МЕЃУНАРОДЕН СЛАВЈАНСКИ УНИВЕРЗИТЕТ

РЕПУБЛИКА СЕВЕРНА МАКЕДОНИЈА
ФАКУЛТЕТ ЗА ТЕХНИЧКИ НАУКИ И ИНФОРМАТИКА
СТУДИСКА ПРОГРАМА: БЕЗБЕДНОСТ ПРИ РАБОТА

МАГИСТЕРСКА РАБОТА

ИНТЕЛИГЕНТНИ СИСТЕМИ ЗА УПРАВУВАЊЕ СО ПОЖАРНА БЕЗБЕДНОСТ НА ГРАДИЛИШТА. УЛОГАТА НА ВЕШТАЧКАТА ИНТЕЛИГЕНЦИЈА ВО ДИНАМИЧКИ РИЗИЧНИ СРЕДИНИ

СТУДЕНТ: МЕЛИТА РИСТЕСКА
БРОЈ НА ИНДЕКС: M235023
МЕНТОР: ПРОФ. Д-Р. ЦВЕТАНКА МИТРЕВСКА

Битола, 2025



INTERNATIONAL SLAVIC UNIVERSITY

REPUBLIC OF NORTH MACEDONIA
FACULTY OD TEHNICAL SCIENCES AND INFORMATICS
STUDY PROGRAM: OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH

MASTER'S THESIS

INTELLIGENT SYSTEMS FOR MANAGING FIRE SAFETY AT CONSTRUCTION SITES: THE ROLE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN DYNAMIC RISK ENVIRONMENTS

STUDENT: MELITA RISTESKA

INDEX NUMBER: M235023

MENTOR: PROF. DR. CVETANKA MITREVSKA

Bitola, 2025

АПСТРАКТ

Современите градилишта претставуваат исклучително комплексни и динамички работни средини, каде што ризикот од појава и ширење пожари е постојано присутен. Застарените, реактивни системи за заштита од пожари сè почесто се покажуваат како недоволни во справувањето со предизвиците што ги носи брзиот технолошки развој и зголемената урбанизација. Во тој контекст, интеграцијата на вештачката интелигенција (ВИ) и интелигентни системи за управување со пожарна безбедност се наметнува како стратешки неопходна.

Овој магистерски труд има за цел да ја истражи улогата и потенцијалот на ВИ во динамички ризични средини, со акцент на градежниот сектор како една од најранливите индустрии.

Трудот опфаќа сеопфатна анализа на современи технологии како Интернет на нештата (IoT), дигитални близнаци, машинско учење, BIM (Building Information Modeling), како и генеративни ВИ-модели за симулација на пожарни сценарија. Преку реалновременска детекција, предиктивна анализа и автоматизирана евакуација, овие технологии овозможуваат системско, приспособливо и превентивно управување со ризици. Посебно внимание се посветува на нормативните и организациските предуслови за успешна имплементација, како и на предизвиците поврзани со етичките дилеми, сајбер безбедноста и трошоците за дигитална трансформација.

Со комбинирање на теоретски сознанија, емпириски примери и анализи на добри практики, трудот демонстрира дека интелигентните системи не само што овозможуваат побезбедна и поефикасна градителска околина, туку претставуваат клучна алатка за унапредување на општата култура на безбедност и намалување на пожарните загуби во урбаните и во индустриските средини.

Клучни зборови: вештачка интелигенција, пожарна безбедност, градилишта, интелигентни системи, детекција на пожар, пожарна превенција, автоматизирана евакуација, индустрија 4.0.

ABSTRACT

Modern construction sites represent highly complex and dynamic working environments where the risk of the fire occurrence and spread is constantly present. Outdated, reactive fire protection systems are increasingly proving inadequate in addressing the challenges posed by rapid technological advancement and growing urbanization. In this context, the integration of artificial intelligence (AI) and intelligent fire safety management systems emerges as a strategic necessity.

This master's thesis aims to explore the role and potential of AI in dynamically hazardous environments, with a particular focus on the construction sector as one of the most vulnerable industries. The study provides a comprehensive analysis of modern technologies such as the Internet of Things (IoT), digital twins, machine learning, Building Information Modeling (BIM), and generative AI models for simulating fire scenarios. Through real – time detection, predictive analysis, and automated evacuation, these technologies enable systemic, adaptive, and predictive risk management. Special attention is given to the regulatory and organizational prerequisites for successful implementation, as well as to the challenges related to ethical dilemmas, cybersecurity, and the costs of digital transformation.

By combining theoretical insights, empirical examples, and analyses of best practices, the thesis demonstrates that intelligent systems not only contribute to a safer and more efficient construction environment but also represent a key tool for advancing the overall safety culture and reducing fire – related losses in urban and industrial settings.

Keywords: artificial intelligence, fire safety, construction sites, intelligent systems, fire detection, fire prevention, automated evacuation, industry 4.0.

СОДРЖИНА

ВОВЕД 1

I. ТЕОРЕТСКИ ДЕЛ 3

1.1. Пожарна безбедност на градилишта: ризици и предизвици 3

1.1.1. Видови пожари и фазите со највисок ризик 6

1.1.2. Човечки и технички фактори 7

1.1.3. Регулаторна рамка и стандарди за заштита од пожари 8

1.2. Современи предизвици во градежната индустрија поврзани со безбедноста 8

1.2.1. Урбаната експанзија и комплексноста на објектите 9

1.2.2. Недостаток на брза реакција и одржливи решенија 10

1.3. Основи на вештачката интелигенција и нејзината технолошка рамка 11

1.3.1. Дефиниции и главни правци во развојот 13

1.3.2. Машинско и длабоко учење 14

1.3.3. Примена на IoT и сензорски мрежи во безбедносни системи 16

1.4. Интелигентни системи за предикција и интервенција 17

1.4.1. Прогнозирање пожарни сценарија 19

1.4.2. Реалновременска анализа и автоматизирани аларми 21

1.4.3. Интегрирани системи со прилагодливо учење 22

1.4.4. Примери од практиката 23

1.5. BIM, дигитални близнаци и нивна примена во управување со ризици 29

1.5.1. Улогата на BIM во симулација и визуализација 30

1.5.2. Дигитални близнаци и динамичко следење параметри 32

1.6. Организациска структура и менаџмент на безбедноста 34

1.6.1. Инженерот за безбедност како дел од дигиталниот систем 36

1.6.2. Управување со податоци и донесување одлуки 38

1.6.3. Етички и законски аспекти при користење интелигентни технологии 41

1.7. Улогата на вештачката интелигенција во иднината на пожарната безбедност 45

1.7.1. Потенцијали и ризици од автоматизацијата 45

1.7.2. Перспективи за интегрирани системи на интелигентна заштита 48

II. Методолошки пристап на истражувањето 50
2.1. Појава на истражувањето 50
2.2. Предмет на истражувањето 51
2.3. Цел на истражувањето 52
2.4. Користени методи во истражувањето 54
2.4. Хипотетичка рамка 56
III. Анализа на истражувањето 58
3.1. Презентација на резултатите од анкетниот прашалник 58
3.2. Тестирање хипотези 84
3.3. Дискусија 86
ЗАКЛУЧОК 89
КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА 93
ПРИЛОЗИ 99

ЛИСТА НА СЛИКИ

Слика бр. 1. Пожар на градилиште ……3

Слика бр. 2. Човечка грешка и техничка небезбедност при ракување со пламен ……7

Слика бр. 3. Архитектура на интелигентен систем ……12

Слика бр. 4. Паметна детекција и автоматски одговор на пожарен ризик ……15

Слика бр. 5. IoT-мрежа за рана детекција на пожар на градилиште ……16

Слика бр. 6. Шематски приказ на интелигентен систем за предикција и интервенција при пожар ……18

Слика бр. 7. Симулација со компјутерска динамика на флуиди (CFD) за предвидување ширење чад и топлина во затворен простор ……20

