{p}_0$ | $I_0$<br>( $p$ -вредност) | Збир 1-<br>вредности | $\hat{p}_1$ | $I_1$<br>( $p$ -вредност) |
|----------------------|----------------------|-------------|---------------------------|----------------------|-------------|---------------------------|
| Повређени<br>( $X$ ) | 1120                 | 0,1941      | -0,5046<br>(0,6931)       | 3840                 | 0,6656      | 1,6819*<br>(0,0463)       |
| Погинули<br>( $Y$ )  | 4507                 | 0,7812      | 1,7203*<br>(0,0427)       | 1183                 | 0,2051      | 1,5250<br>(0,0636)        |

\* $p < 0,05$

У ту сврху, најпре се разматра  $X$ -променљива, која се моделује помоћу 1-Пуасонове расподеле, чији је закон расподеле дефинисана на следећи начин:

$$p_X(x) = \begin{cases} \phi_1 + \phi_2 p(x; \lambda), & x = 1, \\ \phi_2 p(x; \lambda), & x \neq 1. \end{cases} \quad (3.1)$$

Овде је  $x = 0, 1, 2, \dots$  скуп вредности дате променљиве, док је  $p(x; \lambda) = \lambda^x \exp(-\lambda)/x!$  расподела стандардне Пуасонове случајне променљиве са параметром  $\lambda > 0$ . Поред тога,  $\phi_1 \in (0, 1)$  је параметар који показује додатни удео јединица, у поређењу са обичном Пуасоновом расподелом, док је  $\phi_2 = 1 - \phi_1$  комплементаран параметар.

Према једначини (3.1), очито је да расподела  $p_X(x)$  укључује вредности 1 са вероватноћом  $\phi_1 + \phi_2 p(1; \lambda)$ , што је веће од одговарајуће вероватноће  $p(1; \lambda)$  код обичне Пуасонове расподеле, јер важи:

$$\begin{aligned} \phi_1 + \phi_2 p(1; \lambda) - p(1; \lambda) &= \phi_1 + (1 - \phi_1)p(1; \lambda) - p(1; \lambda) \\ &= \phi_1(1 - p(1; \lambda)) > 0. \end{aligned}$$

Притом, 1-Пуасонова расподела зависи од три непозната параметра  $\lambda, \phi_1, \phi_2 > 0$  који се могу оценити коришћењем различитих метода. Да би се оценили ови параметри, овде се примењује тзв. метод момената (ММ), заснован на изједначавању прва два теоријска

момента  $\mu_r(\lambda, \phi_1) = E(X^r)$ ,  $r = 1, 2$ , са емпиријским моментима  $\hat{\mu}_r = n^{-1} \sum_{i=1}^n x_i^r$ ,  $r = 1, 2$ . У случају 1-Пуасонове расподеле, лако се може показати да за теоријске моменте важи (видети, рецимо, Stojanović et al., 2023):

$$\mu_r(\lambda, \phi_1) = \phi_1 + \phi_2 M_r(\lambda), \quad r = 1, 2,$$

где су  $M_1(\lambda) = \lambda$  и  $M_2(\lambda) = \lambda^2 + \lambda$  прва два теоријска момента обичне Пуасонове расподеле. Стога се оцене добијене по методу момената могу добити решавањем следећег система једначина:

$$\begin{aligned} \phi_1 + \phi_2 \lambda &= \hat{\mu}_1, \\ \phi_1 + \phi_2 (\lambda^2 + \lambda) &= \hat{\mu}_2, \end{aligned}$$

посматраног у односу на непознате параметре  $\lambda, \phi_1, \phi_2 > 0$ . Након неколико једноставних израчунавања, као решење горњег система добија се:

$$\hat{\lambda}_{1/2} = \frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4ab}}{2a}, \quad \hat{\phi}_2 = \frac{a}{\hat{\lambda} - 1} = \frac{b}{\hat{\lambda}^2}, \quad \hat{\phi}_1 = 1 - \hat{\phi}_2,$$

где су:

$$a = \hat{\mu}_1 - 1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - 1), \quad b = \hat{\mu}_2 - \hat{\mu}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i (x_i - 1). \quad (3.2)$$

прва два узорачка факторијелна момента.

Резултати оваквог поступка оцењивања приказани су у табели 4.5, где је поред самих оцена 1-Пуасонових параметара  $\lambda, \phi_1, \phi_2 > 0$ , приказана и оцењена вредност параметра стандардне Пуасонове расподеле  $\hat{\lambda}_{Pois} = \hat{\mu}_1 = \bar{X}_n$ . Као што се може видети, обе расподеле имају приближно једнаке процењене вредности параметра  $\lambda$ , али додатни удео 1-вредности, исказан оцењеном вредношћу параметра  $\phi_1 \approx 1/2$ , што јасно указује на изражено присуство јединичних вредности.

Табела 4.5. Оцењене вредности параметара Пуасонове и 1-Пуасонове расподеле, засноване на опсервираном узорку  $X$ -серије

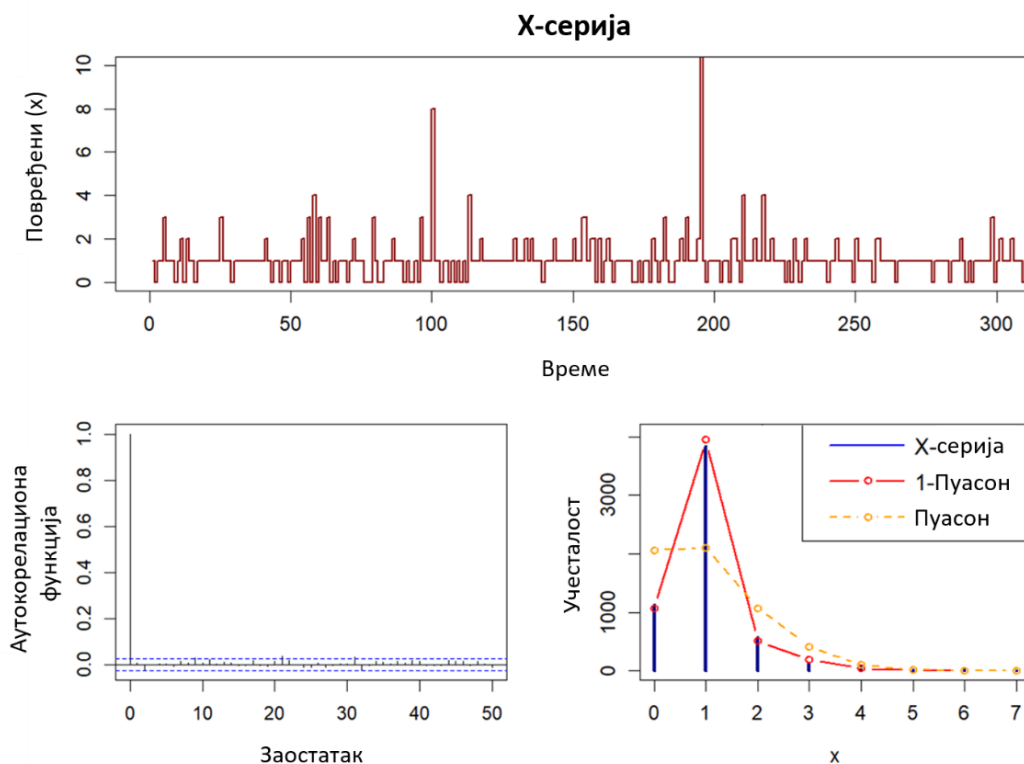
| Расподела   | Параметри |          |          | Тест статистике / ( $p$ -вредности)      |                    |                      |
|-------------|-----------|----------|----------|------------------------------------------|--------------------|----------------------|
|             | $\lambda$ | $\phi_1$ | $\phi_2$ | $W$                                      | $Z$                | $D$                  |
| Пуасонова   | 1,0423    | —        | —        | 17.223.254*<br>( $3,74 \times 10^{-3}$ ) | 1,8472<br>(0,0647) | 0,1510*<br>(~0.0000) |
| 1-Пуасонова | 1,0423    | 0,5009   | 0,4991   | 16.695.024<br>(0,6712)                   | 0,3409<br>(0,7332) | 0,0104<br>(0,9139)   |

\*  $p < 0,05$

Штавише, за обе ове расподеле извршено је и статистичко тестирање њиховог слагања са емпиријском расподелом  $X$ -серије. У ту сврху коришћена су следећа три статистичка теста:

- Вилкоксонов тест збира рангова са корекцијом континуитета ( $W$ );
- пермутациони асимптотски тест опште независности ( $Z$ );
- асимптотски тест Колмогоров-Смирнова ( $D$ ).

Сви горе наведени тестови спроведени су у статистички оријентисаном програмском језику „R” (верзија 4.5.0) и коришћењем софтверског пакета „*twosamples*” (Dowd, 2023). Вредности тест статистика, као и одговарајуће  $p$ -вредности, такође су дате у табели 4.5. На основу њих, очигледно је да у случају 1-Пуасонове расподеле, нулта хипотеза о њеном слагању са емпиријском расподелом  $X$ -серије није одбачена ни у једном од наведених тестова. Насупрот томе, обична Пуасонова расподела очигледно није адекватан стохастички модел, што се може видети и на слици 4.1.



Слика 4.1. Горњи графикон: Динамика броја повређених ( $X$ ). Графикони испод: Аутокорелациона функција променљиве  $X$  (лево) и емпиријска расподела исте променљиве (десно), фитована обичном Пуасоновом и 1-Пуасоновом расподелом

Слично  $X$ -променљивој, у наставку је размотрено моделовање емпиријске расподеле  $Y$ -променљиве коришћењем 0-Пуасонове расподеле, чији је закон расподеле дат следећом једнакошћу:

$$p_Y(y) = \begin{cases} \phi_0 + \phi_2 p(y; \lambda), & y = 0 \\ \phi_2 p(y; \lambda), & y \neq 0. \end{cases}$$

Овде је, као и раније,  $p(y; \lambda) = \lambda^y \exp(-\lambda)/y!$ ,  $y = 0, 1, 2, \dots$ , расподела обичне, стандардне Пуасонове случајне променљиве, параметар  $\phi_0 \in (0, 1)$  представља додатни удео 0-вредности, док је  $\phi_2 = 1 - \phi_0$ . На исти начин као и код 1-Пуасонове расподеле, непознати параметри  $\lambda, \phi_0, \phi_2 > 0$  код 0-Пуасонове расподеле могу се оценити коришћењем метода момената, тј. решавањем следећег система једначина:

$$\begin{aligned} \phi_2 \lambda &= \hat{\mu}_1, \\ \phi_2 (\lambda^2 + \lambda) &= \hat{\mu}_2. \end{aligned}$$

Након једноставних израчунавања, решење горњег система се добија на следећи начин:

$$\hat{\lambda} = \frac{\hat{\mu}_2}{\hat{\mu}_1} - 1 = \frac{b}{a + 1}, \quad \hat{\phi}_2 = \frac{\hat{\mu}_1}{\hat{\lambda}} = \frac{\hat{\mu}_2}{\hat{\lambda}(\hat{\lambda} + 1)}, \quad \hat{\phi}_0 = 1 - \hat{\phi}_2,$$

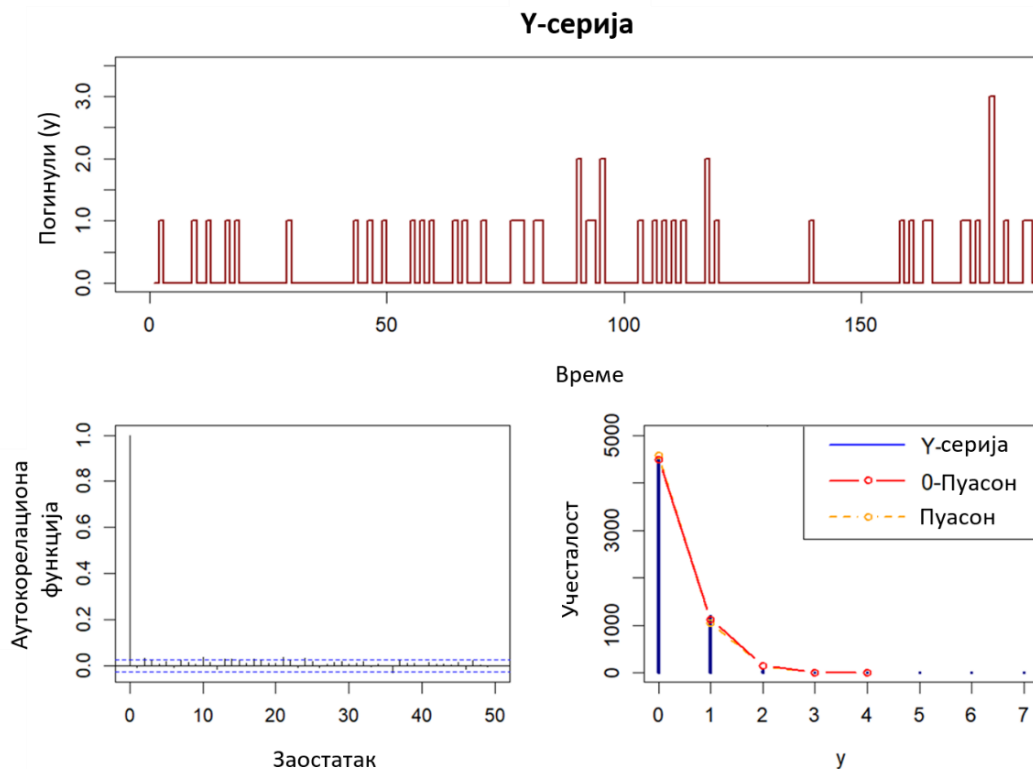
где су  $\hat{\mu}_1, \hat{\mu}_2$  узорачки моменти, док су  $a, b$  факторијелни узорачки моменти дефинисани једнакошћу (3.2). Резултати оцењивања параметара 0-Пуасонове расподеле, као и оцена  $\hat{\lambda}_{Pois} = \hat{\mu}_1 = \bar{Y}_n$  параметра стандардне Пуасонове расподеле, приказани су у наредној табели 4.6.

Табела 4.6. Оцењене вредности параметара Пуасонове и 0-Пуасонове расподеле, засноване на опсервираном узорку  $Y$ -серије

| Расподела | Параметри |          |          | Тест статистике / ( $p$ -вредности) |                     |                    |
|-----------|-----------|----------|----------|-------------------------------------|---------------------|--------------------|
|           | $\lambda$ | $\phi_0$ | $\phi_2$ | W                                   | Z                   | D                  |
| Пуасон    | 0,2375    | —        | —        | 16.539.970<br>(0,4340)              | -1,5793<br>(0,1143) | 0,0154<br>(0,4984) |
| 0-Пуасон  | 0,2394    | 0,0813   | 0,9187   | 16.662.252<br>(0,8663)              | 1,0421<br>(0,2793)  | 0,0106<br>(0,9037) |

Према овако добијеним резултатима, јасно је да, слично као у претходном случају, обе дистрибуције имају приближно једнаке процењене вредности параметра  $\lambda$ . Ипак, за разлику од претходне  $X$ -променљиве, овде је додатни удео 0-вредности знатно мањи ( $\phi_0 \approx 0,08$ ). Стога, обе разматране теоријске расподеле (Пуасонова и 0-Пуасонова) могу бити адекватни стохастички модели за емпиријску дистрибуцију  $Y$ -серије. То потврђују и све добијене вредности тест статистика, које указују на асимптотску еквиваленцију уклопљених (фитованих) расподела са емпиријском дистрибуцијом  $Y$ -променљиве. Другим речима, нити у једном случају овде нема основа за одбацивање хипотезе о еквиваленцији ових расподела. Ово је такође видљиво на слици 4.2, где су, слично претходној, приказана временска динамика, аутокорељација и емпиријска дистрибуција  $Y$ -

серије, фитоване Пуасоновом и 0-Пуасоновом дистрибуцијом. Према њима, јасно је да постоји асимптотска еквиваленција одговарајућих расподела, тако да се обе предложене дистрибуције фитовања могу сматрати адекватним стохастичким моделом.



Слика 4.2. Горњи графикон: Динамика броја погинулих (Y). Графикони испод: Аутокорељациона функција променљиве Y (лево) и емпиријска расподела исте променљиве (десно), фитована обичном Пуасоновом и 0-Пуасоновом расподелом

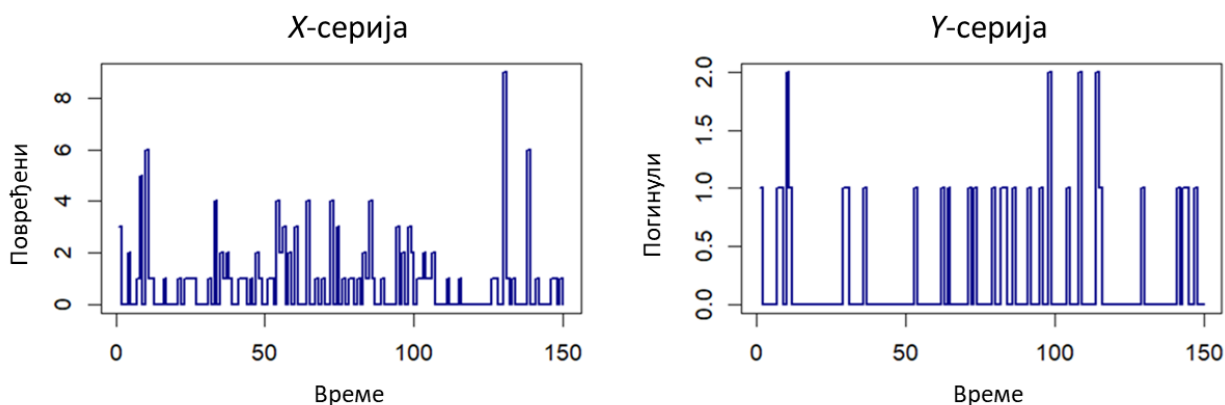
Коначно, треба напоменути да се на основу тога могу испитати и неке друге стохастичке карактеристике посматраних варијабли (рецимо, предвиђање вероватноћа или броја пожара са већим бројем повреда и смртних исхода). Поред тога, у наставку ће бити анализиране неке друге карактеристике посматраних варијабли.

#### 4.2.2. Анализа временске динамике применом минификационог (MIN-SB) процеса

За анализу временске динамике броја повређених и смртно страдалих лица примењен је минификациони Split-BREAK (MIN-SB) процес, описан у Одељку 2.2.2. За разлику од класичних модела временских серија, MIN-SB процес, први пут уведен у раду (Stojanović et al., 2026), развијен је управо за моделовање ретких дискретних догађаја, које карактеришу велики број нултих вредности, повремени нагли скокови и изражена временска зависност. Управо су такве карактеристике типичне за временске серије последица пожара по људе, у којима већина посматраних периода не садржи повређена

или смртно страдала лица, док се повремено јављају догађаји са већим бројем жртава. Концептуално, предложени модел омогућава истовремено описивање редукције последица током времена и појаве изненадних повећања ризика, што га чини погодним за анализу пожарне безбедности.

У овом истраживању, MIN–SB процес примењен је на временске серије броја повређених и смртно страдалих лица у пожарима у Републици Србији, које су описане у претходном излагању. Циљ примене није било само описивање временске зависности анализираних серија, приказаних на слици 4.3, већ и испитивање способности самог модела да репродукују специфичне статистичке особине реалних података, пре свега велики удео нултих вредности, неравномерну варијабилност и појаву ретких екстремних догађаја. У том смислу, модел омогућава да се пожарни догађаји посматрају као стохастички процес чији интензитет зависи како од претходног стања система, тако и од случајних спољашњих утицаја, чиме се обезбеђује реалистичнији опис динамике пожарних последица.



Слика 4.3. Дневна динамика броја повређених (X-серија) и смртно страдалих (Y-серија) у пожарима у Републици Србији

Добијени резултати показали су да MIN–SB модел успешно репродукује основне карактеристике анализираних временских серија. Посебно је значајно што модел природно описује груписање нултих вредности, као и појаву изолованих периода са повећаним бројем повређених или смртно страдалих лица, што представља једно од најважнијих обележја података из области пожарне безбедности. За разлику од класичних ауторегресивних модела пребројавања, који често претпостављају релативно стабилну динамику процеса, MIN–SB процес омогућава моделирање наглих промена и структурних прелаза између периода ниског и повећаног ризика.

Са практичног аспекта, примена MIN–SB процеса омогућава боље разумевање временске динамике последица пожарних догађаја по људе и представља основу за развој

поузданијих модела процене ризика. Идентификовањем периода повећаног ризика и анализом појаве ретких, али по последицама веома значајних догађаја, овај приступ може допринети планирању превентивних активности, ефикаснијем распоређивању ресурса служби заштите и спасавања и доношењу мера усмерених ка смањењу броја повређених и смртно страдалих лица у пожарима. На тај начин, стохастичко моделовање не представља само статистички опис анализираних серија, већ и инструмент за унапређење система управљања ризиком од пожара.

#### **4.2.3. GAMLSS моделовање демографске структуре повређених и смртно страдалих лица**

Полазну основу стохастичког моделовања посматраних демографских образаца, пре свега старосне структуре лица повређених и смртно страдалих у пожарима, представља избор одговарајуће параметарске расподеле која на најбољи начин описује емпиријску расподелу анализираних података. У области безбедности од пожара овај корак има посебан значај, будући да демографске карактеристике повређених и смртно страдалих лица најчешће одступају од класичних претпоставки нормалности. Наиме, њихова старосна структура обично је асиметрична, често садржи изражене „репове” расподеле и показује различит степен концентрације вероватноће у појединим старосним категоријама. Из тих разлога, примена класичне нормалне расподеле често није довољна за адекватно описивање оваквих података, због чега је неопходно размотрити шири скуп кандидатских расподела.

Да би се формализовали посматрани демографски обрасци, у овом делу се примењује стохастичко моделовање применом GAMLSS методологије, описане у Одељку 2.2.3, односно једнакошћу (2.2). Како је већ истакнуто, овакав приступ омогућава флексибилно моделовање не само средњих вредности ( $\mu$ ), већ и стандардне девијације ( $\sigma$ ), параметара облика ( $\nu$ ) и куртозиса ( $\tau$ ). Ово чини GAMLSS моделе посебно погодним за анализу старосне расподеле повреда и смртних исхода, јер подаци показују различиту асиметрију и спљоштеност коју класични приступи не могу у потпуности да обухвате. Да би се теоретски описала расподела повређених и смртно страдалих лица, овде се користи неколико симетричних и асиметричних кандидатских стохастичких расподела (нормална, генерализована нормална, рефлективна лог-нормална, итд.). Адекватност сваке од ових расподела процењује се на неколико начина: коришћењем информационих критеријума, метрике грешака и тестова подудараности, чиме се обезбеђују како статистичка ригорозност, тако и емпиријска валидност:

1. *Информациони критеријуми*: Акаикеов информациони критеријум (енгл. *Akaike Information Criterion – AIC*), као и Бајесов информациони критеријум (енгл. *Bayesian Information Criterion – BIC*), користе се за уравнотежење уклапања модела са њиховом сложености. На тај начин, ниже вредности ових критеријума указују на бољи квалитет уклапања датог модела.
2. *Средња квадратна грешка* (енгл. *Mean Squared Error - MSE*): Ова метрика представља квантитативну меру разлике између теоријских расподела и оригиналних података, тј. указује на то колико добро теоријска расподела апроксимира посматране фреквенције. MSE се израчунава као средње квадратно одступање између емпиријских и прилагођених података, тако да мање вредности MSE указују на то да теоријска расподела тачније одражава емпиријску варијабилност старости, и обрнуто.
3. *Тестови једнакости расподела*: У истраживању је такође примењено неколико статистичких тестова да би се формално проценила сагласност између емпиријских и теоријских дистрибуција:
  - a. *Колмогоров-Смирнов (KS) тест* процењује максималну удаљеност између емпиријске кумулативне функције дистрибуције (енгл. *Empirical Cumulative Distribution Function – ECDF*) и теоријске CDF.
  - b. *Андерсон-Дарлинг (AD) тест* поставља веће тежинске вредности на „репове” дистрибуције, што га чини посебно корисним за откривање одступања у екстремним старосним групама (нпр. веома млада или веома старија повређена лица).
  - c. *Краммер-фон Мизесов (CVM) тест* допуњује KS и AD тестове интегришући квадратне разлике између ECDF и теоријске CDF у целом домену. На тај начин, CVM пружа посебну процену квалитета подударања и доста је робустан за континуиране податке о старости.

Треба напоменути да су све горе наведене метрике, обично називане GOF-статистике (енгл. *Goodness Of Fit – GOF*), као и тестови једнакости расподела спроведени у статистички оријентисаном програмском језику „R” (верзија 4.5.0) и коришћењем раније поменутог софтверског пакета „*twosamples*” (Dowd, 2023). Њиховим комбиновањем процењује се адекватност одабраних стохастичких модела на основу неколико комплементарних аспеката, чиме се обезбеђују статистичка робусност и поузданост добијених резултата. Затим се бирају најбоље дистрибуције и користе се за предвиђање ризика од пожара за одређене старосне групе.

За старосну расподелу повређених ( $X$  – променљива), како је већ приказано у претходно наведеној табели 4.3, дескриптивна статистика показала је да је реч о симетричној расподели са умереном варијабилношћу ( $\text{StDev} \approx 19,6$ ) и благом спљоштеношћу (куртозис  $\approx 2,4$ ). Стога је за моделовање старости повређених лица разматран већи број симетричних теоријских кандидатских расподела. Прецизније речено, разматране су четири конкурентске расподеле (дистрибуције): Нормална дистрибуција (ND), Генерализована нормална дистрибуција (GND), Студентова  $t$  – дистрибуција (TD) и Генерализована  $t$  – дистрибуција (GTD). Оцењене вредности параметара наведених расподела, заједно са одговарајућим, раније поменути статистикама подударања, приказане су у табели 4.7.

Табела 4.7. Оцењене вредности конкурентских дистрибуција и њихових GOF-статистика ( $X$  – променљива)

| Расподела  | Параметри |          |                       | GOF-статистике |        |                       | Тест-статистике /<br>( $p$ -вредности) |                      |                    |
|------------|-----------|----------|-----------------------|----------------|--------|-----------------------|----------------------------------------|----------------------|--------------------|
|            | $\mu$     | $\sigma$ | $\nu$                 | AIC            | BIC    | MSE                   | KS                                     | AD                   | CVM                |
| <b>ND</b>  | 47,66     | 19,61    | –                     | 18.244         | 18.255 | $3,42 \times 10^{-4}$ | 0,0467*<br>(0,0185)                    | 28.321*<br>(0,0180)  | 2,247*<br>(0,0275) |
| <b>TD</b>  | 47,66     | 19,61    | $1,62 \times 10^{42}$ | 18.246         | 18.262 | $3,43 \times 10^{-4}$ | 0,0434*<br>(0,0325)                    | 22.450*<br>(0,0425)  | 1,5033<br>(0,0775) |
| <b>GTD</b> | 47,78     | 32,40    | 400,02                | 18.194         | 18.216 | $1,62 \times 10^{-3}$ | 0,0675*<br>(~0,000)                    | 119.651*<br>(~0,000) | 4,178*<br>(~0,000) |
| <b>GND</b> | 47,78     | 19,65    | 3,105                 | 18.192         | 18.209 | $2,06 \times 10^{-4}$ | 0,0376<br>(0,0935)                     | 10.223<br>(0,255)    | 0,5462<br>(0,425)  |

\*  $p < 0,05$

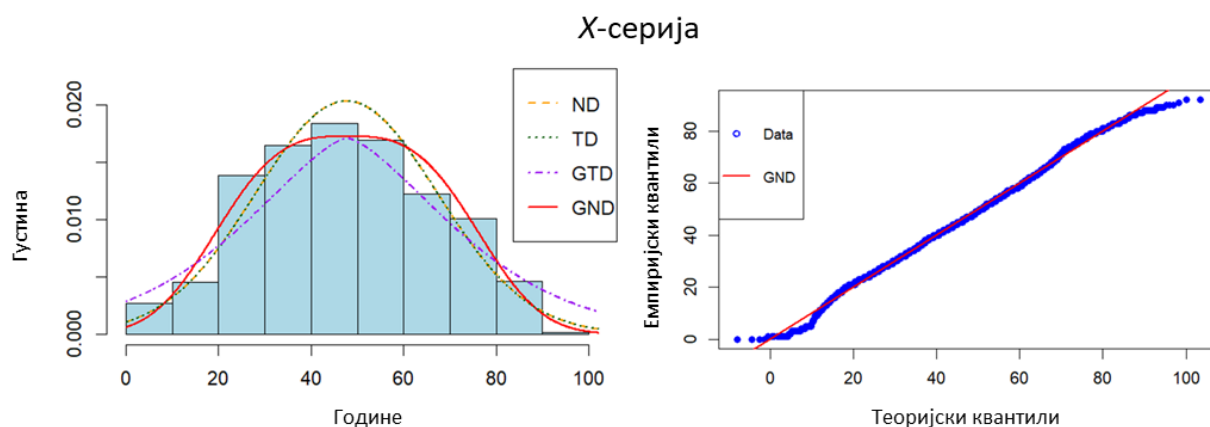
На основу добијених резултата, јасно је да GND дистрибуција постиже најниже AIC/BIC вредности, минимизује средње квадратну грешку (MSE) и једино код ње није одбачена хипотеза о једнакости расподела, на нивоу значајности од  $p \geq 0,05$ . Дакле, GND расподела, чија је густина:

$$f(x | \mu, \sigma, \nu) = \frac{\nu}{2\sigma \Gamma(1/\nu)} \exp\left(- \left| \frac{x - \mu}{\sigma} \right|^\nu\right), x \in \mathbb{R}, \nu > 0,$$

где је  $\Gamma(\cdot)$  гама функција, најбоље одговара старосној структури расподеле повређених лица. Стога се она може користити као одговарајући симетричан старосни профил, што је у складу са резултатима дескриптивне статистичке анализе добијених података, приказаним у Одељку 4.1.2.

Ово је такође илустровано и на слици 4.4, која приказује емпиријске и конкурентске расподеле (лево), као и Q-Q (енгл. *Quantile-to-Quantile*) графиконе који приказују

уклапање емпиријске расподеле старости повређених са GND расподелом (десно). На основу њих је такође јасно да GND расподела најбоље одговара емпиријској расподели старости повређених лица. Сходно томе, она може бити изабрана као адекватан генеративни модел за наредну анализу и закључивање, предвиђање и квантификацију ризика од повређивања лица различитих старосних доби.



Слика 4.4. Леви графикон: Емпиријске и прилагођене расподеле старости повређених. Десни графикон: Q-Q графикон уклапања емпиријских података са GND расподелом

У случају стохастичког моделовања расподеле старосне структуре морталитета ( $Y$  –променљива), дескриптивна статистика, приказана у табели 4.3, показује да је емпиријска расподела негативно асиметрична (средња вредност  $\approx 64,5$ , медијана = 71, асиметричност  $\approx -1,06$ ) са високом варијабилношћу ( $\text{StDev} \approx 21,5$ ) и издуженошћу (куртозис  $\approx 3,61$ ). Ове вредности указују на расподелу која је концентрисана у старијим старосним групама, са негативном асиметричношћу и тежим „реповима“. Ово се такође поклапа са емпиријским профилем: смртни исходи су концентрисани међу старијим лицима, са оштрим врхом, али и продуженим левим „репом“ расподеле, што указује на значајне вероватноће морталитета и код млађе популације.

Да би се формализовали ови обрасци, као што се може видети у табели 4.8, уклопљене су четири конкурентске расподеле: Нормална дистрибуција (ND), Вејбулова дистрибуција (WD), Генерализована гама дистрибуција (GGD), као и тзв. Рефлектована лог-нормална дистрибуција са позитивном подршком (RefLOGND+), дата функцијом густине:

$$f(y \mid \mu, \sigma, c) = \frac{1}{(c - y) \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\log(c - y) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \Phi\left(\frac{\log(c) - \mu}{\sigma}\right), \quad 0 < y < c,$$

где је  $\Phi(\cdot)$  функција расподеле стандардне нормалне дистрибуције. У овом случају, константа рефлексије изабрана према једнакости  $c = \max(Y) + 5 = 103$ , чиме се осигурава да RefLOGND+ расподела има само позитивне вредности. Очигледно, код ND,

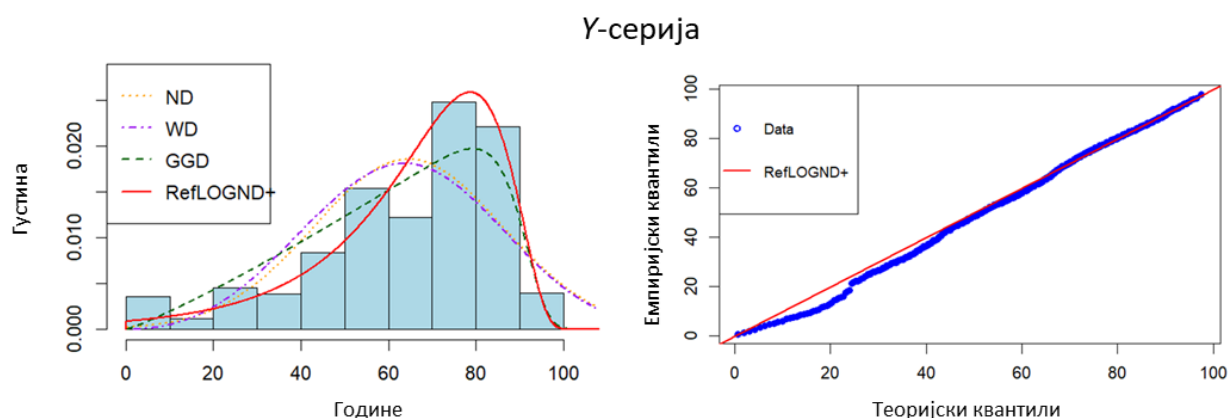
WD и GGD расподеле одбачена је нулта хипотеза о једнакости фитованих расподела са емпиријском, тако да је RefLOGND+ једина расподела која пружа адекватно подударање. Као и у претходном случају са GND расподелом, RefLOGND+ има најниже вредности AIC/BIC и MSE, а једина је која није одбачена применом KS, AD и CVM тестова.

Табела 4.8. Оцењене вредности конкурентских дистрибуција и њихових GOF-статистика (Y – променљива)

| Расподела | Параметри |          |       | GOF-статистике |         |                       | Тест-статистике / (p-вредности) |                     |                    |
|-----------|-----------|----------|-------|----------------|---------|-----------------------|---------------------------------|---------------------|--------------------|
|           | $\mu$     | $\sigma$ | $\nu$ | AIC            | BIC     | MSE                   | KS                              | AD                  | CVM                |
| ND        | 64,52     | 21,47    | —     | 7.737,5        | 7.747,0 | $3,89 \times 10^{-3}$ | 0,1346*<br>(~0,000)             | 39.049*<br>(~0,000) | 6,617*<br>(~0,000) |
| WD        | 70,88     | 3,313    | —     | 7.876,9        | 7.886,4 | $5,08 \times 10^{-3}$ | 0,1485*<br>(~0,000)             | 46.542*<br>(~0,000) | 8,765*<br>(~0,000) |
| GGD       | 81,83     | 0,1549   | 19,44 | 7.521,5        | 7.535,8 | $3,59 \times 10^{-3}$ | 0,1137*<br>(~0,000)             | 25.268*<br>(~0,000) | 5,896*<br>(~0,000) |
| RefLOGND+ | 3,50      | 0,5534   | —     | 7.465,1        | 7.474,6 | $9,63 \times 10^{-4}$ | 0,0638<br>(0,0530)              | 5121.6<br>(0,1655)  | 1,1093<br>(0,1545) |

\*  $p < 0,05$

Сличан закључак се може донети и на основу слике 4.5, где је приказано уклапање емпиријске расподеле старости смртно страдалих лица у односу на четири конкурентске расподеле, заједно са Q-Q графиком уклапања са RefLOGND+ расподелом. Очито, RefLOGND+ представља најприкладнији генеративни стохастички модел за старост смртно страдалих, јер обухвата како негативну асиметрију, тако и сам врх расподеле примећене у подацима.



Слика 4.5. Леви графикон: Емпиријске и прилагођене расподеле старости смртно страдалих. Десни графикон: Q-Q графикон уклапања емпиријских података са RefLOGND+ расподелом

На основу Q-Q графикона приметно је такође да RefLOGND+ ипак показује неке слабости у уклапању млађих старосних категорија. Међутим, изражена тачност за старије

старосне групе, као најчешћу категорију међу смртно страдалим лицима, чини RefLOGND+ посебно погодним за процену ризика и симулацију будућих образаца смртности у зависности од старости, који се детаљније описују у наставку.

Користећи добијене најадекватније теоријске дистрибуције (GND за повреде и RefLOGND+ за смртне исходе), могу се извршити предвиђања (предикција) по одређеним старосним групама. Другим речима, одабрани модели омогућавају израчунавање вероватноћа предвиђања критичних догађаја (повреда, односно смртних исхода код лица одређене старосне доби), које представљају процене ризика засноване на дистрибуцији по старосним групама. Ове предиктивне вредности за сваки старосни интервал  $[a, b)$  добијају се коришћењем кумулативних функција расподела одабраних модела, тако што за обе варијабле  $X, Y$  израчунавамо вероватноће:

$$P(a \leq X < b) = F_X(b) - F_X(a), \quad P(a \leq Y < b) = F_Y(b) - F_Y(a),$$

где су  $F_X(x)$ ,  $F_Y(y)$  кумулативне функције расподеле за GND и RefLOGND+, респективно.

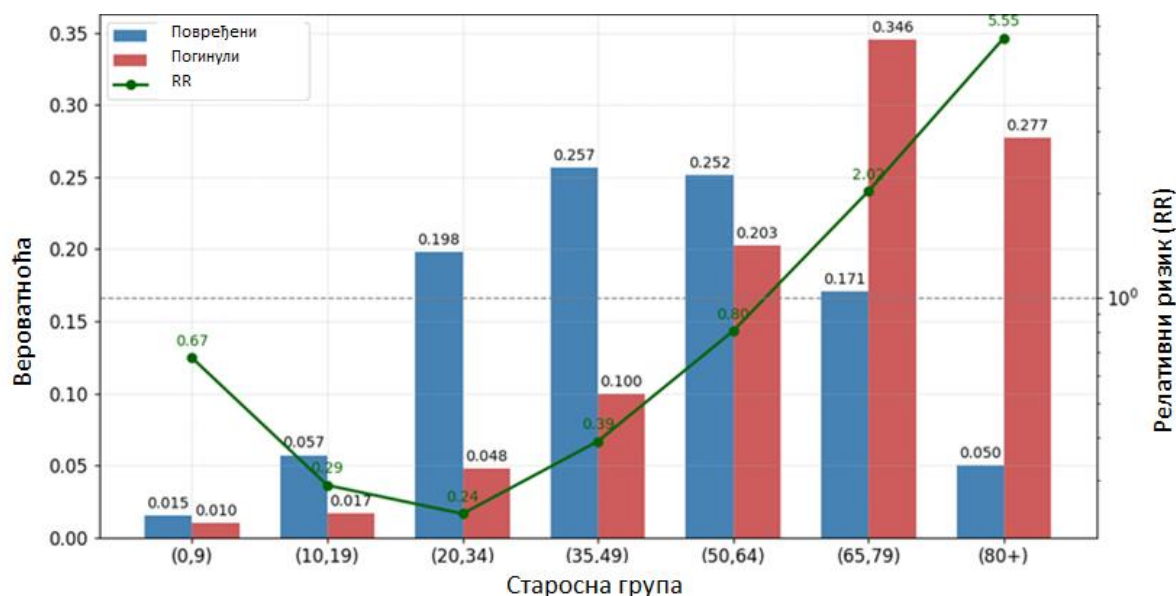
Тако добијене предиктивне вредности приказане су на слици 4.6, где се може видети да у случају повреда ( $X$  – променљива), постоји симетрична концентрација повређивања код особа средњег старосног доба, достижући врхунац између 35–49 година ( $\approx 0,26$ ), али остајући високе и у периоду између 50–64 године ( $\approx 0,25$ ), након чега постепено опадају. С друге стране, морталитет показује ниску почетну вредност до средњег доба, након чега следи нагли пораст за старосну групу од 50–64 године ( $\approx 0,20$ ), врхунац између 65–79 година ( $\approx 0,35$ ) и веома високе вредности у популацији особа од 80 и више година ( $\approx 0,28$ ). Треба истаћи да је овај образац у складу са одабраним моделима који укључују ризик од повреда повезаних са радном активношћу лица и повезаност са старењем, које често представља узрок морталитета. На тај начин, ова предвиђања такође подржавају диференциране стратегије превенције: контролу изложености за радно способно становништво старости 20–64 године и специфичне интервенције усмерене на рањивост становништва старијег од 65 година.