Слика бр. 8. Анализа на евакуација во подземна инфраструктура ……25

Слика бр. 9. Дигитален близнак за следење пожарни ризици на градилиште ……32

Слика бр. 10. Улогата на инженерот за безбедност во дигитален градежен систем.....36

Слика бр. 11. Етички и законски аспекти при примена на ВИ во безбедноста на градилиштата ……42

ЛИСТА НА ТАБЕЛИ

Табела бр. 1. Фази на градба и пожарни ризици ……..6

Табела бр. 2. Разлика меѓу традиционалниот и интелигентниот систем ……..11

Табела бр. 3. Карактеристики на реалновременски алармни системи ……..21

Табела бр. 4. Потенцијали и ризици од автоматизацијата ……..46

Табела бр. 5. Прашање 1. ……..57

Табела бр. 6. Прашање 2. ……..58

Табела бр. 7. Прашање 3. ……..60

Табела бр. 8. Прашање 4. ……..61

Табела бр. 9. Прашање 5. ……..62

Табела бр. 10. Прашање 6. ……..64

Табела бр. 11. Прашање 7. ……..65

Табела бр. 12. Прашање 8. ……..66

Табела бр. 13. Прашање 9. ……..68

Табела бр. 14. Прашање 10. ……..69

Табела бр. 15. Прашање 11. ……..70

Табела бр. 16. Прашање 12. ……..71

Табела бр. 17. Прашање 13. ……..73

Табела бр. 18. Прашање 14. ……..74

Табела бр. 19. Прашање 15. ……..75

Табела бр. 20. Прашање 16. ……..77

Табела бр. 21. Прашање 17. ……..78

Табела бр. 22. Прашање 18. ……79

ЛИСТА НА ДИЈАГРАМИ

Дијаграм бр. 1. Градежна површина на јавни објекти во Кина (2013 – 2021) ……4

Дијаграм бр. 2. Глобален раст на урбана популација (2020 – 2025) ……10

Дијаграм бр. 3. Организациска структура за дигитално управување со безбедноста на градилиштата ……35

Дијаграм бр. 4. Процес на дигитално управување со податоци и донесување одлуки во градежната безбедност ……39

Дијаграм бр. 5. Прашање 1. ……58

Дијаграм бр. 6. Прашање 2. ……59

Дијаграм бр. 7. Прашање 3. ……60

Дијаграм бр. 8. Прашање 4. ……61

Дијаграм бр. 9. Прашање 5. ……63

Дијаграм бр. 10. Прашање 6. ……64

Дијаграм бр. 11. Прашање 7. ……65

Дијаграм бр. 12. Прашање 8. ……67

Дијаграм бр. 13. Прашање 9. ……68

Дијаграм бр. 14. Прашање 10. ……69

Дијаграм бр. 15. Прашање 11……70

Дијаграм бр. 16. Прашање 12. ……72

Дијаграм бр. 17. Прашање 13. ……73

Дијаграм бр. 18. Прашање 14. ……74

Дијаграм бр. 19. Прашање 15. ……75

Дијаграм бр. 20. Прашање 16. ……77

Дијаграм бр. 21. Прашање 17. ……78

Дијаграм бр. 22. Прашање 18. ……80

ЛИСТА НА ПРИЛОЗИ

Анкетен прашалник ……96

ВОВЕД

Пожарната безбедност претставува фундаментален аспект од современото урбано живеење и градежништвото, со суштинско значење за заштита на човечки животи, имот и животна средина. Зголемената урбанизација, технолошкиот напредок и појавата на комплексни и високи објекти значително го усложнија управувањето со пожарните ризици. Во тој контекст, традиционалните системи за заштита од пожари, кои се темелат врз рачни аларми, периодични технички прегледи и статички евакуациски протоколи, сè почесто се покажуваат како недоволни во справувањето со предизвиците на новото дигитално време.

Индустриската револуција 4.0 донесе сериозна дигитална трансформација во речиси сите сектори, вклучително и во градежништвото. Поимите како паметни градови, паметни згради и паметна инфраструктура стануваат реалност, а во тој развоен процес, пожарната безбедност зазема централна улога. Модерните објекти не се само функционални структури, туку комплексни технолошки системи коишто бараат интегрирани и проактивни решенија за идентификација, превенција и справување со пожари. Во таа насока, вештачката интелигенција (ВИ), Интернетот на нештата (IoT), облачните технологии и дигиталните близнаци се наметнуваат како нови алатки коишто ја менуваат парадигмата на управување со пожарна безбедност.

Интегрирањето на ВИ во системите за заштита од пожари овозможува реалновременска детекција на опасности, предиктивна анализа на големи податоци и автоматизирано управување со итни состојби. Овие технологии овозможуваат идентификација на промени во температурата, присуство на гасови, електрични дефекти и други индикатори на пожар, со што значително се скратува времето на интервенција и се подобрува координацијата на службите за спасување. Преку IoT-сензори и интелигентни мрежи, овие системи создаваат интерконектирана средина што го унапредува квалитетот на набљудувањето, одржувањето и евакуацијата.

Искуствата од развиените земји, како што се Кина и САД, покажуваат различни модели на имплементација на Индустрија 4.0 во доменот на пожарната безбедност. Додека Кина се фокусира на централно планирана дигитализација преку стратегијата „Made in

China 2025“, со силен акцент на автоматизација и аналитика, САД развиваат пофлексибилен пристап базиран на приватни иницијативи, големи податоци и предиктивни модели. И во двата случаи, резултатите укажуваат на зголемена ефикасност, подобра координација и намалување на ризиците од катастрофални пожарни настани.

Покрај технолошките придобивки, примената на ВИ во пожарната безбедност претставува и клучен придонес кон реализацијата на Целите за одржлив развој (SDGs) на Обединетите Нации, особено Цел 9 (индустрија, иновации и инфраструктура) и Цел 11 (одржливи градови и заедници). Со тоа, дигиталната трансформација не се третира само како технолошка неопходност, туку и како социјална одговорност.

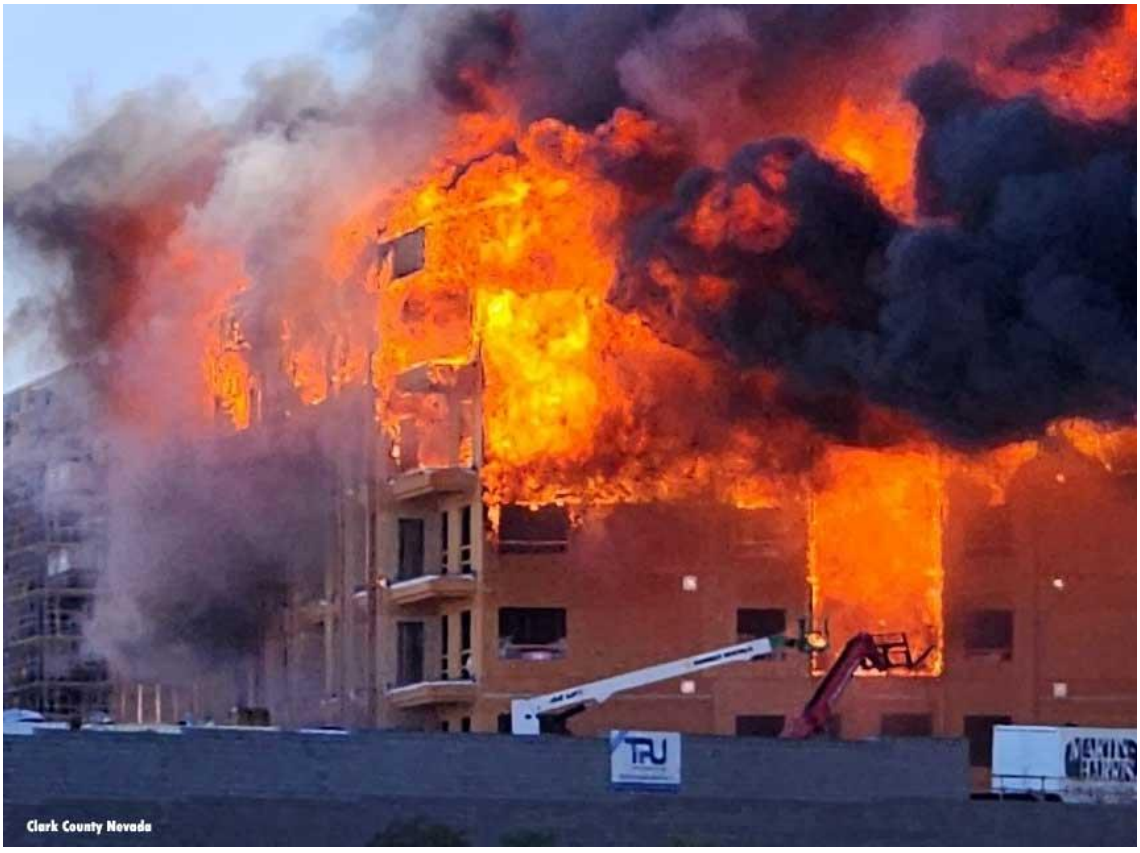
Меѓутоа, предизвиците не се занемарливи. Сè уште постојат правни, етички, организациски и технички бариери за целосна имплементација на овие технологии. Потребно е зголемено знаење и свест кај инженерите, архитектите, менаџерите на објекти и противпожарните служби за користење алатки базирани на ВИ. Исто така, високите трошоци за иницијална имплементација и одржување, како и загриженоста за сајбер безбедноста, бараат системско решение на ниво на држава и институции.

Во тој контекст, овој магистерски труд има за цел да го анализира потенцијалот на интелигентните системи базирани на ВИ во доменот на управување со пожарна безбедност на градилишта – простори коишто по својата природа се динамички, нестабилни и со висок степен на ризик. Преку преглед на современи научни трудови, анализа на применети технологии, како и студии на случај, ќе се разгледаат придобивките, ограничувањата и идните насоки во користењето на ВИ за унапредување на безбедносната култура и превенција на пожари во урбани и индустриски средини.

I. ТЕОРЕТСКИ ДЕЛ

1.1. Пожарна безбедност на градилишта: ризици и предизвици

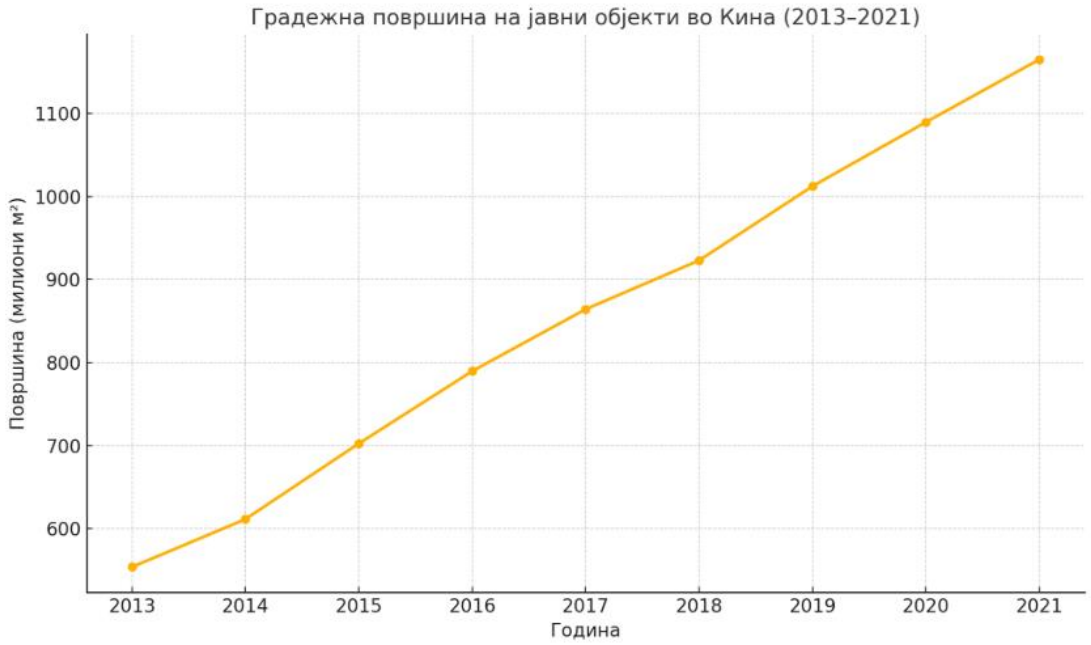
Градилиштата, како отворени и динамични простори, се карактеризираат со зголемен степен на ранливост на пожар поради специфичната организација, постојаните промени во структурата и употребата на разновидни материјали и машини. Во споредба со завршени објекти, тие претставуваат високоризично окружување во кое коегзистираат повеќе извори на потенцијална опасност: запаливи градежни материјали, нестабилни електрични инсталации, отворени извори на оган, складирани гасови под притисок, па дури и човечки фактор како резултат на непочитување на протоколи. Овие ризици значително се зголемуваат во услови на интензивна урбанизација, каде што темпото на градба го надминува капацитетот на институциите за контрола и превенција.



Слика бр. 1. *Пожар на градилиште*

Во последната деценија, како резултат на економскиот раст и демографските промени, се бележи значително зголемување на изградба на јавни објекти со голема

површина. Овој тренд, особено изразен во земји со интензивна урбанизација, како Кина, не само што ги зголемува архитектонските и инженерските барања, туку и го проширува опсегот на потенцијални пожарни сценарија. Податоците покажуваат дека вкупната градежна површина на јавни објекти во Кина се зголемила од 553,63 милиони $м^2$ во 2013 година на 1.165,30 милиони $м^2$ во 2021 година, што претставува речиси дуплирање на површината во помалку од една деценија.



Дијаграм бр. 1. *Градежна површина на јавни објекти во Кина (2013 – 2021)*

Се разбира, зголемувањето на физичкиот обем на градби не е единствениот предизвик. Современите јавни објекти се одликуваат со комплексни конфигурации, мултифункционални простори и интензивна човечка фреквенција, што значи дека и најмалиот пожар може да има катастрофални последици. Противпожарната безбедност на овие локации бара нов пристап, кој надминува пасивни мерки како што се поставување хидрантски мрежи и апарати за гаснење. Се јавува потреба од интегрирани системи за рана детекција, динамична процена на ризик и брза евакуација, особено на градилишта каде што секојдневно се менуваат условите и распоредот.

Токму ваквите предизвици доведуваат до постепено напуштање на традиционалните нормативни решенија и ориентација кон пристапот базиран на перформанси (Performance – Based Design – PBD). Овој метод овозможува дизајнирање и тестирање безбедносни

решенија преку симулации, моделирање проток на чад и оган, како и анализа на човечко движење за време на евакуација. Алатките како CFD (Computational Fluid Dynamics), Pathfinder, FDS (Fire Dynamics Simulator) и други се веќе општо прифатени во инженерската практика. Тие овозможуваат изработка на сценарија за различни видови пожари, процена на време за евакуација и испитување на системите за контрола на чад. Меѓутоа, нивната примена бара висока стручност, ресурси и време, што често ги ограничува малите проектантски бироа и новите инженери.

Дополнително, веродостојноста на овие модели честопати се доведува во прашање, бидејќи симулациите се изведуваат врз база на претходно дефинирани сценарија, кои не можат секогаш да ја претстават реалната состојба. Ограничувањата на моделите, недостигот од стандардизација во користењето на софтверските параметри, како и потребата од обемна експертиза при верификација на резултатите, ја прават PBD-методологијата скапа и неретко недостапна. Сепак, нејзината вредност во подигањето на стандардите за безбедност е неспорна, особено во сложени објекти и урбани градилишта каде што класичните пристапи не обезбедуваат доволно прецизна анализа на ризикот.