За даљу квантификацију структурне дивергенције између повреда и смртних исхода по старосним групама, уводи се тзв. *индекс релативног ризика* (RR-индекс), који се за сваки старосни интервал  $a_i$  дефинише на следећи начин:

$$RR_i = \frac{P(a_i | Y)}{P(a_i | X)}.$$

Овде  $P(a_i | Y)$  и  $P(a_i | X)$  представљају предиктивне вероватноће добијене из уклопљених RefLOGND+ и GND расподела, респективно. На тај начин, однос  $RR_i$  мери

релативну прекомерну заступљеност дате старосне групе међу смртним исходима у поређењу са повредама. Очито, вредности  $RR_i > 1$  указују на то да је старосна група пропорционално чешћа међу смртним исходима него међу повредама, док случај  $RR_i < 1$  указује да у датој старосној доби доминира повређивање (а не смртни исход). Дакле,  $RR$  – вредности квантитативно приказују релативни ризик настанка смртних исхода код лица одређене старосне доби, па отуда њихов велики значај у предикцији безбедносно ризичних пожара.



Слика 4.6. Предиктивне вероватноће повреда и смртних исхода, као и одговарајући индекс релативног ризика ( $RR$ ) изведен из оптимално прилагођених стохастичких модела ( $GND$  и  $RefLOGND+$ , респективно)

Крива релативног ризика је такође приказана на слици 4.6, у логаритамски скалираним ординатама, што омогућава симетрично тумачење структурне транзиције око неутралног прага  $RR_i = 1$ . Очито, за старосне групе млађе од 65 година, релативни ризик остаје испод јединице, што потврђује да су инциденти пожара у овим категоријама претежно узроковани повредама. Међутим, за старосне групе изнад 65 година  $RR$  – индекс нагло расте, прелазећи вредност  $RR = 2$  у старосној групи 65–79 и достижући вредности  $RR > 5$  у категорији лица старијих од 80 година. Ово јасно указује на чињеницу да је најстарија популација више од пет пута релативно прекомерно заступљена у смртним исходима у поређењу са повредама.

На тај начин, овако добијени резултати јасно указују на различите механизме ризика: код повређених доминирају изложеност и активност, док код смртно страдалих кључну улогу играју физиолошка рањивост и ограничене могућности реакције у старости. Генерално, комбинација  $GND$  расподеле за повређене и  $RefLOGND+$  расподеле за смртно

страдале пружа методолошки конзистентан оквир за описивање и предвиђање старосне структуре жртава пожара. На основу ових налаза, јасна је потреба за применом различитих превентивних мера: за млађе и особе средњих година, фокусирати се на контролу изложености и безбедносне процедуре, док за старије особе приоритет треба да буде смањење рањивости кроз брже откривање, евакуацију и медицинску помоћ. Најзад,  $RR$  – крива омогућава квантитативни „прелазак” са исхода пожара доминираних изложеношћу на исходе пожара доминираних рањивошћу.

Посматрани као целина, резултати стохастичког моделовања указују да људске последице пожарних догађаја представљају сложен стохастички процес, чије се поједине компоненте не могу адекватно описати применом једног модела. Инфлаторна Пуасонова расподела омогућава моделирање ретких дискретних догађаја, минификациони процеси описују њихову временску динамику, док GAMLSS приступ омогућава детаљно моделирање демографске структуре повређених и смртно страдалих лица. Посматрани заједно, ови резултати представљају основу за идентификацију фактора ризика применом метода машинског учења, приказаних у наредном одељку.

### 4.3. Примена метода машинског учења

Стохастичко моделовање представљено у претходном одељку омогућава квантитативно описивање последица пожарних догађаја по безбедност становништва и идентификацију њихових основних статистичких законитости. Међутим, за потпуније разумевање механизма који доводе до повређивања и смртних исхода није довољно анализирати само појединачне променљиве и њихове расподеле. Наиме, неопходно је испитати и међусобне односе између карактеристика пожарних догађаја, демографских обележја лица и насталих последица, како би се идентификовали најзначајнији фактори ризика и препознали обрасци који претходе настанку најтежих исхода.

У том циљу, у наставку су примењене методе машинског учења, које омогућавају анализу великих скупова података, откривање сложених зависности и издвајање закономерности које није могуће уочити применом класичних статистичких метода. За разлику од стохастичког моделовања, које је усмерено на описивање елемената случајности унутар анализираних појава, методе машинског учења омогућавају истовремено разматрање већег броја променљивих и идентификацију њиховог заједничког односа на последице пожара по људе.

Полазећи од постављених циљева истраживања, у студији су примењене три међусобно комплементарне методе машинског учења. Кластерска анализа коришћена је за издвајање група пожарних догађаја са сличним карактеристикама, CHAID алгоритам за идентификацију и рангирање најзначајнијих фактора који утичу на настанак повреда и смртних исхода, док је Argioi алгоритам примењен ради откривања асоцијативних правила између карактеристика пожара и њихових последица. Њиховом интегрисаном применом добија се свеобухватнији увид у структуру пожарног ризика, што представља основу за формулисање превентивних мера, унапређење система заштите од пожара и повећање безбедности људи. Најзад, треба истаћи да се резултати приказани у овом одељку не посматрају изоловано, већ у комбинацији са резултатима стохастичког моделовања представљеним у претходном одељку. На тај начин формира се јединствен аналитички оквир који омогућава не само описивање и моделовање последица пожара по безбедност људи, већ и разумевање узрочно-последичних односа који до њих доводе, што представља један од основних научних доприноса ове дисертације.

#### **4.3.1. Кластерска анализа образаца повређивања и смртних исхода**

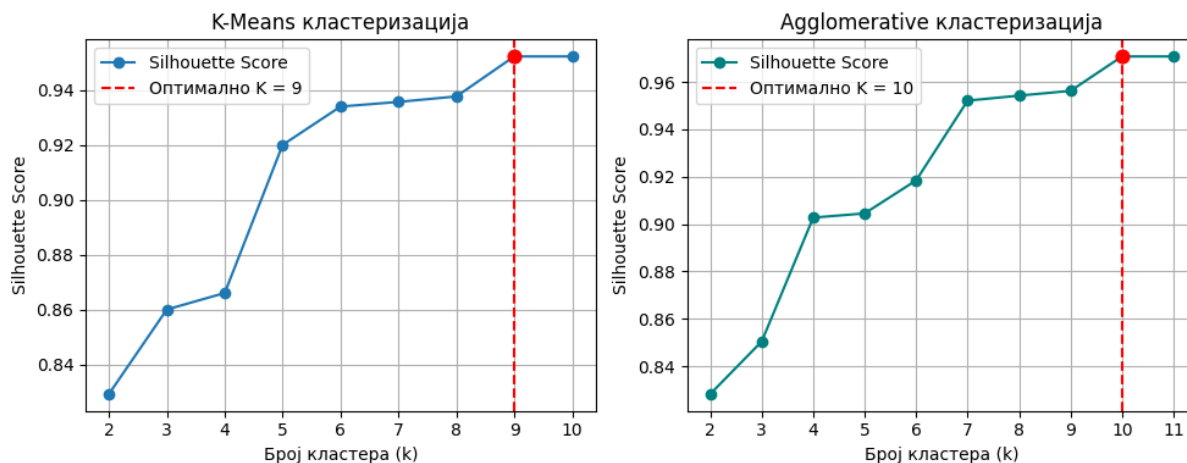
Као што је већ објашњено, додатна могућност анализе променљивих које се односе на повређивање и смртне исходе настале пожарима јесте кластеризација, односно груписање варијабли  $X$  и  $Y$ , које, респективно, описују број повреда и број смртних исхода од пожара у Републици Србији. У том циљу, утврђено је да варијабле  $X$  и  $Y$  имају релативно ниску корелацију (Пирсонов коефицијент корелације је приближно 0,23). То свакако указује на оправданост њиховог груписања, јер због ниске корелације примена неких других метода, попут регресије, у овом случају не би била адекватна.

У првом кораку, у складу са раније наведеним теоријским претпоставкама, користи се Silhouette Score (SS) метод као кључни алат за избор оптималног броја кластера. Треба напоменути да избор оптималног броја кластера код метода ненадгледаног груписања (као што су K-Means и АН метод) није одређен „априори”. Он се обично заснива на хеуристици, тј. на понашању структуре података, па у том случају SS вредности, описане у Одељку 2.3.1, представљају једну од најчешће коришћених метрика за процену квалитета груписања. Истовремено, као што је такође објашњено, SS метод има двоструку улогу: он директно комбинује компактност кластера (тј. њихову унутрашњу удаљеност) са удаљеношћу између самих кластера. У овом случају, зависност SS вредности у односу на број кластера ( $k$ ) израчуната је софтверски, помоћу библиотеке „*sklearn.cluster*” (Scikit-

learn developers, n.d.) унутар 64-битног програмског окружења „*IDLE Python 3.12*”. Она је такође приказана на слици 4.7, која указује на следеће:

- Код кластеризације применом K-means алгоритма, вредности SS постепено расту од  $k = 2$  до  $k = 9$ , достижући стабилни ниво (плато) за  $k = 9$  и  $k = 10$ , где постају идентичне.
- Слично, код АН кластеризације, вредности SS брзо расту до  $k = 10$ , док нема даљег побољшања од  $k = 10$  до  $k = 11$ .

Оваква стабилизација SS вредности јасно указује да је значајна гранулираност опсервираног скупа података достигнута за  $K = 9$  кластера у случају K-Means метода, односно  $K = 10$  кластера код АН кластеризације. То значи да се може претпоставити да нови кластери неће значајно допринети побољшању у погледу раздвајања и кохеренције.



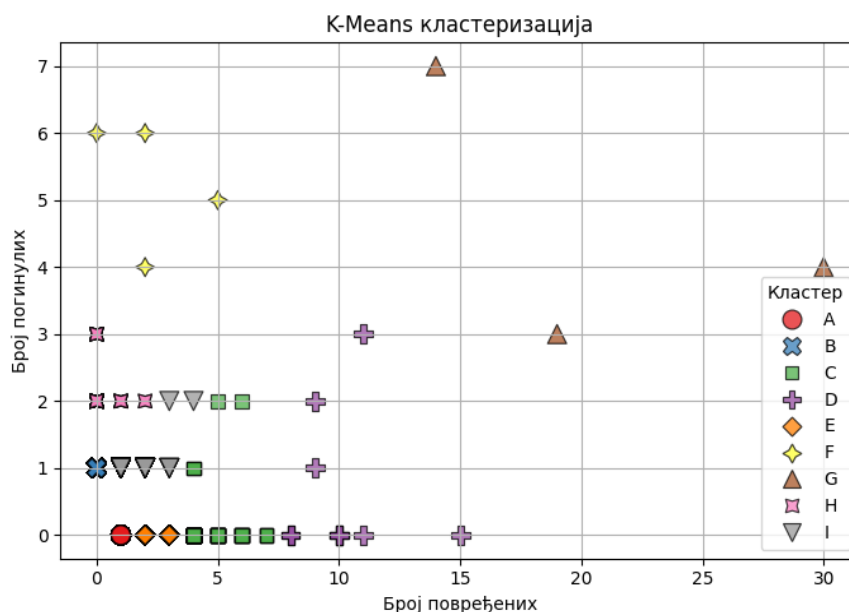
Слика 4.7. Зависност SS вредности у односу на број кластера ( $k$ ): а) K-Means метод; б) АН метод

Поред тога, избор од 9 до 10 кластера омогућава релативно једноставну, али довољно квалитетну интерпретабилност, па овако изабране вредности обезбеђују задовољавајући баланс између сепарабилности и стабилности за оба модела. Коначно, треба напоменути да је оптимална SS вредност за АН метод (0,9708) нешто виша од одговарајуће вредности за K-Means алгоритам (0,9523). Стога се очекује да кластеризација применом АН метода буде нешто успешнија него код K-Means алгоритма.

#### 4.3.1.1. K-Means кластеризација

Кластеризација извршена применом K-means алгоритма, као што је већ претходно истакнуто, спроведена је за оптимални број од укупно  $K = 9$  кластера. Сам поступак кластеризације је, слично као у претходном случају, софтверски имплементиран у 64-битном програмског окружењу „*IDLE Python 3.12*”, применом функције „*KMeans()*” из

библиотеке „*sklearn.cluster*”. Резултати ове кластеризације приказани су на слици 4.8, док је њихова дескриптивна статистичка анализа приказана у наредној табели 4.9.



Слика 4.8. K-Means кластеризација са оптималним бројем од  $K = 9$  кластера

Треба напоменути да су највећи кластери А (са 3.745 случајева) и В (са 1.060 случајева), који заједно чине око 83% свих података. Такође, може се приметити да кластер А представља типичне, мање пожарне незгоде са једном повредом и без смртних исхода. Супротно томе, кластер В укључује случајеве са једним смртним исходом и без повреда – вероватно веома брзо изазване пожаре.

Табела 4.9. Дескриптивна статистика кластера добијених применом K-means методе

| КЛАСТЕР |       | ПОВРЕЂЕНИ |       |      |       |      |       |      | ПОГИНУЛИ |       |     |      |     |      |     |
|---------|-------|-----------|-------|------|-------|------|-------|------|----------|-------|-----|------|-----|------|-----|
| Ознака  | Обим  | Просек    | StDev | Min  | 25%   | 50%  | 75%   | Max  | Просек   | StDev | Min | 25%  | 50% | 75%  | Max |
| A       | 3.745 | 1,000     | 0,000 | 1,0  | 1,00  | 1,0  | 1,00  | 1,0  | 0,000    | 0,000 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 0,00 | 0,0 |
| B       | 1.060 | 0,000     | 0,000 | 0,0  | 0,00  | 0,0  | 0,00  | 0,0  | 1,000    | 0,000 | 1,0 | 1,00 | 1,0 | 1,00 | 1,0 |
| C       | 101   | 4,693     | 0,956 | 4,0  | 4,00  | 4,0  | 5,00  | 7,0  | 0,089    | 0,349 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 0,00 | 2,0 |
| D       | 12    | 9,917     | 1,929 | 8,0  | 8,75  | 10,0 | 10,25 | 15,0 | 0,500    | 1,000 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 0,25 | 3,0 |
| E       | 659   | 2,184     | 0,387 | 2,0  | 2,00  | 2,0  | 2,00  | 3,0  | 0,000    | 0,000 | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 0,00 | 0,0 |
| F       | 4     | 2,250     | 2,062 | 0,0  | 1,50  | 2,0  | 2,75  | 5,0  | 5,250    | 0,957 | 4,0 | 4,75 | 5,5 | 6,00 | 6,0 |
| G       | 3     | 21,00     | 8,185 | 14,0 | 16,50 | 19,0 | 24,50 | 30,0 | 4,667    | 2,082 | 3,0 | 3,50 | 4,0 | 5,50 | 7,0 |
| H       | 66    | 0,136     | 0,426 | 0,0  | 0,00  | 0,0  | 0,00  | 2,0  | 2,106    | 0,310 | 2,0 | 2,00 | 2,0 | 2,00 | 3,0 |
| I       | 119   | 1,303     | 0,590 | 1,0  | 1,00  | 1,0  | 1,00  | 4,0  | 1,017    | 0,129 | 1,0 | 1,00 | 1,0 | 1,00 | 2,0 |

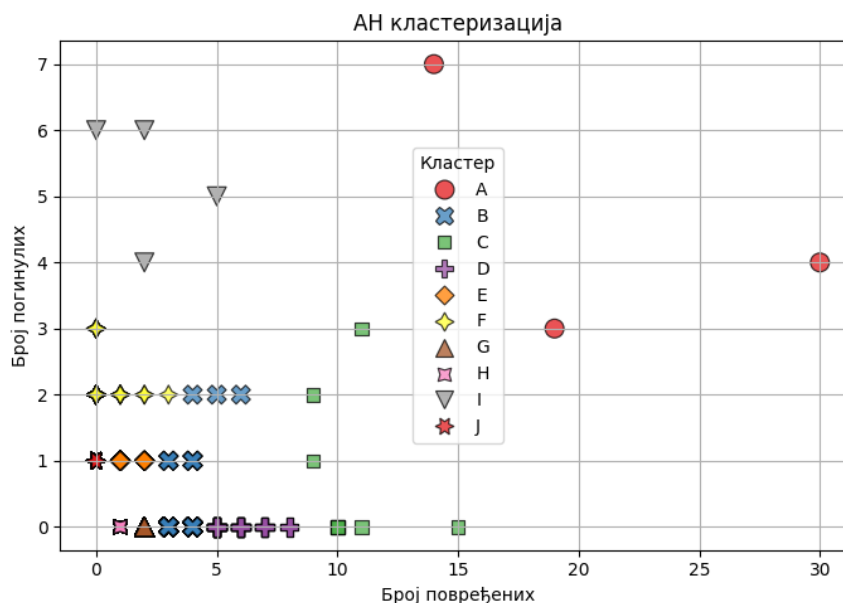
Преостали кластери идентификују мање уобичајене, али значајне обрасце, који би се укратко могли описати на следећи начин:

- Кластер С: већи број повређених лица, са мањим бројем смртних исхода.

- Кластер D: озбиљни пожари (просек од скоро 10 повређених).
- Кластер E: прелаз између благих и озбиљних пожара („жуто упозорење”).
- Кластери F и G: ретки, али екстремни пожари са већим бројем жртава и повређивања.
- Кластер H: веома специфичне несреће са мало повређених и високом смртношћу.
- Кластер I: мешовити профил са 1–2 повређена и исто толико смртно страдалих.

#### 4.3.1.2. АН кластеризација

Као што је већ раније поменуто, агрегативно-хијерархијска (АН) кластеризација даје сличне резултате као и у случају претходне кластеризације, али са већим бројем кластера, па је стога сегментација нешто „нијансиранија”. Такође, треба (поново) нагласити да АН метод, поред нешто већег броја од  $K = 10$  кластера, има и већу SS вредност у односу на одговарајућу вредност добијену код K-Means алгоритма. Слично претходном, АН метод кластеризације користи функцију „*AgglomerativeClustering()*” у оквиру библиотеке „*sklearn.cluster*” у „*IDLE Python*”. Резултати овог поступка кластеризације су приказани на слици 4.9, док је статистичка анализа добијених кластера дата у наредној табели 4.10.



Слика 4.9. АН кластеризација са оптималним бројем од  $K = 10$  кластера

Практично тумачење кластера добијених АН методом може се, слично као у претходном случају, дати на следећи начин:

- Кластер А садржи најтеже инциденте, са просеком од 21 повређених и 4,67 смртно страдалих. То су типично пожари у великим објектима (болнице, фабрике), односно масовне трагедије. Такође треба напоменути да овај кластер

има велику варијабилност у броју повреда и смртних исхода (колоне StDev у табели 4.10) и еквивалентан је кластеру G у K-Means кластеризацији.

- Кластер B, са просеком од приближно 3,35 повређених и готово без смртно страдалих, показује пожаре средње тежине са успешном евакуацијом.
- Кластер C (~10,5 повређених, ~0,67 смртно страдалих) указује на веома озбиљну ситуацију и потенцијално кашњење у реаговању надлежних служби.
- Кластер D (~5,8 повређених, 0 смртно страдалих) представља умерено ризичне догађаје, вероватно пожаре у школама, пословним просторијама, итд.
- Кластер E (~1,2 повређене особе, 1 смртно страдало лице) има мешовите исходе, тј. овде је највероватније реч о несрећама са делимичним евакуацијама.
- Кластер F (~0,18 повређених, ~2,1 смртно страдало лице) показује изузетно смртоносне пожаре, који се обично дешавају у затвореном простору.
- Кластер G (~2,0 повређених, 0 смртних случајева) су типични мањи пожари са лакшим повредама.
- Кластер H (~1,0 повређених, 0 смртно страдалих) представља најчешћи образац, тј. мање пожаре са једним повређеним лицем и еквивалентан је кластеру A код K-Means кластеризације.
- Кластер I (~2,25 повређених, ~5,25 смртно страдалих) указује на катастрофалне пожаре са високом смртношћу, који су прилично ретки, али веома озбиљни.
- Кластер J (0 повређених, 1 смртни исход) садржи податке о пожарима без повређених и са једним смртним исходом (еквивалентан је кластеру B код K-Means кластеризације).

*Табела 4.10. Дескриптивна статистика кластера добијених применом АН методе*

| КЛАСТЕР |       | ПОВРЕЂЕНИ |       |      |      |      |      |      |        | ПОГИНУЛИ |     |      |     |     |     |
|---------|-------|-----------|-------|------|------|------|------|------|--------|----------|-----|------|-----|-----|-----|
| Ознака  | Обим  | Просек    | StDev | Min  | 25%  | 50%  | 75%  | Max  | Просек | StDev    | Min | 25%  | 50% | 75% | Max |
| A       | 3     | 21,00     | 8,185 | 14,0 | 16,5 | 19,0 | 24,5 | 30,0 | 4,667  | 2,082    | 3,0 | 3,50 | 4,0 | 5,5 | 7,0 |
| B       | 187   | 3,348     | 0,521 | 3,0  | 3,0  | 3,0  | 4,00 | 6,0  | 0,080  | 0,326    | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 0,0 | 2,0 |
| C       | 9     | 10,56     | 1,810 | 9,0  | 10,0 | 10,0 | 11,0 | 15,0 | 0,667  | 1,118    | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 1,0 | 3,0 |
| D       | 43    | 5,837     | 0,949 | 5,0  | 5,0  | 6,0  | 6,00 | 8,0  | 0,000  | 0,000    | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| E       | 113   | 1,204     | 0,404 | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,00 | 2,0  | 1,000  | 0,000    | 1,0 | 1,00 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| F       | 67    | 0,179     | 0,548 | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,00 | 3,0  | 2,104  | 0,308    | 2,0 | 2,00 | 2,0 | 2,0 | 3,0 |
| G       | 538   | 2,000     | 0,000 | 2,0  | 2,0  | 2,0  | 2,00 | 2,0  | 0,000  | 0,000    | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| H       | 3.745 | 1,000     | 0,000 | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 1,00 | 1,0  | 0,000  | 0,000    | 0,0 | 0,00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| I       | 4     | 2,250     | 2,061 | 0,0  | 1,5  | 2,0  | 2,75 | 5,0  | 5,250  | 0,957    | 4,0 | 4,75 | 5,5 | 6,0 | 6,0 |
| J       | 1.060 | 0,000     | 0,000 | 0,0  | 0,0  | 0,0  | 0,00 | 0,0  | 1,000  | 0,000    | 1,0 | 1,00 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |

#### *4.3.1.3. Упоредна анализа резултата сегментације*

На крају овог одељка, истакнимо да сваки идентификовани кластер открива специфичне обрасце који указују на одговарајуће стратегије управљања пожарима. На пример, код К-Means кластеризације, кластер А представља мање инциденте са само једном повредом (и без смртних исхода), што указује да се у овом случају стандардни безбедносни протоколи показују ефикасним. Насупрот томе, кластер В укључује изненадна смртна страдања без повређивања, што указује на потребу за побољшањем система за детекцију и инфраструктуре отпорне на ватру за такве пожаре. С друге стране, као што је већ раније истакнуто, кластер С указује на пожаре где је (делимична) евакуација довела до вишеструких повреда, али без смртних исхода. Следећи кластер D, са великим бројем повреда (али и смртних исхода), истиче важност ефикасних процедура евакуације, док екстремни кластери попут F и G захтевају хитан фокус на вежбе за случај пожара, структурну безбедност и специјализовану опрему. Коначно, присуство кластера I (мешовити профил повреда и смртних исхода) истиче делимичне неуспехе у евакуацији или одложени одговор, наглашавајући потребу за интегрисаним стратегијама за ублажавање ризика.

Истовремено, сегментација добијена применом АН метода, као и претходна, пружа значајну основу за превенцију, стратегије интервенције и категоризацију ризика од пожара. На пример, кластери H и J су очигледно еквивалентни кластерима А и В, добијеним применом K-means алгоритма. Они садрже најчешће сценарије безбедносних ризика од пожара, са ниским интензитетом и благим последицама, па чине основу за уобичајене или мање инциденте. Насупрот томе, кластери B, D и G показују средње тешке пожаре, са више повреда, али (скоро) без смртних случајева, и указују, слично K-means алгоритму, на пожаре који се дешавају унутар зграда, возила и отворених простора. Даље, кластери C и E имају мешовите исходе, и са повредама и са смртним случајевима, што указује на догађаје са делимичном евакуацијом. Најзад, кластери A, F и I представљају изузетно озбиљне инциденте са високим стопама смртности, који захтевају посебну пажњу са становишта безбедности, као и за план за кризне ситуације, са циљем смањења броја жртава пожара.

Посебно је значајно то што су идентификовани кластери са великим бројем жртава, који, иако ретки, јасно указују на потребу за специфичним кризним протоколима. На овај начин, резултујућа сегментација пружа важну основу за превенцију, стратегије интервенције и категоризацију ризика, успешно идентификујући доминантне обрасце и екстремне случајеве. Важно је истаћи да је сваки кластер детаљно окарактерисан на

основу статистичких показатеља и практичних импликација. Притом, АН алгоритам је показао нешто вишу SS вредност (0,9708 наспрам 0,9523), што указује на незнатно бољу унутрашњу структуру резултујућих кластера. С обзиром на релативно мали број екстремних случајева у посматраном скупу података, као и присуство суптилних хијерархијских образаца, чини се да АН приступ представља адекватнији избор за анализу горе наведених података. Ово се такође поклапа са неким ранијим истраживањима где је АН кластеризација предлагана у студијама које су укључивале ретке, али критичне догађаје и атипичне кластере (Abdalla, 2021; Peterson et al., 2018). Коначно, будућа истраживања могу додатно анализирати употребу кластеризације која је заснована на различитим моделима, при чему избор и примена модела могу бити додатно побољшани и унапређени.

#### **4.3.2. Класификација узрока пожара и предикција исхода**

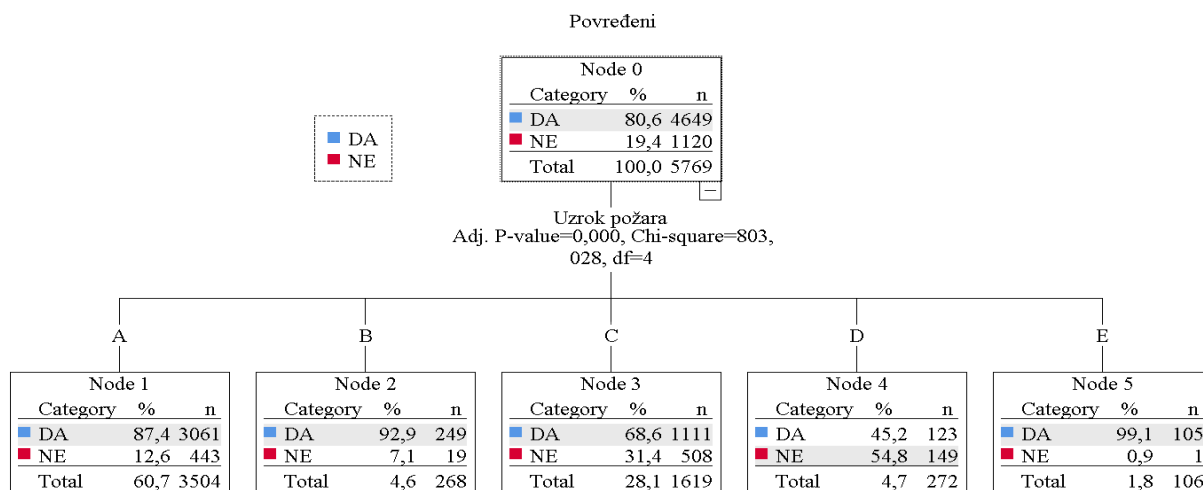
##### *4.3.2.1. Примена CHAID алгоритма*

У циљу идентификације најзначајнијих фактора који утичу на настанак повреда и смртних исхода у пожарима, у наставку је примењен CHAID (енгл. *Chi-square Automatic Interaction Detection*) алгоритам, детаљније објашњен у Одељку 2.3.2. Реч је о методу машинског учења заснованог на стаблима одлучивања, који омогућава аутоматско издвајање променљивих са статистички најзначајнијим утицајем на циљну променљиву, као и откривање њихових међусобних интеракција. За разлику од класичних статистичких приступа, који најчешће анализирају утицај појединачних фактора независно један од другог, CHAID алгоритам омогућава истовремено разматрање већег броја категоријалних променљивих и њихову хијерархијску организацију у облику стабла одлучивања.

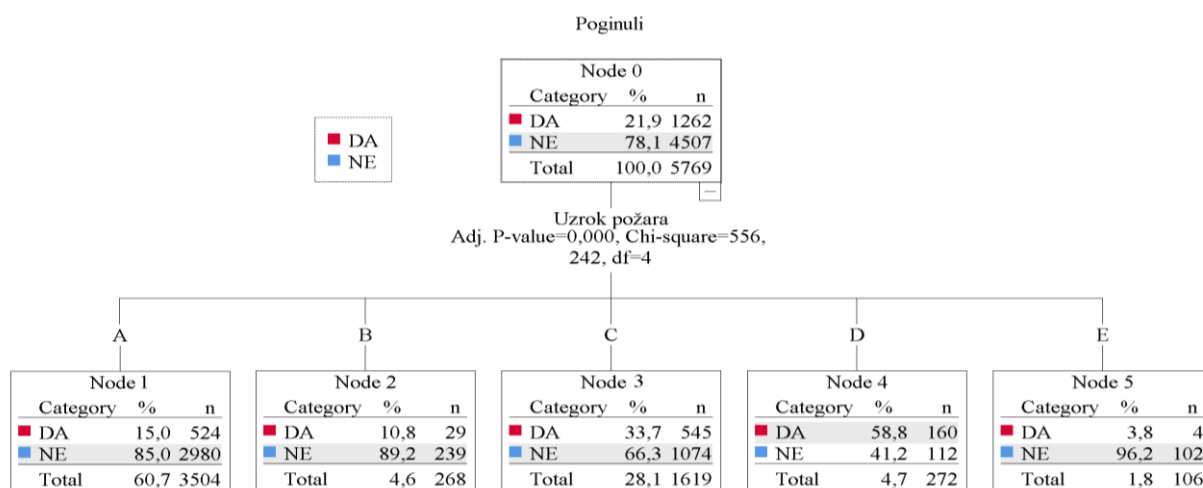
У овом истраживању, CHAID алгоритам је примењен како би се утврдили важни фактори, као што су узрок пожара, доба дана и друге карактеристике пожарних догађаја, који највише доприносе настанку последица ризичних по људску безбедност. На тај начин, добијена стабла одлучивања омогућавају рангирање анализираних променљивих према њиховом значају, као и идентификацију комбинација фактора који доводе до повећаног ризика од повређивања, односно смртних исхода. Поред аналитичке вредности, овакви модели имају и значајну практичну примену, јер обезбеђују једноставну и прегледну интерпретацију добијених резултата, што је од посебног значаја приликом доношења одлука у области превенције пожара и управљања ризицима.

Користећи моделе стабла одлучивања и CHAID алгоритам, овде је извршена класификација случајева пожара који дају излазне вредности променљивих  $X$  и  $Y$ , које су

већ описане раније. Тумачењем ових варијабли као излаза (циљева) за проблем класификације, формирано је неколико стабала одлучивања која описују утицај и однос различитих узрока пожара на ситуације у којима долази до повређивања или смртних исхода. На тај начин је идентификовано неколико различитих врста пожара, укључујући ретке, али смртоносне инциденте који захтевају хитне превентивне мере. То омогућава проактивно управљање ризицима и ефикаснију расподелу ресурса, са циљем успешног спречавања таквих инцидентата.



Слика 4.10. Прва грана класификације, добијена атрибутом „Узрок пожара” и циљним варијаблама: повређени



Слика 4.11. Прва грана класификације, добијена атрибутом „Узрок пожара” и циљним варијаблама: погинули

У овом делу, класификација горе поменутих циљних варијабли, тј. класа са или без повреда и смртних исхода, извршена је у односу на скуп улазних варијабли описаних у претходној табели 3.4. Сама класификација извршена је коришћењем алата „Decision Tree” у софтверском окружењу IBM SPSS Statistics (верзија 26) (видети, нпр., Baizyldayeva

et al., 2013). Као што је већ објашњено, добијена стабла одлучивања показују утицај улазних променљивих наведених у претходној табели 3.4, на ситуације у којима долази до телесних повреда или смрти у пожару. На овај начин, она представљају класификаторе који пружају јасну сегментацију утицаја различитих карактеристика пожара на појаву ризичних исхода по људску безбедност.

Притом, подсетимо се да варијабла „Узрок пожара” има највеће *ID*-вредности, па стога већ у првом кораку класификације, као што се види на сликама 4.10 и 4.11, овај атрибут „раздваја” све групе узрока пожара (детаљније описаних у претходној табели 3.5). На тај начин, класификација узрока пожара из група А, В и Е јесте прилично задовољавајућа (најнижа тачност је 85%). Из тих разлога, у даљем делу истраживања главни циљ биће класификација циљних варијабли унутар узрока типа С, а посебно узрока D који (једини) садржи јединствени узрок пожара: *опушак цигарете*. Треба напоменути да је класификација циљних варијабли „Повређени” и „Погинули” за узрок D прилично уједначена, тј. она има највећи проценат жртава. Стога она захтева знатно детаљнију анализу која ће, кроз даља експериментална истраживања, бити описана у наредним деловима овог поглавља.

Табела 4.11. Мере основних карактеристика добијених стабала одлучивања

| Метрике             | Узрок С   |          | Узрок D   |          |
|---------------------|-----------|----------|-----------|----------|
|                     | Повређени | Погинули | Повређени | Погинули |
| Укупан број чворова | 120       | 139      | 53        | 52       |
| Терминални чворови  | 78        | 91       | 35        | 33       |
| Дубина стабла       | 7         | 6        | 7         | 7        |
| Улазне променљиве   | 7         | 8        | 6         | 6        |
| Процена             | 0,035     | 0,048    | 0,007     | 0,007    |
| Стандардна грешка   | 0,005     | 0,006    | 0,005     | 0,005    |

Неке од основних метрика добијених класификатора приказане су у табели 4.11, на основу којих се може уочити да су оба стабла одлучивања за узрок С прилично обимна (са више од 100 чворова). Конкретно, у случају класификације променљиве „Погинули”, добија се најобимније стабло, са осам независних променљивих. С друге стране, класификација циљне променљиве „Повређени” има један атрибут мање, тј. укључује укупно седам независних променљивих. Истовремено, приметно је да сва добијена стабла имају сличну дубину (6 или 7 нивоа гранања), као и приближно једнаке, релативно мале вредности стандардних грешака. Поред тога, број терминалних чворова („листова”), који показују коначну класификацију за одређени исход, указује на ефективну тачност резултујућих стабала одлучивања, иако оба стабла имају сличну, вишеслојну и детаљну

структуру, што указује на сложен процес доношења одлука. Стога оба овако добијена стабла одлучивања пружају могућност идентификације ризичних ситуација и циљаног деловања (нпр. превентивне мере у градовима високог ризика, сезонама или категоријама објеката).

Детаљна структура стабала одлучивања код узрока D, за обе циљне променљиве, дата је у Прилогу 2 ове студије (слике П.3. - П.4.). Као што се може видети на њима, у случају узрока D, тј. пожара изазваних цигаретом, излазне вредности обе циљне променљиве добијају се на основу шест независних променљивих („Локација пожара”, „Годишње доба”, „Место настанка пожара”, „Категорија пожара по локацији”, „Дојава/Долазак”, „Тип дан”), при чему је локација пожара примарна у обе класификације. Притом, важно је истаћи да се сегментације података са потпуним доношењем одлука (100% потврђених случајева који указују на веома висок ризик од повреда и смрти, односно 100% негативних случајева који указују на потпуно безбедне ситуације) јасно разликују код оба стабла одлучивања. Наравно, мањи број улазних променљивих и чворова јесте у складу са величином овог дела скупа података, који има 272 инстанце. На крају, треба још једном напоменути да узрок D има убедљиво највећу стопу смртности, због чега је од посебног значаја у овој студији. Већ у наредном поглављу биће спроведена детаљнија анализа овог узрока, као и самих стабала одлучивања.

#### 4.3.2.2. Евалуација класификационих алгоритама

Класификација података која је извршена коришћењем CHAID алгорита омогућава идентификацију кључних улазних варијабли које значајно утичу на вероватноће повређивања, односно смртних исхода. Између осталог, показује се да варијабле попут локације пожара, годишњег доба, градова и категорије објекта показују јаке повезаности са тежином последица. Истовремено, посебан нагласак стављен је на пожаре изазване опушцима цигарета (узрок D), који показују високу учесталост смртних исхода, што јасно указује на потребу за специфичним образовним и превентивним мерама. Висока прецизност и тачност класификационих модела додатно потврђују оправданост овог приступа.

Поред тога, приближно равномерна расподела грешака, приказана у табели 4.11 указује на то да су добијени стабилни и поуздани модели који не праве систематске грешке на одређеним подацима. Наиме, како повреде и смртни исходи настали као последице пожара зависе од више међусобно зависних и условљених фактора, равномерне грешке имплицирају да ниједна група није потпуно предвидљива, што је типично за

догађаје са бројним латентним (скривеним) факторима. Ово је пожељан сигнал у класификацији, посебно у домену безбедности и превенције. У прилог наведеном, табеле 4.12 и 4.13 приказују резултате класификације за сва горе поменута стабла одлучивања. Прецизније речено, обе табеле приказују тзв. матрице конфузије, односно укупне вредности исправно и погрешно класификованих исхода за обе циљне променљиве.

*Табела 4.12. Матрица конфузије за стабла одлучивања (узрок C)*

| Опсервације | Предикција |     |        |          |     |        |
|-------------|------------|-----|--------|----------|-----|--------|
|             | Повређени  |     |        | Погинули |     |        |
|             | ДА         | НЕ  | Укупно | ДА       | НЕ  | Укупно |
| ДА          | 976        | 28  | 1004   | 381      | 39  | 420    |
| НЕ          | 20         | 366 | 386    | 28       | 942 | 970    |
| Укупно      | 996        | 394 | 1390   | 409      | 981 | 1390   |

*Табела 4.13. Матрица конфузије за стабла одлучивања (узрок D)*

| Опсервације | Предикција |     |        |          |     |        |
|-------------|------------|-----|--------|----------|-----|--------|
|             | Повређени  |     |        | Погинули |     |        |
|             | ДА         | НЕ  | Укупно | ДА       | НЕ  | Укупно |
| ДА          | 123        | 0   | 123    | 158      | 2   | 160    |
| НЕ          | 2          | 147 | 149    | 0        | 112 | 112    |
| Укупно      | 125        | 147 | 272    | 158      | 114 | 272    |

На основу датих табела, очигледно је да се обе класификације могу сматрати задовољавајућим, с обзиром на то да је укупан број исправно класификованих исхода значајно већи од броја погрешно класификованих. Поред тога, расподела нетачних излаза је прилично равномерно распоређена, што указује на то да се грешке јављају у различитим деловима стабала. То значи да независне променљиве имају релативно једнаке доприносе, тј. да не постоји „доминантна” променљива која искључиво одређује исход. Такође се може видети да је класификација значајно боља у случају узрока D (опушак цигарете), који садржи мање случајева, али, као што је већ поменуто, представља важан узрок пожара са становишта високе стопе смртности.

Горе наведене табеле омогућавају детаљнију анализу квалитета резултујућих стабала одлучивања, коришћењем неких од најчешће коришћених квалитативних мера, које се могу изразити на следећи начин:

$$\begin{aligned} \text{Тачност} &= \frac{TP + TN}{N}, & \text{Прецизност (поз.)} &= \frac{TP}{TP + FP}, & \text{Одзив (поз.)} &= \frac{TP}{TP + FN}, \\ \text{Прецизност (нег.)} &= \frac{TN}{TN + FN}, & \text{Одзив (нег.)} &= \frac{TN}{TN + FP} \end{aligned}$$

$$F_1 (\text{поз.}) = 2 \times \frac{\text{Прецизност} \times \text{Одзив}}{\text{Прецизност} + \text{Одзив}}, \quad F_1 (\text{нег.}) = 2 \times \frac{\text{Нег. прецизност} \times \text{Нег. одзив}}{\text{Нег. прецизност} + \text{Нег. одзив}},$$

$$F_{1,\text{макро}} = \frac{F_1 (\text{поз.}) + F_1 (\text{нег.})}{2}.$$

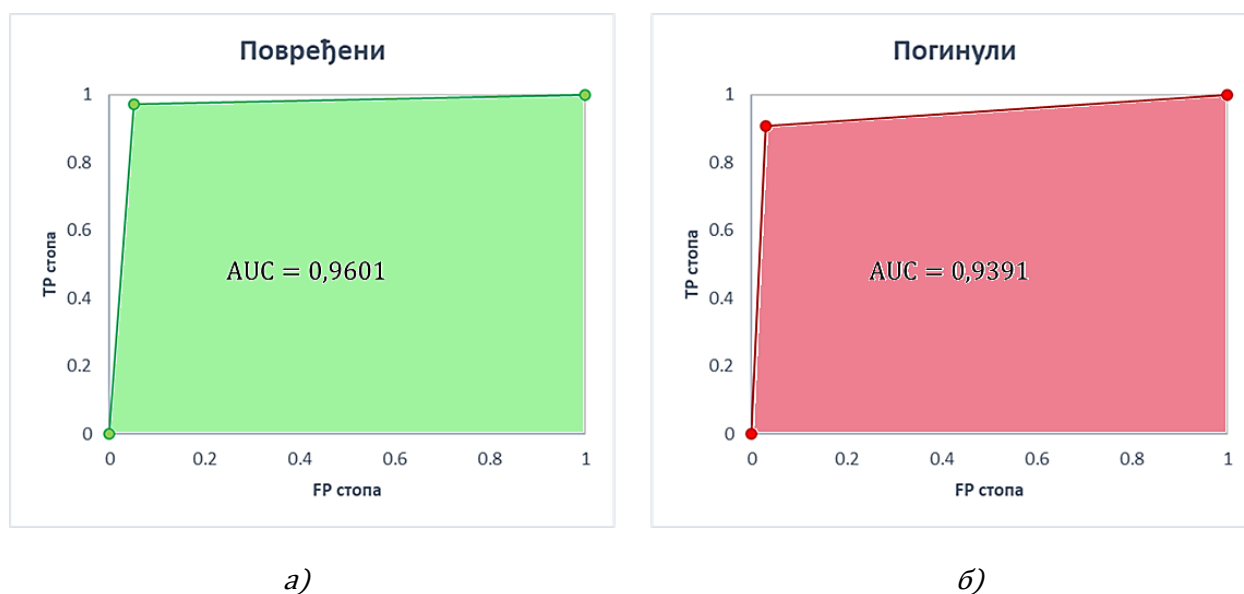
Овде је са  $TP$  означен укупан број истинито позитивних (енгл. *True Positive*— $TP$ ), са  $FP$  лажно позитивних (енгл. *False Positive*— $FP$ ), са  $TN$  истинито негативних (енгл. *True Negative*— $TN$ ) и са  $FN$  лажно негативних (енгл. *False Negative* —  $FN$ ) предвиђања, при чему је  $N = TP + FP + TN + FN$ . Најзад, прецизност, одзив и  $F_1$  мере су посматране двојако, тј. за позитивне (поз.) и негативне (нег.) класе предвиђања. Израчунате вредности свих горе наведених мера квалитета, добијених за сва горе поменута стабла одлучивања, приказане су у наредној табели 4.14.

*Табела 4.14. Мере квалитета класификације за уочене узроке пожара и добијена стабла одлучивања*

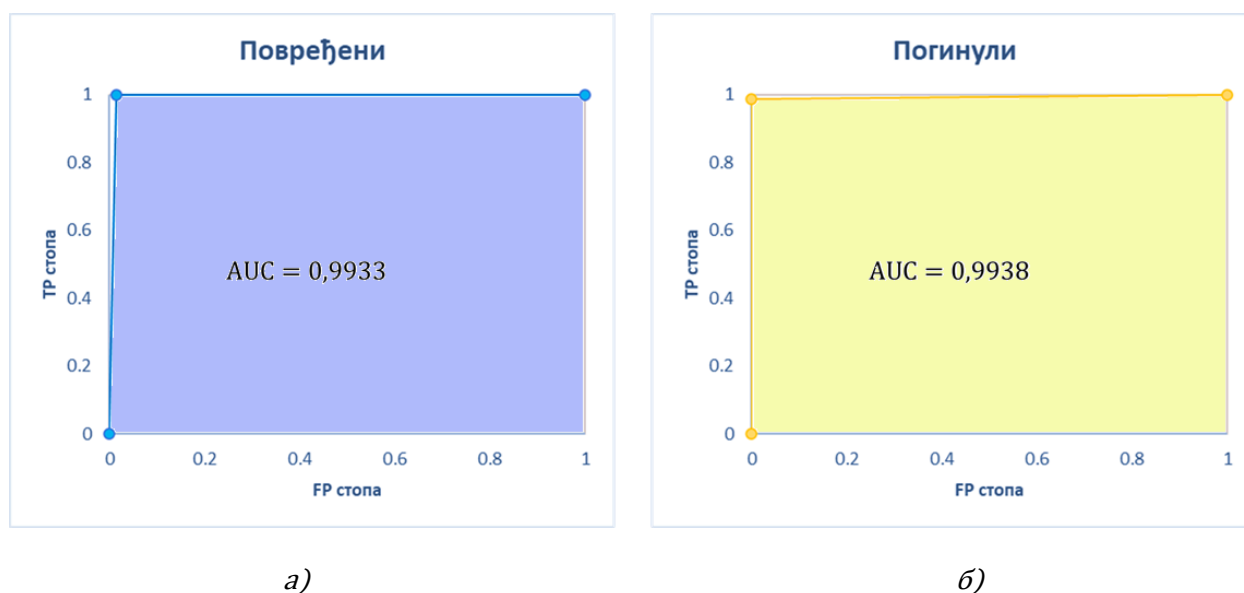
| Мера                                   | Узрок С   |          | Узрок Д   |          |
|----------------------------------------|-----------|----------|-----------|----------|
|                                        | Повређени | Погинули | Повређени | Погинули |
| <b>Тачност</b>                         | 0,9655    | 0,9518   | 0,9926    | 0,9926   |
| <b>Прецизност (поз.)</b>               | 0,9799    | 0,9315   | 0,9840    | 1,0000   |
| <b>Прецизност (нег.)</b>               | 0,9289    | 0,9602   | 1,0000    | 0,9824   |
| <b>Одзив (поз.)</b>                    | 0,9721    | 0,9071   | 1,0000    | 0,9875   |
| <b>Одзив (нег.)</b>                    | 0,9482    | 0,9711   | 0,9866    | 1,0000   |
| <b><math>F_1</math> мера (поз.)</b>    | 0,9760    | 0,9192   | 0,9919    | 0,9937   |
| <b><math>F_1</math> мера (нег.)</b>    | 0,9385    | 0,9657   | 0,9932    | 0,9911   |
| <b><math>F_{1,\text{макро}}</math></b> | 0,9572    | 0,9424   | 0,9926    | 0,9924   |

На основу добијених резултата, јасно је да постоји висока стопа тачности, као резултат повољне расподеле вредности у матрицама конфузије датим у табелама 4.12 и 4.13. Прецизније речено, код узрока С оба модела имају задовољавајуће, висококвалитетне мере, с тим што се истински позитивни случајеви боље детектују у циљној променљивој „Повређени”, а истински негативни случајеви у променљивој „Погинули”. С друге стране, мере квалитета за узрок Д су изузетно високе, јер све оне имају вредности веома блиске (или чак једнаке) јединици. На пример, класификација повреда у моделу стабла одлучивања нема лажно негативних случајева, па је потпуно (савршено) осетљива за позитивне класе и потпуно прецизна за негативне класе, тј. важи: Одзив (поз.) = Прецизност (нег.) = 1,0. Насупрот томе, модел класификације смртних исхода никада не узима лажно позитивне случајеве, па је Прецизност (поз.) = Одзив (нег.) = 1,0. Све ово потврђује да су стабла одлучивања добијена CHAID

алгоритмом практично применљива у предвиђању исхода на основу посматраних улазних променљивих.



Слика 4.12. ROC области класификације стабла одлучивања за узрок C са циљним варијаблама: а) повређени; б) погинули



Слика 4.13. ROC области класификације стабла одлучивања за узрок D са циљним варијаблама: а) повређени; б) погинули

Поред претходно изложених резултата, потребно је истаћи да се тачност класификације добијених модела може потврдити и помоћу тзв. ROC кривих (енгл. *Receiver Operating Characteristic*—ROC). ROC криве представљају полигоналне линије чије вертикалне осе приказују стопу истински позитивних случајева (тј. осетљивост модела), док хоризонтална оса приказује стопу лажно позитивних одговора (вредност комплементарна одзиву негативне класе). Површина испод ROC криве, обично означена

као AUC (енгл. *Area Under Curve*), представља посебну меру квалитета класификације, односно способност класификационог модела да правилно разликује различите класе. Као што се може видети на сликама 4.12 и 4.13, веома високе AUC вредности ( $AUC \approx 1$ ) још једном потврђују да предложени модели класификације, засновани на стаблима одлучивања, могу пружити веома висок проценат тачних предвиђања.

#### 4.3.3. Анализа асоцијативних правила

За разлику од CHAID алгорита, који омогућава идентификацију и рангирање појединачних фактора ризика, анализа асоцијативних правила усмерена је на откривање комбинација карактеристика које се најчешће јављају заједно код пожарних догађаја. На овај начин није могуће утврдити узрочно-последичне односе у строгом статистичком смислу, али се могу идентификовати обрасци који указују на повећану вероватноћу истовременог јављања одређених услова и последица. Управо такве информације представљају значајну основу за процену пожарног ризика, планирање превентивних активности и доношење одлука у области заштите од пожара.

##### 4.3.3.1. Примена *Apriori* алгорита

У овом истраживању анализа асоцијативних правила спроведена је софтверском имплементацијом *Apriori* алгорита, којим су идентификоване најзначајније везе између карактеристика пожарних догађаја и њихових последица по људе. Добијена правила процењена су применом стандардних мера, као што су подршка (енгл. *Support*), поверење (енгл. *Confidence*), коефицијент подизања (енгл. *Lift*), и др., чиме је омогућена процена њихове статистичке и практичне релевантности.

*Apriori* алгоритам је реализован у софтверу WEKA 3.9.6 (видети, нпр., Hall et al., 2009), који омогућава репродуктивну и транспарентну обраду категоријских записа. У нашем случају, овај алгоритам је имплементиран са минималном подршком од 3% за повређене и 7% за смртне исходе. Ови прагови изабрани су како би се изједначила апсолутна учесталост генерисања правила, тј. тако да минималан број инстанци (случајева) потребних за формирање асоцијација буде приближно једнак за оба скупа (62 и 60, респективно). На овај начин, они омогућавају откривање ретких, али значајних правила која повезују различите атрибуте везане за повреде и смртне исходе у пожару.

Насупрот томе, узима се висока вредност поузданости од најмање 95%, која се такође користи као водећа метрика, чиме се обезбеђује значајна поузданост добијених правила асоцијације. Сам алгоритам је покренут током 20 итерација, тако да резултујући број

„великих скупова”, тј. низова правила дужине  $L(i)$ ,  $i = 1, \dots, 5$  показује значајну структурну сложеност и у скупу повређених и у скупу смртних исхода. Ово се такође може уочити у табели 4.15, где је индикативно постојање већег броја стабилних комбинација атрибута које прелазе горе наведене, унапред дефинисане прагове учесталости.

Табела 4.15. Број генерисаних „великих скупова” са минималном и потпуном подршком у Apriori алгоритму

| Скуп      | $L(1)$ | $L(2)$ | $L(3)$ | $L(4)$ | $L(5)$ | Случајеви |      |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|------|
|           |        |        |        |        |        | Подршка   | Сума |
| Повређени | 38     | 250    | 425    | 220    | 23     | 62        | 2075 |
| Погинули  | 23     | 94     | 79     | 15     | 0      | 60        | 853  |

На тај начин, примена асоцијативних правила на податке о пожарима открива скривене обрасце који повезују узроке пожара, време, објекте, старосне групе и исходе (повреде, односно смртне исходе). Наредне табеле 4.16 и 4.17 приказују десет најважнијих асоцијација са највишим вредностима поузданости за оба скупа података, које се детаљније анализирају у наставку.

Унутар популације повређених, најјаче идентификована правила показују јасне демографске и еколошке обрасце, као што је приказано у табели 4.16. Сва асоцијативна правила имају високе вредности поузданости (0,95–0,98), умерену вредност степена подизања (1,25–1,31), одступање од независности близу нуле (0,01–0,02) и изражене вредности убедљивости (3,74–8,11). Као што се види из саме табеле, у скоро свим структурираним контекстима повреда у пожарима (индустрија, саобраћај, експлозије, радни дани, лакше повреде), повреде се знатно чешће јављају код мушкараца. Штавише, најризичнији „мушки” контекст су машине за заваривање/брушење у индустрији током радних дана, општи индустријски узроци, а затим пожари у саобраћају. Јасно је да транспортни сектор има мању, али и даље јасно идентификовану, диспропорцију ризика, првенствено међу професионалним возачима који су високо изложени ризику од пожара.

С друге стране, скуп података о погинулима разликује се од претходног, јер има потпуно другачије обрасце ризика, односно демографски, етиолошки и сезонски фактори смртности су знатно специфичнији. Као што се може видети у табели 4.17, пожари у стамбеним објектима доминирају у смртним исходима, пре свега зато што стамбени простори јесу најчешћи контекст за смртоносне пожаре, комбинујући високу изложеност (много људи борави у њима) са рањивим групама (старији, болесни). Такође, доминантни узроци пожара су грејни елементи, употреба цигарета и отворени пламен, тако да такви

пожари могу бити изузетно ризични, посебно за старију популацију. Дакле, асоцијације овде нису повезане са професионалним контекстима, већ са рањивим групама, стамбеним окружењима и специфичним узроцима пожара.

*Табела 4.16. Уочени обрасци и метрике асоцијативних правила унутар популације повређених*

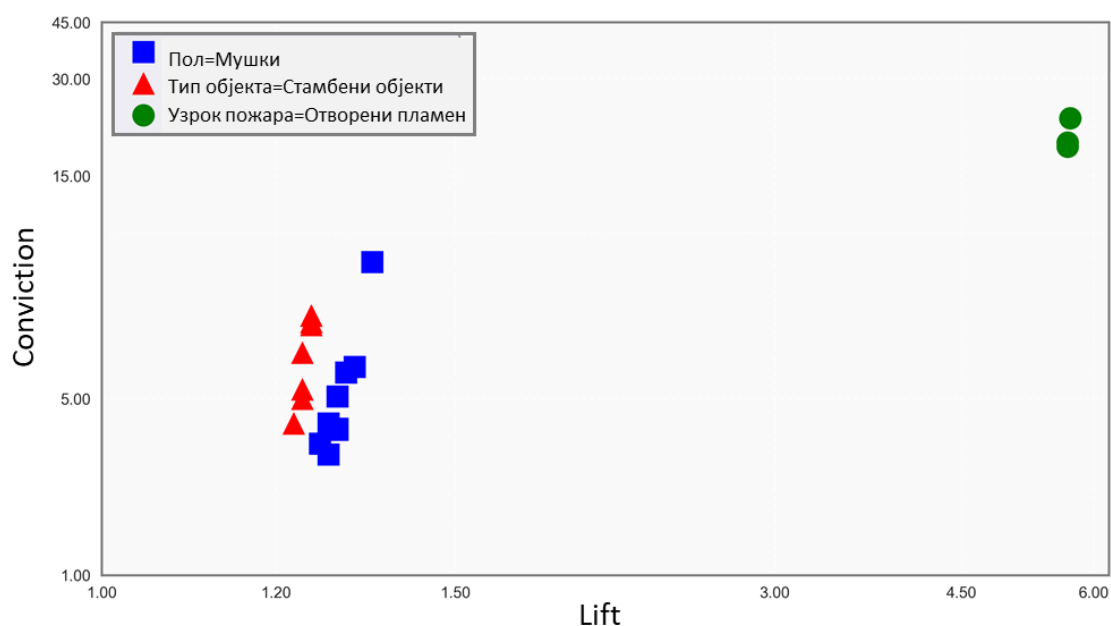
| Ред. бр.                   | Претходник (А)                                                                   | Последица (В) | Број случајева (А → В) | Conf.       | Lift        | Lev.        | Conv.       |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1.                         | Интервал времена = Интервал III,<br>Узрок пожара =<br>Заваривање/брушење         | Пол = мушки   | 66 → 65                | 0,98        | 1,31        | 0,01        | 8,11        |
| 2.                         | Старосна група = 20–34,<br>Тип објекта = Индустрijски и<br>производни објекти    | Пол = мушки   | 70 → 68                | 0,97        | 1,29        | 0,01        | 5,73        |
| 3.                         | Тип дана = Радни дан,<br>Узрок пожара =<br>Заваривање/брушење                    | Пол = мушки   | 114 → 110              | 0,96        | 1,28        | 0,01        | 5,60        |
| 4.                         | Узрок пожара =<br>Заваривање/брушење                                             | Пол = мушки   | 144 → 138              | 0,96        | 1,27        | 0,01        | 5,06        |
| 5.                         | Годишње доба = Зима,<br>Узрок пожара = Индустрijски и<br>производни објекти      | Пол = мушки   | 70 → 67                | 0,96        | 1,27        | 0,01        | 4,30        |
| 6.                         | Узрок пожара =<br>Заваривање/брушење,<br>Тежина повреде = лака                   | Пол = мушки   | 88 → 84                | 0,95        | 1,27        | 0,01        | 4,33        |
| 7.                         | Тип објекта = Индустрijски и<br>производни објекти                               | Пол = мушки   | 181 → 172              | 0,95        | 1,26        | 0,02        | 4,45        |
| 8.                         | Интервал времена = Интервал III,<br>Тип објекта = Транспорт, возила и<br>пловила | Пол = мушки   | 76 → 72                | 0,95        | 1,26        | 0,01        | 3,74        |
| 9.                         | Узрок пожара = Експлозија,<br>Тип објекта = Индустрijски и<br>производни објекти | Пол = мушки   | 76 → 72                | 0,95        | 1,26        | 0,01        | 3,74        |
| 10.                        | Тип дана = Радни дан,<br>Тип објекта = Индустрijски и<br>производни објекти      | Пол = мушки   | 146 → 138              | 0,95        | 1,25        | 0,01        | 3,99        |
| <b>Просечне вредности:</b> |                                                                                  |               |                        | <b>0,96</b> | <b>1,27</b> | <b>0,01</b> | <b>4,91</b> |

Штавише, треба напоменути да се према добијеним метрикама све горе наведене асоцијације могу посматрати као два различита кластера. Пожари у стамбеним објектима имају значајне, али умерене метричке вредности, са приближно једнаким вредностима коефицијента подизања (1,22–1,24) и релативно уједначеном убедљивошћу (4,4–6,9).

*Табела 4.17. Уочени обрасци и метрике асоцијативних правила унутар популације погинулих*

| Ред. бр.                   | Претходник (А)                                                     | Последица (В)                     | Број случајева (А → В) | Conf.       | Lift        | Lev.        | Conv.        |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 1.                         | АНГ = Интервал I,<br>Старосна група = 80+                          | Тип објекта =<br>Стамбени објекти | 66 → 65                | 0,98        | 1,24        | 0,01        | 6,89         |
| 2.                         | Узрок пожара = Ложиште                                             | Тип објекта =<br>Стамбени објекти | 97 → 95                | 0,98        | 1,24        | 0,02        | 6,75         |
| 3.                         | Узрок пожара = Опушак<br>цигарете,<br>Пол = мушки                  | Тип објекта =<br>Стамбени објекти | 96 → 94                | 0,98        | 1,24        | 0,02        | 6,68         |
| 4.                         | Тип објекта = Отворен<br>простор / остало                          | Узрок пожара =<br>Отворени пламен | 82 → 80                | 0,98        | 5,70        | 0,08        | 22,65        |
| 5.                         | Узрок пожара = Опушак<br>цигарете                                  | Тип објекта =<br>Стамбени објекти | 116<br>→ 113           | 0,97        | 1,23        | 0,02        | 6,05         |
| 6.                         | Тип дана = Радни дан,<br>Узрок пожара = Ложиште                    | Тип објекта =<br>Стамбени објекти | 75 → 73                | 0,97        | 1,23        | 0,02        | 5,22         |
| 7.                         | Узрок пожара = Грејна тела                                         | Тип објекта =<br>Стамбени објекти | 72 → 70                | 0,97        | 1,23        | 0,02        | 5,01         |
| 8.                         | Тип објекта = Отворен<br>простор / остало,<br>Пол = мушки          | Узрок пожара =<br>Отворени пламен | 69 → 67                | 0,97        | 5,67        | 0,06        | 19,06        |
| 9.                         | Тип дана = Радни дан,<br>Тип објекта = Отворен<br>простор / остало | Узрок пожара =<br>Отворени пламен | 67 → 65                | 0,97        | 5,67        | 0,06        | 18,51        |
| 10.                        | Узрок пожара = Неутврђено,<br>Пол = женски                         | Тип објекта =<br>Стамбени објекти | 64 → 62                | 0,97        | 1,22        | 0,01        | 4,45         |
| <b>Просечне вредности:</b> |                                                                    |                                   |                        | <b>0,97</b> | <b>2,57</b> | <b>0,03</b> | <b>10,13</b> |

Насупрот томе, пожари изазвани отвореним пламеном имају другачије метричке карактеристике (Confidence  $\approx$  0,97, Lift  $\approx$  5,7, Conviction  $\approx$  18–23), указујући на изузетно јаке везе између претходника и последица. Другим речима, то значи да пожари са отвореним пламеном на отвореним просторима (дворишта, нерегулисани простори) представљају несразмерно ризичан сценарио. Неке од горе наведених чињеница су такође приказане на слици 4.14, која представља логаритамски дијаграм расејања вредности подизања (Lift) у односу на убедљивост (Conviction) за горе наведена асоцијативна правила.



Слика 4.14. Логаритамски дијаграм сегментације Lift и Conviction вредности за кластере добијене применом асоцијативних правила

Вредности метрика су груписане у три различита кластера: „Пол = Мушки”, „Тип објекта = Стамбене зграде”, односно „Узрок пожара = Отворени пламен”. Очигледно је да прва два кластера имају блиске Lift-вредности ( $\approx 1,2-1,3$ ), док је трећи кластер, који описује отворени пламен као узрок пожара, изузетно специфичан, са високим вредностима обе метрике. На тај начин, он указује на веома ризичне сценарије којима треба посветити посебну пажњу приликом формулисања и реализације противпожарних безбедносних политика, о чему ће бити више речи у наставку.

#### 4.3.3.2. Интерпретација добијених асоцијативних правила

Анализа правила асоцијација открива различите механизме повређивања и смртних исхода повезаних са пожарима у Републици Србији. На основу издвојених правила код повређених лица, атрибут „Пол = Мушки” појавио се као доминантан ефекат, са високим степеном поузданости (0,95-0,98) и умереним, али значајним степеном повећања (1,25-1,31). Најјача правила примећена су у сценаријима који укључују заваривање и брушење, као и у случајевима пожара у индустријским и производним погонима, посебно када су се ови догађаји догодили током радних дана, првенствено поподне (12-18 часова).

Нешто мањи, али и даље значајан феномен су пожари у транспорту, возилима и пловилима. Ови резултати су очекивани, јер су то активности у којима преовлађују мушкарци као радници у индустријским секторима у Републици Србији, што резултира структурно већом изложеношћу опасностима од пожара. Добијени резултати су такође у складу са међународним извештајима који истичу да обрада метала, рад на високим

температурама и транспорт запаљивих материјала представљају најризичније узроке пожара на радном месту, посебно када се безбедносни протоколи или заштитна опрема недоследно примењују.

С друге стране, правила асоцијација за смртне исходе указују на прецизно дефинисан скуп ризика који се код атрибута „Тип објекта = Стамбене зграде” јављају са веома високим и стабилним степеном поузданости (0,97-0,98), као и стабилним коефицијентом подизања (1,22-1,24). Најистакнутији узроци као што су опушак цигарете, камин/шпорет и други неспецификовани узроци показују да се смртоносни пожари обично дешавају у затвореним, углавном ноћним и мање контролисаним окружењима, где је откривање пожара тешко, а могућности евакуације ограничене. Штавише, високе вредности поузданости потврђују да, уколико су горе наведени узроци присутни, постаје веома вероватно присуство смртог исхода.

Са аспекта демографских фактора, лица старија од 80 година првенствено се истичу као група високог ризика, што је у складу са њиховом смањеном покретљивошћу и споријом реакцијом у ванредним ситуацијама. У поређењу са повредама, где се ризици углавном јављају у радном и индустријском окружењу, смртоносни пожари су мање разноврсни, али много доследнији: концентрисани су у домаћинствима, повезани са непажњом, грејним елементима и рањивим категоријама становништва. Ово јасно разликује превентивне приоритете - безбедност на раду ради спречавања повреда, наспрам раног откривања, безбедног грејања и подршке старијој популацији у циљу спречавања смртних исхода у пожарима.

Коначно, пожари изазвани отвореним пламеном имају веома значајан коефицијент подизања ( $Lift \approx 6$ ) и убедљивости ( $Conviction \approx 20$ ), што указује на екстремну „снагу” овог правила, везаног за отворени пламен као узрок пожара и то најчешће у руралним подручјима. Из тих разлога, ова група асоцијативних правила представља кључни индикатор смртоносних пожара, тј. указује на чињеницу да отворени пламен у нерегулисаним просторима најкритичнији сценарио.

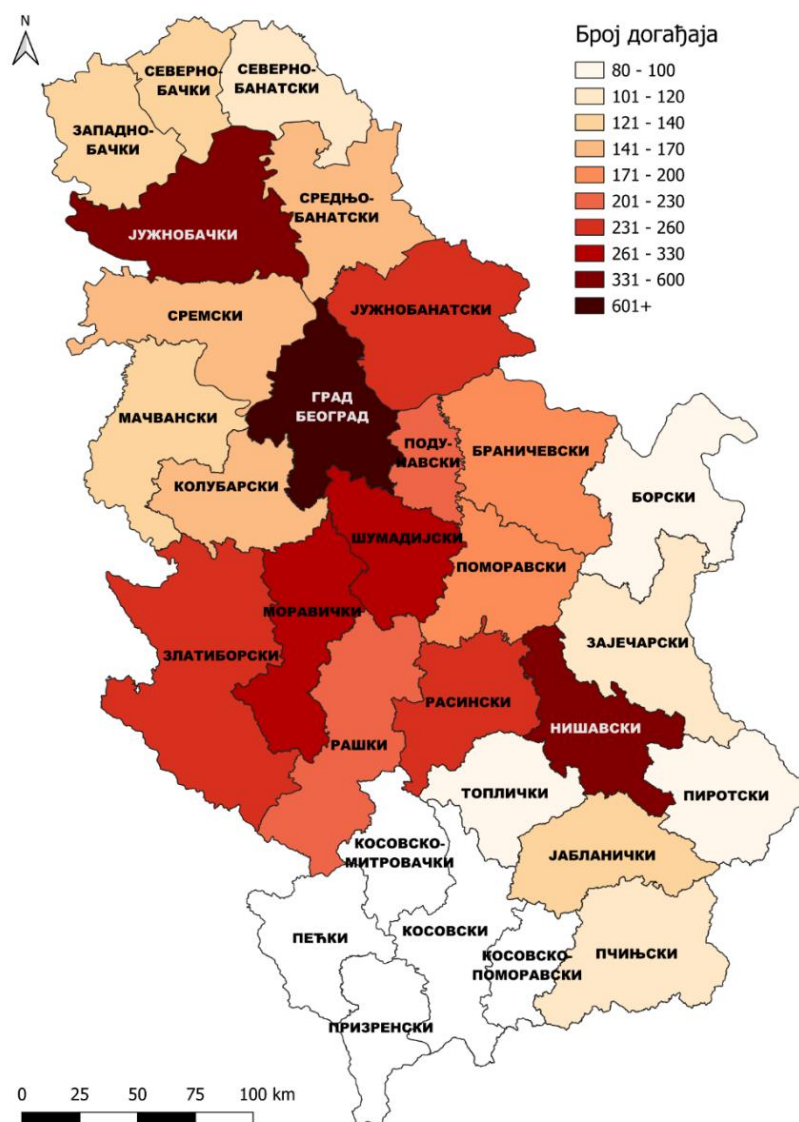
Добијена асоцијативна правила јасно указују да се последице пожарних догађаја по људе не јављају случајно, већ да су повезане са специфичним комбинацијама карактеристика пожара, објекта, времена настанка и демографских обележја лица. Посебно су значајна правила која истовремено обухватају више фактора, јер она указују да ризик од повређивања или смртог исхода није последица једне изоловане околности, већ њиховог заједничког деловања.

На крају, претходна анализа асоцијативних правила представља природан наставак анализе резултата добијених применом стохастичког моделовања и CHAID алгоритма. Док су стохастички модели омогућили квантитативни опис ризика, а CHAID алгоритам идентификовао најзначајније факторе који на тај ризик утичу, Apriori алгоритам омогућио је откривање најчешћих комбинација услова под којима долази до настанка последица пожара по људе. Интеграцијом резултата добијених применом сва три приступа добија се свеобухватнији увид у структуру пожарног ризика, што представља основу за дефинисање циљаних превентивних мера и унапређење система заштите од пожара.

#### **4.4. Просторна анализа пожарних догађаја**

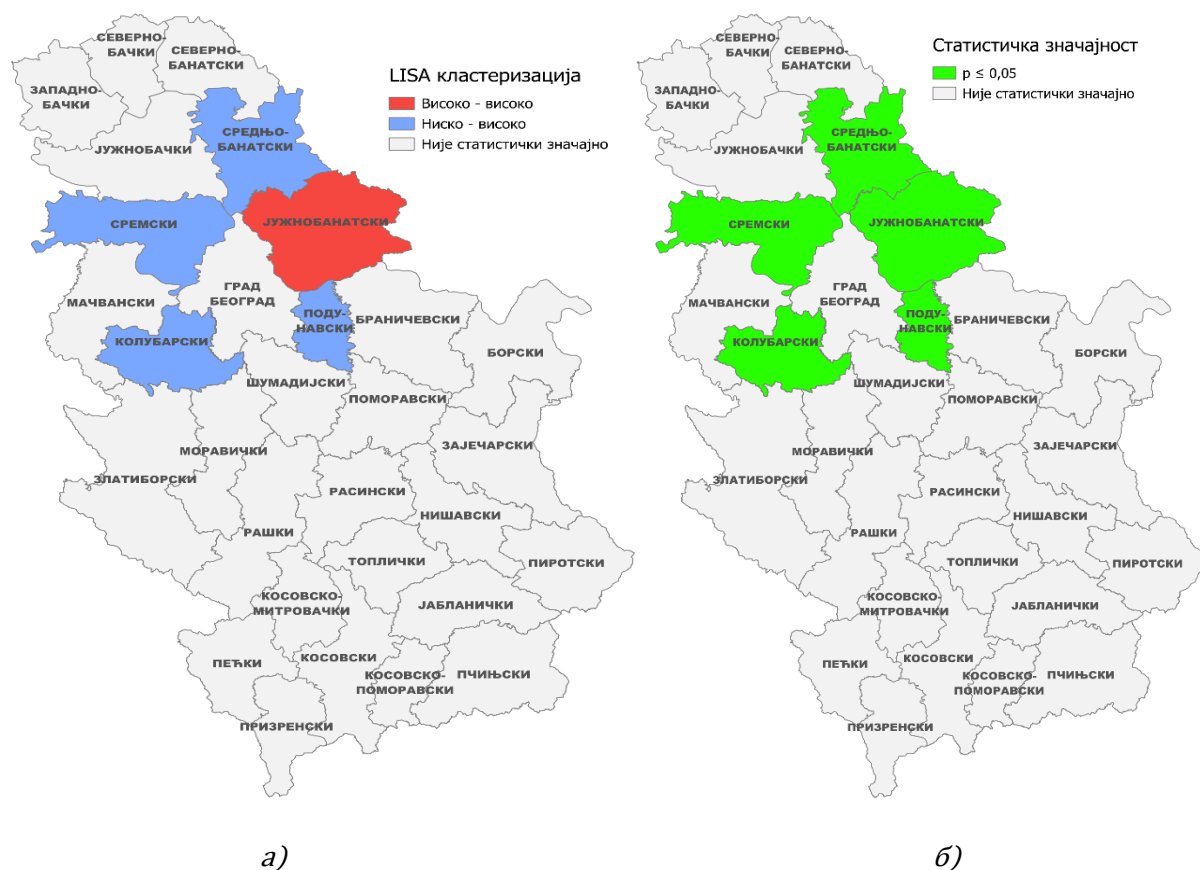
У наставку истраживања анализирана је просторна расподела пожарних догађаја на територији Републике Србије, са циљем идентификације просторних разлика и образаца њихове појаве. Анализа је најпре обухватила пожарне догађаје са повређеним и смртно страдалим лицима, независно од узрока, а затим посебно догађаје код којих је као узрок настанка пожара евидентирана цигарета. На слици 4.15 приказана је просторна дистрибуција ових догађаја по управним окрузима Републике Србије, применом хороплет картографске методе са десет категорија интензитета.

Резултати анализе указују на изражену просторну диференцираност пожарних догађаја, при чему је највећа концентрација (601+) регистрована на подручју Града Београда, што се може довести у везу са високом густином насељености и инетезивном урбанизацијом. У категорији високих вредности (331–600) издвајају се Јужнобачки и Нишавски округ, у оквиру којих се налазе Нови Сад и Ниш са већом густином насељености и израженијом урбанизацијом. Умерено висок интензитет пожарних догађаја (261–330) присутан је у Моравичком и Шумадијском округу, док категорију од 231 до 260 догађаја карактеришу, Расински, Златиборски и Јужнобанатски округ. Средње вредности (171–230) забележене су у Рашком, Подунавском, Браничевском и Поморавском округу. Нижи интензитет (121–170) забележен је у Средњобанатском, Сремском, Колубарском, Јабланичком, Севернобачком, Западнобачком и Мачванском, док најнижу учесталост пожарних догађаја (80–120) карактеришу Пиротски, Борски, Топлички, Зајечарски, Пчињски и Севернобанатски округ. Уочени просторни образац у великој мери прати степен урбанизације, густину насељености и интензитет друштвено-економских активности, при чему урбанизовани окрузи са већом концентрацијом становништва бележе значајно већи број пожарних догађаја у односу на претежно руралне и периферне делове Републике Србије.



Слика 4.15. Просторна дистрибуција укупних пожарних догађаја са повређеним и смртно страдалим лицима по управним окрузима Републике Србије

У циљу идентификације статистички значајних просторних кластера пожарних догађаја са људским жртвама, примењена је анализа локалног Морановог индекса. Резултати су приказани на карти LISA кластеризације на слици 4.16а и карти статистичке значајности на слици 4.16б (Abdulhafedh, 2017; Vranić & Mišić, 2024). Резултати показују постојање два типа статистички значајних просторних образаца (слика 4.16.а). Јужнобанатски округ издваја се као кластер типа Високо-Високо, указујући да овај округ, заједно са суседним јединицама, бележи натпросечне вредности посматране варијабле. Насупрот томе, Сремски, Колубарски и Подунавски округ идентификовани су као кластери типа Ниско-Високо, односно као просторне аномалије у којима се окрузи са испотпросечним вредностима непосредно граниче са зоном повишених вредности.



Слика 4.16. а) LISA кластеризација укупних пожарних догађаја; б) статистичка значајност локалног Морановог индекса за укупне пожарне догађаје

Статистичка поузданост свих идентификованих кластера верификована је на нивоу значајности  $p \leq 0,05$ , при чему је примењена метода случајних пермутација са 999 симулација (слика 4.16б). Иако је праг значајности јединствен за све издвојене јединице, важно је напоменути да просторни распоред значајних округа концентрисаних у северном и централном делу земље сугерише да уочени обрасци нису резултат случајног распореда вредности, већ одражавају стварне просторне законитости у дистрибуцији посматраног феномена. Како је показано у претходној анализи, опушак цигарете представља један од посебно значајних узрока пожара, при чему овакве пожаре прати изражен ризик од наступања смртних исхода. Због тога, пожари изазвани опушком цигарете захтевају посебну пажњу, не само са аспекта анализе њихове просторне и временске дистрибуције, већ и са становишта форензичке идентификације и превенције. Имајући у виду наведене резултате, у наставку истраживања посебна пажња је усмерена на ову категорију пожара, најпре кроз њихову просторну анализу, а затим и кроз експериментално испитивање могућности идентификације трагова цигарете и развоја ватроотпорних материјала намењених смањењу ризика од њиховог наступања.