Во таа насока, расте интересот за примена на вештачката интелигенција во поддршка на противпожарното инженерство. Новите истражувања покажуваат дека со користење генеративни модели – како GAN (Generative Adversarial Networks) и дифузиски алгоритми – може да се предвидат сценарија на ширење пожар со точност слична на CFD-симулациите, но за далеку пократко време и со значително пониски трошоци. На пример, системи тренирани без база на симулации на 30 различни архитектонски распореди покажале висока прецизност во предвидувањето на дистрибуцијата на чад и температура, користејќи метрики како NRMSE и SSIM. Ова отвора врата кон поинтегрирана и реално променлива анализа, која може да се искористи уште во раната фаза на дизајн или секојдневно надгледување на ризикот.

Покрај тоа, потребно е институционално приспособување – преку создавање правна рамка што ќе ги препознае овие нови технологии, како иницијативи за обучување инженери во користење вакви системи. Соодветна регулатива, комбинирана со технолошки напредок и квалитетно образован кадар, може да создаде суштинска трансформација на пристапот

кон пожарната безбедност на градилиштата, притоа зачувувајќи човечки животи и значително намалувајќи економски штети.

1.1.1. Видови пожари и фазите со највисок ризик

Пожарите на градилиштата можат да се класифицираат според изворот, обемот и фазата на градба во која се јавуваат. Најчести видови вклучуваат пожари предизвикани од електрични инсталации, пожари при работа со отворен пламен (заварување, сечење), пожари од запаливи течности и гасови, како и пожари поврзани со складирање и несоодветна манипулација на материјали. Највисок ризик се јавува за време на фазите кога се вршат инсталациски работи – електрични, гасовни и вентилациски – бидејќи токму тогаш градилиштето е полно со запаливи материјали, кабли под напон, отворени електрични приклучоци и често отсуство на системи за автоматска детекција и гаснење.

Пожарниот ризик не е рамномерно распределен низ сите фази на изградба. Ризикот е највисок во фазите кога се вршат внатрешни и завршни работи, бидејќи во тој период се присутни лесно запаливи супстанци како бои, лакови и растворувачи. Дополнително, честопати на градилиштата нема системи за контрола на искри, се работи со незаштитени извори на пламен, а временските инсталации за струја не се заземени или заштитени од кратки споеви.

Фаза на градба	Видливи ризици од пожар	Ниво на ризик
Припремни работи (чистење, копање, поставување основа)	Согорлив отпад, неовластено горење	Средно
Конструктивна фаза (армировка, бетонирање, поставување скеле)	Искри при сечење, заварување, кабли на отворено	Високо
Инсталации и внатрешни работи (електрика, гас, вентилација)	Електрични дефекти, истекување гас	Многу високо
Фаза на завршни работи (декорација, бојадисување, монтажа)	Лак, растворувачи, бои – испарливи материи	Високо
Складирање материјали и машинерија на самото место	Лошо складирање на запаливи материи, преполни површини	Средно Високо

Табела бр. 1. *Фази на градба и пожарни ризици*

Оваа табела дава систематски преглед на фазите во кои ризикот од пожар е највисок, заедно со конкретни примери за типични извори на пожар во секоја фаза и процена на нивото на ризик.

1.1.2. Човечки и технички фактори

Пожарната безбедност на градилиштата не зависи единствено од инсталираните технички системи, туку во голема мера и од човечкиот фактор. Грешките направени од работниците, неконтролираното користење алати што генерираат искри, игнорирањето на безбедносни процедури и непознавањето на планот за евакуација се едни од најчестите причини за настанување или ескалација на пожари. Недоволното обучување на персоналот, недостатокот на редовна обука за работа со запаливи материјали, како и слабата култура за безбедност, создаваат услови за зголемен ризик.

Од технички аспект, чест предизвикувач на пожар се времено поставените електрични инсталации коишто не се во согласност со прописите, неисправни продолжителни кабли, приклучоци без заземјување, како и застарена или импровизирана опрема. Инсталации за гас коишто не се адекватно затворени или проверени, исто така претставуваат сериозен ризик. Отсуството на рани детекциски системи и неадекватно позиционирани апарати за гаснење уште повеќе ја усложнуваат состојбата.



Слика бр. 2. *Човечка грешка и техничка небезбедност при ракување со пламен*

1.1.3. Регулаторна рамка и стандарди за заштита од пожари

Правната и техничката регулатива поврзана со пожарната безбедност на градилиштата претставува основа за системско управување со ризик. Во повеќето држави, вклучително и Република Северна Македонија, постојат законски обврски за изработка на процена на ризик, поставување план за евакуација, обезбедување противпожарна опрема и обучување на работниците. Законот за заштита и спасување, Законот за безбедност и здравје при работа, како и различни правилници и технички стандарди го дефинираат минимумот што треба да се почитува на градилиште.

Меѓутоа, проблемот не е секогаш во отсуство на прописи, туку во нивната примена на терен. Честопати, инвеститорите и изведувачите гледаат на безбедноста како на дополнителен трошок, а не како на суштинска компонента на проектот. Надзорните тела се соочуваат со ограничени ресурси и кадровски капацитет, поради што спроведувањето на инспекциски надзор е селективно. Во таа насока, потребна е не само ревизија и усогласување со европските и меѓународните регулативи, туку и создавање култура на одговорност, каде што сите чинители (работници, инженери, надзор, инвеститори) се свесни за својата улога во превенцијата од пожари.

1.2. Современи предизвици во градежната индустрија поврзани со безбедноста

Современата градежна индустрија функционира во контекст на драматични трансформации коишто произлегуваат од динамиката на технолошкиот напредок, интензивната урбанизација, порастот на побарувачката за комплексни инфраструктурни објекти и зголемените еколошки и социјални очекувања. Безбедноста на градилиштата, која во минатото се третирала како техничка дисциплина ограничена на минимални законски обврски и употреба на основна заштитна опрема, денес мора да се реинтерпретира како клучен стратешки сегмент на одржливото инженерство и управувањето со ризик.

Пожарната безбедност, како дел од поширокиот систем на здравје и безбедност при работа, се соочува со сè посложени предизвици коишто произлегуваат од новите начини на градење – како што се интегрирани функционални простори, употреба на леснозапаливи композитни материјали и инсталација на иновативни системи за климатизација, енергетска ефикасност и интелигентна автоматизација. Во ваков контекст, класичните методи за

идентификација на ризик, процена на ризик и заштитни мерки стануваат недоволни. Потребна е севкупна парадигма којашто ќе го вклучи концептот на предиктивно управување со ризик, засновано врз реални податоци, дигитални симулации и безбедносни технологии.