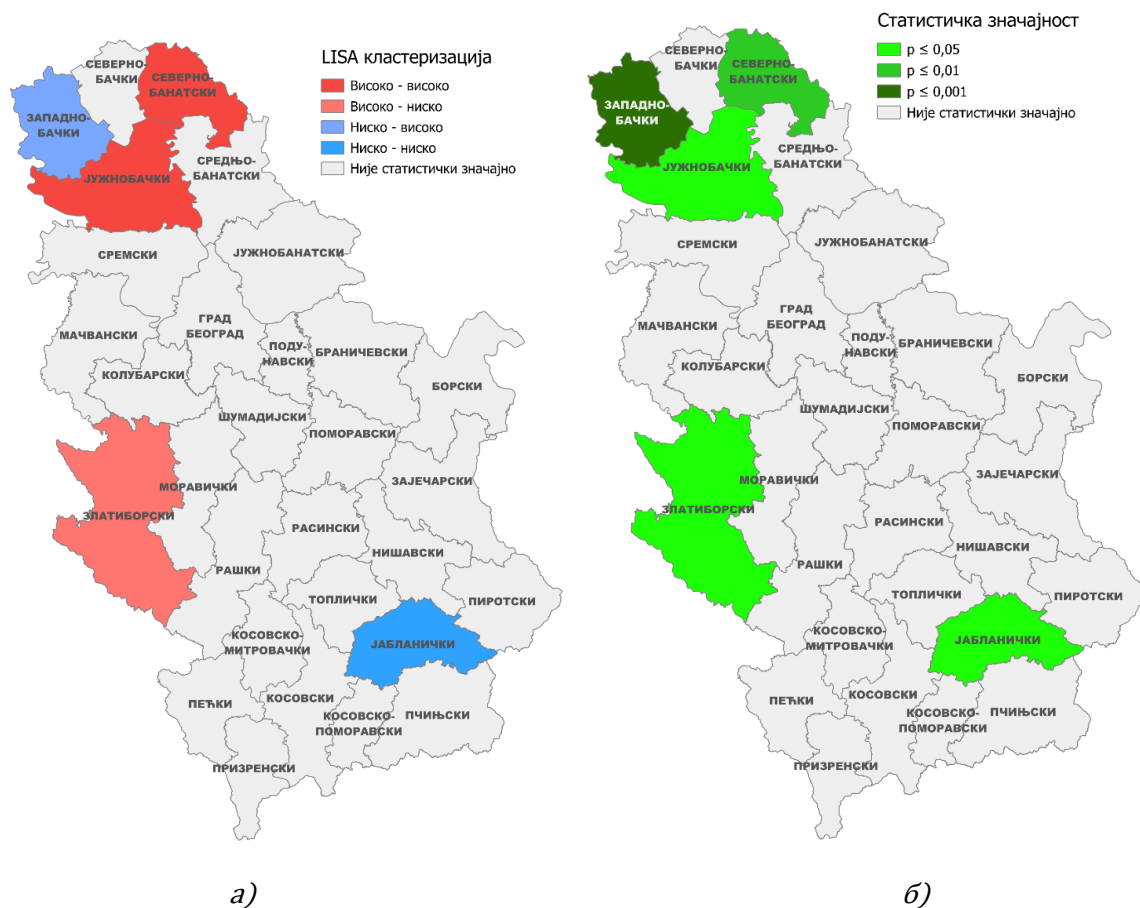
Како је показано у претходној анализи, опушак цигарете представља један од посебно значајних узрока пожара, при чему овакве пожаре прати изражен ризик од наступања смртних исхода. Због тога, пожари изазвани опушком цигарете захтевају посебну пажњу, не само са аспекта анализе њихове просторне и временске дистрибуције, већ и са становишта форензичке идентификације и превенције. Имајући у виду наведене резултате, у наставку истраживања посебна пажња је усмерена на ову категорију пожара, најпре кроз њихову просторну анализу, а затим и кроз експериментално испитивање могућности идентификације трагова цигарете и развоја ватроотпорних материјала намењених смањењу ризика од њиховог наступања.



Слика 4.17. Просторна дистрибуција пожарних догађаја узрокованих цигаретама са повређеним и смртно страдалим лицима по управним окрузима Републике Србије

На слици 4.17 приказана је просторна дистрибуција пожара у којима је цигарета идентификована као узрок настанка пожара, а чији је исход укључивао повређена и смртно страдала лица, применом хороплет картографске методе на нивоу управних округа Републике Србије. Уочена је изражена просторна неуједначеност, при чему је највиша

учесталост пожара (21–30) забележена у Севернобачком, Јужнобачком и Јужнобанатском округу у Војводини, као и у Расинском округу у централној Србији. Поред тога, Подунавски и Шумадијски округ карактерише умерено висок интензитет (16–20), док средњу заступљеност (11–15) бележе Златиборски, Сремски, Поморавски, Средњобанатски и Севернобанатски округ.



Слика 4.18. а) LISA кластеризација пожарних догађаја узрокованих цигаретом; б) статистичка значајност локалног Морановог индекса за пожарне догађаје узроковане цигаретом

У категорији умерено ниске учесталости (6–10) издвајају се Западнобачки, Браничевски, Пчињски, Рашки, Пиротски, Нишавски, Зајечарски, Борски и Колубарски округ. Са најнижом учесталостју пожара (1–5), издвајају се Град Београд, Топлички, Јабланички и Мачвански округ, што потенцијално указује на различите нивое изложености ризику, ефикасност превентивних мера и просторне специфичности анализираних подручја. Идентификовани просторни образац представља значајну аналитичку основу за планирање и усмеравање превентивних активности у зонама са повишеним ризиком. Резултати анализе показују постојање неколико статистички значајних просторних образаца, приказаних на слици 4.18а. У северном делу земље, Северно-банатски и Јужнобачки округ образују кластер Високо-Високо, односно зону у

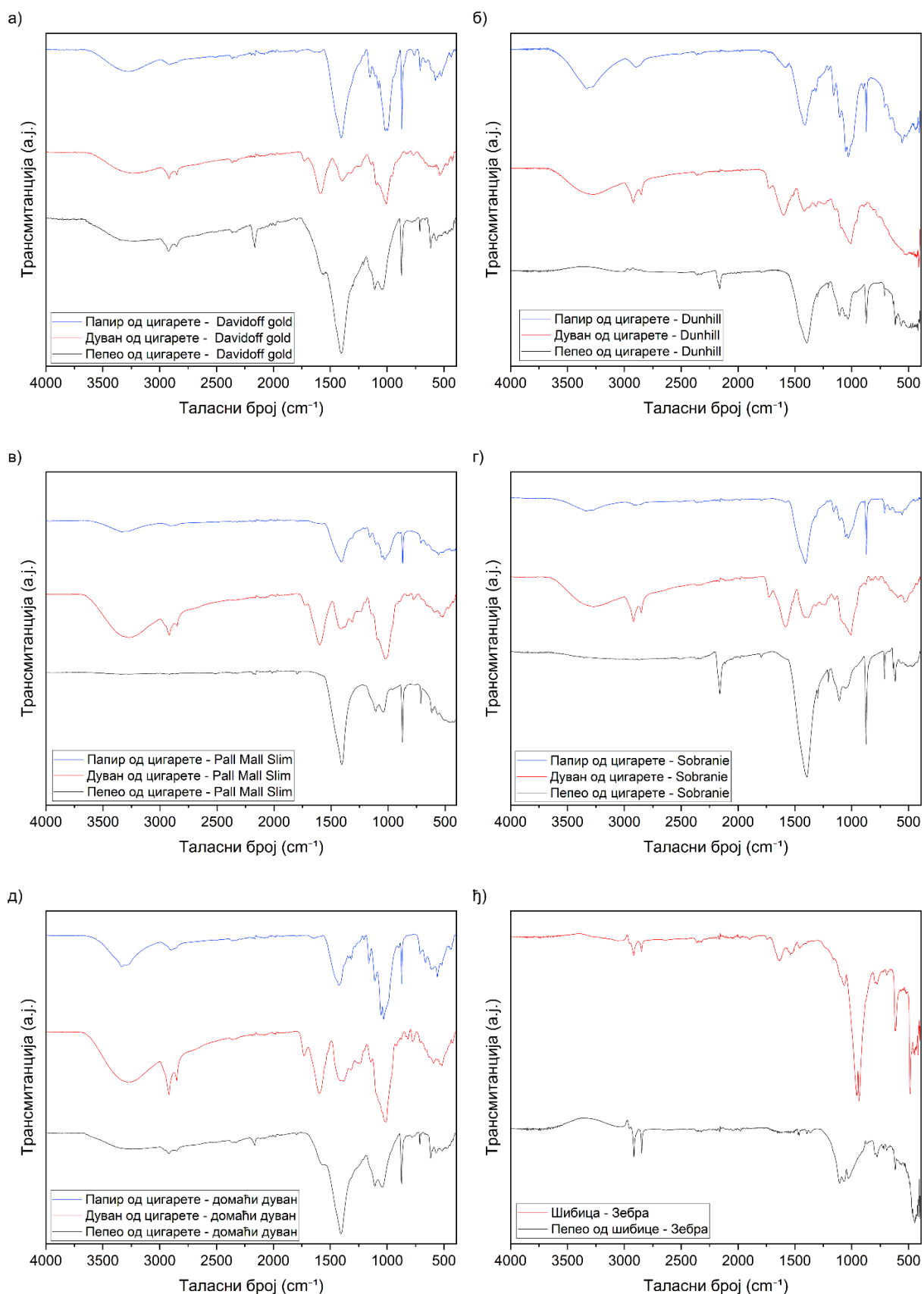
којој се висок број догађаја бележи и у самим окрузима и у њиховом непосредном окружењу. Насупрот томе, Јабланички округ у југоисточној Србији представља кластер Ниско-Ниско, карактеристичан по концентрацији ниских вредности. Западнобачки округ идентификован је као просторна аномалија типа Ниско-Високо, а Моравички и Златиборски округ као тип Високо-Ниско. Што указује на одступање њихових вредности у односу на суседни контекст.

Резултати анализе показују постојање неколико статистички значајних просторних образаца, приказаних на слици 4.18а. У северном делу земље, Северно-банатски и Јужнобачки округ образују кластер Високо-Високо, односно зону у којој се висок број догађаја бележи и у самим окрузима и у њиховом непосредном окружењу. Насупрот томе, Јабланички округ у југоисточној Србији представља кластер Ниско-Ниско, карактеристичан по концентрацији ниских вредности. Западнобачки округ идентификован је као просторна аномалија типа Ниско-Високо, а Моравички и Златиборски округ као тип Високо-Ниско. Што указује на одступање њихових вредности у односу на суседни контекст. Коначно, статистичка значајност добијених резултата додатно је верификована методом случајних пермутација (слика 4.18б). Највиши ниво поузданости ( $p \leq 0,001$ ) достиже Западнобачки округ, затим следе Северно-банатски и Јужнобачки ( $p \leq 0,01$ ), као и Златиборски, Моравички и Јабланички ( $p \leq 0,05$ ). Добијени резултати потврђују да уочена просторна концентрација није резултат случајности, те да постоје изражене регионалне разлике у распореду посматраног феномена на територији Републике Србије.

## **4.5. Примена инструменталних метода за идентификацију узрока пожара**

### **4.5.1. FT-IR спектроскопија у идентификацији трагова цигарете на текстилним материјалима**

Анализом података о пожарима на простору Републике Србије установљено је да су цигарете најчешћи доказани изазивачи пожара. Стога је у испитивању могућности примене FT-IR спектроскопије за идентификацију хемијских трагова повезаних са овим узрочником посебна пажња посвећена траговима насталим услед дејства цигарете. Промене настале услед термичке разградње материјала приликом његовог излагања различитим горивим материјама, испитане су анализом FT-IR спектра. На слици 4.19 приказани су FT-IR спектри папира, дувана и пепела цигарете за цигарете марке *Davidoff Gold*, *Dunhill Master Blend*, *Pall Mall Slim*, *Sobranie*, мотаног домаћег дувана, као и шибице и пепела након сагоревања шибице.



Слика 4.19. FT-IR спектри папира, дувана и пепела цигарете за цигарете марке а) Davidoff Gold, б) Dunhill, в) Pall Mall Slim, г) Sobranie, д) мотаног домаћег дувана и ђ) шибице и пепела након сагоревања шибице

На основу FT-IR спектра, приказаних на слици 4.19, примећује се јасна промена у спектрима пре и након калцинације материјала цигарета и шибице. У случају цигарета, код свих цигарета примећују се исте карактеристичне апсорционе траке које се могу повезати са траговима папира и дувана. Поређењем наведених апсорпционих трака, примећује се разлика у структури спектра сагореле шибице у односу на спектре цигарете, што јасно указује да је применом наведене инструменталне методе могуће дати допринос реконструкцији догађаја и прикупљању релевантних материјалних доказа потребних за судски поступак. У спектрима пепела цигарета приказаним на сликама 4.19а – 4.19д, приказују се апсорпционе траке сличног идентитета на таласним бројевима  $1420\text{ cm}^{-1}$ ,  $1041\text{ cm}^{-1}$ ,  $1034\text{ cm}^{-1}$ ,  $871\text{ cm}^{-1}$ ,  $774\text{ cm}^{-1}$  и  $621\text{ cm}^{-1}$ .

Апсорпциона трака у спектру пепела цигарете на таласном броју  $1420\text{ cm}^{-1}$  потиче од асиметричног истезања јона  $\text{CO}_3^{2-}$  добијеног након сагоревања цигарете (Cai et al., 2010) као и C-H деформација  $\text{CH}_2$  групе пореклом из несагорелих остатака папира (апсорпциона трака слабијег интензитета у спектру папира), што указује на могућност примене у поступцима реконструкције догађаја и одређивања узорка пожара (Zhou et al., 2011). Изостанак апсорпционе траке на  $1610\text{ cm}^{-1}$  након калцинације папира указује на деградацију и раскидање веза  $\text{C}=\text{C}$  пореклом из макромолекула лигнина, који даје чврстину листу дувана (Boukir et al., 2019; Zhou et al., 2011). Траке малог интензитета на таласним бројевима  $1041\text{ cm}^{-1}$  и  $1034\text{ cm}^{-1}$  могу се приписати C-O вибрацијама растезања пореклом из природних макромолекула листа дувана и сировина папира (Raspolli Galletti et al., 2015; Refaat et al., 2023).

Постојање ових трака и смањење њиховог интензитета у односу на дуван и папир након пиролизе потврђују непотпуно сагоревање цигарете и могу се сматрати маркером цигарете након пожара. Појава траке на таласном броју  $871\text{ cm}^{-1}$  указује на постојање вибрација ван равни калцијум-карбоната (калцитна фаза) у узорку папира и пепела, што је комплементарно са постојањем траке на  $1420\text{ cm}^{-1}$  (Luo et al., 2020). Калцијум-карбонат се користи у производњи папира као пунилац у великом масеном проценту и при ниским температурама сагоревања не мења свој облик, што потенцијално може помоћи у поступку реконструкције пожара (Buruberry et al., 2015; Srivastava et al., 2024). Оштра апсорпциона трака на таласном броју  $774\text{ cm}^{-1}$  присутана у пепелу цигарете након пиролизе указује на вибрације симетричног истезања Si-O-Si, што је комплементарно са резултатима испитивања пепела биомасе (Kalembkiewicz et al., 2018; Yin et al., 2019).

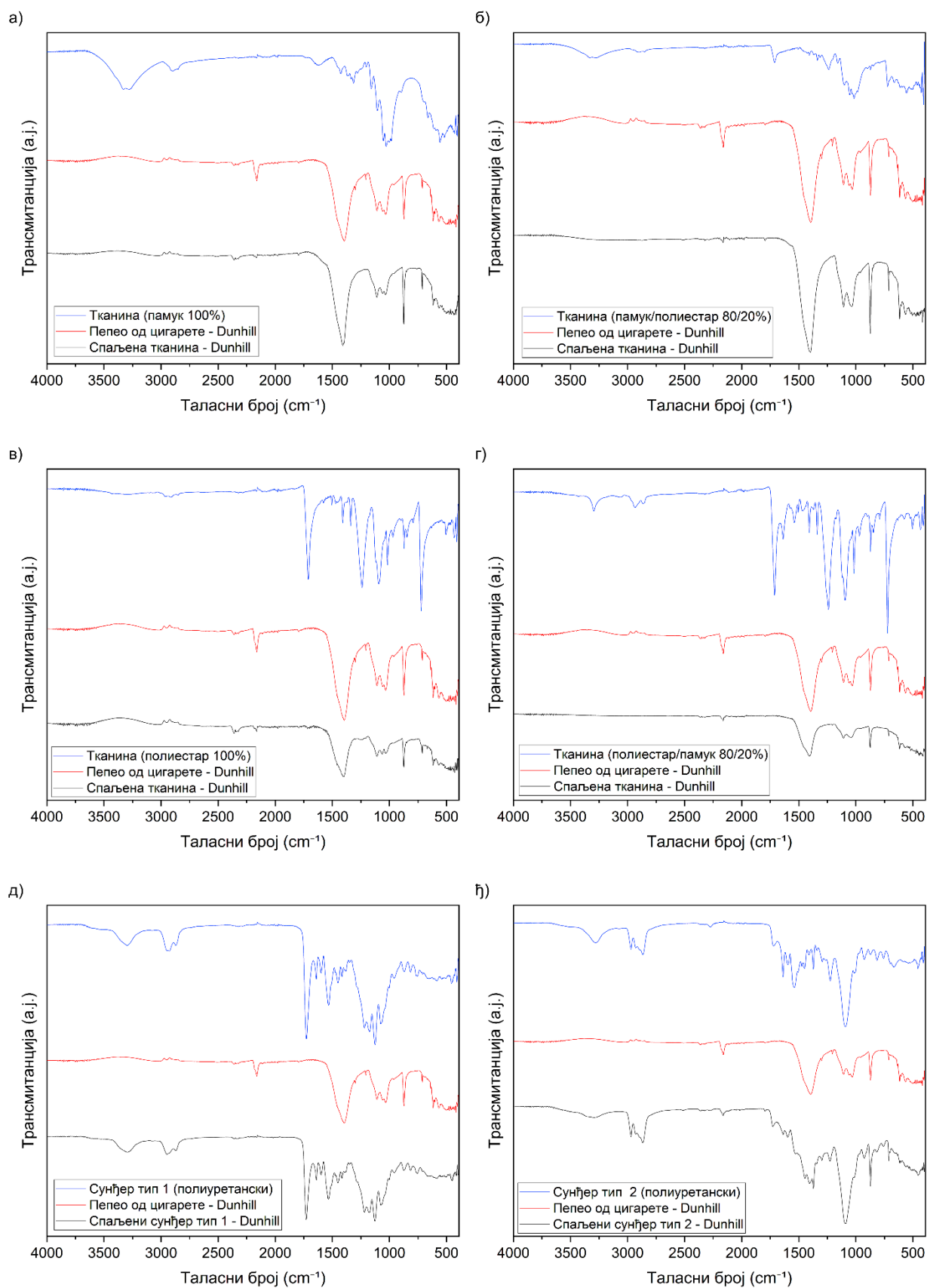
Формирање нове апсорпционе траке на  $621\text{ cm}^{-1}$  након пиролизе цигарете указује на постојање вибрација савијања ван равни сулфатног јона, које настају као производ

сагоревања сумпорних једињења из дувана (Kamaraj et al., 2017). Поред наведених апсорпционих максимума, у пепелу цигарета марке *Davidoff Gold*, *Dunhill* и *Sobranie* присутан је и апсорпциони максимум слабијег интензитета на таласном броју око  $2160\text{ cm}^{-1}$ , који потиче од асиметричних вибрација истезања  $\text{-N-C=S}$  насталих приликом термалне разградње никотина и других извора азота из дувана (Tammer, 2004).

За разлику од карактеристичних апсорпционих трака цигарете, код пепела шибице приказаног на слици 4.19ђ примећују се две апсорпционе траке слабог интензитета у области око  $2900\text{ cm}^{-1}$ , који се такође појављују у спектру шибице пре калцинације. Наведени дублет апсорпционих трака потиче од асиметричних истезања  $\text{C-H}$  групе пореклом из природних макромолекула дрвета шибице (Jia et al., 2011). Након калцинације, из спектра нестају слабе апсорпционе траке у опсегу таласних дужина  $1600\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$ , што указује на раскидање ароматичних веза  $\text{C=C}$  из молекула лигнина (Boukir et al., 2019; Traoré et al., 2018). Такође, приликом калцинације нестале су интензивне оштре апсорпционе траке на око  $1000\text{ cm}^{-1}$ , које се могу приписати вибрацијама  $\text{Cl-O}$ , пореклом из  $\text{ClO}_3^-$  јона из главе шибице (Alves et al., 2005).

Након сагоревања долази до формирања апсорпционих у области у  $1070\text{--}1040\text{ cm}^{-1}$ , који се могу приписати вибрацијама асиметричног истезања силоксанских веза  $\text{Si-O-Si}$  из пунила шибице. Постојање слабе траке на  $871\text{ cm}^{-1}$  након калцинације указује на појаву вибрација савијања калцијум-карбоната насталог сагоревањем материјала (Luo et al., 2020; Veerasingam & Venkatachalapathy, 2014). Након калцинације смањен је интензитет апсорпционе траке на  $610\text{ cm}^{-1}$  услед смањења интензитета вибрација изазваних непотпуном потрошњом хлоратног јона ( $\text{ClO}_3^-$ ) услед сагоревања  $\text{KClO}_3$  из шибице (Ford et al., 2004).

Након дефинисања карактеристичних апсорпционих трака делова цигарете и пепела, извршена је анализа структуре узорака различитих материјала присутних у домаћинствима пре и након спаљивања цигаретом *Dunhill Master Blend*. FT-IR спектри различитих тканина (памук 100%, памук/полиестар 80/20%, полиестар 100%, полиестар/памук 80/20%, полиуретански сунђер тип 1 и полиуретански сунђер тип 2) пре и након калцинације изазване цигаретом *Dunhill Master Blend* приказани су на наредној слици 4.20.



Слика 4.20. FT-IR спектри пре и након калцинације изазване цигаретом Dunhill материјала: а) памук 100%, б) памук/полиестар 80/20%, в) полиестар 100%, г) полиестар/памук 80/20%, д) полиуретански сунђер тип 1 и е) полиуретански сунђер тип 2

Анализом FT-IR спектра приказаних на слици 4.20 може се приметити велика сличност у деловима текстила калцинисаним жаром цигарете, док се код узорака сунђера примећује мања ефикасност методе услед топљења материјала при излагању температури жара цигарете. На основу спектра на сликама 4.20а – 4.20г, без обзира на врсту текстилног материјала, примећује се идентичан спектар калцинисаних делова са карактеристичним апсорпционим тракама на таласним бројевима:  $1420\text{ cm}^{-1}$ ,  $1041\text{ cm}^{-1}$ ,  $1034\text{ cm}^{-1}$ ,  $871\text{ cm}^{-1}$ ,  $774\text{ cm}^{-1}$  и  $621\text{ cm}^{-1}$ . Интензитет апсорпционих трака у потпуности се поклапа са претходно објашњеним доминантним апсорпционим тракама цигарете *Dunhill Master Blend*, што може указати на то да је у случају карбонизације текстилних материјала могуће применити FT-IR методу у доказивању цигарете као узрочника пожара. Анализом спектра полиуретанских сунђера приказаних на Слика 4.20д и Слика 4.20ђ, примећује се да код сунђера типа 1 нема промена након излагања жару цигарете, што се може приписати топљењу материјала услед излагања термичком стресу. Код наведеног материјала није примећено задржавање пепела цигарете на карамелизованом делу. У случају испитивања сунђера типа 2, промене у спектрима пре и након калцинације мање су него у случају тканине, што такође указује на то да материјал није сагорео, али је доказано постојање апсорпционих трака које потичу од цигарете. Формирање апсорпционих трака након контакта цигарете и сунђера типа 2 на таласним бројевима  $1420\text{ cm}^{-1}$ ,  $872\text{ cm}^{-1}$  и  $760\text{ cm}^{-1}$ , као и постојање благог повећања на око  $620\text{ cm}^{-1}$ , може указати на постојање трагова цигарете на површини узорка. На основу наведених апсорпционих максимума може се закључити да FT-IR метода омогућава идентификацију карактеристичних апсорпционих трака испитиваних узорака, што може представљати допунски извор информација у форензичкој анализи и реконструкцији догађаја.

Табела 4.18. Пирсонови коефицијенти корелације FT-IR спектра пепела од цигарете

| Пепео од цигарете | Pall Mall Slim | Sobranie      | Davidoff Gold | Мотана цигарета |
|-------------------|----------------|---------------|---------------|-----------------|
| Pall Mall Slim    | <b>1,0000</b>  | 0,7956        | 0,6867        | 0,7477          |
| Sobranie          | 0,7956         | <b>1,0000</b> | 0,9088        | 0,9253          |
| Davidoff Gold     | 0,6867         | 0,9088        | <b>1,0000</b> | 0,9898          |
| Мотана цигарета   | 0,7477         | 0,9253        | 0,9898        | <b>1,0000</b>   |

Поред визуелног поређења FT-IR спектра, извршена је и математичка анализа применом Пирсоновог коефицијента корелације. Резултати анализе, приказани у табели 4.18, показали су висок степен сличности FT-IR спектра пепела различитих цигарета (0,687–0,990). Највећа корелација утврђена је између пепела цигарете *Davidoff*

*Gold* и пепела мотане цигарете (0,990), док је најмања корелација забележена између пепела цигарета *Pall Mall Slim* и *Davidoff Gold* (0,687).

У табели 4.19. анализа је показала веома висок степен сличности FT-IR спектра дувана различитих брендова цигарета. Коефицијента корелације кретао се од 0,9299 до 0,9841, при чему је највећа корелација утврђена између дувана цигарете *Pall Mall Slim* и мотане цигарете (0,9841). Добијени резултати указују на релативно уједначене FT-IR карактеристике анализираних дуванских смеша, без обзира на бренд цигарете.

Табела 4.19. Пирсонови коефицијенти корелације FT-IR спектра дувана од цигарете

| Дуван од цигарета | Pall Mall Slim | Sobranie      | Davidoff Gold | Мотана цигарета |
|-------------------|----------------|---------------|---------------|-----------------|
| Pall Mall Slim    | <b>1,0000</b>  | 0,9366        | 0,9299        | 0,9841          |
| Sobranie          | 0,9366         | <b>1,0000</b> | 0,9604        | 0,9692          |
| Davidoff Gold     | 0,9299         | 0,9604        | <b>1,0000</b> | 0,9463          |
| Мотана цигарета   | 0,9841         | 0,9692        | 0,9463        | <b>1,0000</b>   |

Анализа FT-IR спектра папира различитих брендова цигарета, приказана у табели 4.20., показала је висок степен међусобне сличности, при чему су вредности коефицијента корелације износиле од 0,7706 до 0,9430. Највећа вредност коефицијента корелације утврђена је између папира цигарета *Sobranie* и *Davidoff Gold* (0,9430), док је најнижа вредност забележена између папира цигарета *Pall Mall Slim* и *Sobranie* (0,7706).

Табела 4.20. Пирсонови коефицијенти корелације FT-IR спектра папира од цигарете

| Папир од цигарета | Pall Mall Slim | Sobranie      | Davidoff Gold | Мотана цигарета |
|-------------------|----------------|---------------|---------------|-----------------|
| Pall Mall Slim    | <b>1,0000</b>  | 0,7706        | 0,7745        | 0,8187          |
| Sobranie          | 0,7706         | <b>1,0000</b> | 0,9430        | 0,8256          |
| Davidoff Gold     | 0,7745         | 0,9430        | <b>1,0000</b> | 0,8718          |
| Мотана цигарета   | 0,8187         | 0,8256        | 0,8718        | <b>1,0000</b>   |

Резултати корелационе анализе различитих брендова цигарета, приказани у табели 4.21., показали су да немодификоване тканине остварују највише вредности корелације са пепелом цигарета, при чему се вредности крећу у опсегу од 0,8484 до 0,9367. Највиша корелација са пепелом утврђена је код цигарете *Sobranie* (0,9367), затим код мотане цигарете (0,9002) и *Davidoff Gold* (0,8580), док је код *Pall Mall Slim* забележена нешто нижа вредност (0,8484). Вредности корелације са папиром цигарета биле су ниже (0,6763 - 0,8677), док су најниже вредности забележене у односу на дуван цигарета (0,3606 - 0,6335).

Код модификованих тканина уочене су промене у корелационим обрасцима. Модификована тканина показала је умерену корелацију са пепелом цигарете *Pall Mall Slim* (0,5642), која је била нижа у односу на остале испитиване узорке. Насупрот томе, код цигарете *Sobranie* на модификованој тканини задржана је висока корелација са пепелом цигарете (0,8968), што указује на то да модификација материјала не утиче подједнако на FT-IR карактеристике продуката сагоревања код свих врста цигарета.

*Табела 4.21. Пирсонови коефицијенти корелације FT-IR спектра спаљене немодификоване и модификоване тканине са компонентама цигарета*

| Врста цигарете  | Пепео од цигарета |                         | Дуван од цигарета |                         | Папир цигарета    |                         |
|-----------------|-------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------|
|                 | сирова<br>тканина | модификована<br>тканина | сирова<br>тканина | модификована<br>тканина | сирова<br>тканина | модификована<br>тканина |
| Pall Mall Slim  | 0,8484            | 0,5642                  | 0,3606            | 0,4529                  | 0,7232            | 0,4439                  |
| Sobranie        | 0,9367            | 0,8968                  | 0,6335            | 0,6635                  | 0,8677            | 0,9018                  |
| Davidoff Gold   | 0,8580            | 0,7134                  | 0,4269            | 0,5790                  | 0,8010            | 0,7871                  |
| Мотана цигарета | 0,9002            | 0,7977                  | 0,4700            | 0,6294                  | 0,6763            | 0,7670                  |

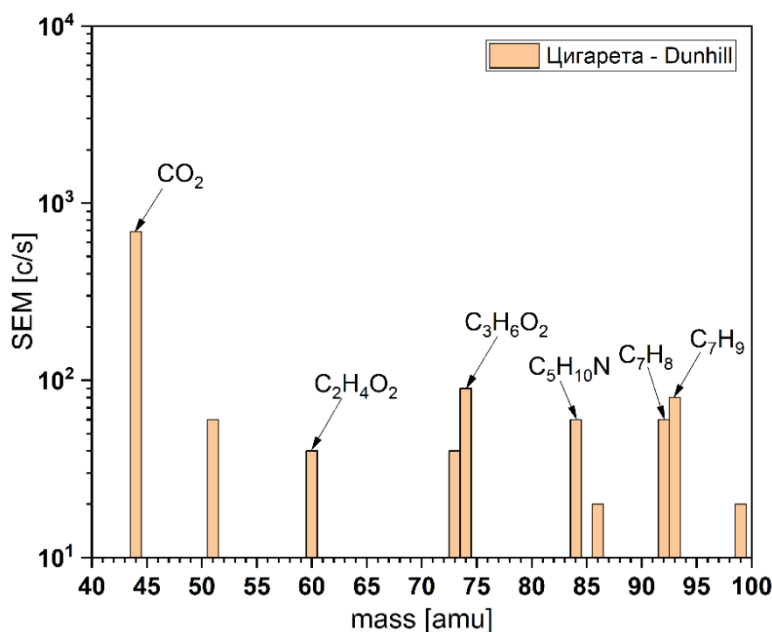
Корелациони индекси добијени FT-IR анализом приказано у табели 4.22. показују да памук 100% и памук 80% имају највећу спектралну сличност са пепелом од цигарете (0,9835 и 0,9872), док модификовани полиестар показује високу корелацију са дуваном и папиром цигарете. Изузетак представља полиестар 80% који бележи највишу вредност корелације са пепелом од шибице (0,9635), док најниже вредности за шибицу као узрочник паљења показују сунђер типа 2 (0,5319) и памук 80% (0,7445). Добијени резултати указују да FT-IR спектроскопија омогућава разликовање узрочника паљења на основу хемијских трагова насталих сагоревањем.

*Табела 4.22. Пирсонови коефицијенти корелације између FT-IR спектра спаљених материјала и трагова потенцијалних иницијатора пожара*

| Спаљене тканине           | Пепео од<br>цигарета | Дуван од<br>цигарета | Папир<br>цигарета | Шибица | Пепео од<br>Шибице |
|---------------------------|----------------------|----------------------|-------------------|--------|--------------------|
| памук 100%                | 0,9835               | 0,7506               | 0,8281            | 0,8095 | 0,8503             |
| памук 80%                 | 0,9872               | 0,7962               | 0,8791            | 0,7445 | 0,8368             |
| полиестар 100%            | 0,9788               | 0,7903               | 0,8269            | 0,7337 | 0,8133             |
| полиестар 80%             | 0,9748               | 0,8377               | 0,8747            | 0,8235 | 0,9635             |
| сунђер тип 1              | 0,6391               | 0,7382               | 0,6612            | 0,7382 | 0,8162             |
| сунђер тип 2              | 0,8650               | 0,8357               | 0,8447            | 0,5319 | 0,6837             |
| памук<br>модификовани     | 0,7108               | 0,9077               | 0,8364            | 0,7952 | 0,8807             |
| полиестар<br>модификовани | 0,9032               | 0,9220               | 0,9084            | 0,7337 | 0,8133             |

#### 4.5.2. EI-MS у идентификацији трагова цигарете на текстилним материјалима

Испитивање могућности примене EI-MS у откривању трагова цигарете као изазивача пожара обухвата карактеризацију трагова цигарете *Dunhill Master Blend*. Масени спектар приказан је на Слика 4.21.



Слика 4.21. Масени спектар цигарете *Dunhill Master Blend*

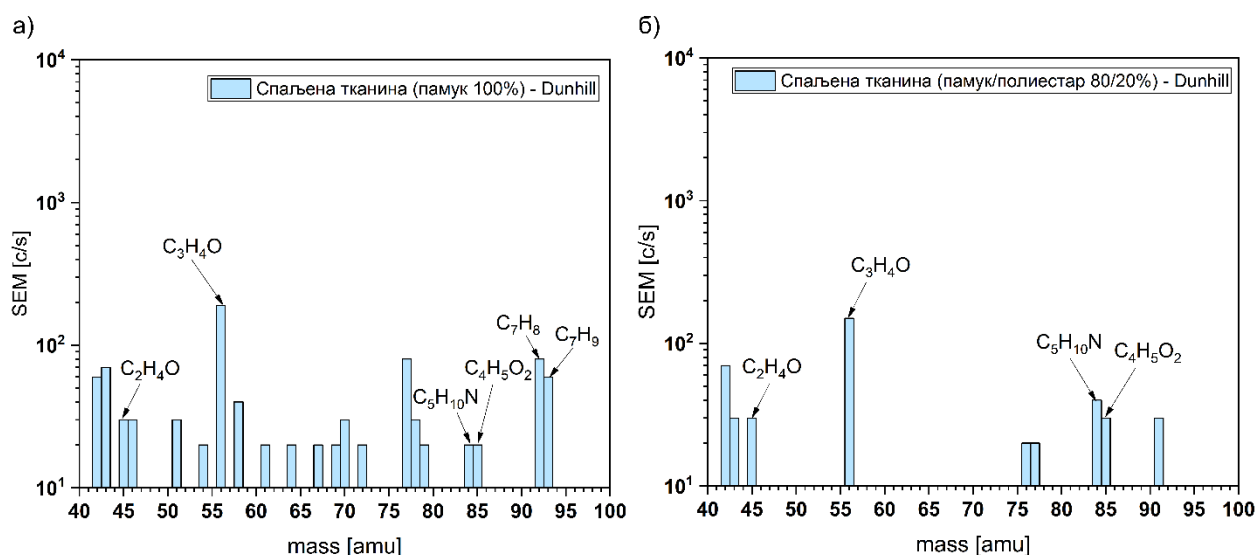
На основу анализе положаја и интензитета детектованих пикова добијених испитивањем цигарете *Dunhill Master Blend*, приказаних на слици 4.21, и поређења са ранијим испитивањима објављеним у другим студијама, могуће је извршити идентификацију хемијских врста присутних у гасној фази коморе. Интензивни пик на  $m/z = 44$  приписује се молекулу угљен-диоксида (CO<sub>2</sub>), који настаје као примарни производ оксидативног сагоревања органских материја (Englhard & Bachmann, 2023).

Пик на  $m/z = 60$  повезује се са фрагментом C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>, који потиче од глицерола, као адитива који се додаје дуванском листу током технолошке обраде (Borgerding & Klus, 2005). Присуство овог пика у спектру указује на то да испаравање адитива прати процес сагоревања дувана, те да је глицерол доспео у гасну фазу унутар коморе. Такође, пик на  $m/z = 74$  одговара лакоиспарљивом органском фрагменту C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub> из дуванског дима, чије присуство указује на то да су у комори регистроване и тешке органске компоненте дима (Adam et al., 2005).

У идентификацији узорка посебно је значајно присуство карактеристичног сигнала при  $m/z = 84$ , који се доводи у везу са јонским фрагментом никотина (C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>N) (Adam et al., 2005; Hawke et al., 2019). Пикови на  $m/z = 92$  и  $m/z = 93$  одговарају молекулу толуена

( $C_7H_8$ ) и његовом изотопском пику  $C_7H_9$  (Adam et al., 2006; Hawke et al., 2019). У литератури је толуен препознат као поуздани маркер испарљивих ароматичних органских једињења у диму цигарете, а његово присуство у овом мерењу додатно потврђује закључак о дуванском пореклу детектованих гасова (Adam et al., 2005; Hawke et al., 2019).

Посматрани скуп, истовремено детектовање фрагмента никотина  $C_5H_{10}N$ , толуена ( $C_7H_8$ ), глицеролног фрагмента  $C_4H_8O_2$  и повећаних концентрација  $CO_2$  у оквиру јединственог масеног спектра формира препознатљив хемијски образац који је у литератури доследно повезиван са гасном фазом изнад сагореле цигарете (Adam et al., 2005, 2006; Hawke et al., 2019). На основу свих наведених налаза може се закључити да испитивани узорак показује карактеристике дуванског порекла. Добијени резултати указују на погодност примењеног инструмента Hiden HPR-60 EQP за детекцију карактеристичних маркера дуванског дима.