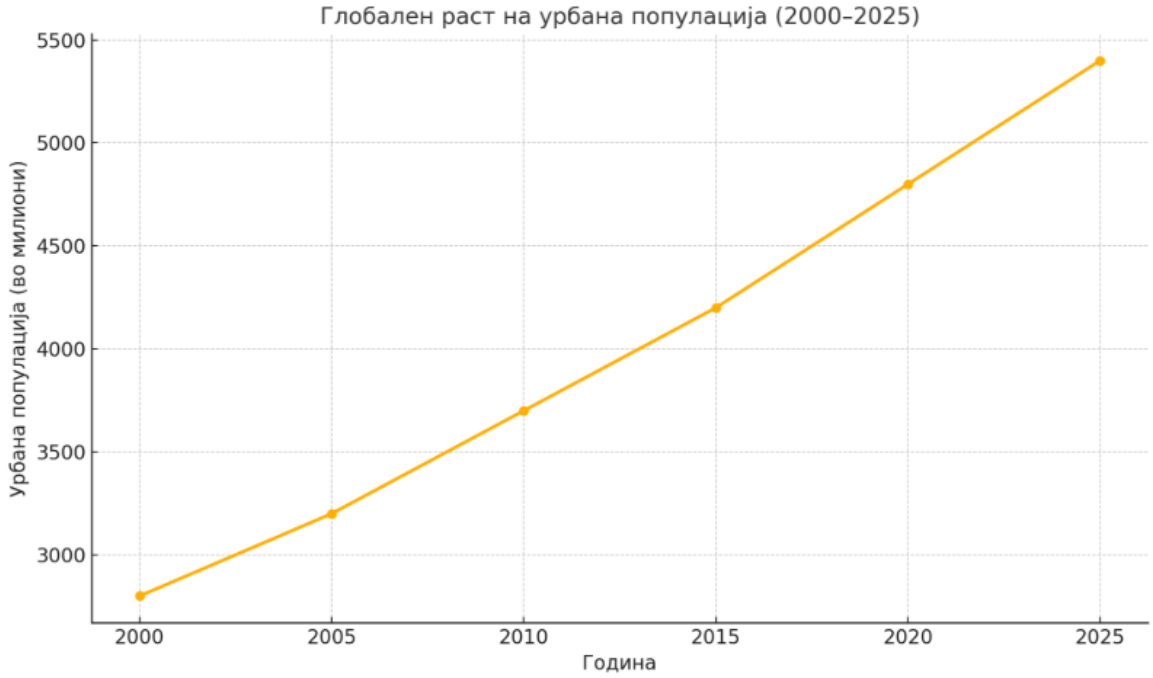
Во продолжение ги обработувам двете особено значајни димензии на современите безбедносни предизвици: прво, влијанието на урбаната експанзија и архитектонско-инженерската комплексност на објектите, и второ, потребата од навремена реакција и примена на одржливи, технолошки засновани решенија при заштита од пожари.

1.2.1. Урбаната експанзија и комплексноста на објектите

Во последните децении, урбаната експанзија прерасна во глобален феномен што суштински го трансформира начинот на планирање, проектирање и изведба на објекти. Според проценитe на Обединетите нации, над 68 насто од светското население ќе живее во урбани средини до 2050 година, што резултира со сè поголема концентрација на луѓе, ресурси и функции во ограничен простор. Како одговор на ваквиот тренд, современите објекти не само што стануваат поголеми и повисоки, туку се и сè поинтегрирани, комбинирајќи во себе комерцијални, станбени, административни и технолошки функции.

Таквата комплексност на архитектонско-инженерски решенија отвора низа прашања поврзани со управувањето со ризици, особено во доменот на пожарната безбедност. Градилиштата во густо населени подрачја не дозволуваат импровизација: пристапот до објектите е ограничен, логистичките коридори се тесни, а евакуацијата на работниците во случај на пожар е исклучително тешка. Дополнително, современите фасадни системи, инсталациски шуплини и употребата на синтетички материјали често го зголемуваат пожарниот товар и ја забрзуваат брзината на ширење на пожарот.

Примената на традиционални методи за процена на безбедност станува несоодветна во вакви контексти. Наместо тоа, неопходно е користење на симулациски алатки за моделирање ширење чад, динамика на евакуација и сценарија за интервенција. Особено внимание треба да се посвети во почетните фази на проектирање, кога преку интеграција на пожарната безбедност во концептниот дизајн може да се намали потребата од скапи и тешко применливи решенија во продолжените фази на изградба.



Дијаграм бр. 2. *Глобален раст на урбана популација (2020 – 2025)*

1.2.2. Недостаток на брза реакција и одржливи решенија

Пожарите што се јавуваат на градилиштата често се карактеризираат со брзо ширење и неконтролирана динамика, при што секунда може да биде пресудна. Потребата од брза и прецизна реакција е очигледна, но реалноста на теренот честопати покажува недостаток на функционални и автоматизирани системи за рано откривање, алармирање и интервенција. Во отсуство на овие системи, одговорот зависи исклучиво од човечкиот фактор – кој, и покрај најдобрите намери, е подложен на грешки, паника и доцнење.

Овој недостаток е особено изразен во услови кога системите за гаснење се дизајнирани со фокус на економичност, а не на ефективност и еколошка одржливост. Корисниците сè почесто се соочуваат со несоодветно активирани прскалки, системи коишто користат средства штетни по животната средина, или, пак, недоволна интегрираност меѓу сензорските единици и алатките за дејствување. Во такви услови, не само што се намалува ефикасноста на реакцијата, туку и се зголемува штетата по инфраструктурата и околината.

Примена на интелигентни решенија, како што се Internet of Things (IoT)-уреди, приспособливи системи за алармирање за анализа на податоци во живо, нуди нови можности за рано препознавање закани и избор на најсоодветна стратегија за одговор. Со

овие технологии, можна е автоматска активација на прецизни интервенции – со минимална потрошувачка на ресурси и ограничено влијание врз човечкиот фактор. Овој пристап го надминува класичниот концепт на заштита и овозможува премин кон „интелигентна безбедност“, заснована врз анализа, предизвикување и контрола.

ТРАДИЦИОНАЛЕН СИСТЕМ	ИНТЕЛИГЕНТЕН СИСТЕМ
Рачна детекција	Напредна сензорска детекција
Реакција заснована врз правила	Анализа на податоци во реално време
Периодична инспекција	Континуирано следење

Табела бр. 2. *Разлика меѓу традиционалниот и интелигентниот систем*

1.3. Основи на вештачката интелигенција и нејзината технолошка рамка

Појавата на вештачката интелигенција (ВИ) претставува една од најзначајните пресвртници во историјата на технолошкиот развој. Од своите скромни почетоци како теоретска дисциплина во средината на 20. век, ВИ еволуираше во мултидисциплинарна платформа што денес длабоко навлегува во сите сфери на човековото дејствување – од секојдневниот живот до индустрискиот инженеринг и стратешкото управување со системи со високо ниво на ризик. Во рамките на системите за безбедност и заштита од пожари, особено на градилиштата, вештачката интелигенција отвора нови хоризонти на можности за предвидување, анализа и дејствување со степен на прецизност што не беше замислив со конвенционалните пристапи.

Вештачката интелигенција, во својата суштина, претставува концепт и технолошка архитектура којашто на машините им овозможува да демонстрираат форми на паметно однесување: да собираат и обработуваат информации од средината, да учат од минати искуства и да преземаат акции насочени кон остварување одредена цел. За разлика од класичните алгоритми, кои извршуваат однапред дефинирани задачи по строги правила,

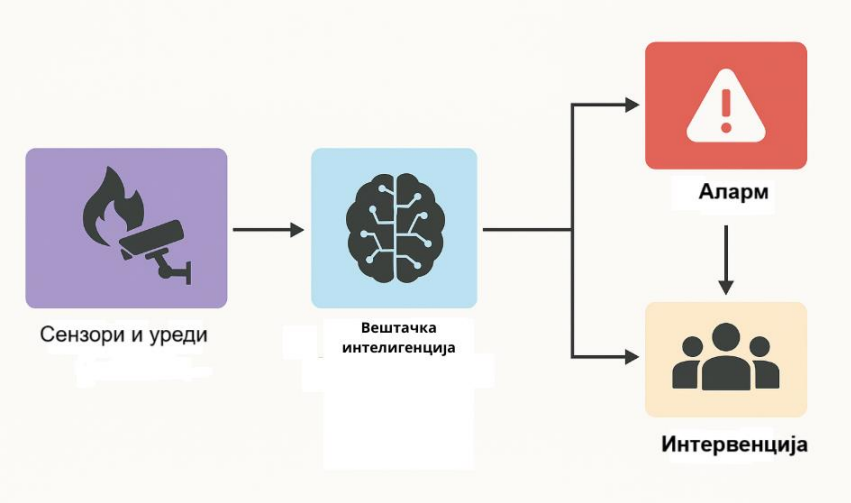
ВИ-системите имаат способност за адаптација, анализа на неодредени и променливи средини, како и носење одлуки врз база на големи и разновидни податоци.

Клучна особеност на современите ВИ-системи е нивната способност за контекстуална процена – што значи дека можат да ја разберат логиката на околината во која функционираат, да го препознаат значењето на сензорските податоци во реално време и да реагираат според промените. Ова е особено важно во контексти каде што времето за реакција е критично, а параметрите на опасност се нестабилни – како што се активни градилишта во урбани средини, каде што можноста за пожар е во постојан раст.

Технолошката рамка што стои зад ВИ обединува неколку клучни компоненти: прво, интелигентни алгоритми (машинско учење, длабоко учење, логичко заклучување); второ, структури за складирање и обработка на големи податоци (т.н. „big data“-инфраструктура); трето, мрежи на сензори и уреди коишто ја регистрираат реалноста во која системот функционира (вклучувајќи IoT-технологија); и четврто, хардверски платформи коишто овозможуваат пресметковна моќ и комуникациска поврзаност во реално време.

Кога се разгледува примената на ВИ во доменот на пожарната безбедност, не може да се зборува само за една технологија, туку за екосистем на поврзани решенија: од автоматско препознавање чад преку термовизиски камери, до симулации на ширење оган со цел да се предвиди оптимална евакуација. Сето ова подразбира длабоко разбирање на основите на ВИ, што претставува основа за успешна примена во практиката.

Во следните потточки ќе се разгледаат темелните дефиниции и правци на развој на ВИ, карактеристиките и разликите меѓу машинското и длабокото учење, како и улогата на IoT и сензорските мрежи во создавање интелигентни безбедносни системи за превенција и контрола на пожари во сложени, динамички средини какви што се градилишта.



Слика бр. 3. *Архитектура на интелигентен систем*

1.3.1. Дефиниции и главни правци во развојот

Вештачката интелигенција (ВИ), иако технолошки термин, суштински се однесува на амбицијата да се создадат системи коишто не само што извршуваат задачи, туку и размислуваат за нив. Таа опфаќа група методи и алгоритми што овозможуваат машините да изведуваат интелигентни функции – да учат од искуство, да донесуваат логички одлуки, да обработуваат природен јазик, да препознаваат обрасци и да се приспособат на нови ситуации. ВИ не е една технологија, туку дисциплина што ги обединува математиката, логиката, невронауката, компјутерските науки и инженерството.

Првите концепти за вештачка интелигенција датираат уште од средината на XX век, кога истражувачите како Алан Тјуринг и Џон Мекарти почнуваат да размислуваат како машините можат да го имитираат човечкото размислување. Првата генерација системи користела **симболичка логика**, при што експертските системи биле создадени рачно, со зададени правила од страна на човечки инженери. Таквиот пристап, иако користен во ограничени сценарија, бил нефлексибилен и неподготвен за ситуации што не биле однапред предвидени.

Со појавата на поголема пресметковна моќ и поголеми количини податоци, истражувачкиот фокус се префрла кон **статистички пристапи**, каде што доминираат моделите на учење од податоци. Овие методи ја отвораат вратата за современиот развој на

машинското учење, а подоцна и **длабоко учење**, кои денес се најприменувани правци на ВИ.

Дополнително, треба да се разликуваат два концепта: **тесна [1] (специјализирана) ВИ,** која е фокусирана на извршување една задача (на пример, детекција на чад), и **генерална ВИ**, која претставува хипотетички концепт каде што машините би можеле да ги имитираат сите когнитивни способности на човекот. Моментално, целата индустриска и истражувачка активност е фокусирана на узката ВИ – која веќе овозможува значајни подобрувања во многу полиња, меѓу кои и безбедноста на градилиштата.

Развојните правци на ВИ денес вклучуваат интеграција со IoT, автоматизирано донесување одлуки, објаснива ВИ (explainable AI), како и генеративни модели коишто можат да симулираат сложени сценарија. Во контекст на пожарната безбедност, ваквите технологии овозможуваат не само рана детекција, туку и предиктивна анализа, планирање на евакуацијата на интервенции во реално време – сето тоа врз основа на реални, променливи податоци од теренот.

1.3.2. Машинско и длабоко учење

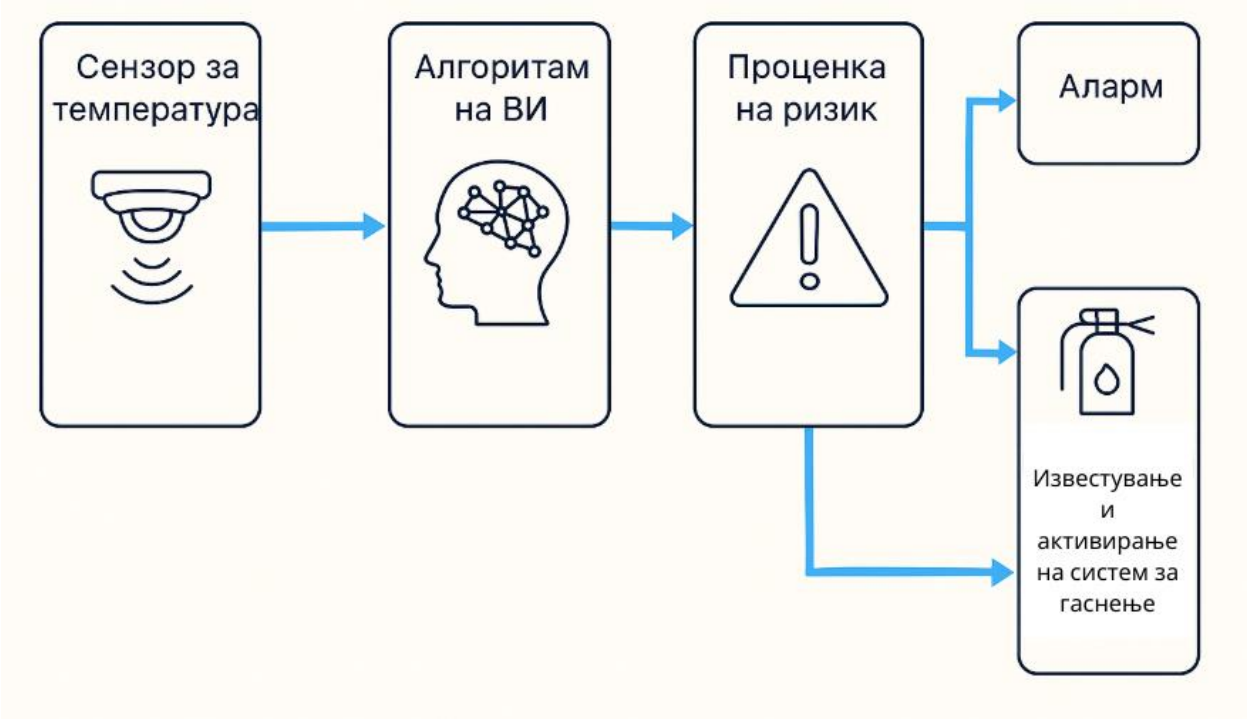
Машинското учење (machine learning – ML) претставува клучен потсистем во рамките на вештачката интелигенција, која им овозможува на алгоритмите да учат од податоци и да донесуваат заклучоци без да бидат експлицитно програмирани за секоја поединечна ситуација. Оваа способност го означува пресвртот од статични, регламентирани системи, кон приспособливи, саморазвивачки системи, кои можат да откриваат шаблони, да ги предвидуваат идните состојби и да генерираат препораки.