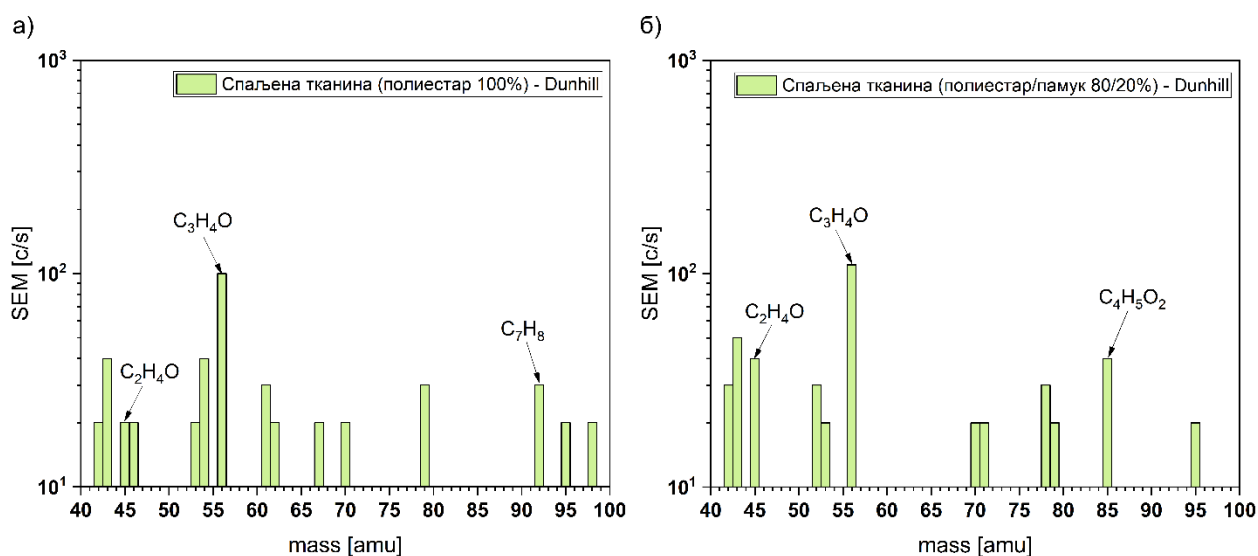
Слика 4.22. Масени спектри остатака спаљених тканина изазваних цигаретом Dunhill Master Blend а) памук 100% б) памук / памук/полиестар 80/20%

Након идентификације карактеристичних масених сигнала цигарете као потенцијалног изазивача пожара, извршена је анализа спаљених памучних тканина ради испитивања могућности детекције трагова цигарете у остацима пожара. На слици 4.22а и слици 4.22б, приказани су масени спектри остатака спаљених тканина од 100% памука и мешавине памук/полиестар 80/20%, изложених дејству цигарете Dunhill Master Blend.

Код спаљене тканине од памука 100%, приказане на слици 4.22а, детектовани су пикови при  $m/z = 45$ ,  $m/z = 56$ ,  $m/z = 84$ ,  $m/z = 85$ ,  $m/z = 92$  и  $m/z = 93$ . Пикови на  $m/z = 84$  ( $C_5H_{10}N$ ),  $92$  ( $C_7H_8$ ) и  $93$  ( $C_7H_9$ ) одговарају карактеристичним маркерима дуванског дима, односно фрагменту никотина, толуену и његовом изотопском сигналу (Adam et al., 2005; Hawke et al., 2019). Пик на  $m/z = 45$  ( $C_2H_5O$ ), који такође није детектован у спектру саме

цигарете, може се довести у везу са продуктима термичке деградације целулозних влакана током процеса сагоревања (Mitschke et al., 2005), док се пик на  $m/z = 56$  ( $C_3H_4O$ ) може приписати акролеину (2-пропенал), али и другим једињењима исте номиналне масе која настају током термичке деградације и сагоревања органских материјала (Mitschke et al., 2005). Додатно је уочен и пик на  $m/z = 85$  ( $C_4H_5O_2$ ), који такође није детектован у спектру саме цигарете и могао би бити повезан са продуктима пиролизе памучних влакана. Присуство пикова на  $m/z = 84$ ,  $m/z = 92$  и  $m/z = 93$  указује на то да су карактеристични маркери цигарете вероватно очувани и након сагоревања памучне тканине, што указује на могућност њихове детекције у остацима пожара (Adam et al., 2005; Hawke et al., 2019).

Код спаљене тканине са 80% удела памука, приказане на слици 4.22б, доминантан је пик на  $m/z = 84$  ( $C_5H_{10}N$ ), уз присуство пикова на  $m/z = 45$  ( $C_2H_5O$ ),  $m/z = 56$  ( $C_3H_4O$ ) и  $m/z = 85$  ( $C_4H_5O_2$ ) (Adam et al., 2005), насталих термичком деградацијом органских влакана (Mitschke et al., 2005). У поређењу са масеним спектром цигарете са претходне слике 4.21., код спаљене тканине са 80% памука нису детектовани сви карактеристични пикови дуванског дима, што указује на то да продукти термичке деградације влакана могу делимично маскирати сигнале карактеристичних једињења из цигарете.

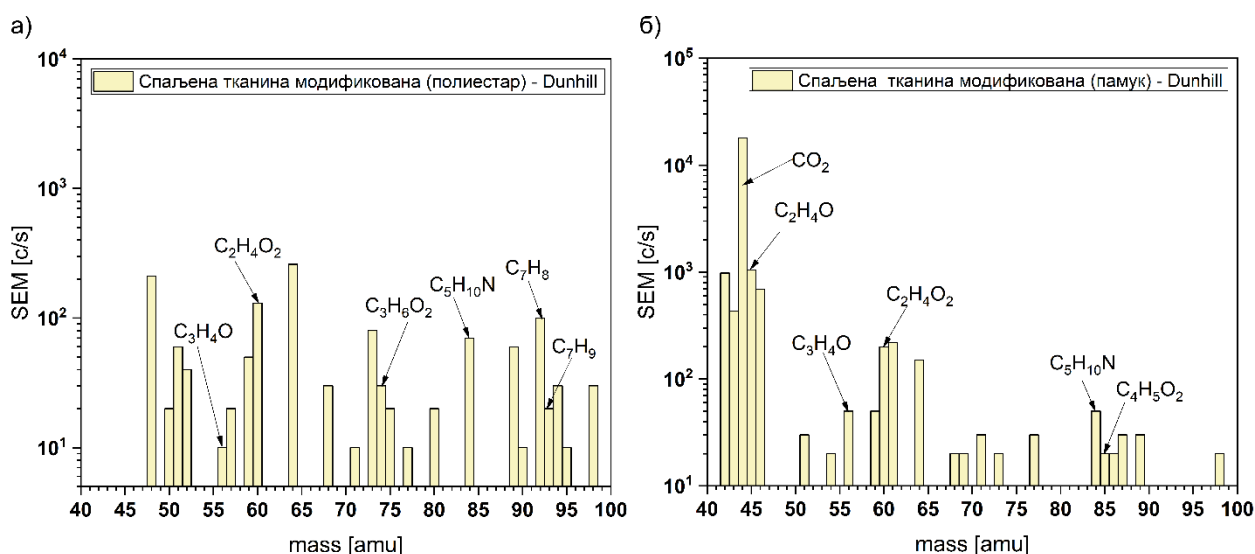


Слика 4.23. Масени спектри остатака спаљених тканина изазваних цигаретом Dunhill Master Blend а) полиестар 100% б) полиестар/памук 80/20%

На слици 4.23а приказани су масени спектри спаљене тканине од 100% полиестара. Детектовани су пикови при  $m/z = 45$ ,  $56$  и  $92$ . Пик на  $m/z = 92$  ( $C_7H_8$ ) одговара толуену, који представља један од карактеристичних маркера дуванског дима (Adam et al., 2005; Hawke et al., 2019). Пикови на  $m/z = 45$  ( $C_2H_5O$ ) и  $m/z = 56$  ( $C_3H_4O$ ) могу се довести у везу

са продуктима термичке деградације полиестарских влакана и другим органским једињењима насталим током процеса сагоревања (Mitschke et al., 2005).

Насупрот томе, на слици 4.23б приказани су масени спектри спаљене тканине полиестар/памук 80/20%, код којих нису уочени карактеристични маркери дуванског дима. Детектовани су само пикови при  $m/z = 45$  ( $C_2H_5O$ ),  $m/z = 56$  ( $C_3H_4O$ ) и  $m/z = 85$  ( $C_4H_5O_2$ ), који се могу довести у везу са продуктима термичке деградације органских материјала (Mitschke et al., 2005). Одсуство карактеристичних пикова цигарете указује на то да продукти пиролизе синтетских влакана у већој мери маскирају сигнале дуванског дима, што отежава њихову идентификацију у остацима пожара.

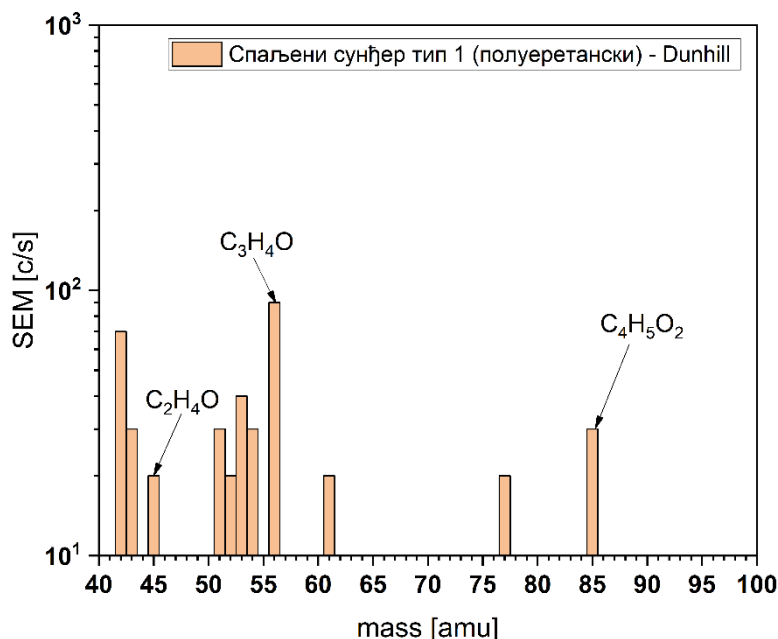


Слика 4.24. Масени спектри остатака спаљених модификованих тканина изазваних цигаретом Dunhill Master Blend а) полиестар б) памук

На слици 4.24а приказани су масени спектри спаљене модификоване полиестарске тканине. Поређењем са масеним спектром цигарете (слика 4.21) уочено је поклапање пикова при вредностима  $m/z = 60$  ( $C_2H_4O_2$ ),  $m/z = 74$  ( $C_3H_6O_2$ ),  $m/z = 84$  ( $C_5H_{10}N$ ),  $m/z = 92$  ( $C_7H_8$ ) и  $m/z = 93$  ( $C_7H_9$ ), што указује на висок степен сличности анализираних спектра и потврђује да модификована полиестарска тканина задржава највећи број карактеристичних маркера цигарете (Adam et al., 2005; Hawke et al., 2019). Додатно је детектован и пик при  $m/z = 56$  ( $C_3H_4O$ ), који се може повезати са продуктима термичке деградације влакана и органске матрице током процеса сагоревања (Mitschke et al., 2005).

На слици 4.24б приказани су масени спектри спаљене модификоване памучне тканине, код којих су идентификовани пикови при вредностима  $m/z = 44$  ( $CO_2$ ),  $m/z = 60$  ( $C_2H_4O_2$ ) и  $m/z = 84$  ( $C_5H_{10}N$ ) (Adam et al., 2005), као и пикови на  $m/z = 45$  ( $C_2H_5O$ ),  $m/z = 56$  ( $C_3H_4O$ ) и  $m/z = 85$  ( $C_4H_5O_2$ ), који се могу довести у везу са продуктима термичке деградације влакана током процеса сагоревања (Mitschke et al., 2005). Добијени резултати

указују на то да модификована полиестарска тканина показује већу спектралну сличност са масеним спектром цигарете у односу на модификовану памучну тканину, што указује на боље очување карактеристичних маркера дуванског дима након процеса сагоревања.



Слика 4.25. Масени спектри остатака спаљеног сунђера изазваних цигаретом Dunhill Master Blend

На слици 4.25 приказан је масени спектар спаљеног сунђера. Детектовани су пикови при  $m/z = 45$  (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>O), 56 (C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>O) и 85 (C<sub>4</sub>H<sub>5</sub>O<sub>2</sub>), који се могу довести у везу са продуктима термичке деградације и сагоревања органских материјала (Mitschke et al., 2005). Међутим, нису уочени карактеристични пикови дуванског дима, односно пикови који се поклапају са масеним спектром цигарете приказаним на слици 4.21. Овакви резултати указују на то да у случају сунђера није дошло до очувања карактеристичних маркера цигарете, што отежава идентификацију цигарете као потенцијалног узрочника пожара применом EI-MS.

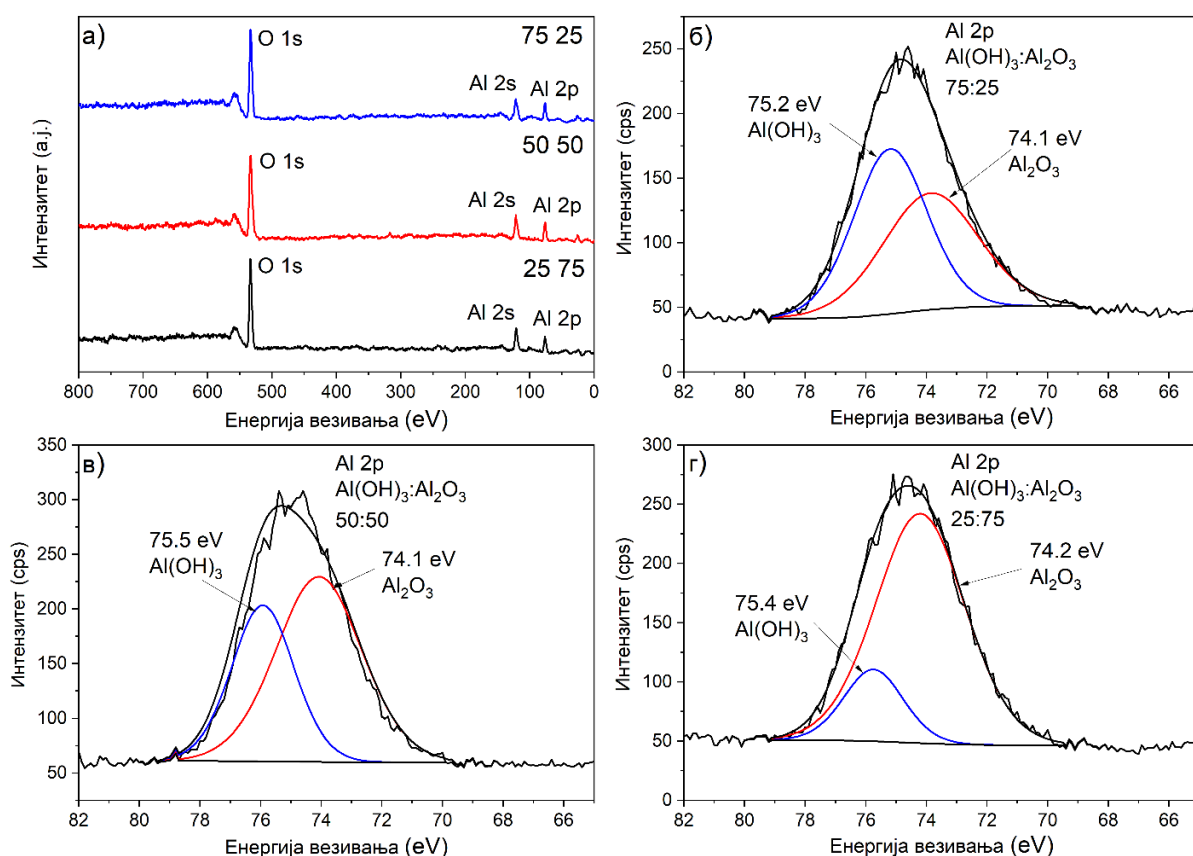
Добијени резултати указују на то да поузданост детекције трагова цигарете масеном спектрометријом значајно зависи од врсте горивог материјала присутног на месту пожара. Памучне тканине и модификована полиестарска тканина показале су задовољавајући степен задржавања карактеристичних маркера ( $m/z = 84$  - C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>N,  $m/z = 92$  - C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>,  $m/z = 93$  - C<sub>7</sub>H<sub>9</sub>) (Adam et al., 2005; Hawke et al., 2019), потврђујући могућност идентификације цигарете као узрочника чак и након термичке деградације материјала. Присуство фрагмента никотина и толуена у остацима сагоревања указује на дуванско порекло иницијалног извора паљења. У свим испитиваним спектрима тканина детектовани су пикови на  $m/z = 45$  (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>O) и  $m/z = 56$  (C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>O), који се могу довести у везу са продуктима термичке деградације органских материјала и стога немају специфичност

као маркери дуванског дима (Mitschke et al., 2005). Пик на  $m/z = 85$  ( $C_4H_5O_2$ ) детектован је у спектрима већине спаљених тканина изложених цигарети, што указује на то да највероватније представља последицу термичке деградације влакана током процеса сагоревања, а не директан маркер дуванског дима. Насупрот томе, код сунђера и тканина са већим уделом синтетских влакана карактеристични маркери нису детектовани, што указује на то да продукти пиролизе синтетских материјала маскирају или потискују сигнале остатака цигарете.

## 4.6. Испитивање функционалности модификованих тканина

### 4.6.1. XPS анализа честица нанокompозита $Al(OH)_3 / Al_2O_3$

Хемијски састав нанокompозита  $Al(OH)_3 / Al_2O_3$ , добијених механохемијском синтезом поступком механичке активације, испитан је XPS анализом. На слици 4.26 приказани су XPS спектри нанокompозита са различитим масеним односима  $Al(OH)_3$  и  $Al_2O_3$  (25:75, 50:50 и 75:25).



Слика 4.26. XPS спектри композитних узорака  $Al(OH)_3 / Al_2O_3$ . а) Прегледни спектри узорака 75:25, 50:50 и 25:75. Високорезолуциони Al 2p спектри: б) 75:25, в) 50:50 и г) 25:75  $Al(OH)_3 / Al_2O_3$  узорака

На основу прегледних спектра честица нанокмползита  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$  приказаних на слици 4.26а, јасно се уочавају карактеристични пикови Al 2s, Al 2p и O 1s, чиме се потврђује да су алуминијум и кисеоник доминантни површински елементи, без детектованих нечистоћа. Одсуство додатних пикова унутар граница детекције указује на то да на површини узорака нема значајне контаминације нити присуства секундарних елемената. Релативни интензитети сигнала алуминијума и кисеоника у складу су са материјалима на бази алуминијум-оксида/хидроксида.

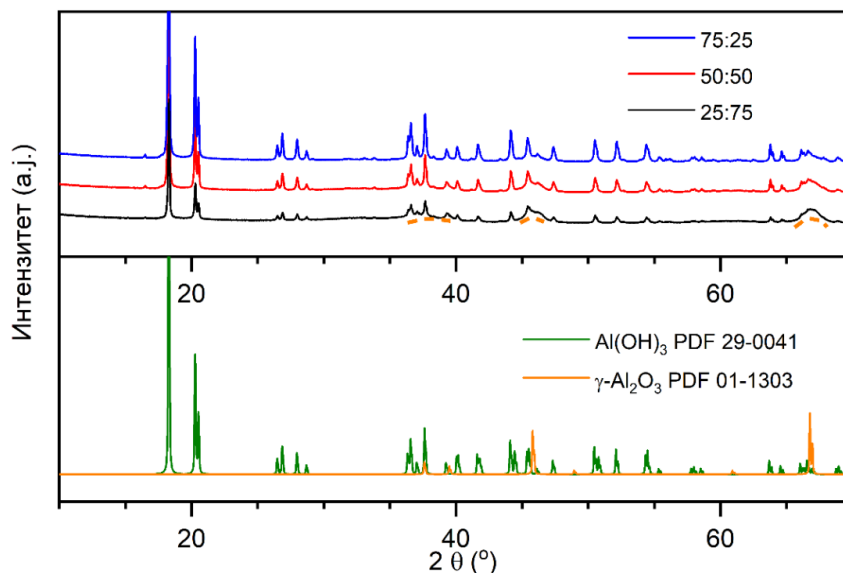
Слика 4.26б приказује високорезолуциони Al 2p спектар узорка номиналног масеног удела 75:25  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$ . Спектар је деконволуисан на две компоненте, позициониране на 75,2 eV и 74,1 eV, које одговарају  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$ , редом (Lizarbe et al., 2023; Semiletov et al., 2022). Ове вредности енергија везивања добро се поклапају са литературним подацима за алуминијум у оксидном и хидроксидном хемијском облику (Cañas et al., 2021; Mahfoudhi & Boufi, 2020). Иако је очекивани састав био 75 mas. %  $\text{Al}(\text{OH})_3$  и 25 mas. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , квантитативна анализа површина под пиковима показује стварне површинске уделе од 52,1 mas. %  $\text{Al}(\text{OH})_3$  и 47,9 mas. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , што указује на обогаћење оксидне фазе у односу на номиналног однос. Ова разлика може бити последица делимичне дехидратације  $\text{Al}(\text{OH})_3$  или израженије сегрегације  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на површини услед механохемијске синтезе нанохибрида (Yang & Yuan, 2025).

На слици 4.26в, приказан је Al 2p спектар узорка 50:50  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$ . Уочавају се два пика на 75,5 eV ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) и 74,1 eV ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (Lizarbe et al., 2023; Semiletov et al., 2022), са израчунатим масеним уделима фаза од 38,0 mas. %  $\text{Al}(\text{OH})_3$  и 62,0 mas. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , што указује на већу заступљеност  $\text{Al}_2\text{O}_3$  у анализираној површинској области узорка. Промена у релативним интензитетима пикова додатно потврђује да је оксидна фаза претежно заступљена у вишим површинским слојевима анализираним XPS уређајем.

Слика 4.26г приказује Al 2p спектар узорка номиналног састава 25:75  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$ . Деконволуисани пикови се јављају на 75,4 eV за  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 74,2 eV за  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (Lizarbe et al., 2023; Semiletov et al., 2022), са релативним уделима од 17,2 mas. % и 82,8 mas. %. У овом случају, измерени садржај  $\text{Al}(\text{OH})_3$  је нижи од почетних 25 mas. %, што поново указује на одступање између запреминског састава и површинског састава детектованог XPS методом. У целини, систематске разлике између очекиваног и измереног површинског састава код свих узорака указују да површински осетљива анализа открива неуједначену расподелу фаза, највероватније под утицајем термодинамичке стабилности, ефеката механичког третмана или делимичне трансформације фаза током припреме узорака (Lizarbe et al., 2023; Semiletov et al., 2022).

#### 4.6.2. XRD анализа честица нанокompозита $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$

Применом XRD методе одређена је зависност кристалографске структуре честица нанокompозита од полазних масених односа  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$ . На слици 4.27 приказани су XRD обрасци узорка са различитим односима  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$ : 75:25, 50:50 и 25:75.

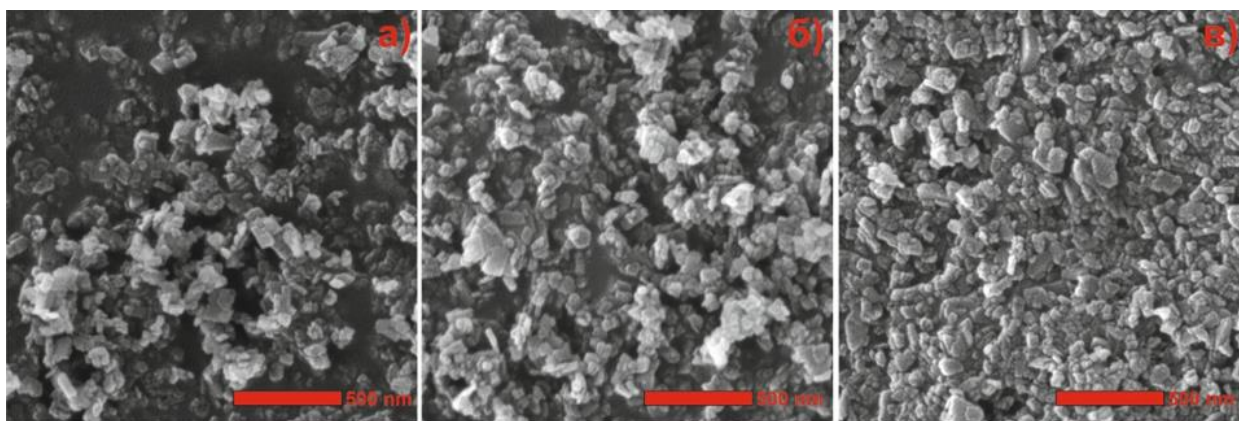


Слика 4.27. XRD дифрактограми узорка са различитим односима  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$ : 75:25, 50:50 и 25:75

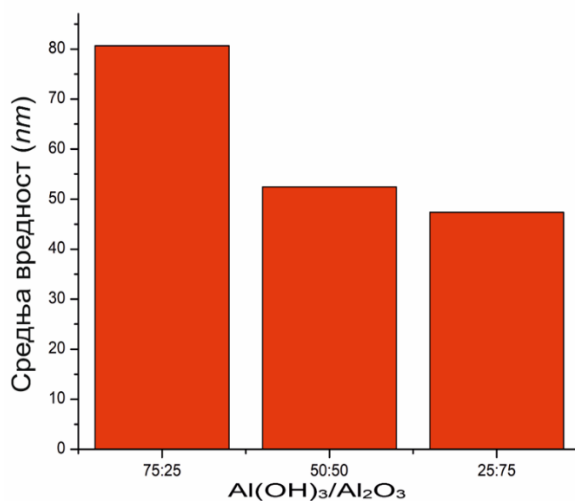
На основу дифрактограма приказаних на слици 4.27 утврђено је да код узорка са масеним односом честица  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$  75:25 доминантни пикови одговарају честицама  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , док су пикови  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  слабијег интензитета. Наведене вредности приказане на графику указују на већу заступљеност алуминијум-хидроксида у честицама нанокompозита. Анализа спектра узорка у коме је био једнак масени однос честица (50:50) приказује карактеристичне пикове оба једињења, при чему поједини припадају  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , а други  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . Наведене вредности, потврђују присуство обе фазе састава у приближно једнаким количинама. Код узорка добијеног млевењем честица односа маса  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$  25:75 карактеристични пикови углавном припадају  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , док су пикови  $\text{Al}(\text{OH})_3$  нижег интензитета у односу на претходне узорке. Наведене вредности указују на већу заступљеност алуминијум-оксида. Са повећањем масеног удела честица  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  пре самог мешања, интензитет пикова  $\text{Al}(\text{OH})_3$  је слабији, док пикови  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  постају доминантни, што потврђује фазну трансформацију композита у зависности од односа  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$ . Карактеристични пикови  $\text{Al}(\text{OH})_3$  јављају се око  $2\theta \approx 19\text{--}20^\circ$ , док су пикови који припадају фази  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  распоређени изнад  $30^\circ$ , типични за кубну или спинелну структуру, што омогућава јасну идентификацију узорка по карактеристичним дифракционим линијама.

#### 4.6.3. SEM анализа честица нанокompозита $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$

Карактеризација честица нанокompозита  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$ , добијених активацијом поступком механохемијске синтезе, обухвата одређивање морфолошке структуре и просечне величине честица методом скенирајуће електронске микроскопије. На слици 4.28 приказане су микрографије добијене SEM анализом узорка честица у различитим масеним односима  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$  (75:25; 50:50; 25:75), док су на слици 4.29 приказане зависности средње вредности расподеле величина честица нанокompозита  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$  од међусобног масеног односа полазних сировина.



Слика 4.28. SEM микрограми честица нанокompозита различитих масених односа  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$ : а) 75:25, б) 50:50 и в) 25:75



Слика 4.29. Средње вредности расподеле величина честица нанокompозита  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$  од међусобног масеног односа полазних сировина

Анализом SEM микрографија приказаних на слици 4.28 и расподеле величина честица на слици 4.29 може се закључити да се механохемијским поступком добијају честице мање средње вредности расподеле величине у односу на прекурсор  $\text{Al}_2\text{O}_3$  чија вредност

износи  $\sim 3 \mu\text{m}$ . На основу добијених микрографија може се закључити да механохемијским поступком, поред сједињавања честица алуминијум-хидроксида и алуминијум-оксида, настају уситњене честице суб-нано и нано димензија. Такође, примећује се појава агрегације честица након механохемијског поступка, што указује на то да је дошло до сједињавања честица у нове честице нанокомпозита -  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$ . Према средњим вредностима расподеле величина честица може се закључити да са повећањем масеног удела алуминијум-оксида долази до већег уситњавања честица и интензивнијег стварања агрегата. Ова појава може се повезати са интеракцијама између честица алуминијум-оксида као последица веће иницијалне тврдоће у односу на алуминијум-хидроксид.

#### 4.6.4. Методе испитивања физичко-механичких својстава текстилних материјала

##### 4.6.4.1. Испитивање затезних својстава немодификованих и модификованих текстилних тканина

Резултати испитивања затезних својстава текстилних површина сирових и модификованих тканина од 100% полиестара и 100% памука приказани су у табелама 4.23 и 4.24. Табела 4.24 Испитивање је спроведено у складу са стандардима SRPS EN ISO 1421 и SRPS EN ISO 13934, којима се дефинише поступак одређивања прекидне силе и прекидног издужења применом епрувета у облику траке.

Епрувете означене са А представљају правац основе текстила узорка, док епрувете са ознаком В представљају правац потке текстилног узорка. Резултати показују значајну варијацију механичких својстава у зависности од правца испитивања, што указује на анизотропију текстилне структуре.

Табела 4.23. Резултати испитивања затезних својстава модификованих тканина

| Узорак  | Прекидна сила, N | Прекидно издужење, % |
|---------|------------------|----------------------|
| 1A / 1B | 823 / 675        | 26,72 / 31,36        |
| 2A / 2B | 376,4 / 245,8    | 10,70 / 26,28        |
| 3A / 3B | 817 / 652        | 25,28 / 34,56        |
| 4A / 4B | 362,8 / 350,8    | 14,21 / 28,40        |
| 5A / 5B | 675 / 549        | 22,35 / 31,36        |
| 6A / 6B | 370,8 / 348      | 12,60 / 29,12        |
| 7A / 7B | 849 / 500        | 29,68 / 26,84        |
| 8A / 8B | 390,4 / 238,3    | 10,50 / 26,20        |

Уочено је да прекидна сила варира у широком опсегу (приближно од 238 N до 849 N), док се прекидно издужење креће у интервалу од око 10% до 35%. Такође, као и код сирових тканина, и код наслојених тканина прекидна сила полиестарских тканина већа је у односу на памучне тканине. Код модификованих тканина уочава се да веће вредности прекидне силе има полиестарска тканина наслојена са једне стране (узорци 1 и 7), док је код памучне тканине већа вредност прекидне силе забележена код наслојавања са обе стране (узорак 4).

Табела 4.24. Резултати испитивања сирових тканина

| Узорак             | Прекидна сила, N | Прекидно издужење, % |
|--------------------|------------------|----------------------|
| полиестар (основа) | 1702             | 22,20                |
| памук (основа)     | 639              | 9,55                 |
| полиестар (потка)  | 1664             | 28,13                |
| памук (потка)      | 566              | 14,84                |

Поређењем резултата приказаних у табелама 4.23 и 4.24, уочава се да модификација утиче на механичка својства тканина, при чему прекидна сила код модификованих тканина варира од 238,3 до 849 N, док се код сирових полиестарских и памучних тканина креће у опсезима од 1664 до 1702 N, односно од 566 до 639 N. Интензитет промена зависи од врсте материјала и начина наслојавања. Испитивање затезних својстава омогућава оцену утицаја примењене модификације на механичку стабилност тканина, што је значајно за њихову даљу примену.

#### 4.6.4.2. Испитивање отпорности немодификованих и модификованих текстилних тканина на хабање

Испитивањем отпорности текстилних материјала на хабање процењује се њихова способност да издрже дејство поновљеног механичког трења без значајног нарушавања структуре. Ово својство је значајно за оцену њихове погодности за примену као техничких тканина, код којих се, поред отпорности на дејство топлоте, захтева и одговарајућа механичка издржљивост. У табели 4.25 приказани су резултати испитивања отпорности модификованих тканина на хабање према Матиндаловој методи, у складу са стандардом SRPS EN ISO 12947. Нумерација узорака дефинисана је у претходној наведеној табели 3.12. у Одељку 3.3.3.

Табела 4.25. Резултати испитивања модификованих тканина на отпорност на хабање према стандарду SRPS EN ISO 12947

| Број узорка | Стање након 26.000 циклуса         | Опис епрувете након испитивања                                            |
|-------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 1           | Благо оштећена површина епрувете   | Видљив почетак оштећења након 20.000 циклуса                              |
| 2           | Почетак оштећења површине епрувете | Видљива оштећења по ободу узорка, видљива су оштећења и абразивне тканине |
| 3           | Оштећена површина епрувете         | Почетак оштећења након 22.000 циклуса                                     |
| 4           | Оштећена површина епрувете         | Видљив почетак оштећења након 20.000 циклуса                              |
| 5           | Без оштећења испитиване тканине    | Видљив почетак оштећења абразивне тканине након 20.000 циклуса            |
| 6           | Оштећење на ободу епрувете         | Почетак оштећења абразивне тканине након 20.000 циклуса                   |
| 7           | Абразивна тканина                  | Абразивна тканина оштећена након 20.000 циклуса                           |
| 8           | Потпуно деградирана епрувета       | Видљив почетак оштећења након 16.000 циклуса                              |

На основу резултата испитивања отпорности на хабање модификованих текстила приказаних у табели 4.25, примећује се јасна зависност отпорности на хабање од броја и оријентације наноса, али и од сировинског састава тканине. Узорци 5 и 6, код којих су тканине модификоване са обе стране, показали су највећу отпорност на хабање. Код узорка 5, сировинског састава 100% полиестар, није било оштећења испитиване тканине, већ само оштећења абразивне тканине. Случајеви у којима је абразивна тканина оштећена веома су специфични, јер је стандардизована тканина намењена за више стотина хиљада испитних циклуса. Код испитивања осталих узорака, утврђена је боља отпорност код тканина сировинског састава 100% полиестар у односу на памучне тканине.

Добијени резултати показују да примењена модификација може допринети очувању, а у одређеним случајевима и побољшању отпорности текстилних материјала на хабање. Овај резултат је значајан за оцену функционалности модификованих тканина, јер показује да побољшање ватроотпорности може бити праћено задржавањем задовољавајућих механичких својстава важних за њихову практичну примену.

#### 4.6.4.3. Испитивање паропропустљивости немодификованих и модификованих текстилних материјала

Испитивање паропропустљивости текстилних материјала извршено је одређивањем пропустљивости водене паре, праћењем губитка масе узорака у временском интервалу од 24 h. Резултати су приказани у табели 4.26.

*Табела 4.26. Резултати испитивања модификованих тканина на паропропустљивост*

| Број узорка | Маса, g (t = 0) | Маса, g (t = 24 h) | Пропустљивост водене паре<br>(g m <sup>-2</sup> за 24 h) |
|-------------|-----------------|--------------------|----------------------------------------------------------|
| 1           | 136,081         | 134,292            | 7934,5                                                   |
| 2           | 133,415         | 131,713            | 7548,6                                                   |
| 3           | 135,560         | 133,561            | 8865,9                                                   |
| 4           | 131,007         | 128,888            | 9398,1                                                   |
| 5           | 135,707         | 134,606            | 4883,1                                                   |
| 6           | 133,897         | 132,799            | 4869,8                                                   |
| 7           | 133,695         | 131,601            | 9287,2                                                   |
| 8           | 131,735         | 128,741            | 13278,9                                                  |

Вредности пропустљивости водене паре код модификованих тканина кретале су се од 4869,8 до 13278,9 g m<sup>-2</sup> за 24 h. Најнижа вредност забележена је код узорка 6, док је највећа утврђена код узорка 8. Добијене вредности указују на варијације паропропустљивости у зависности од карактеристика материјала и примењеног начина модификације, што се може повезати са променама у структури материјала и делимичним затварањем пора услед наношења модификационог слоја. Поређење са немодификованим тканинама омогућава сагледавање утицаја модификације на ово својство и процену њеног утицаја на функционалност материјала. Са аспекта примене, очување одговарајуће паропропустљивости представља важан услов за развој модификованих текстилних материјала код којих се, поред побољшане ватроотпорности, захтевају и задовољавајућа функционална својства.

#### 4.6.5. Испитивање запаљивости модификованих узорака

Резултати испитивања времена до појаве термичке деградације и формирања зоне оштећења за различите масене односе Al(OH)<sub>3</sub> / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> приказани су у табели 4.27.

*Табела 4.27. Време до појаве термичке деградације и термичког оштећења материјала*

| Однос<br>Al(OH) <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Почетак термичке деградације (s) |       |      |       | Зона термичког оштећења (s) |       |      |       |
|--------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------|------|-------|-----------------------------|-------|------|-------|
|                                                              | полиестар                        | памук | дрво | папир | полиестар                   | памук | дрво | папир |
| <b>00:00</b>                                                 | 4                                | 3     | 7    | 2     | 5                           | 4     | 27   | 3     |
| <b>25:75</b>                                                 | 21                               | 19    | 26   | 12    | 93                          | 89    | 126  | 52    |
| <b>50:50</b>                                                 | 23                               | 22    | 28   | 13    | 97                          | 93    | 131  | 54    |
| <b>75:25</b>                                                 | 25                               | 23    | 30   | 15    | 100                         | 95    | 135  | 57    |

Подаци из табели 4.27 показују да промена масеног односа Al(OH)<sub>3</sub> / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> у саставу премаза утиче на време појаве почетног термичког оштећења и формирања зоне

термичког оштећења код свих испитиваних материјала. Са повећањем учешћа  $\text{Al}(\text{OH})_3$  у односу на  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , наведени временски интервали се постепено продужавају. Најдужа времена забележена су при масеном односу 75:25, код свих испитиваних материјала, у поређењу са односима 50:50 и 25:75. Ови резултати указују на повољније дејство премаза са већим учешћем  $\text{Al}(\text{OH})_3$  у погледу успоравања развоја термичког оштећења.

#### *4.6.5.1. Испитивање запаљивости модификованог памучног текстилног материјала*

Тканине сировинског састава 100% полиестар и 100% памук третиране су премазима различитог масеног односа  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$  (75:25, 50:50 и 25:75), при чему је у матрицу додато 10 мас. % честица. На слици 4.30 је приказана модификована тканина 100% памук  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$  (75:25), која је дала задовољавајуће резултате при тестирању.



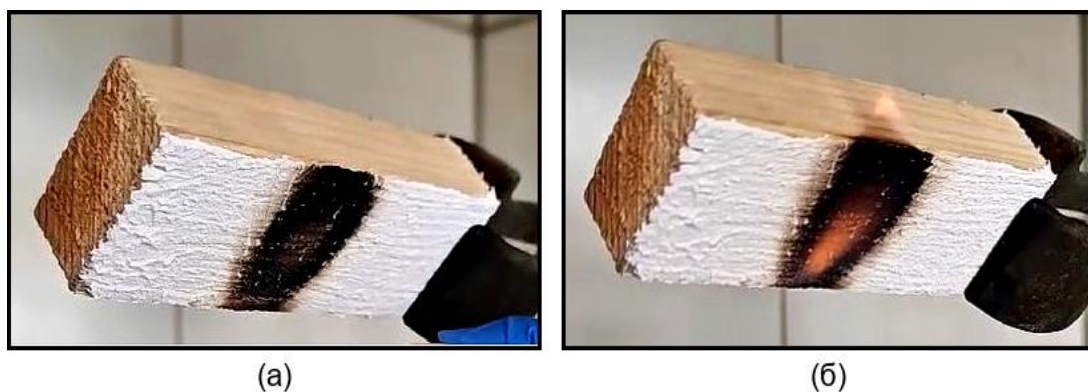
Слика 4.30. Промене на површини модификоване памучне тканине узорка при излагању отвореном пламену: а) након 23 s; б) након 95 s

Испитивање запаљивости модификованог памучног текстилног материјала показало је значајно побољшано понашање при излагању отвореном пламену у односу на уобичајене карактеристике немодификованог материјала. При иницијалном дејству пламена није дошло до непосредног паљења узорка, што указује на способност материјала да одложи почетак процеса горења. Након 23 s излагања пламену, узорак није показивао знаке самосталног одржавања горења, већ су уочене ограничене, локализоване промене боје и површинско термичко оштећење у области непосредног дејства извора топлоте

(слика 4.30а). Излагање истог узорка настављено је до укупног времена од 95 s, при чему је дошло до интензивнијег површинског термичког оштећења и формирања израженије зоне промене боје, уз појаву пламена (слика 4.30б). Појава пламена тек након продуженог излагања указује на способност материјала да одложи иницирање горења и ограничи његов развој. Добијени резултати указују да примењени премаз доприноси побољшању отпорности материјала на паљење, што се може довести у везу са формирањем заштитног слоја на површини материјала и ограничењем преноса топлоте ка његовој унутрашњости.