Алгоритмите на машинско учење најчесто се поделени во три категории: **надгледувано учење (supervised learning)**, каде што се откриваат скриени структури без однапред дефинирани излези; и **засилено учење (reinforcement learning)**, кое функционира на принципот на награда и казна. Секој од овие пристапи има своја улога во доменот на

[1] Терминот „**тесна ВИ**“ (на англиски: *narroe AI)* се однесува на **вештачка интелигенција којашто е дизајнирана и обучена да извршува само една специфична задача или ограничен сет задачи,** и тоа **без способност за општо „размислување“ или учење надвор од тие рамки.**

безбедносните системи, особено кога станува збор за континуирано следење ризици и адаптација на однесувањето според нови услови.

Во рамки на машинското учење, посебно внимание заслужува **длабокото учење (deep learning – DL)**, кое се заснова врз архитектури на **вештачки невронски мрежи** составени од повеќе слоеви (слоеви на перцепција). Инспирирани од начинот на кој функционира човечкиот мозок, овие мрежи имаат способност да обработуваат слики, звуци, говор, текст и структурирани податоци со голема точност. Она што ги прави исклучително релевантни во областа на пожарната безбедност е нивната способност **да препознаат сложени обрасци што не се веднаш очигледни за човекот** или за традиционалните алгоритми.



Слика бр. 4. *Паметна детекција и автоматски одговор на пожарен ризик*

На пример, длабоките невронски мрежи можат да се обучат да препознаат знаци на потенцијален пожар врз основа на слики од термовизиски камери, или да следат податоци

од сензори во реално време и да детектираат промени во микроклиматските услови што претходат на ризична состојба. Преку алгоритми како што се Convolutional Neural Networks (CNN) и Recurrent Neural Networks (RNN), можни се напредни функции: анализа на видео во живо од градилиште, препознавање нелегални активности (на пример, користење отворен пламен во забранети зони), и предвидување веројатност за инцидент врз основа на историски податоци.

Дополнително, примената на **генеративни модели** (на пример GAN – Generative Adversarial Networks) овозможува симулација на сценарија за ширење пожар во различни конфигурации на градилишта, без потреба од скапи физички тестови. Таквите модели се особено корисни при изработка на предиктивни модули за планирање евакуација и за тестирање различни сценарија на интервенција.

Важно е да се истакне дека успешната примена на машинско и длабоко учење зависи не само од техничката прецизност на алгоритмите, туку и од **квалитетот на податоците** со кои се обучуваат. Лошо структурирани, нецелосни или пристрасни податочни сетови можат да доведат до погрешни предвидувања и опасни заклучоци – што може да биде особено ризично во контексти како што е безбедноста на градилишта, каде што точноста и навременоста на одлуките имаат директно влијание врз човечки животи.

Во пракса, се препорачува имплементација на **објаснива длабока ВИ** (explainable deep AI), која не само што генерира резултат, туку обезбедува и објаснување за донесените одлуки. Таквиот пристап ја зголемува транспарентноста и дозволува инженерите по безбедност подобро да ги анализираат однесувањата на системите, како и да ја прилагодат стратегијата за интервенција.

1.3.3. Примена на IoT и сензорски мрежи во безбедносни системи

Интернетот на нештата (Internet of Things – IoT) претставува концепт што означува глобално вмрежување на интелигентни уреди и сензори коишто комуницираат меѓусебно и со надворешни системи преку Интернет или други мрежни протоколи. Во контекст на безбедносните системи, особено во областа на заштитата од пожари, IoT-технологијата отвора нови можности за воспитување **реалновременски, автоматизирани и предиктивни системи** коишто функционираат со висока прецизност и адаптибилност.



Слика бр. 5. *IoT-мрежа за рана детекција на пожар на градилиште*

1.4. Интелигентни системи за предикција и интервенција

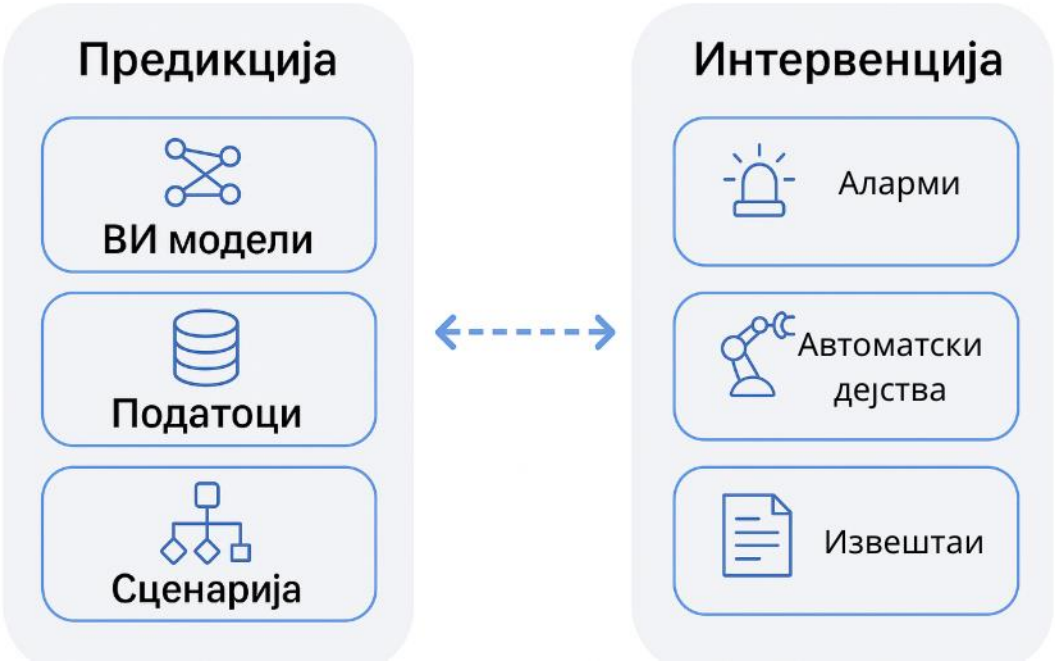
Современите предизвици во областа на пожарната безбедност, особено во нестабилни и ризични средини како што се градилиштата, бараат решенија што ги надминуваат традиционалните механизми за детекција и реакција. Во овој контекст, интелигентните системи за предикција и интервенција претставуваат квантен скок во начинот на кој безбедносните служби предвидуваат, идентификуваат и неутрализираат потенцијални пожарни закани. Станува збор за системи коишто **комбинираат вештачка интелигенција, сензорска инфраструктура, анализа на големи податоци и автоматизирани одлуки,** со цел да обезбедат **ран увид и прецизна реакција.**

Во суштина, овие системи функционираат на два паралелни фронта: **прогонистички (предикција)** и **оперативен (интервенција).** Прогонистичката компонента користи алгоритми за длабоко учење и симулациски модели за да предвиди можни сценарија на појава и ширење пожар, базирани на податоци како што се температура, влажност, материјали, историја на инциденти и човечко присуство. Од друга страна, интервенциската компонента вклучува **реалновременска анализа на настаните и**

активирање системи за итно дејствување, како што се аларми, известувања, блокирање пристапи и активирање противпожарни механизми.

Посебна предност на интелигентните системи е нивната **приспособливост и самоучење** – способноста да ги прилагодуваат своите алгоритми на нови ситуации преку т.н. повратна спрега (feedback loop). Тоа значи дека системот не само што учи од однапред обучени модели, туку и **се дообучува во реално време** врз основа на новите податоци од теренот, што значително ја зголемува неговата ефикасност и релевантност. Овие карактеристики се особено корисни во динамички средини како што се градилиштата, каде што условите се менуваат секојдневно.

Интелигентните системи за предикција и интервенција често вклучуваат **модули за визуализација,** кои преку 2D или 3D графички интерфејси го прикажуваат тековниот ризик, симулациите на ширење на пожарот и предложените реакции. Ваквите модули овозможуваат побрзо донесување одлуки од страна на менаџерите за безбедност и овластените инженери.