#### 4.6.5.2. Испитивање запаљивости модификованог дрвета

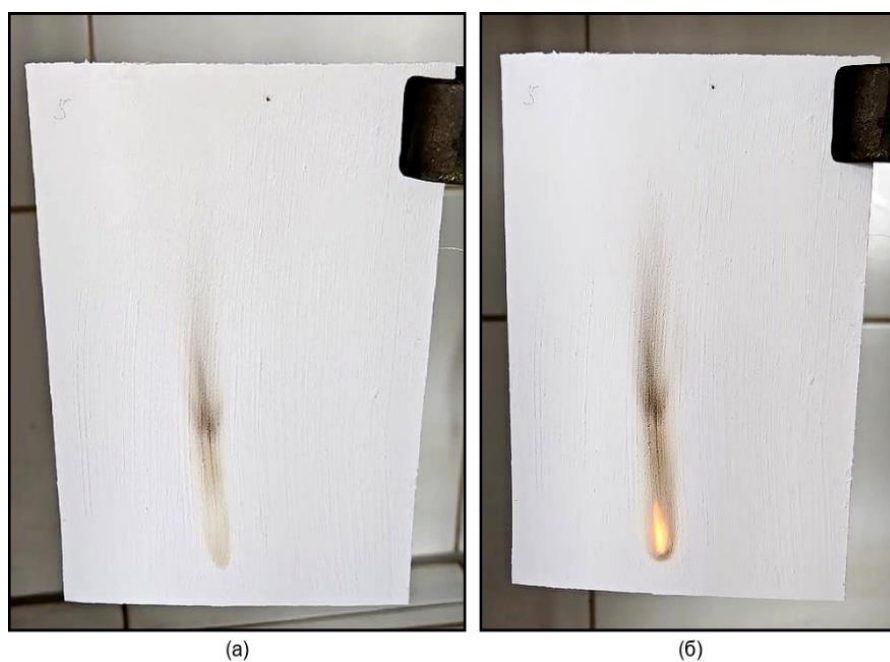
Испитивање запаљивости модификованог узорка дрвета липе показало је измењено понашање материјала при излагању отвореном пламену. Узорак дрвета липе третиран је ватроотпорним премазом на бази честица  $Al(OH)_3 / Al_2O_3$ , масеног односа 75:25, при чему је у матрицу премаза додато 10 мас. % честица. У почетној фази излагања нису уочене видљиве промене на површини узорка. Након 30 s излагања пламену, када су први пут уочене видљиве промене на површини, дошло је до појаве локализованог термичког оштећења и формирања карбонизованог слоја (слика 4.31а). Формирани слој представља баријеру која ограничава даљи пренос топлоте ка унутрашњости материјала и успорава развој оштећења. Излагање истог узорка настављено је до укупног времена од 135 s, при чему је дошло до интензивирања површинског оштећења и ширења зоне захваћене термичким дејством, уз појаву пламена слабог интензитета (слика 4.31б). Појава пламена тек након продуженог излагања указује на одлагање иницирања горења, док његов релативно низак интензитет указује на ограничен развој процеса. Добијени резултати показују да примењени премаз побољшава отпорност дрвета липе на горење, при чему карбонизовани слој додатно ограничава дејство топлоте на материјал.



Слика 4.31. Промене на површини модификованог дрвеног узорка при излагању отвореном пламену: а) након 30 s; б) након 135 s

#### 4.6.5.3. Испитивање запаљивости модификованог папирног узорка

Испитивање запаљивости модификованог папирног узорка показало је измењено понашање материјала при излагању отвореном пламену. Узорак је третиран премазом на бази  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$  у масеном односу 75:25, са додатком 10 mas. % честица у матрицу. У почетној фази испитивања, при контакту пламена са површином узорка, није дошло до непосредног паљења, већ је уочена само локална промена боје. Након 15 s излагања пламену уочено је израженије термичко оштећење површине у виду потамњења и почетка формирања карбонизованог слоја, али без развоја стабилног пламена (слика 4.32a). Даљим излагањем пламену до укупног времена од 57 s долази до појаве локализованог пламена у доњем делу зоне изложене дејству извора топлоте, уз ограничено ширење зоне оштећења (слика 4.32б). Релативно низак интензитет и ограничена распрострањеност пламена указују на ограничен развој процеса горења. Добијени резултати показују да примењени премаз повећава отпорност папира на иницирање горења и ограничава ширење оштећења.



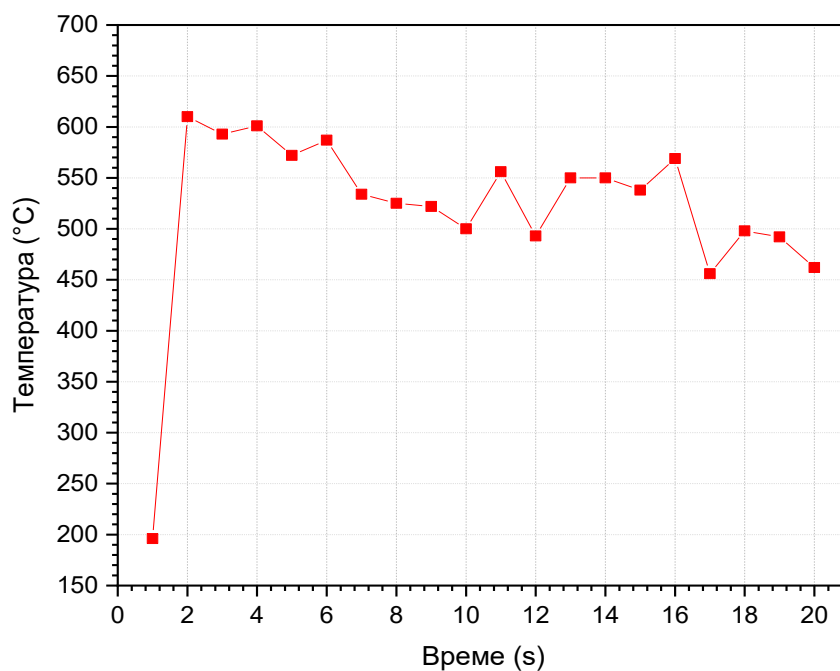
Слика 4.32. Промене на површини модификованог папира узорка при излагању отвореном пламену: а) након 15 s; б) након 57 s

Упоредна анализа резултата показује различит степен ефикасности примењеног премаза у зависности од материјала. Најизраженији ефекат уочен је код памучног текстила, код којег ни након 95 s није дошло до развоја стабилног пламена. Код дрвета липе пламен се појавио након 135 s, док је код папира локализовани пламен уочен након 57 s. Добијени резултати указују да премаз доприноси одлагању иницирања и ограничавању развоја процеса горења, са најизраженијим ефектом код памучног текстила.

#### 4.6.6. Термовизијска анализа температуре жара и термичких оштећења текстилних материјала

##### 4.6.6.1. Термовизијска анализа температуре жара цигарете

Резултати испитивања температуре жара цигарете током сагоревања показали су да се измерене температуре у посматраном интервалу крећу од 196 °C до 610 °C (слика 4.33), са просечном вредношћу од 524 °C. У почетној фази загревања, при  $t = 1$  s, регистрована је температура од 196 °C, након чега долази до наглог пораста температуре, која при  $t = 2$  s достиже максималну вредност од 610 °C. Након достизања максималне вредности долази до постепеног смањења температуре, уз присутне осцилације током даљег сагоревања. У већем делу посматраног интервала температура се одржава у приближном опсегу од 500 °C до 600 °C, што указује на релативно стабилно, али нестационарно топлотно стање жара.



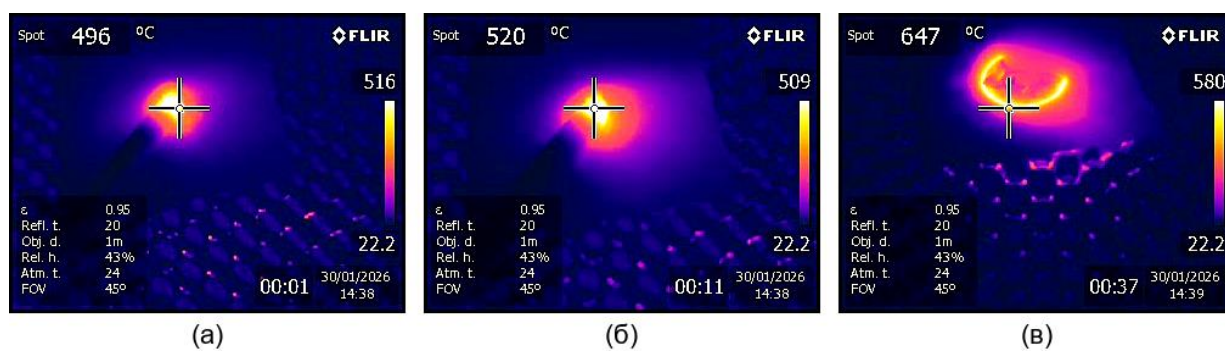
Слика 4.33. Температура жара цигарете у функцији времена

Визуелном анализом термовизијских снимака уочава се постепено померање и промена облика зоне жара током сагоревања, при чему се зона највише температуре локализује у области непосредног жаришта. Промене температуре прате динамику сагоревања, што указује на променљив интензитет ослобађања и преноса топлоте са жара цигарете на околину. Термовизијски снимци промене температуре жара цигарете током посматраног интервала приказани су у Прилогу 3 (слике П.5 – П.6). Ови резултати представљају основу за даљу анализу интеракције жара цигарете са површином испитиваних текстилних материјала.

#### 4.6.6.2. Термовизијска анализа и процена оштећења памучне и полиестарске тканине изложене дејству цигарете

Испитивање је спроведено на по пет узорака тканине од 100% памука и 100% полиестара, изложених дејству жара цигарете. Термовизијском анализом праћен је развој температурног поља на површини тканина током и након излагања извору топлоте, док је квантитативном анализом процењен обим насталих површинских промена. У наставку су приказани резултати за узорке који су, у оквиру испитаних узорака сваке врсте тканине, показали највећу површину термичких промена.

Термовизијским испитивањем праћен је развој температурног поља на површини тканине током и након излагања жару цигарете. На слици 4.34 приказани су термограми развоја температурног поља на површини немодификоване памучне тканине.

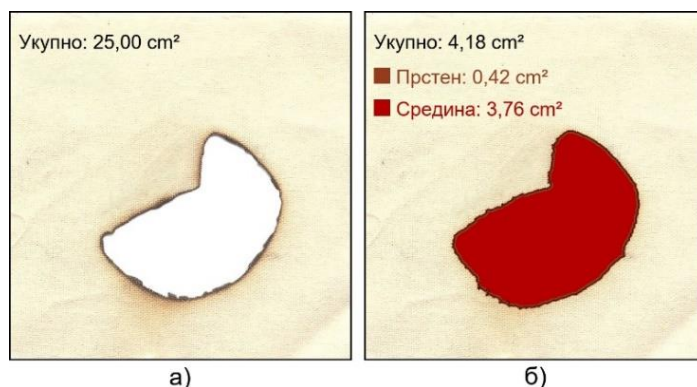


Слика 4.34. Термовизијска анализа развоја температурног поља на површини памучне тканине: а) почетна фаза загревања, б) стање непосредно пре уклањања извора топлоте (цигарете), в) стање након уклањања извора топлоте

У иницијалној фази контакта  $t = 1$  s регистрована је температура од приближно 496 °C, при чему је загревање било локализовано (слика 4.34а), без видљивих макроскопских промена. Са протоком времена долази до акумулације топлоте, тако да након  $t = 11$  s (слика 4.34б), температура достиже око 520 °C, што указује на почетак термичког оштећења целулозних влакана. У овом тренутку цигарета је уклоњена са површине тканине, чиме престаје директан довод топлоте. Међутим, и након уклањања извора топлоте долази до даљег пораста температуре, која у времену  $t = 37$  s достиже максималну вредност од 647 °C (слика 4.34в). Ова појава указује на развој самосталног процеса тињања и наставак термичког разлагања материјала након уклањања извора топлоте.

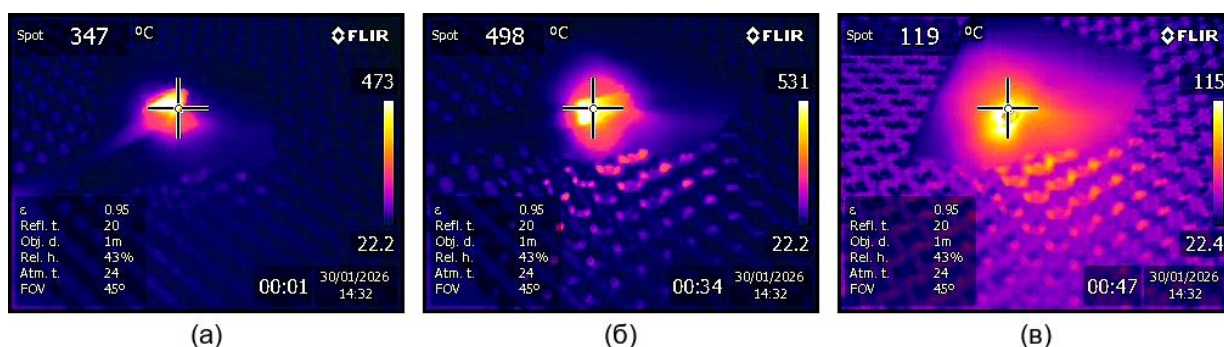
Даљи развој термичког процеса доводи до ширења температурног поља, при чему ужарена зона добија неправилан облик (слика 4.35). Квантитативном анализом насталог оштећења, применом програмског језика *Python*, утврђено је да укупна површина

захваћена термичким дејством износи  $4,18 \text{ cm}^2$ , док површина централне зоне потпуног оштећења износи  $3,76 \text{ cm}^2$ .



Слика 4.35. Квантитативна анализа површине термичког оштећења памучне тканине са издвојеним зонама (прстен и средина): а) оригинални приказ оштећења, б) резултати дигиталне анализе и сегментације оштећења

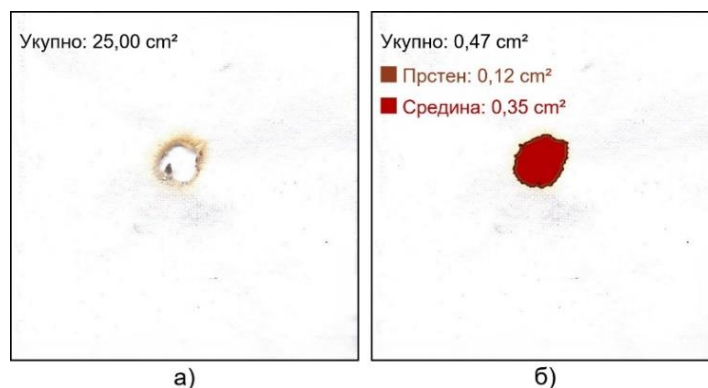
Код полиестрске тканине у иницијалној фази контакта  $t = 1 \text{ s}$  (слика 4.36а), измерена је температура од око  $347 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , при чему је загревање локализовано у зони непосредног контакта. Са протоком времена долази до постепеног пораста температуре, тако да у тренутку  $t = 34 \text{ s}$  достиже приближно  $498 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (слика 4.36б).



Слика 4.36. Термовизијска анализа развоја температурног поља на површини полиестарске тканине: а) почетна фаза загревања, б) стање непосредно пре уклањања извора топлоте (цигарете), в) стање након уклањања извора топлоте

Током загревања уочава се деформација структуре влакана, њихово скупљање и локално топлеење, што доводи до формирања компактније зоне оштећења. Ова појава додатно утиче на смањење продора топлоте у дубље слојеве материјала, јер долази до делимичног затварања порозне структуре. У тренутку  $t = 34 \text{ s}$  цигарета је уклоњена са површине тканине, чиме престаје довод топлоте. Након тога долази до наглог пада температуре, тако да у времену  $t = 47 \text{ s}$  износи око  $119 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (слика 4.36в). Овако изражен пад температуре указује на престанак процеса сагоревања након уклањања извора топлоте. Посматрањем просторне расподеле температуре уочава се да је зона повишених

температура строго ограничена, без тенденције ширења, што је у директној супротности са понашањем памучне тканине. Одсуство тињања додатно потврђује да код полиестарске тканине не долази до развоја самосталног процеса сагоревања након уклањања извора топлоте. Анализа оштећења показује да укупна посматрана површина износи  $25,00 \text{ cm}^2$  (слика 4.37а), док је зона потпуног оштећења изузетно мала и износи  $0,47 \text{ cm}^2$ . Централна зона  $0,35 \text{ cm}^2$  одговара директном дејству извора топлоте, док периферни прстен  $0,12 \text{ cm}^2$  представља област делимичног оштећења (слика 4.37б).



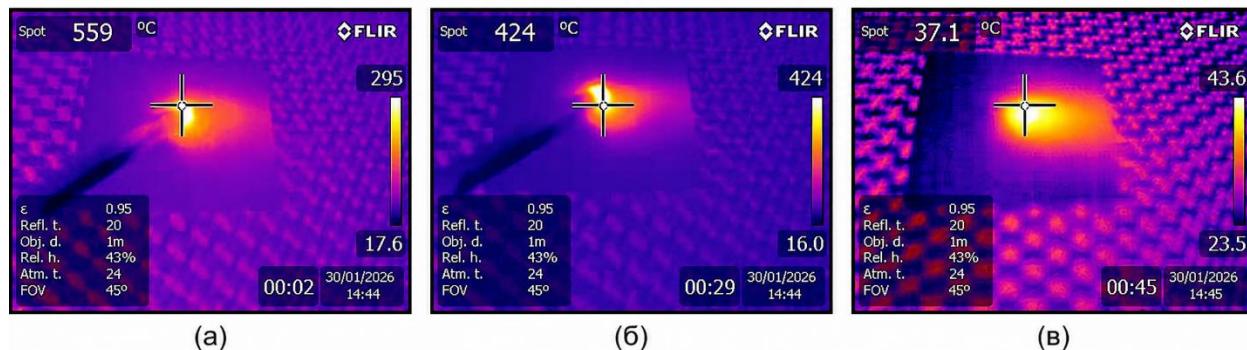
Слика 4.37. Квантитативна анализа површине термичког оштећења полиестарске тканине са издвојеним зонама (прстен и средина): а) оригинални приказ оштећења, б) резултати дигиталне анализе и сегментације оштећења

Поређењем резултата немодификованих памучних и полиестарских тканина уочавају се значајне разлике у њиховом понашању при дејству жара цигарете. Код памучне тканине, температура је након уклањања цигарете наставила да расте и достигла максималних  $647 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , уз термички захваћену површину од  $4,18 \text{ cm}^2$  и централну зону оштећења од  $3,76 \text{ cm}^2$ . Код полиестарске тканине, након достизања температуре од  $498 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , уследио је пад температуре на  $119 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , без даљег ширења зоне повишених температура, док је зона потпуног оштећења износила  $0,47 \text{ cm}^2$ . Ове разлике представљају референтну основу за оцену утицаја модификације на термичко понашање и степен оштећења тканина.

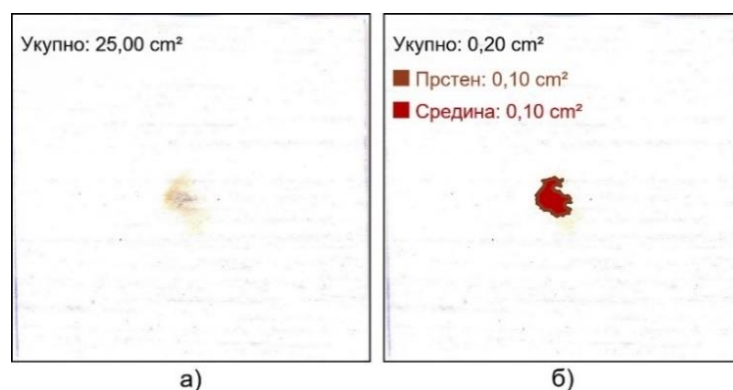
#### 4.6.6.3. Термовизијска анализа и процена оштећења модификоване памучне и полиестарске тканине изложене дејству цигарете

За испитивање термичког понашања модификованих текстилних материјала коришћен је ватроотпорни премаз са масеним односом  $\text{Al}(\text{OH})_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  од 75:25. Испитивање је спроведено на пет узорака сваке врсте тканине, односно на пет узорака модификоване памучне и пет узорака модификоване полиестарске тканине, изложених дејству жара цигарете. Термовизијском анализом праћен је развој температурног поља на

површини тканина током и након излагања извору топлоте, док је квантитативном анализом процењен обим насталих површинских промена. У наставку су приказани резултати за узорке који су, у оквиру испитаних узорака сваке врсте тканине, показали највећу површину термичких промена.



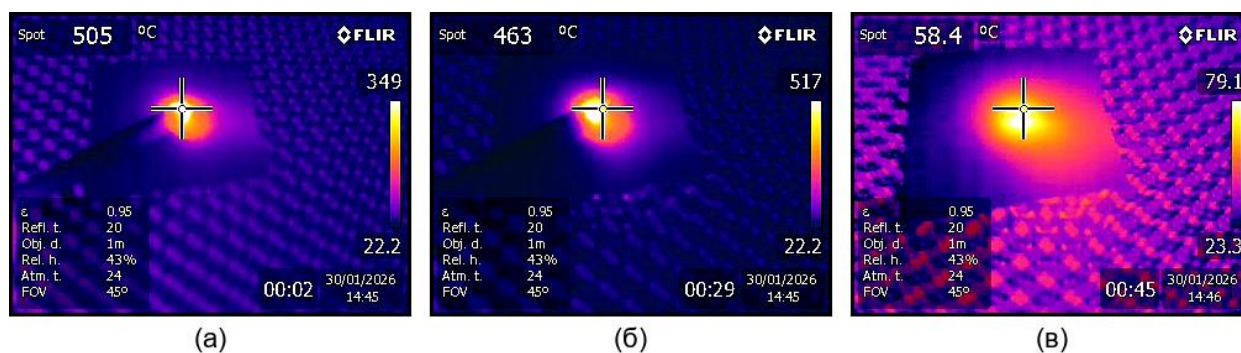
Слика 4.38. Термовизијска анализа развоја температурног поља на површини модификоване памучне тканине: а) почетна фаза загревања, б) стање непосредно пре уклањања извора топлоте (цигарете), в) стање након уклањања извора топлоте



Слика 4.39. Квантитативна анализа површине термичког оштећења модификоване памучне тканине са издвојеним зонама (прстен и средина): а) оригинални приказ оштећења, (б) резултати дигиталне анализе и сегментације оштећења

Термовизијска анализа модификоване памучне тканине показује измењено термичко понашање у односу на немодификовани памук. У почетној фази излагања, при  $t = 2$  s, регистрована је температура од 559 °C (слика 4.38a), при чему је загревање локализовано у зони непосредног дејства извора топлоте. У наредној фази, при  $t = 29$  s, температура опада на 424 °C (слика 4.38б), што указује на смањење интензитета загревања. Након уклањања цигарете долази до наглог пада температуре, тако да је у времену  $t = 45$  s регистрована температура од 37,1 °C (слика 4.38в), што је блиско амбијенталној температури. За разлику од немодификованог памука, код модификоване тканине није уочено тињање нити накнадни пораст температуре након уклањања извора топлоте. Овакво понашање указује на ограничен даљи развој термичког процеса након престанка

директног довода топлоте и способност модификоване тканине да ограничи ширење термичког дејства. Квантитативном анализом утврђено је да укупна површина захваћена термичким дејством износи  $0,20 \text{ cm}^2$  (слика 4.39б). Централна зона површине  $0,10 \text{ cm}^2$  одговара области директног дејства извора топлоте, док периферни део површине  $0,10 \text{ cm}^2$  представља област површинских промена (слика 4.39б). Код модификоване полиестарске тканине у почетној фази излагања, при  $t = 2 \text{ s}$ , регистрована је температура од  $505 \text{ }^\circ\text{C}$  (слика 4.40а), при чему је загревање локализовано у зони непосредног дејства извора топлоте. Са протоком времена температура благо опада, тако да при  $t = 29 \text{ s}$  достиже  $463 \text{ }^\circ\text{C}$  (слика 4.40б). Након уклањања цигарете долази до наглог пада температуре, при чему је у времену  $t = 45 \text{ s}$  регистрована температура од  $58,4 \text{ }^\circ\text{C}$  (слика 4.40в). Након уклањања извора топлоте није уочен накнадни пораст температуре нити развој тињања, што указује на ограничен даљи развој термичког процеса.

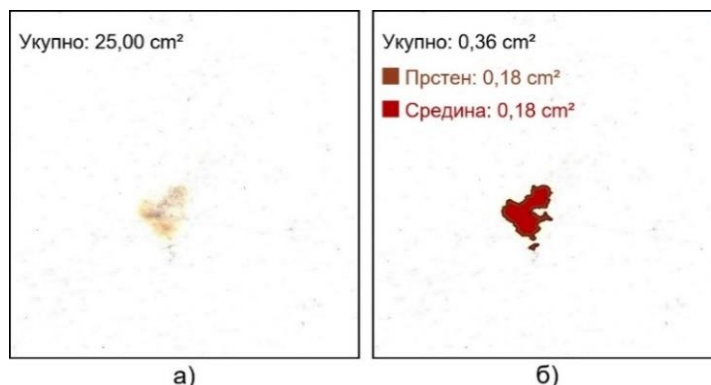


Слика 4.40. Термовизијска анализа развоја температурног поља на модификованој полиестарске тканине: а) почетна фаза загревања, б) стање непосредно пре уклањања извора топлоте (цигарете), в) стање након уклањања извора топлоте

Квантитативном анализом утврђено је да укупна површина на којој су уочене промене износи  $0,36 \text{ cm}^2$  (слика 4.41б). Централна зона обухвата површину од  $0,18 \text{ cm}^2$ , док периферна зона, односно прстен, такође обухвата  $0,18 \text{ cm}^2$ . Поређењем термовизијских резултата модификованих памучних и полиестарских тканина уочава се слично понашање након уклањања извора топлоте, али и разлика у степену површинских промена.

Поређењем термовизијских резултата модификованих памучних и полиестарских тканина уочава се слично понашање након уклањања извора топлоте, али и разлика у степену површинских промена. Код модификоване памучне тканине температура је са  $559 \text{ }^\circ\text{C}$  при  $t = 2 \text{ s}$  опала на  $424 \text{ }^\circ\text{C}$  при  $t = 29 \text{ s}$ , а након уклањања цигарете смањила се на  $37,1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Код модификоване полиестарске тканине температура је са  $505 \text{ }^\circ\text{C}$  при  $t = 2 \text{ s}$  опала на  $463 \text{ }^\circ\text{C}$  при  $t = 29 \text{ s}$ , а након уклањања цигарете на  $58,4 \text{ }^\circ\text{C}$  при  $t = 45 \text{ s}$ . Код оба материјала није уочен накнадни пораст температуре нити развој тињања. Квантитативна

анализа показала је да је код модификоване памучне тканине површина захваћена термичким дејством износила  $0,20 \text{ cm}^2$ , док је код модификоване полиестарске тканине површина на којој су уочене промене износила  $0,36 \text{ cm}^2$ .

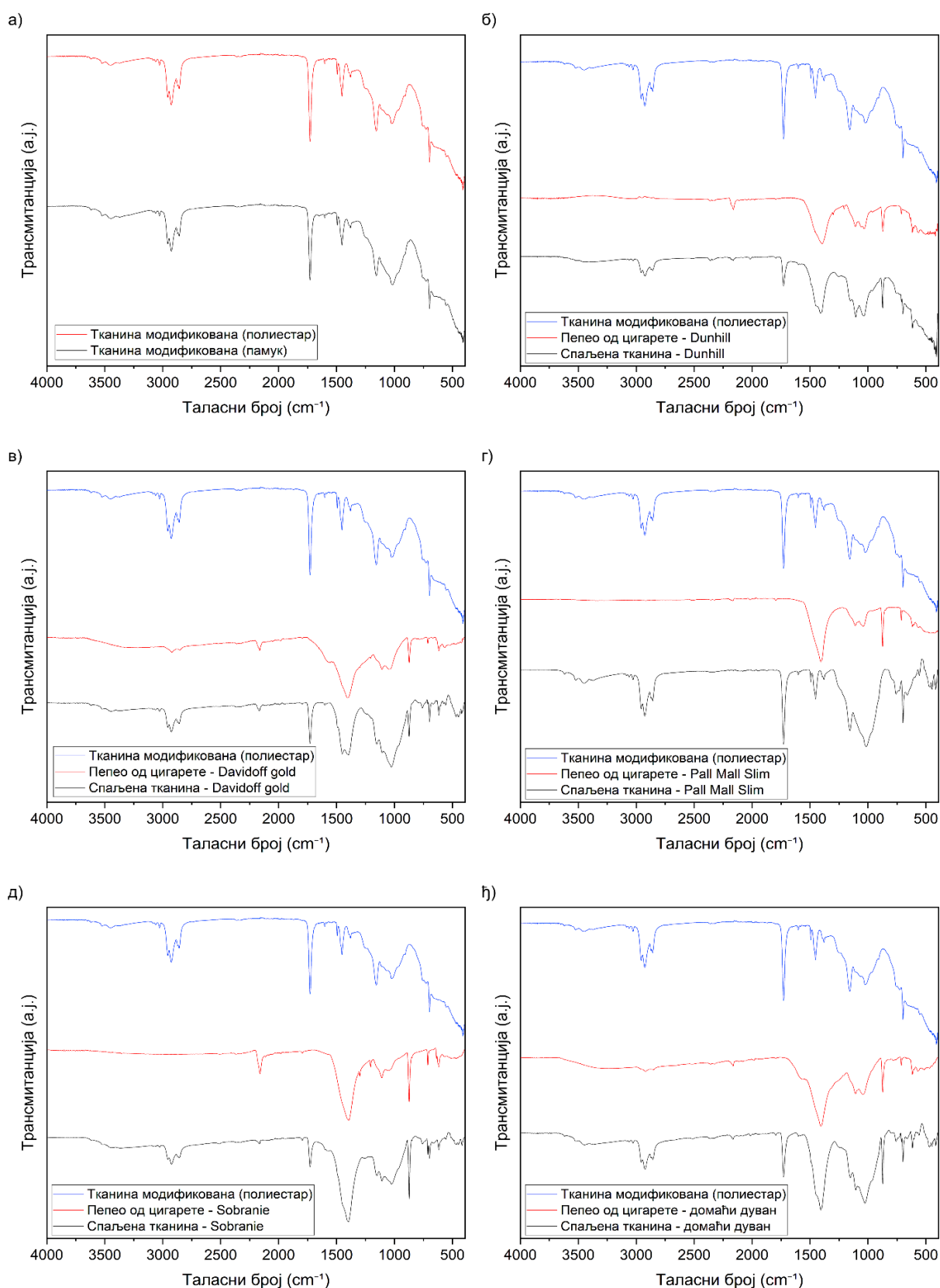


Слика 4.41. Квантитативна анализа површине термичког оштећења модификоване полиестарске тканине са издвојеним зонама (прстен и средина): а) оригинални приказ оштећења, б) резултати дигиталне анализе и сегментације оштећења

Упоредном анализом немодификованих и модификованих тканина уочава се позитиван утицај примењене модификације на њихово термичко понашање. Код модификованих памучних и полиестарских тканина након уклањања извора топлоте није уочен накнадни пораст температуре нити развој тињања, док је површина термичког утицаја била мања и није прогорела узорак у односу на немодификоване узорке. Најизраженији ефекат модификације уочен је код памучне тканине, код које је површина термичког утицаја смањена са  $4,18 \text{ cm}^2$  на  $0,20 \text{ cm}^2$ , док је код полиестарске тканине површина промена смањена са  $0,47 \text{ cm}^2$  на  $0,36 \text{ cm}^2$ . Добијени резултати указују да примењена модификација ограничава даљи развој термичког процеса и степен површинских промена након дејства цигарете.

#### 4.6.7. FT-IR анализа површине модификованих тканина

Испитивањем промена FT-IR спектра тканина приказаним у Одељку 4.5.1. ове дисертације закључено је да се немодификоване комерцијалне тканине у потпуности калцинишу у зони тињања приликом излагања жару цигарете. Према истој методологији извршено је испитивање промена у структури тканина модификованих  $\text{Al}(\text{OH})_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  75:25 ради одређивања промена на молекулском нивоу премаза. На слици 4.42 приказани су FT-IR спектри: а) површине тканина сировинског састава 100% памук и 100% полиестар модификованих премазом 75:25, полиестара модификованог премазом пре и након паљења цигаретама марке: б) *Dunhill Master blend*, в) *Davidoff Gold*, г) *Pall Mall Slim*, д) *Sobranie* и ђ) мотаног домаћег дувана.



Слика 4.42. FT-IR спектри а) површине тканина сировинског састава 100 % памук и 100 % полиестар модификованих премазом 75:25, полиестара модификованог премазом пре и након паљења цигаретама марке б) Dunhill, в) Davidoff gold, г) Pall Mall Slim, д) Sobranie и ђ) мотаног домаћег дувана

Према FT-IR спектрима приказаним на слици 4.42а може се закључити да су спектри обе тканине чија је површина модификована премазом  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$  75:25 идентични. Висок степен сличности потврђен је Пирсоновим коефицијентом корелације, који износи 0,9954, што указује на веома висок ниво подударности спектралних карактеристика испитиваних узорка. Висока вредност коефицијента корелације показује да се анализом површине не детектују апсорпционе траке карактеристични за макромолекуле текстилних материјала, што доводи до закључка да је постигнута добра покривност приликом наношења. С обзиром на то да су код оба узорка идентификоване идентичне апсорпционе траке, у наставку испитивања интеракције модификоване тканине са изазивачем пожара коришћена је тканина сировинског састава 100% полиестар, применом FT-IR спектроскопије.

На основу FT-IR спектра приказаних на сликама 4.42б – 4.42ђ, примећује се присуство апсорпционе траке премаза и након жарења површине цигаретом. У свим случајевима примећује се задржавање апсорпционе траке, уз благо слабљење интензитета апсорпционих трака у области  $2960\text{ cm}^{-1}$  -  $2850\text{ cm}^{-1}$ , које потиче од вибрација истезања C-H присутних у молекулу везива (Defeyt et al., 2017). Као последица непотпуног сагоревања премаза примећује се и слабљење интензитета апсорпционе траке на око  $1730\text{ cm}^{-1}$ , које потиче од вибрација истезања C=O естарске групе (Andrieu et al., 2025; Ładosz et al., 2024). Апсорпциони максимум на  $\sim 1460\text{ cm}^{-1}$  може се приписати вибрацијама C=C из ароматичног прстена (Defeyt et al., 2017; Ładosz et al., 2024). Апсорпциона трака слабог интензитета на таласном броју  $\sim 1380\text{ cm}^{-1}$  може се приписати вибрацијама савијања C-(CH<sub>3</sub>) из структуре везива или додатог средства за регулацију вискозности премаза (Defeyt et al., 2017).

Трака на око  $1153\text{ cm}^{-1}$  указује на постојање вибрација асиметричних истезања C-N-C везива премаза (Defeyt et al., 2017). Апсорпциона трака испод  $1000\text{ cm}^{-1}$ , посебно две апсорпционе траке на око  $940\text{ cm}^{-1}$  и  $915\text{ cm}^{-1}$  одговарају вибрацијама савијања Al-O-H својственом за неорганску компоненту премаза коришћену за побољшање ватроотпорности материјала (Frost et al., 1999; Piperopoulos et al., 2022).

У случајевима жарења површине модификоване полиестарске тканине цигаретама *Dunhill Master Blend*, *Davidof Gold*, *Sobranie* и цигаретом пуњеном домаћим дуваном, примећују се карактеристичне широке апсорпционе траке јаког и/или средњег интензитета на таласним бројевима на око  $1420\text{ cm}^{-1}$ ,  $1041\text{ cm}^{-1}$ ,  $1034\text{ cm}^{-1}$ ,  $871\text{ cm}^{-1}$ ,  $774\text{ cm}^{-1}$  и  $621\text{ cm}^{-1}$ , пореклом из пепела цигарете, што одговара карактеристичним карбонатним (калцит,  $\text{CaCO}_3$ ) и силикатним компонентама пепела дувана (Socrates, 2004). Дати апсорпционе

траке детаљно су објашњени у Одељку 4.5.1. Постојање карактеристичних апсорпционих трака пореклом из цигарете указује на задржавање трагова пепела цигарете на површини тканине. Појава карактеристичних апсорпционих максимума премаза указује на то да заштитни слој тканине није деградирао услед контакта са жаром цигарете. Код жарења модификоване полиестарске тканине цигаретом *Pall Mall Slim* примећује се одсуство карактеристичних апсорпционих максимума пореклом од цигарете на површини текстила, што указује да није дошло до било каквог оштећења премаза при излагању жару цигарете. Поређењем спектра модификованих и немодификованих тканина након излагања текстилних материјала жару цигарете, може се закључити да се модификацијом површине тканине премазом  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$  75:25 тканине штите од ширења пламена успоравањем/ограничавањем ширења жара и пламена на тканини, упркос локалном контакту са жаром цигарете.

# ЗАКЉУЧАК

---

У првом делу дисертације развијен је интегрисани приступ анализи пожарних догађаја применом метода стохастичког моделовања, машинског учења и просторне анализе, са циљем идентификације фактора који утичу на повређивање и смртне исходе у пожарима на територији Републике Србије. Анализа је заснована на вишегодишњој бази података Министарства унутрашњих послова Републике Србије, која је омогућила свеобухватно сагледавање статистичких, просторних и демографских карактеристика пожарних догађаја.

Дескриптивном статистичком анализом утврђено је да већина пожарних догађаја има ограничене последице по људске животе, док релативно мали број пожара доводи до тежих повреда или смртних исхода. Истовремено, анализа је показала да последице пожара по људе нису случајно распоређене, већ зависе од комбинације више фактора, као што су узрок пожара, тип и намена објекта, просторне карактеристике, годишње доба и демографска структура становништва.

Применом инфлаторне (0–1) Пуасонове расподеле, минификационих (MIN-SB) процеса и GAMLSS модела показано је да стохастичко моделовање омогућава адекватан опис дискретних и континуалних карактеристика пожарних догађаја. Инфлаторна Пуасонова расподела успешно је описала изражену инфлацију нултих и јединичних вредности, MIN-SB процеси омогућили су моделирање временске динамике повређивања и смртних исхода, док су GAMLSS модели омогућили избор најадекватнијих расподела за опис старосне структуре повређених и смртно страдалих лица. На основу добијених модела идентификоване су најугроженије старосне категорије и издвојени различити механизми ризика који карактеришу повређивање и смртне исходе. Ови резултати показују да стохастичко моделовање представља поуздану основу за процену пожарног ризика и планирање превентивних мера.

Поред стохастичког моделовања, примењене су и методе машинског учења у циљу идентификације фактора ризика и откривања скривених зависности у анализираним подацима. Кластерском анализом издвојене су групе пожарних догађаја са сличним карактеристикама, CHAID алгоритмом идентификоване су променљиве које имају највећи утицај на повређивање и смртне исходе, док су применом Argioi алгоритма откривена асоцијативна правила која описују типичне комбинације услова под којима долази до најтежих последица. Просторном анализом издвојена су подручја повећаног пожарног ризика, што представља значајну основу за рационалнију расподелу ресурса, развој система раног упозоравања и планирање циљаних превентивних активности.

Добијени резултати показују да интеграција стохастичког моделовања, машинског учења и просторне анализе омогућава свеобухватније разумевање узрока и последица пожарних догађаја него примена сваког од ових приступа појединачно. Развијени методолошки оквир представља научну основу за унапређење процене пожарног ризика, доношење одлука у области јавне безбедности и развој ефикаснијих стратегија превенције пожара, а може се применити и на анализу других ванредних догађаја који подразумевају угрожавање људских живота.

У другом делу дисертације, испитана је могућност примене FT-IR спектроскопије и EI-MS у форензичкој идентификацији цигарете као узрочника пожара. Анализом FT-IR спектра пепела, дувана и папира различитих брендова цигарета утврђено је постојање карактеристичних апсорпционих трака на таласним бројевима  $1420\text{ cm}^{-1}$ ,  $1041\text{ cm}^{-1}$ ,  $1034\text{ cm}^{-1}$ ,  $871\text{ cm}^{-1}$ ,  $774\text{ cm}^{-1}$  и  $621\text{ cm}^{-1}$ , које потичу од карбонатних, силикатних и сулфатних остатака сагоревања дувана и папира, и које се јасно разликују од спектралног отиска сагореле шибице. Поређењем FT-IR спектра спаљених текстилних материјала са спектрима компоненти цигарете применом Пирсоновог коефицијента корелације, утврђена је висока сличност између спаљене тканине и пепела цигарете ( $r$  до 0,9872 за памучне материјале), при чему је памук показао највећу спектралну подударност, док су синтетски материјали (сунђер) показали значајно нижу и неконзистентну корелацију услед топљења материјала при дејству жара. FT-IR спектроскопија показала се као погодна метода за идентификацију спектралних трагова компатибилних са остацима цигарете, нарочито код природних влакана.

Применом EI-MS (Hiden HPR-60 EQP) на узорку цигарете *Dunhill Master Blend* идентификовани су карактеристични маркери дуванског дима - фрагмент никотина ( $m/z = 84$ ), толуен ( $m/z = 92/93$ ), глицеролни фрагмент ( $m/z = 60$ ) и угљен-диоксид ( $m/z = 44$ ) који заједно формирају препознатљив хемијски образац гасне фазе сагоревања дувана. Анализом спаљених тканина утврђено је да памучни узорци, нарочито при већем уделу памучних влакана, и модификована полиестарска тканина у значајној мери задржавају ове карактеристичне маркере и након термичке деградације, чиме се потврђује могућност накнадне идентификације цигарете као извора паљења. Код синтетских материјала са израженом склоношћу ка топљењу, посебно код узорака са већим уделом синтетских влакана (сунђер, 80% полиестар), карактеристични маркери нису детектовани, што указује да продукти пиролизе синтетских влакана могу маскирати трагове изазивача пожара.

Трећи део истраживања био је усмерен на развој и испитивање ватроотпорних премаза са нанокмпозитним честицама  $\text{Al}(\text{OH})_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  различитих масених односа.

Премази су примењени на текстилне материјале, дрво и папир, са циљем повећања њихове отпорности на дејство отвореног пламена и локализованог извора топлоте.

Применом XPS, XRD и SEM метода потврђени су хемијски састав, фазна структура и морфолошке карактеристике синтетисаних нанокмполитних честица, редом. XPS анализа показала је доминантно присуство алуминијума и кисеоника, док је XRD анализа потврдила присуство фаза  $\text{Al}(\text{OH})_3$  и  $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$ . Променом масеног односа полазних компоненти мењала се и релативна заступљеност ових фаза, при чему је у узорку 75:25 доминантно био присутан  $\text{Al}(\text{OH})_3$ .

Испитивања дејства отвореног пламена показала су да примена премаза успорава почетак термичке деградације и одлаже појаву термичког оштећења. Најповољнији резултати добијени су код премаза са масеним односом  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3 = 75:25$ , који је код свих испитиваних материјала обезбедио најдуже време до појаве зоне термичког оштећења.

Термовизијска анализа показала је да модификоване тканине имају ограничење ширење температурног поља и мању могућност наставка термичке деградације након уклањања извора топлоте. Код модификоване полиестарске тканине забележен је брз пад температуре, без појаве тињања и накнадног пораста температуре, док је оштећење остало локализовано и површинско, са укупном површином од  $0,36 \text{ cm}^2$ .

На основу добијених резултата може се закључити да премази са нанокмполитним честицама  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$  доприносе повећању отпорности испитиваних материјала на дејство пламена и локализовано топлотно оптерећење. Најбоље понашање показао је премаз са већим уделом  $\text{Al}(\text{OH})_3$  односно масеним односом 75:25, због чега се хипотеза о повећању ватроотпорности материјала применом ових премаза може сматрати потврђеном у условима спроведеног истраживања.

Интеграцијом статистичко-моделске анализе пожарних догађаја, форензичке идентификације трагова цигарете и развоја ватроотпорних нанокмполитних премаза, у дисертацији је успостављен интегрисани форензичко-инжењерски приступ истраживању пожара. Добијени резултати указују на могућност примене метода машинског учења у препознавању образаца пожарног ризика, FT-IR спектроскопије и EI-MS у идентификацији карактеристичних трагова цигарете, као и премаза са нанокмполитним честицама  $\text{Al}(\text{OH})_3 / \text{Al}_2\text{O}_3$  у повећању отпорности материјала на дејство пламена. На тај начин, истраживање пружа научну основу за унапређење форензичке анализе пожара, превентивних мера и заштите људи, имовине и животне средине.

## ПОПИС ЛИТЕРАТУРЕ

1. Abdalla, H. I. (2021). A Brief Comparison of K-means and Agglomerative Hierarchical Clustering Algorithms on Small Datasets. In Z. Qian, M. A. Jabbar, & X. Li (Eds), *Proceeding of 2021 International Conference on Wireless Communications, Networking and Applications* (pp. 623–632). Springer Nature Singapore.
2. Abdulhafedh, A. (2017). A Novel Hybrid Method for Measuring the Spatial Autocorrelation of Vehicular Crashes: Combining Moran's Index and Getis-Ord  $G_i^*$  Statistic. *Open Journal of Civil Engineering*, 07(02), 208–221. <https://doi.org/10.4236/ojce.2017.72013>
3. Adam, T., Ferge, T., Mitschke, S., Streibel, T., Baker, R. R., & Zimmermann, R. (2005). Discrimination of three tobacco types (Burley, Virginia and Oriental) by pyrolysis single-photon ionisation-time-of-flight mass spectrometry and advanced statistical methods. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 381(2), 487–499. <https://doi.org/10.1007/s00216-004-2935-0>
4. Adam, T., Mitschke, S., Streibel, T., Baker, R. R., & Zimmermann, R. (2006). Quantitative puff-by-puff-resolved characterization of selected toxic compounds in cigarette mainstream smoke. *Chemical Research in Toxicology*, 19(4), 511–520. <https://doi.org/10.1021/tx050220w>
5. Aleksić, M. S., & Ristić, M. M. (2021). A geometric minification integer-valued autoregressive model. *Applied Mathematical Modelling*, 90, 265–280. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.08.047>
6. Alongi, J., & Malucelli, G. (2015). Thermal Degradation of Cellulose and Cellulosic Substrates. In *Reactions and Mechanisms in Thermal Analysis of Advanced Materials* (bll 301–332). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119117711.ch14>
7. Alves, W. A., Téllez Soto, C. A., Hollauer, E., & Faria, R. B. (2005). Vibrational studies on the selective solvation of  $\text{Na}^+$  and  $\text{ClO}_3^-$  ions in dimethylformamide–formamide mixture. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 62(4), 755–760. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2005.02.044>
8. Agrawal, R., Imieliński, T., & Swami, A. (1993). Mining association rules between sets of items in large databases. Proceedings of the 1993 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, 207–216. <https://doi.org/10.1145/170035.170072>
9. Aly, N. M. (2023). Fire protective textiles. In *Advances in Healthcare and Protective Textiles* (bll 203–258). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91188-7.00007-8>

10. Andrieu, L., Espinosa-Rodriguez, E., Taam, M., Villard, M., & Boyron, O. (2025). Identification of polymeric binders in anticorrosive coatings via FTIR spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 343, 126493. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2025.126493>
11. Anselin, L. (1988). *Spatial Econometrics: Methods and Models* (Vol 4). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-7799-1>
12. Anselin, L. (1995). Local Indicators of Spatial Association—LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93–115. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>
13. Anselin, L. (2005). Exploring Spatial Data with GeoDa: A Workbook. *Geographical Analysis*.
14. Anselin, L., Syabri, I., & Kho, Y. (2006). GeoDa: An introduction to spatial data analysis. In *Geographical Analysis* (Vol 38, Number 1, bll 5–22). <https://doi.org/10.1111/j.0016-7363.2005.00671.x>
15. Baaij, S., de Witte, L., Hofman, R., Huizer, E., Molenaar, J., & Weewer, R. (2023). *Handboek gebouwbrandbestrijding*. <https://nipv.nl/wp-content/uploads/2023/03/20230123-NIPV-Handboek-Gebouwbrandbestrijding.pdf>
16. Babrauskas, Vytenis. (2003). *Ignition handbook: principles and applications to fire safety engineering, fire investigation, risk management and forensic science*. Fire Science Publishers; Society of Fire Protection Engineers.
17. Baizyldayeva, U. B., Uskenbayeva, R. K., & Amanzholova, S. T. (2013). Decision making procedure: Applications of IBM SPSS cluster analysis and decision tree. *World Applied Sciences Journal*, 21(8), 1207–1212. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.21.8.2913>
18. Bak, P. (1996). *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-5426-1>
19. Baker, R. R., Coburn, S., Liu, C., & McAdam, K. G. (2016). The science behind the development and performance of reduced ignition propensity cigarettes. *Fire Science Reviews*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s40038-016-0011-4>
20. Basak, S., & Ali, S. W. (2020). Chapter 4 - Fire-resistant behavior of cellulosic textile material functionalized with biomolecules. In S. ul-Islam & B. S. Butola (Eds), *Advances in Functional and Protective Textiles* (pp. 63–80). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820257-9.00004-7>
21. Bayley, S. E., Schindler, D. W., Beaty, K. G., Parker, B. R., & Stainton, M. P. (1992). Effects of Multiple Fires on Nutrient Yields from Streams Draining Boreal Forest and Fen

- Watersheds: Nitrogen and Phosphorus. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 49(3), 584–596. <https://doi.org/10.1139/f92-068>
22. Bílková, L. (2012). Application of infrared spectroscopy and thermal analysis to the examination of the degradation of cotton fibers. *Polymer Degradation and Stability*, 97(1), 35–39. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2011.10.018>
  23. Bitzer, Z. T., Goel, R., Trushin, N., Muscat, J., & Richie, J. P. (2020). Free Radical Production and Characterization of Heat-Not-Burn Cigarettes in Comparison to Conventional and Electronic Cigarettes. *Chemical Research in Toxicology*, 33(7), 1882–1887. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrestox.0c00088>
  24. Bivand, R., Pebesma, E. J., & Gómez-Rubio, V. (2013). *Applied spatial data analysis with R*. Springer.
  25. Borgerding, M., & Klus, H. (2005). Analysis of complex mixtures - Cigarette smoke. *Experimental and Toxicologic Pathology*, 57(SUPPL. 1), 43–73. <https://doi.org/10.1016/j.etp.2005.05.010>
  26. Bouhaj, Y., Saadouni, M., Nadi, A., Cherkaoui, O., Tahiri, M., & El Bouari, A. (2026). The effect of elaboration process on thermal, mechanical, and fire resistance properties of textile waste-based insulation panels. *Construction and Building Materials*, 532, 146748. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2026.146748>
  27. Boukir, A., Fellak, S., & Doumenq, P. (2019). Structural characterization of Argania spinosa Moroccan wooden artifacts during natural degradation progress using infrared spectroscopy (ATR-FTIR) and X-Ray diffraction (XRD). *Heliyon*, 5(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02477>
  28. Brewer, C. (1994). Chapter 7 - Color Use Guidelines for Mapping and Visualization. In A. M. MACEACHREN & D. R. F. TAYLOR (Eds), *Modern Cartography Series* (Vol 2, pp. 123–147). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-042415-6.50014-4>
  29. Briggs, D. (1998). Surface Analysis of Polymers by XPS and Static SIMS. In *Cambridge Solid State Science Series*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511525261>
  30. Buruberri, L. H., Seabra, M. P., & Labrincha, J. A. (2015). Preparation of clinker from paper pulp industry wastes. *Journal of Hazardous Materials*, 286, 252–260. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.12.053>
  31. Butry, D. T., Prestemon, J. P., Abt, K. L., & Sutphen, R. (2010). Economic optimisation of wildfire intervention activities. *International Journal of Wildland Fire*, 19(5), 659–672. <https://doi.org/10.1071/WF09090>

32. Cai, G.-B., Chen, S.-F., Liu, L., Jiang, J., Yao, H.-B., Xu, A.-W., & Yu, S.-H. (2010). 1,3-Diamino-2-hydroxypropane-N,N,N',N'-tetraacetic acid stabilized amorphous calcium carbonate: nucleation, transformation and crystal growth. *CrystEngComm*, 12(1), 234–241. <https://doi.org/10.1039/B911426M>
33. Cañas, J., Alba, G., Leinen, D., Lloret, F., Gutierrez, M., Eon, D., Pernot, J., Gheeraert, E., & Araujo, D. (2021). Diamond/ $\gamma$ -alumina band offset determination by XPS. *Applied Surface Science*, 535. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146301>
34. Causa, A., & Netravali, A. (2008). Characterization and measurement of textile fabric properties. In *Structure and mechanics of textile fibre assemblies* (bl 248). Woodhead Publishing in association with the Textile Institute; CRC Press.
35. Čech, J., Brablec, A., Černák, M., Puač, N., Selaković, N., & Petrović, Z. Lj. (2017). Mass spectrometry of diffuse coplanar surface barrier discharge: influence of discharge frequency and oxygen content in N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> mixture\*. *The European Physical Journal D*, 71(2), 27. <https://doi.org/10.1140/epjd/e2016-70607-5>
36. Chen, L., & Wang, Y.-Z. (2024). Recyclable Flame-Retardant Thermosets and Their Fiber-Reinforced Composites. *Macromolecules*, 57(20), 9498–9517. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.4c00996>
37. Chen, Y. H., Wu, G. W., & He, J. L. (2015). Antimicrobial brass coatings prepared on poly(ethylene terephthalate) textile by high power impulse magnetron sputtering. *Materials Science and Engineering C*, 48, 41–47. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.11.017>
38. CTIF Centre of Fire Statistics. (2024). *The CTIF World Fire Statistics: Report No. 29*. <https://www.ctif.org/world-fire-statistics>
39. De Ville, B. (2013). Decision trees. *WIREs Computational Statistics*, 5(6), 448–455. <https://doi.org/10.1002/wics.1278>
40. Defeyt, C., Langenbacher, J., & Rivenc, R. (2017). Polyurethane coatings used in twentieth century outdoor painted sculptures. Part I: comparative study of various systems by means of ATR-FTIR spectroscopy. *Heritage Science*, 5(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s40494-017-0124-7>
41. DeHaan, J. D., Kirk, P. L., & Icove, D. J. (2012). *Kirk's fire investigation*. Pearson.
42. Dejene, B. K., Abteu, M. A., & Pawlos, M. (2025). Eco-friendly flame retardant and antibacterial finishing solutions for cotton textiles: A comprehensive review. *Journal of Industrial Textiles*, 55. <https://doi.org/10.1177/15280837251325779>

43. Dolez, P. I., Marsha, S., & McQueen, R. H. (2022). Fibers and Textiles for Personal Protective Equipment: Review of Recent Progress and Perspectives on Future Developments. *Textiles*, 2(2), 349–381. <https://doi.org/10.3390/textiles2020020>
44. Dowd, C. (2023). *Twosamples: Fast Permutation Based Two Sample Tests, R Package* (2.0.1). <https://cloud.r-project.org/web/packages/twosamples/index.html>
45. Drysdale, D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119975465>
46. Ebrahimi, K., Valipour, P., Mirjalili, M., & Tayebi, H.-A. (2023). Photocatalytic nanocomposite prepared by synthesis and coating of zinc stannate and graphene on cotton textile. *Synthetic Metals*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:259762922>
47. Emmons, H. W. (1985). The further history of fire science. *Fire Technology*, 21(3), 230–238. <https://doi.org/10.1007/BF01039976>
48. Englhard, J., & Bachmann, J. (2023). Quantification of CO and Further CO<sub>2</sub> Reduction Products by On-line Mass Spectrometry. *Chemistry-Methods*, 3(12). <https://doi.org/10.1002/cmtd.202300019>
49. Fan, X., Sun, H., Liu, Y., Li, M., Liu, L., Zhang, X., & Wang, J. (2026). Microencapsulated phase change material-functionalized thermoplastic polyurethane as flexible, breathable textile coatings for wearable thermal management. *Composites Communications*, 65, 102856. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2026.102856>
50. Fischer, M. M., & Getis, A. (2010). *Handbook of applied spatial analysis: software tools, methods and applications*. Springer.
51. Ford, A. R., Burns, W. A., & Reeve, S. W. (2004). Rotational Analysis of FTIR Spectra from Cigarette Smoke. An Application of Chem Spec II Software in the Undergraduate Laboratory. *Journal of Chemical Education*, 81(6), 865. <https://doi.org/10.1021/ed081p865>
52. Frost, R. L., Klopogge, J. T., Russell, S. C., & Sztetu, J. L. (1999). Vibrational Spectroscopy and Dehydroxylation of Aluminum (Oxo)Hydroxides: Gibbsite. *Applied Spectroscopy*, 53(4), 423–434. <https://doi.org/10.1366/0003702991946884>
53. Gilmour, K. A., Dell’Agnese, B. M., Bonney, G., Unthank, M., White, N., Scott, J., Sherry, A., James, P., Jiang, Y., Dade-Robertson, M., & Zhang, M. (2025). Environmentally conscious hydrophobic spray coatings on bacterial cellulose for sustainable and reusable textiles. *Journal of Cleaner Production*, 514, 145775. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145775>

54. Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W. M., Henry, J., Scott, J., & Joy, D. C. (2018). *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6676-9>
55. Gross, J. H. (2017). *Mass Spectrometry*. Springer International Publishing AG.
56. Grosshandler, W., Bryner, N., Madrzykowski, D., & Kuntz, K. (2005). *Report of the technical investigation of The Station nightclub fire*. <https://doi.org/10.6028/NIST.NCSTAR.2v1>
57. Hall, M., Frank, E., Holmes, G., Pfahringer, B., Reutemann, P., & Witten, I. H. (2009). The WEKA data mining software. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*, 11(1), 10–18. <https://doi.org/10.1145/1656274.1656278>
58. Hassan, M. N., Abdullah, T. S., Mou, M. B., & Towsif, H. R. (2024). Analysis of the flame retardancy effect of boron-containing compound on polyester-cotton blended fabric. *Heliyon*, 10(13), e34007. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34007>
59. Hastie, T., & Tibshirani, R. (2014). Generalized Additive Models. In *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat03141>
60. Hawke, J., Errington, G., & von Frowein, M. B. (2019). Evaluation of an online, real-time, soft-photon ionisation time-of-flight mass spectrometer for mainstream tobacco smoke analysis. *BMC Chemistry*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s13065-019-0654-z>
61. Houshyar, S., Padhye, R., Ranjan, S., Tew, S., & Nayak, R. (2018). The impact of ultraviolet light exposure on the performance of polybenzimidazole and polyaramid fabrics: Prediction of end-of-life performance. *Journal of Industrial Textiles*, 48(1), 77–86. <https://doi.org/10.1177/1528083717725112>
62. Hu, J., & Xin, B. (2019). Structure and mechanics of woven fabrics. In *Structure and mechanics of textile fibre assemblies*. Woodhead Publishing.
63. Huang, J., Zhu, F., & Deng, D. (2023). A mixed generalized Poisson INAR model with applications. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 93(11), 1851–1878. <https://doi.org/10.1080/00949655.2022.2155161>
64. Icove, D. J., & DeHaan, J. D. (2009). *Forensic fire scene reconstruction*. Pearson/Prentice Hall.
65. Jia, N., Li, S.-M., Ma, M.-G., Zhu, J.-F., & Sun, R.-C. (2011). Synthesis and characterization of cellulose-silica composite fiber in ethanol/water mixed solvents. *BioResources*, 6(2), 1186–1195. <https://doi.org/10.15376/biores.6.2.1186-1195>
66. Joksimović, D., & Stojanović, V. S. (2026). *Verovatnoća i statistika*. Kriminalističko-policijski univerzitet.

67. Kalemekiewicz, J., Galas, D., & Sitarz-Palczak, E. (2018). The Physicochemical Properties and Composition of Biomass Ash and Evaluating Directions of its Applications. *Polish Journal of Environmental Studies*, 27(6), 2593–2603. <https://doi.org/10.15244/pjoes/80870>
68. Kamaraj, C., Lakshmi, S., Rose, C., & Muralidharan, C. (2017). Wet Blue Fiber and Lime from Leather Industry Solid Waste as Stabilizing Additive and Filler in Design of Stone Matrix Asphalt. *Asian Journal of Research in Social Sciences and Humanities*, 7(11), 240. <https://doi.org/10.5958/2249-7315.2017.00547.0>
69. Kandola, B. K., Horrocks, A. R., Price, D., & Coleman, G. V. (1996). Flame-retardant treatments of cellulose and their influence on the mechanism of cellulose pyrolysis. *Journal of Macromolecular Science - Reviews in Macromolecular Chemistry and Physics*, 36(4), 721–794. <https://doi.org/10.1080/15321799608014859>
70. Kang, M., & Yu, Z. (2026). Heterostructured PA@ZIF8-MXene nanosheets for interface engineering of epoxy nanocomposites: high-efficiency flame retardant coupled with enhanced toughness and thermal conductivity. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 209, 109992. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2026.109992>
71. Klemm, D. (1998). *Comprehensive cellulose chemistry*. Wiley-VCH.
72. Ładosz, Ł., Sudoł, E., Kozikowska, E., & Choińska, E. (2024). Artificial Weathering Test Methods of Waterborne Acrylic Coatings for Steel Structure Corrosion Protection. *Materials*, 17(8), 1857. <https://doi.org/10.3390/ma17081857>
73. LaPorte, T. R., & Consolini, P. M. (1991). Working in Practice But Not in Theory: Theoretical Challenges of “High-Reliability Organizations”. *Journal of Public Administration Research and Theory*, 1(1), 19–48. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.jpart.a037070>
74. Lee, J. C., Huh, M. W., Hou, Y. L., & Kim, W. J. (2025). Complex Challenges in the Textile Industry and Potential Solutions in Photocatalytic Coating Technology: A Systematic Literature Review. In *Materials* (Vol 18, Number 4). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/ma18040810>
75. Lentini, J. J. (2018). *Scientific Protocols for Fire Investigation*. CRC Press. <https://doi.org/10.4324/9781315178097>
76. Lerpiniere, C. (2020). Value Definition in Sustainable (Textiles) Production and Consumption. In R. Granger (Eds), *Value Construction in the Creative Economy: Negotiating Innovation and Transformation* (pp. 85–107). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37035-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37035-0_5)

77. Lewis, T. G. (2020). *Critical infrastructure protection in homeland security: defending a networked nation*. John Wiley & Sons Inc.
78. Li, B., Pang, H. R., Zhao, L. C., Wang, B., Liu, C., McAdam, K. G., & Luo, D. S. (2014). Quantifying gas-phase temperature inside a burning cigarette. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 53(18), 7810–7820. <https://doi.org/10.1021/ie5009822>
79. Li, P., Yan, C., Huang, Z., & Rao, W. (2026). Construction of a bio-based macromolecular network for durable flame-retardant, superhydrophobic, and antibacterial cotton fabrics. *International Journal of Biological Macromolecules*, 362, 152136. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2026.152136>
80. Li, X., Guo, Q., Jin, G., Zhang, J., Ma, B., Zhu, Z., Zhang, Y., Meng, H., Li, S., & Xu, Q. (2025). Enhanced synthesis of CTAB-assisted ZnO nanosheets on SiO<sub>2</sub> nanofibers: Antibacterial properties and flame retardant enabled by template-free electrospinning. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 726, 137724. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.137724>
81. Li, X., Xu, K., Wang, L., Zhang, Y., Geng, Z., Li, X., He, J., & Yang, R. (2026). Inspired by the catalytic properties of biological enzymes: Design of bifunctional catalytic flame retardants for enhanced polyurethane flame retardancy. *Polymer Degradation and Stability*, 245, 111860. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2025.111860>
82. Liang, S., Neisius, N. M., & Gaan, S. (2013). Recent developments in flame retardant polymeric coatings. *Progress in Organic Coatings*, 76(11), 1642–1665. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.07.014>
83. Liu, C., & Woodcock, D. (2002). Observing the Peripheral Burning of Cigarettes by an Infrared Technique. *Beiträge zur Tabakforschung International/Contributions to Tobacco Research*, 20(4), 257–264. <https://doi.org/10.2478/cttr-2013-0739>
84. Liu, Z., Li, J., Zhao, X., Li, Z., & Li, Q. (2018). Surface coating for flame retardancy and pyrolysis behavior of polyester fabric based on calcium alginate nanocomposites. *Nanomaterials*, 8(11). <https://doi.org/10.3390/nano8110875>
85. Lizarbe, A. J., Major, G. H., Fernandez, V., Fairley, N., & Linford, M. R. (2023). Insight note: X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) peak fitting of the Al 2p peak from electrically isolated aluminum foil with an oxide layer. *Surface and Interface Analysis*, 55(9), 651–657. <https://doi.org/10.1002/sia.7238>
86. Lo Porto, C., Dell'Edera, M., De Pasquale, I., Milella, A., Fracassi, F., Curri, M. L., Comparelli, R., & Palumbo, F. (2022). Photocatalytic Investigation of Aerosol-Assisted

- Atmospheric Pressure Plasma Deposited Hybrid TiO<sub>2</sub> Containing Nanocomposite Coatings. *Nanomaterials*, 12(21). <https://doi.org/10.3390/nano12213758>
87. Longford, N. T. (1987). A fast scoring algorithm for maximum likelihood estimation in unbalanced mixed models with nested random effects. *Biometrika*, 74(4), 817–827. <https://doi.org/10.1093/biomet/74.4.817>
  88. Longley, P., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. (2015). *Geographic information systems science*. John Wiley & Sons.
  89. Luo, X., Song, X., Cao, Y., Song, L., & Bu, X. (2020). Investigation of calcium carbonate synthesized by steamed ammonia liquid waste without use of additives. *RSC Advances*, 10(13), 7976–7986. <https://doi.org/10.1039/c9ra10460g>
  90. Lyu, D., Chen, Q., Li, J., Zhang, W., Chen, J., Li, W., Liu, T., & He, J. (2026). Household fire-resistant textile based on fiber placement technology with core-sheath SIC/AL@ PI hybrid yarn. *Chemical Engineering Journal*, 537, 176108. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2026.176108>
  91. Mahfoudhi, N., & Boufi, S. (2020). Porous material from cellulose nanofibrils coated with aluminum hydroxyde as an effective adsorbent for fluoride. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(3), 103779. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103779>
  92. Marić, P., Mlađan, D., Boban, S., Goran, N., & Slaviša, Đ. (2018). Statistički pristup utvrđivanja individualnog rizika od požara u evropskim zemljama i Republici Srbiji. *Zbornik radova 6. međunarodne naučne konferencije Bezbednosni inženjering – Požar, životna sredina, radna okolina, integrisani rizici i 16. međunarodne konferencije Zaštita od požara i eksplozije*, 125–134.
  93. Maya, R., Chesneau, C., Krishna, A., & Irshad, M. R. (2022). Poisson Extended Exponential Distribution with Associated INAR(1) Process and Applications. *Stats*, 5(3), 755–772. <https://doi.org/10.3390/stats5030044>
  94. Menczel, J. D. (2020). 17-Polybenzimidazole fiber. In M. Jaffe & J. D. Menczel (Eds.), *Thermal Analysis of Textiles and Fibers* (bll 291–295). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100572-9.00017-3>
  95. Milosavljević, S. (2014). *Strukturne instrumentalne metode*. Univerzitet u Beogradu - Hemijski fakultet.
  96. Minkina, W., & Dudzik, S. (2009). *Infrared thermography : errors and uncertainties*. John Wiley & Sons.

97. Mitrović, N., Stojanović, V., Jovanović, M., Grujić, Ž., & Mladjan, D. (2026). Patterns of Human Injuries and Fatalities in Fire Incidents in Serbia: A Comprehensive Statistical and Data Mining Analysis. *Fire*, 9(4), 146. <https://doi.org/10.3390/fire9040146>
98. Mitrović, N., Stojanović, V. S., Jovanović, M., & Mladjan, D. (2025). Forensic and Cause-and-Effect Analysis of Fire Safety in the Republic of Serbia: An Approach Based on Data Mining. *Fire*, 8(8), 302. <https://doi.org/10.3390/fire8080302>
99. Mitschke, S., Adam, T., Streibel, T., Baker, R. R., & Zimmermann, R. (2005). Application of time-of-flight mass spectrometry with laser-based photoionization methods for time-resolved on-line analysis of mainstream cigarette smoke. *Analytical Chemistry*, 77(8), 2288–2296. <https://doi.org/10.1021/ac050075r>
100. Mlađan, D. (2009). *Sprečavanje i suzbijanje požara, havarija i eksplozija*. Kriminalističko-policijski univerzitet.
101. Mlađan, D. (2024). *Bezbednost u vanrednim situacijama*. Kriminalističko-policijski univerzitet.
102. Mo, W., Wu, Z., He, X., Qiang, W., Wei, B., Wei, X., Wu, Y., Fan, X., & Ma, F. (2021). Functional group characteristics and pyrolysis/combustion performance of fly ashes from Karamay oily sludge based on FT-IR and TG-DTG analyses. *Fuel*, 296, 120669. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120669>
103. Mohammadi, Z., Sajjadnia, Z., Bakouch, H. S., & Sharafi, M. (2022). Zero-and-one inflated Poisson–Lindley INAR(1) process for modelling count time series with extra zeros and ones. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 92(10), 2018–2040. <https://doi.org/10.1080/00949655.2021.2019255>
104. Mokoana, V. N., Asante, J. K., & Okonkwo, O. J. (2023). A review on volatilization of flame retarding compounds from polymeric textile materials used in firefighter protective garment. *Journal of Fire Sciences*, 41(4), 107–121. <https://doi.org/10.1177/07349041231171349>
105. Morozov, A., Kochikov, I., Novgorodskaya, A., Sologub, A., & Fufurin, I. (2015). Statistical estimation of the probability of the correct substance detection in FTIR spectroscopy. *Computer Optics*, 39(4), 614–621. <https://doi.org/10.18287/0134-2452-2015-39-4-614-621>
106. Mutoh, A., Booth, A. S., & Stallrich, J. W. (2026). *Revisiting Penalized Likelihood Estimation for Deterministic Computer Experiments*. <http://arxiv.org/abs/2511.18111>

107. Myles, A. J., Feudale, R. N., Liu, Y., Woody, N. A., & Brown, S. D. (2004). An introduction to decision tree modeling. *Journal of Chemometrics*, 18(6), 275–285. <https://doi.org/10.1002/cem.873>
108. *NFPA 921: Guide for Fire and Explosion Investigations*. (2024). National Fire Protection Association.
109. *NFPA 1033, Standard for professional qualifications for fire investigator*. (2021). National Fire Protection Association.
110. Wakelyn, P. J., Bertoniere, N. R., French, A. D., Thibodeaux, D. P., Triplett, B. A., Rousselle, M.A., Goynes, W. R., Edwards, J. V., Hunter, L., McAlister, D. D., & Gamble, G. R. (2007). *Handbook of Fiber Chemistry Third Edition* (M. Lewin, London).
111. Paál, M., Ház, A., Sochr, J., & Labuda, J. (2022). Methods of chemical analysis applied to the wood fire investigation: a review. *Holzforschung*, 76(4), 305–320. <https://doi.org/10.1515/hf-2021-0136>
112. Palavai, S. S., Awasthi, H., & Goel, S. (2026). Phosphorus-doped tunable 3D porous laser-induced graphene electrodes for scalable, high-performance electrochemical supercapacitor. *Surfaces and Interfaces*, 94, 109455. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2026.109455>
113. Pecharsky, V. K., & Zavalij, P. Y. (2005). Fundamentals of powder diffraction and structural characterization of materials. In *Fundamentals of Powder Diffraction and Structural Characterization of Materials*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09579-0>
114. Perrow, C. (1994). *Normal Accidents : Living with High-Risk Technologies*. Basic Books.
115. Peterson, A. D., Ghosh, A. P., & Maitra, R. (2018). Merging *K* -means with hierarchical clustering for identifying general-shaped groups. *Stat*, 7(1). <https://doi.org/10.1002/sta4.172>
116. Piperopoulos, E., Scionti, G., Atria, M., Calabrese, L., & Proverbio, E. (2022). Flame-Retardant Performance Evaluation of Functional Coatings Filled with Mg(OH)<sub>2</sub> and Al(OH)<sub>3</sub>. *Polymers*, 14(3), 372. <https://doi.org/10.3390/polym14030372>
117. Police cantonale du Valais. (2026, Janvier 1). *Crans-Montana: Chronologie de l'événement et bilan provisoire*. Police cantonale du Valais. <https://www.policevalais.ch/communiqués-pour-les-medias/crans-montana-chronologie-de-levenement-et-bilan-provisoire/>
118. Price, D., Horrocks, A. R., Akalin, M., & Farooq, A. A. (1997). Influence of flame retardants on the mechanism of pyrolysis of cotton (cellulose) fabrics in air. *Journal of*

- Analytical and Applied Pyrolysis*, 40–41, 511–524. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(97\)00043-0](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(97)00043-0)
119. QGIS.org. (2024). *QGIS Geographic Information System*. QGIS Association. <https://qgis.org/>
120. Qi, X., Li, Q., & Zhu, F. (2019). Modeling time series of count with excess zeros and ones based on INAR(1) model with zero-and-one inflated Poisson innovations. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 346, 572–590. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2018.07.043>
121. Qian, L., & Zhu, F. (2022). A new minification integer-valued autoregressive process driven by explanatory variables. *Australian & New Zealand Journal of Statistics*, 64(4), 478–494. <https://doi.org/10.1111/anzs.12379>
122. Quintiere, J. G. (2017). *Principles of Fire Behavior*. CRC Press, Taylor and Francis Group.
123. Raditoiu, A., Raditoiu, V., Raduly, M. F., Gabor, A. R., Frone, A. N., Grapin, M., & Anastasescu, M. (2023). Cellulose Fabrics Functionalized with Sol–Gel Photocatalytic Coatings Based on Iron (III) Phthalocyanine Tetracarboxylic Acids–TiO<sub>2</sub>–Silica Hybrids. *Gels*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/gels9110860>
124. Ranucci, E., & Alongi, J. (2025). Thermal decomposition of cellulosic materials: Insights into mechanisms and product evolution. *Polymer Degradation and Stability*, 242, 111629. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2025.111629>
125. Raspolli Galletti, A. M., D'Alessio, A., Licursi, D., Antonetti, C., Valentini, G., Galia, A., & Nassi O Di Nasso, N. (2015). Midinfrared FT-IR as a tool for monitoring herbaceous biomass composition and its conversion to furfural. *Journal of Spectroscopy*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/719042>
126. Refaat, A., Elhaes, H., & Ibrahim, M. A. (2023). Effect of alkali metals on physical and spectroscopic properties of cellulose. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48850-7>
127. Rein, G. (2016). Smoldering Combustion. In M. J. Hurley, D. Gottuk, J. R. Hall, K. Harada, E. Kuligowski, M. Puchovsky, J. Torero, J. M. Watts, & C. Wieczorek (Eds), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (pp. 581–603). Springer New York. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0\\_19](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0_19)
128. Rigby, R. A., & Stasinopoulos, D. M. (2005). Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape. *Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics*, 54(3), 507–554. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9876.2005.00510.x>

129. Rigby, R. A., Stasinopoulos, M. D., Heller, G. Z., & De Bastiani, F. (2019). *Distributions for Modeling Location, Scale, and Shape*. Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9780429298547>
130. Ritschard, G. (2013). CHAID and Earlier Supervised Tree Methods. *Contemporary Issues in Exploratory Data Mining in Behavioral Sciences*, 48–74.
131. Runefors, M. (2023). Sociodemographic Patterns in the Effectiveness and Prevalence of Preventive Measures. In M. Runefors, R. Andersson, M. Delin, & T. Gell (Eds), *Residential Fire Safety: An Interdisciplinary Approach* (pp. 243–255). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-06325-1\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-031-06325-1_14)
132. Saito, M. Y., & Rodrigues, J. A. (2025). Bayesian Analysis of Zero and One Inflated Distributions. *Rev. Mat. Estatíst*, 23, 47–57.
133. Sawada, A., Higashino, T., Oyabu, T., Takei, Y., Nanto, H., & Toko, K. (2008). Gas sensor characteristics for smoldering fire caused by a cigarette smoke. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 130(1), 88–93. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2007.07.083>
134. Schindler, W. D., & Hauser, P. J. (2004). *Chemical finishing of textiles*. CRC ; Woodhead.
135. Schwartz, Peter. (2008). *Structure and mechanics of textile fibre assemblies*. Woodhead Publishing in association with the Textile Institute; CRC Press.
136. Schwartz, P. (2019). *Structure and mechanics of textile fibre assemblies*. Woodhead Publishing.
137. scikit-learn developers. (n.d.). *Clustering*. Clustering. Opgehaal 17 April 2025, van <https://scikit-learn.org/stable/modules/clustering.html>
138. Semiletov, A. M., Chirkunov, A. A., Grafov, O. Y., & Kuznetsov, Y. I. (2022). Stability of Superhydrophobic Layers Formed by Organic Acids on the Surface of Aluminum Alloy 6063. *Coatings*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/coatings12101468>
139. Senthil Kumar, P., Narayan, A. S., & Dutta, A. (2017). *Nanochemicals and Effluent Treatment in Textile Industries* (pp. 57–96). [https://doi.org/10.1007/978-981-10-2188-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-10-2188-6_2)
140. SFPE Task Group on Fire Risk Assessment. (2023). Fire Hazard Identification. In *SFPE Guide to Fire Risk Assessment: SFPE Task Group on Fire Risk Assessment* (pp. 45–52). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-17700-2\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-17700-2_8)
141. Shakeriaski, F., Ghodrat, M., Rashidi, M., & Samali, B. (2022). Smart coating in protective clothing for firefighters: An overview and recent improvements. *Journal of Industrial Textiles*, 51(5\_suppl), 7428S-7454S. <https://doi.org/10.1177/15280837221101213>

142. Shen, D. K., & Gu, S. (2009). The mechanism for thermal decomposition of cellulose and its main products. *Bioresource Technology*, 100(24), 6496–6504. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.095>
143. Shi, X.-H., Li, X.-L., Li, Y.-M., Li, Z., & Wang, D.-Y. (2022). Flame-retardant strategy and mechanism of fiber reinforced polymeric composite: A review. *Composites Part B: Engineering*, 233, 109663. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109663>
144. Shi, Y., Meng, Q., Qian, X., Duo, Y., Lei, H., Lv, S., Shan, X., & Guo, S. (2026). Antibacterial viscose fibers from fresh whole-plant *Artemisia argyi* extract for functional textile applications. *Industrial Crops and Products*, 246, 123414. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2026.123414>
145. Slobodkina, L., Muzyka, R., Sobek, S., Sajdak, M., & Werle, S. (2026). Thermal decomposition of textile fibers: insights from thermogravimetric analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 151(10), 8541–8559. <https://doi.org/10.1007/s10973-026-15611-3>
146. Socrates, G. (2004). *Infrared and Raman characteristic group frequencies : tables and charts*. John Wiley & Sons.
147. Sokolov, S. V., & Kostyuchenko, D. V. (2017). Risk management of fire deaths in homes of urban settlements. *Пожаровзрывобезопасность*, 26(1), 61–74. <https://doi.org/10.18322/pvb.2017.26.01.61-74>
148. Srivastava, S., Moukannaa, S., Isteri, V., Ramteke, D. D., Perumal, P., Adesanya, D., Kinnunen, P., Ohenoja, K., & Illikainen, M. (2024). Utilization of calcite-rich Green Liquor Dregs (GLD) by-products from pulp and paper industry: Cement clinker production and life cycle analysis. *Case Studies in Construction Materials*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02870>
149. SRPS EN 2:2011 Класификација пожара (2011).
150. Steen-Hansen, A., & Storesund, K. (2023). Prevention of Ignition and Limitation of Fire Development in Furnishing and Home Environment. In M. Runefors, R. Andersson, M. Delin, & T. Gell (Eds), *Residential Fire Safety: An Interdisciplinary Approach* (pp. 159–176). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-06325-1\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-06325-1_10)
151. Stojanović, V. (2022). *Uvod u analitiku podataka*. Kriminalističko-policijski univerzitet.
152. Stojanović, V., Ljajko, E., & Tošić, M. (2023a). Parameters Estimation in Non-Negative Integer-Valued Time Series: Approach Based on Probability Generating Functions. *Axioms*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/axioms12020112>

153. Stojanović, V. S., Bakouch, H. S., Bojičić, R., Alomair, G., & Alghamdi, S. A. (2024a). Poisson-Lindley minification INAR process with application to financial data. *AIMS Mathematics*, 9(8), 22627–22654. <https://doi.org/10.3934/math.20241102>
154. Stojanović, V. S., Bakouch, H. S., Gajtanović, Z., Almuhayfith, F. E., & Kuk, K. (2024b). Integer-Valued Split-BREAK Process with a General Family of Innovations and Application to Accident Count Data Modeling. *Axioms*, 13(1), 40. <https://doi.org/10.3390/axioms13010040>
155. Stojanović, V. S., Bakouch, H. S., Ljajko, E., & Qarmalah, N. (2023b). Zero-and-One Integer-Valued AR(1) Time Series with Power Series Innovations and Probability Generating Function Estimation Approach. *Mathematics*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/math11081772>
156. Stojanović, V. S., Mitrović, N., Tomović, K., Bakouch, H. S., & Alghamdi, S. (2026). Minification Integer-Valued Split-BREAK Process with Power Series Innovations and Application in Fire Safety Dynamics. *Axioms*, 15(6), 388. <https://doi.org/10.3390/axioms15060388>
157. Stupar, S. Lj., Bučko, M., Karanović, J., Lazić, D., Dinić, D., Tanić, M. N., & Karkalić, R. (2023a). Silver coated textiles as multifunctional flexible materials. *International Journal of Electrochemical Science*, 18(2), 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2023.01.008>
158. Stupar, S. Lj., Vuksanović, M. M., Mijin, D. Ž., Bučko, M. M., Joksimović, V. J., Barudžija, T. S., & Tanić, M. N. (2023b). Functional nano-silver decorated textiles for wearable electronics and electromagnetic interference shielding. *Materials Today Communications*, 34, 105312. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105312>
159. Su, X., Gu, W., Chen, X., Hua, Y., Yang, J., He, Y., Gu, X., Sun, J., Jing, J., Qi, P., & Zhang, S. (2026). Antioxidant MXene-based flame retardant cotton fabrics for sensing and personal thermal management. *Chemical Engineering Journal*, 540, 177403. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2026.177403>
160. Subošić, D., Stevanović, O., Mijalković, S., Popović, B., Zekavica, R., Ivanović, Z., Kekić, D., Mladjan, D., Vuković, S., & Ljustina, A. (2016). *Procena rizika u zaštiti lica, imovine i poslovanja: priručnik za obuku*. Kriminalističko-policijski univerzitet.
161. Tammer, M. (2004). G. Sokrates: Infrared and Raman characteristic group frequencies: tables and charts. *Colloid and Polymer Science*, 283(2), 235. <https://doi.org/10.1007/s00396-004-1164-6>

162. Thompson, A. L. (2024). New Fire Protection Materials. In X. Huang & W. C. Tam (Eds), *Intelligent Building Fire Safety and Smart Firefighting* (pp. 199–235). Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-48161-1\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-48161-1_9)
163. Traoré, M., Kaal, J., & Martínez Cortizas, A. (2018). Differentiation between pine woods according to species and growing location using FTIR-ATR. *Wood Science and Technology*, 52(2), 487–504. <https://doi.org/10.1007/s00226-017-0967-9>
164. van der Heide, P. (2012). *X-ray photoelectron spectroscopy: an introduction to principles and practices*. John Wiley & Sons.
165. Veerasingam, S., & Venkatachalapathy, R. (2014). Estimation of carbonate concentration and characterization of marine sediments by Fourier Transform Infrared Spectroscopy. *Infrared Physics & Technology*, 66, 136–140. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2014.06.005>
166. Vranić, P., & Mišić, N. (2024). Spatial Distribution Patterns of Wild-Fires Incidents in Serbia Based on VIIRS 375 m Data for the Period 2013-2023. *Facta Universitatis, Series: Working and Living Environmental Protection*, 087. <https://doi.org/10.22190/fuwlep240605008v>
167. Wakelyn, P. J. (2006). *Cotton Fiber Chemistry and Technology*.
168. Wang, S., Xu, W., Hu, Q., & Liu, D. (2026). Fluorine-free waterborne polyurethane coatings with siloxane synergy for sustainable water-repellent textiles. *Progress in Organic Coatings*, 214, 110043. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2026.110043>
169. Waseda, Y., Matsubara, E., & Shinoda, K. (2011). *X-Ray Diffraction Crystallography X-Ray Diffraction Crystallography Introduction, Examples and Solved Problems* (1st ed). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-16635-8>
170. Weiß, C. H., Homburg, A., & Puig, P. (2019). Testing for zero inflation and overdispersion in INAR(1) models. *Statistical Papers*, 60(3), 823–848. <https://doi.org/10.1007/s00362-016-0851-y>
171. Weisstein, E. W. (n.d.). *Kronecker Delta*. MathWorld-A Wolfram Resource. Opgehaal 10 Augustus 2026, van <https://mathworld.wolfram.com/KroneckerDelta.html>
172. Wilson, K. (1979). *A history of textiles*. Westview Press.
173. Wu, D., Li, X., & Zhao, P. (2023). Durable Flame-Retardant Cotton Fabric Modified by a Novel Reactive P-N Intumescent Flame Retardant. *Advances in Polymer Technology*, 2023, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2023/4359057>
174. Xu, R., & Wunsch, D. (2005). Survey of clustering algorithms. In *IEEE Transactions on Neural Networks* (Vol 16, Number 3, bll 645–678). <https://doi.org/10.1109/TNN.2005.845141>

175. Yang, M., & Yuan, B. (2025). Modification of Aluminum Hydroxide by Ball Milling: A Feasible Method to Obtain High-Efficiency Flame Retardants for Production of High-Performance EVA Composites. *Materials*, 18(5). <https://doi.org/10.3390/ma18050984>
176. Yin, Y., Yin, H., Wu, Z., Qi, C., Tian, H., Zhang, W., Hu, Z., & Feng, L. (2019). Characterization of coals and coal ashes with high Si content using combined second-derivative infrared spectroscopy and Raman spectroscopy. *Crystals*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/cryst9100513>
177. Yu, K., & Tao, T. (2023). An Observation-Driven Random Parameter INAR(1) Model Based on the Poisson Thinning Operator. *Entropy*, 25(6), 859. <https://doi.org/10.3390/e25060859>
178. Zhang, C., Tian, G.-L., & Ng, K.-W. (2016). Properties of the zero-and-one inflated Poisson distribution and likelihood-based inference methods. *Statistics and Its Interface*, 9, 11–32.
179. Zhang, C., Tian, G.-L., Yuen, K. C., Wu, Q., & Li, T. (2020). Multivariate zero-and-one inflated Poisson model with applications. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 365, 112356. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2019.112356>
180. Zhang, H., Du, X., Liu, J., Bai, Y., Nie, J., Tan, J., He, Z., Zhang, M., Li, J., & Ni, Y. (2023). A novel and effective approach to enhance the interfacial interactions of meta-aramid fibers. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 120, 244–253. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.12.031>
181. Zhang, J., He, L., Guo, Y., Sun, T., Liu, R., Huang, Y., Shang, F., Tan, T., & Zhou, X. (2026). Hydrophobic flame-retardant polyurethane coating: With fluorinated Graphene/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Microencapsulated APP. *Materialia*, 47, 102767. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2026.102767>
182. Zhang, S., Ren, X., Wang, B., Yuen, R. K. K., & Hu, Y. (2026). Investigation on the fire resistance, mechanical properties, and biodegradability of multifunctional bio-based flame-retardant polyester/nanoclay composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 205, 109694. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2026.109694>
183. Zhang, Z., Yang, T., Zhang, Y., Zhang, H., Tian, C., Qing, Y., Yang, S., & Wu, Y. (2026). In situ construction of Cu-MOF/Ammonium Dihydrogen Phosphate-SiO<sub>2</sub> functional layer in delignified wood towards efficient flame-retardant and smoke-suppression properties. *Composites Communications*, 64, 102793. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2026.102793>

184. Zheng, K., Wang, L., Zhang, X., Zhu, H., Tao, L., Ni, J., & Wu, M. (2026). Wash-free digital inkjet-dyeing of polyester fabric using a polysiloxane–acrylate hybrid emulsion with gradient silicon distribution. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2026.04.022>
185. Zhou, G., Taylor, G., & Polle, A. (2011). FTIR-ATR-based prediction and modelling of lignin and energy contents reveals independent intra-specific variation of these traits in bioenergy poplars. *Plant Methods*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/1746-4811-7-9>
186. Zhu, Z., Ai, Y., Li, M., Sun, H., Jiao, R., Li, J., & Li, A. (2026). High-efficiency flame-retardant microcapsules: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 353, 103885. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2026.103885>
187. Zou, Y., Rasch, P. J., Wang, H., Xie, Z., & Zhang, R. (2021). Increasing large wildfires over the western United States linked to diminishing sea ice in the Arctic. *Nature Communications*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26232-9>
188. Закон о заштити од пожара, Службени гласник РС, бр. 111/2009, 20/2015, 87/2018 и 87/2018 – др. закон (2009).
189. Републички геодетски завод. (n.d.). *Регистар просторних јединица – Управни окрузи*. GeoSrbija. Opgehaal 25 Maart 2026, van <https://a3.geosrbija.rs>

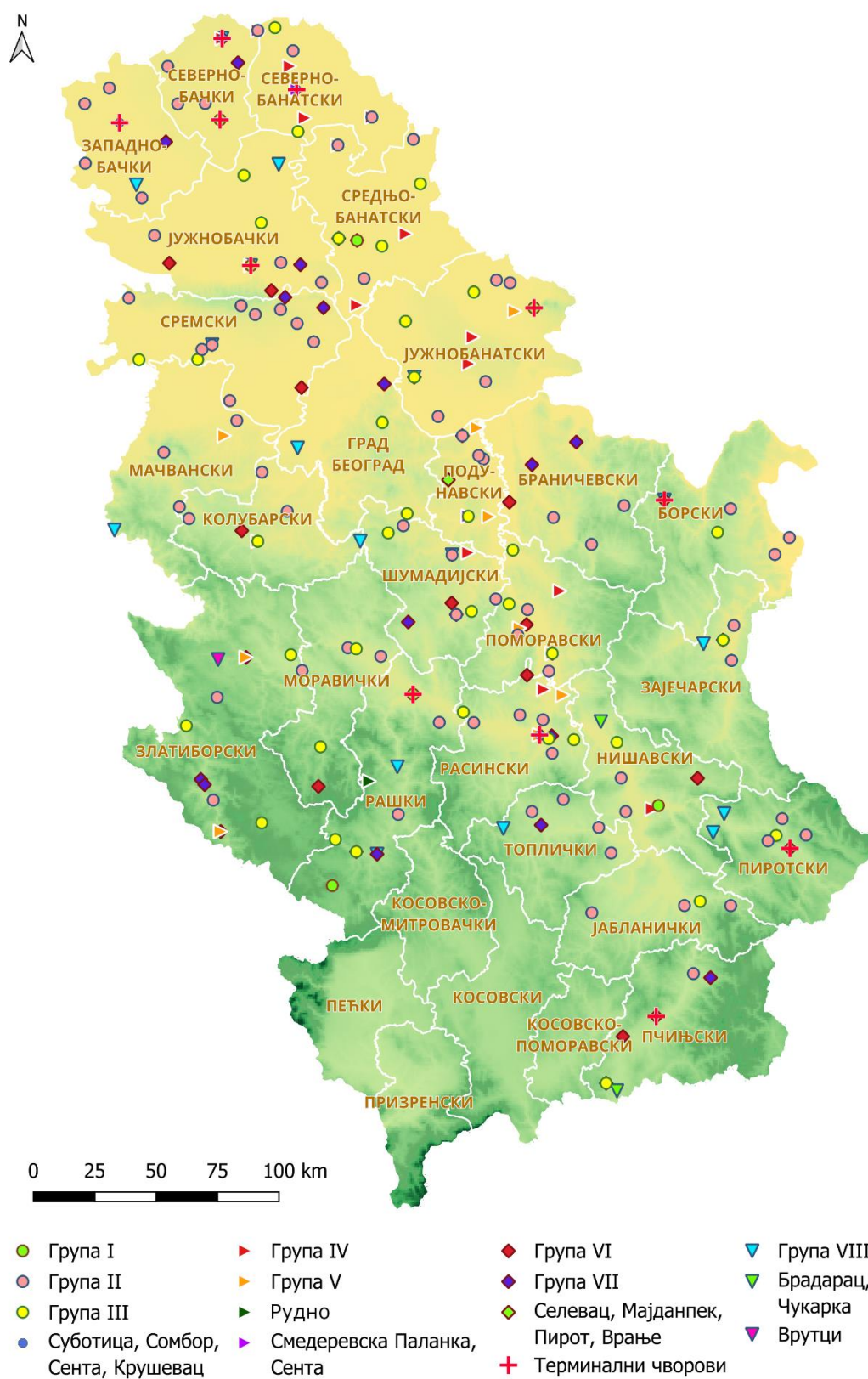
## Ауторски радови

1. **Mitrović, N.**, Stojanović, V. S., Jovanović, M., & Mladjan, D. (2025). Forensic and Cause-and-Effect Analysis of Fire Safety in the Republic of Serbia: An Approach Based on Data Mining. *Fire*, 8(8), 302. <https://doi.org/10.3390/fire8080302> **(M21)**
2. **Mitrović, N.**, Stojanović, V., Jovanović, M., Grujčić, Ž., & Mladjan, D. (2026). Patterns of Human Injuries and Fatalities in Fire Incidents in Serbia: A Comprehensive Statistical and Data Mining Analysis. *Fire*, 9(4), 146. <https://doi.org/10.3390/fire9040146> **(M21)**
3. Stojanović, V. S., **Mitrović, N.**, Tomović, K., Bakouch, H. S., & Alghamdi, S. (2026). Minification Integer-Valued Split-BREAK Process with Power Series Innovations and Application in Fire Safety Dynamics. *Axioms*, 15(6), 388. <https://doi.org/10.3390/axioms15060388> **(M21)**

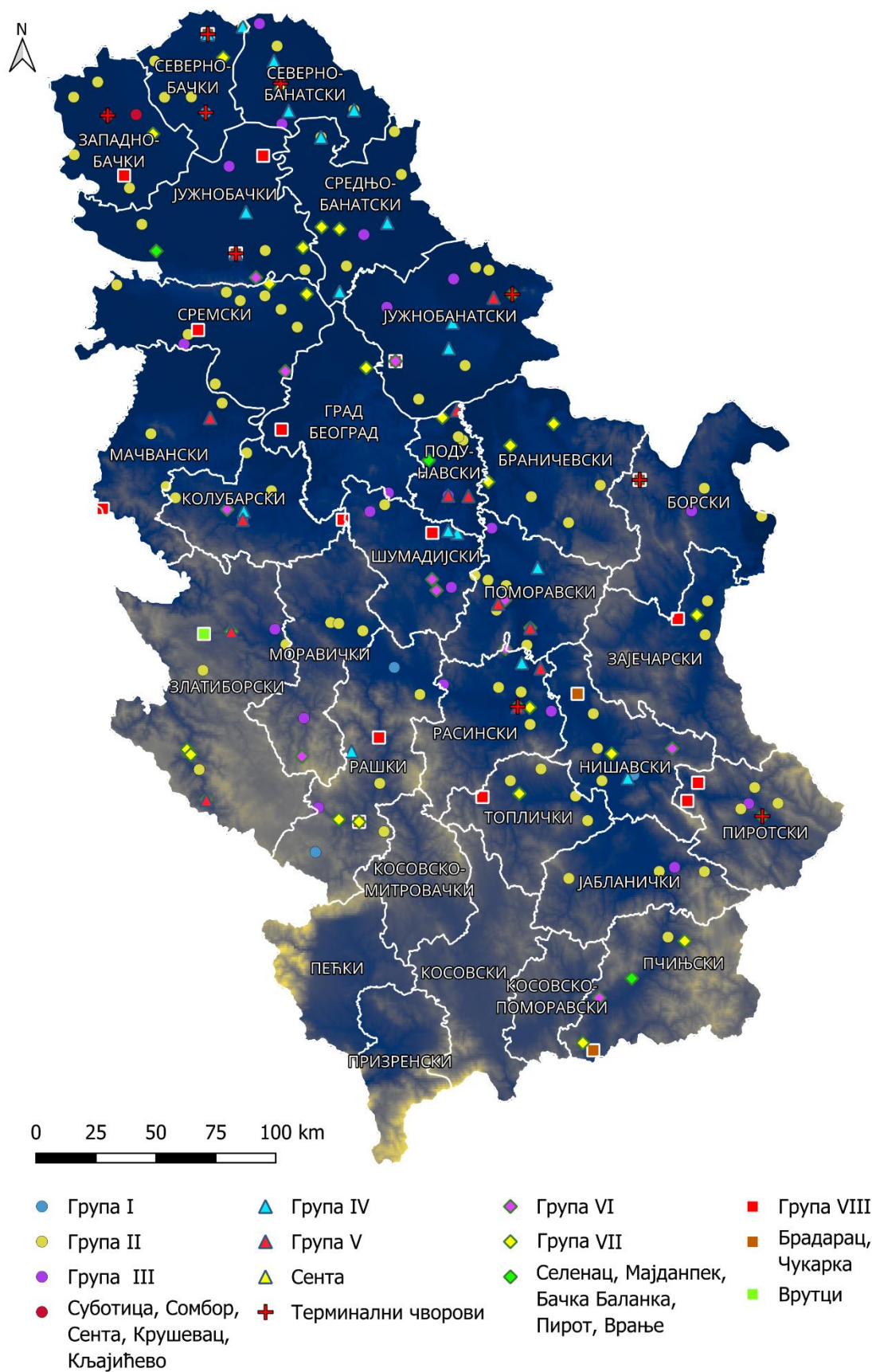
# ПРИЛОЗИ

---

## Прилог 1. Гео-просторне карте

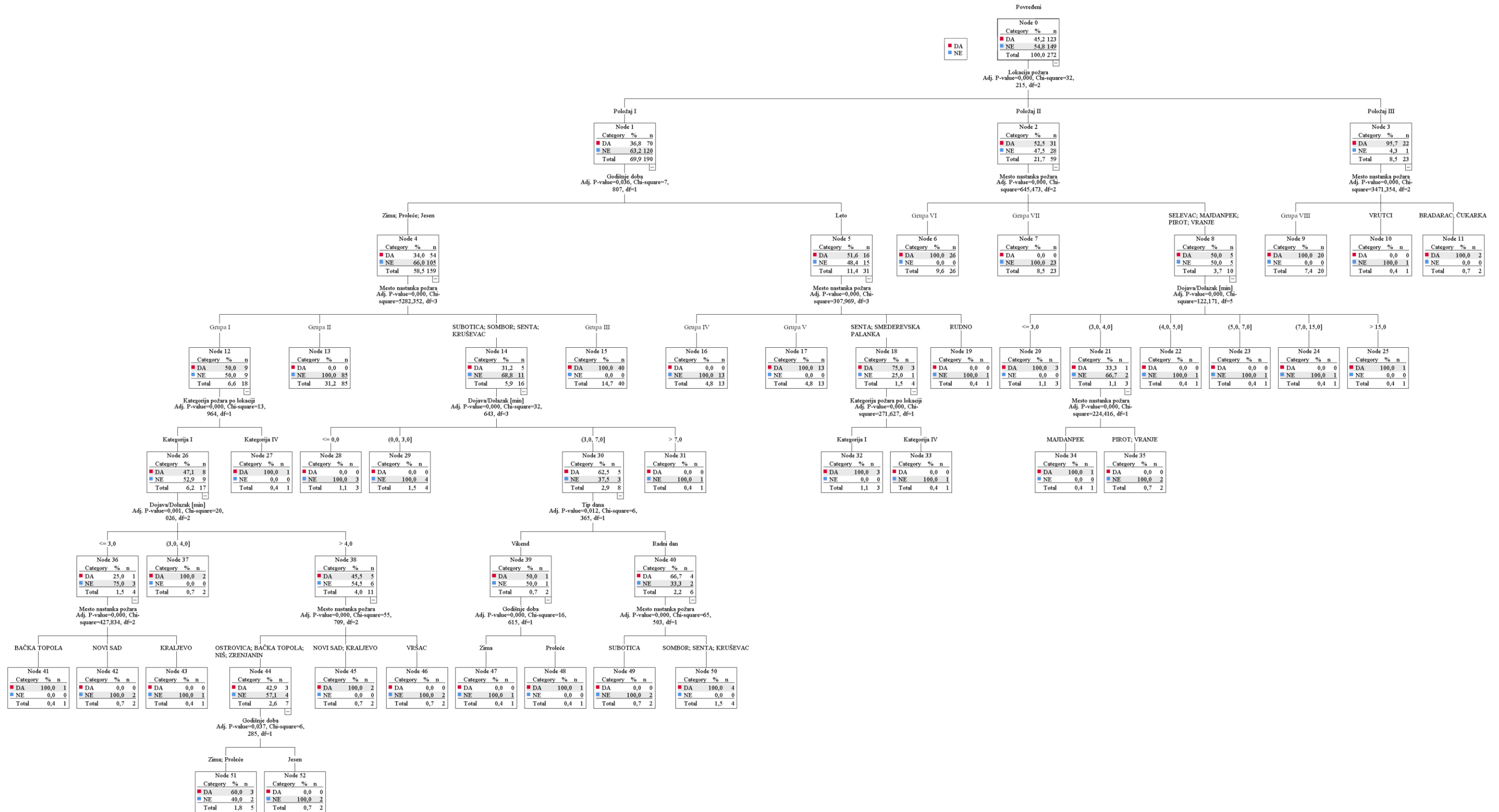


Слика П.1. Мапа насељених места груписаних унутар „Место настанка пожара” променљиве (циљна променљива „Повређени”)

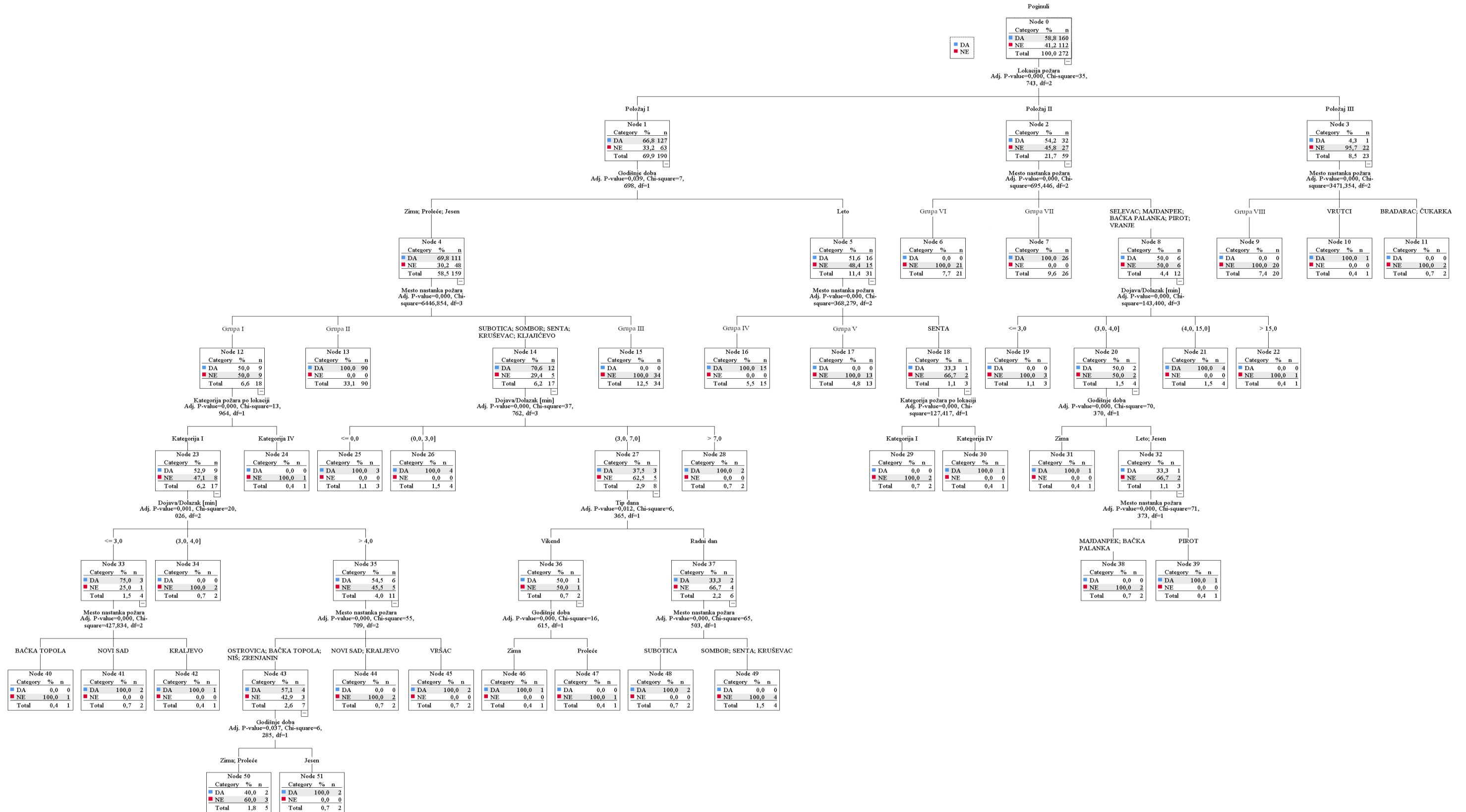


Слика П.2. Мапа насељених места груписаних унутар „Место настанка пожара” променљиве (циљна променљива „Погинули”)

## Прилог 2. Стабла одлучивања (узрок D)

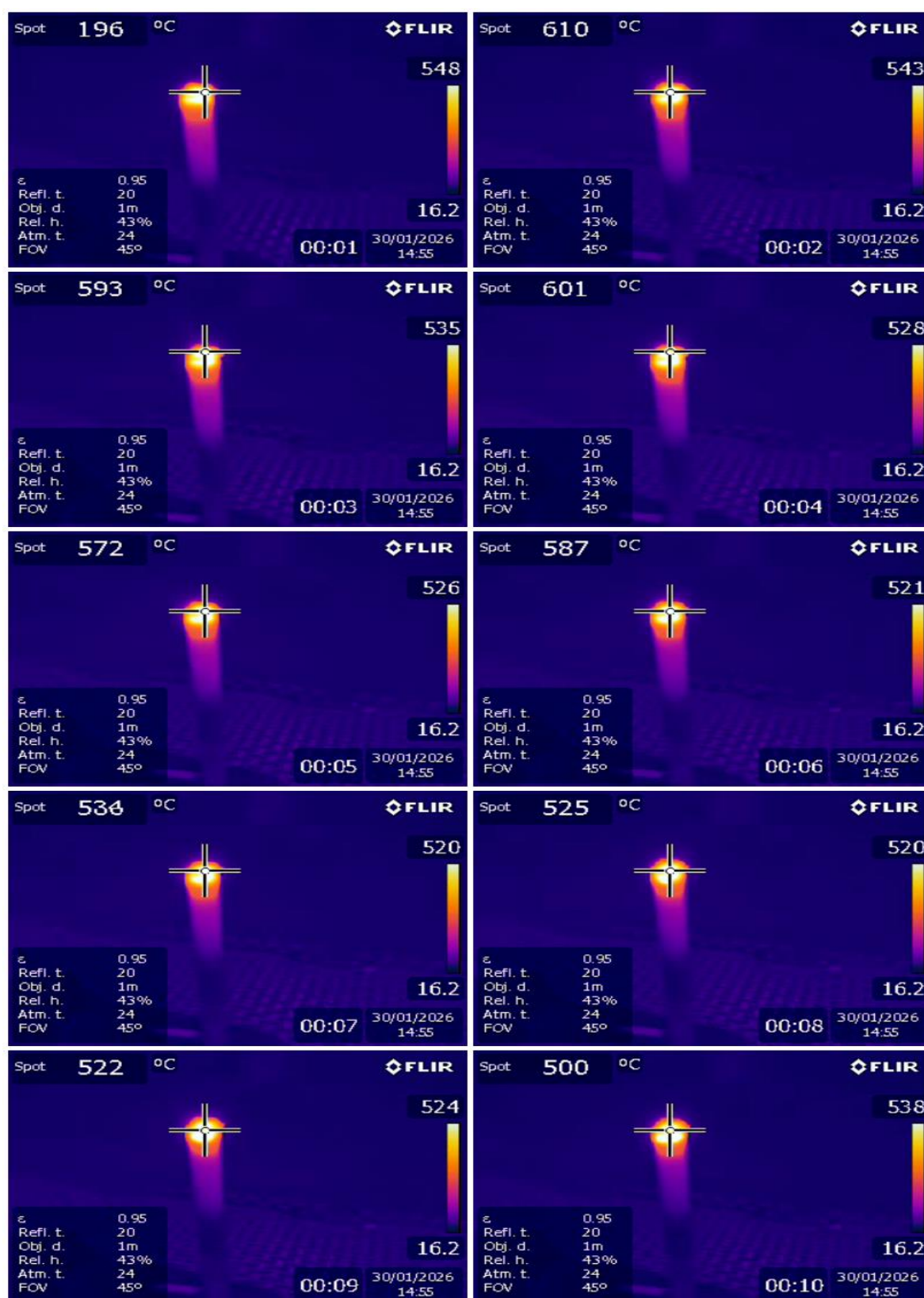


Слика П.3. Стабло одлучивања за циљну променљиву „Повређени” (узрок D)

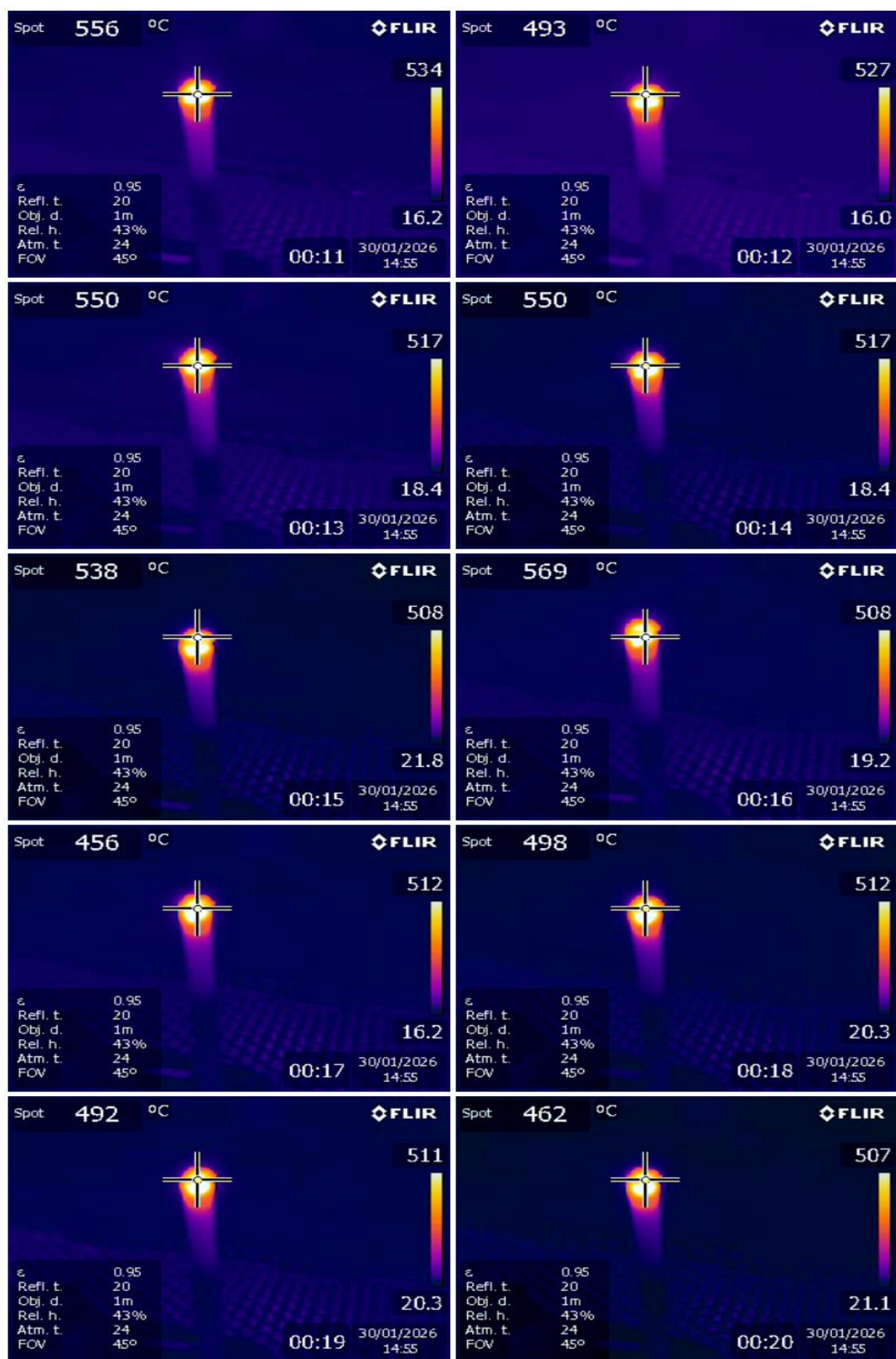


Слика П.4. Стабло одлучивања за циљну променљиву „Погинули” (узрок D)

### Прилог 3. Термовизија жара цигарете



Слика П.5. Термографски приказ промене температуре при тињању цигарете у временском интервалу (0 - 10 s)



Слика П.6. Термографски приказ промене температуре при тињању цигарете у временском интервалу (11 - 20 s)

---

## БИОГРАФИЈА

Никола Б. Митровић, маст. инж. маш., рођен је 27. фебруара 1995. године у Ваљеву. Основне академске студије на смеру Машинско инжењерство на Машинском факултету Универзитета у Београду уписао је школске 2014/2015. године, а завршио 2018. године одбраном дипломског рада под називом „CAD/CAM системи”. Након завршетка основних студија, исте године уписао је мастер академске студије на истом факултету, на смеру Машинско инжењерство, модул Процесна техника и заштита животне средине. Мастер академске студије завршио је у септембру 2022. године одбраном мастер рада под називом „Димензионисање и конструкциона документација уређаја за топљење кристалисаног меда капацитета до 200 kg/h”. Током 2022. године уписао је докторске академске студије на студијском програму „Форензичко инжењерство” на Криминалистичко-полицијском универзитету, где је положио све испите предвиђене планом и програмом са просечном оценом 10,00.

Током професионалног рада био је ангажован у наставним, научноистраживачким и стручним активностима на Криминалистичко-полицијском универзитету, учествујући у реализацији наставних и других академских активности. Континуирано се стручно усавршавао кроз учешће на специјализованим обукама, курсевима и семинарима. Поседује стручне лиценце и положен стручни испит.



## ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Име и презиме аутора: Никола Митровић

Број индекса: 2F1-0003/22

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

**„ПРИМЕНА МЕТОДА МАШИНСКОГ УЧЕЊА У ФОРЕНЗИЧКОЈ АНАЛИЗИ УЗРОКА ПОЖАРА И  
ПОБОЉШАЊЕ ВАТРООТПОРНОСТИ МАТЕРИЈАЛА”**

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

**Потпис аутора**

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ  
ДОКТОРСКОГ РАДА**

Име и презиме аутора: Никола Митровић

Број индекса: 2F1-0003/22

Студијски програм: Докторске академске студије Форензичко инжењерство

Наслов рада: „Примена метода машинског учења у форензичкој анализи узрока пожара и побољшање ватроотпорности материјала”

Први ментор: проф. др Владица Стојановић, ред. професор

Други ментор: доц. др Стеван Ступар

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањења у **Дигиталном репозиторијуму Криминалистичко-полицијског универзитета у Београду.**

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама **Криминалистичко-полицијског универзитета у Београду.**

**Потпис аутора**

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



### Изјава о коришћењу

Овлашћујем библиотеку Криминалистичко-полицијског универзитета да у Дигитални репозиторијум Криминалистичко-полицијског универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

„Примена метода машинског учења у форензичкој анализи узрока пожара и побољшање ватроотпорности материјала”

---

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Криминалистичко-полицијског универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
- ③. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

Потпис аутора

У Београду, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

---

1. **Ауторство.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.