Слика бр. 6. *Шематски приказ на интелигентен систем за предикција и интервенција при пожар*

1.4.1. Прогнозирање пожарни сценарија

Прецизната симулација на можни пожарни настани претставува суштински предуслов за навремено и ефективно управување со ризиците на градилишта. Наместо реагирање по настанувањето, современите пристапи се насочени кон предвремено идентификување потенцијални извори и патишта на ширење на пожарот. Преку вакви предиктивни механизми, овозможено е да се процени влијанието врз околината, структурните компоненти и евакуациските патеки, уште пред да се појави реална опасност.

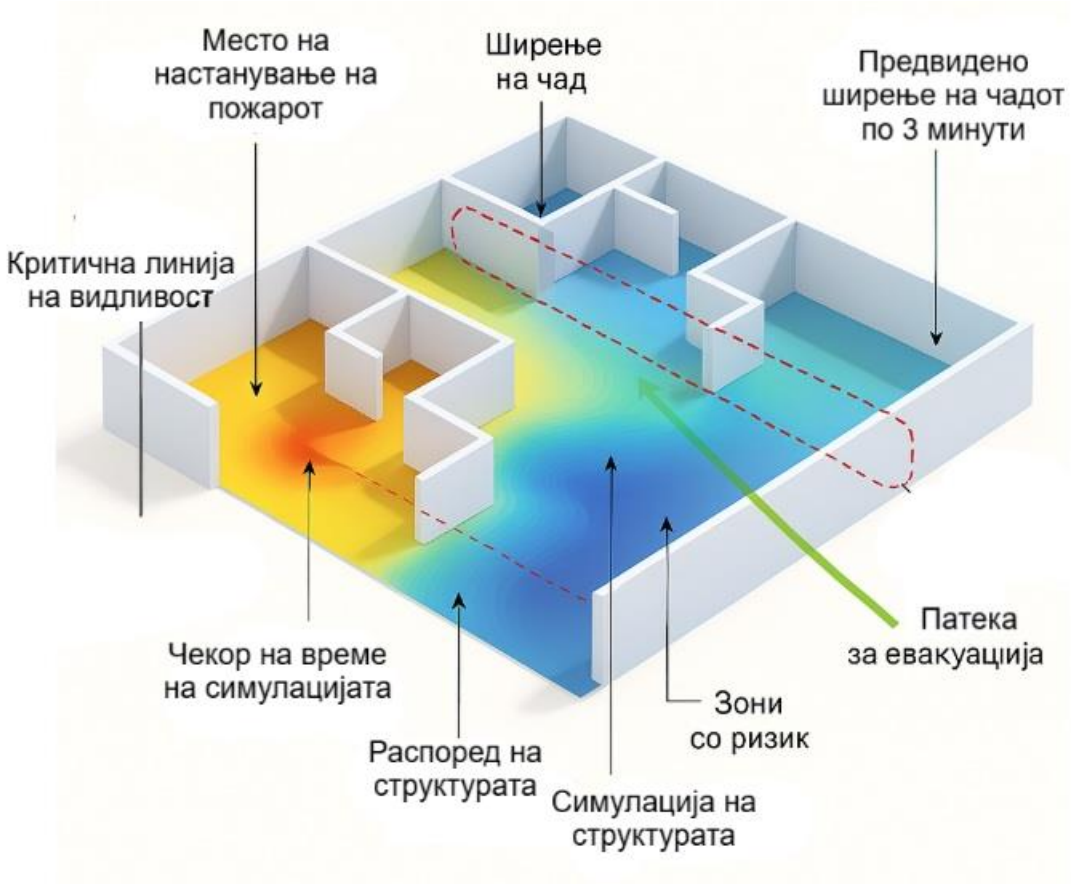
Современите пристапи кон прогнозирање се темелат врз **синтеза на податоци добиени од сензорски мрежи, историски инциденти, метеоролошки информации, и BIM-модели (Building Information Modeling).** Преку овие податоци, интелигентните алгоритми – најчесто базирани на машинско и длабоко учење – **генерираат предиктивни симулации** на развојот на пожарот во простор и време. На пример, алгоритми како што се Recurrent Neural Networks (RNN) или Long Short – Term Memory (LTSM) мрежи овозможуваат моделирање на временската еволуција на температурата, густината на чад, нивоата на CO_2 и стапката на ширење на огнот.

Покрај алгоритамската анализа, во процесот на прогнозирање значајна улога играат и **сценарија базирани на симулации со компјутерска динамика на флуиди (CFD)** – особено кога се работи за објекти со сложена архитектура. CFD-симулациите овозможуваат пресметување на движењето на топлина, чад и токсични гасови низ просторот, што е особено важно при проценатa на достапното време за евакуација (ASET – Available Safe Egress Time) и компарација со потребното време за евакуација (RSET – Required Safe Egress Time).

Дигиталните близнаци (Digital Twins), кои се реалновременски дигитални реплики на физички простори, сè повеќе се применуваат за динамичко следење и симулирање пожарни сценарија. Во таков систем, податоците од IoT-сензорите се внесуваат во дигиталниот модел, кој овозможува **прогнозирање ризици во речиси реално време.** На пример, ако термален сензор на теренот детектира брзо зголемување на температурата во конкретна зона, дигиталниот близнак може да изврши симулација на потенцијално ширење на пожарот и веднаш да предложи оптимални интервенции.

Прогнозирањето не се сведува само на моделирање на физичките аспекти на пожарот, туку вклучува и **превентивна анализа на човечкиот фактор**, како што се веројатноста за човечка грешка, небезбедни практики, или неправилна работа со електрични алати и запаливи супстанции. Комбинирањето технички и бихевиорални параметри овозможува развој на целосни ризични профили за конкретни работни локации и активности.

Имајќи го предвид сето наведено, прогнозирањето пожарни сценарија не треба да се сфаќа како пасивна анализа, туку како **основа за проактивно управување со безбедноста.** Информациите што се добиваат од овие модели може да се интегрираат во плановите за итни интервенции, да се користат за обука на персоналот, како и за дизајнирање нови објекти со поголема пожарна отпорност.



Слика бр. 7. *Симулација со компјутерска динамика на флуиди (CFD) за предвидување ширење чад и топлина во затворен простор*

1.4.2. Реалновременска анализа и автоматизирани аларми

Во услови на забрзана урбанизација и зголемена комплексност на градилиштата, потребата за **реалновременски надзор** и **инстантно активирање алармни системи** станува приоритет во современото инженерство на пожарна безбедност. Брзината на детекција и реакција не само што влијае врз ограничувањето на материјалната штета, туку директно се одразува врз спасувањето човечки животи. Интелигентните безбедносни системи денес се базираат на **автоматизирана обработка на податоци** од сензорски уреди и **активирање алармни механизми** во рамки на секунди.

Овие системи се состојат од **мрежа на интегрирани сензори** – за температура, чад, гасови, пламен и движење – кои се поврзани преку инфраструктура Internet of Things (IoT). Кога некој од сензорите ќе детектира отстапување од безбедносните параметри, се активира автоматизиран протокол што може да опфати:

- Локални и централни аларми;
- Известувања преку мобилни апликации;
- Известување на противпожарни служби;
- Автоматско активирање системи за гаснење (прскалки, CO_2);
- Евакуациски сигнали и насочување.

Клучна карактеристика на ваквите системи е употребата на **edge computing** – анализа на податоците директно на уредот, без потреба од испраќање до централен сервер, со што се минимизира доцнењето. Дополнително, **објаснива вештачка интелигенција (XAI)** овозможува не само алармирање, туку и давање информации зошто бил активиран алармот, што придонесува за доверба и ефикасна интерпретација.

Во контекст на градилишта, овие системи се прилагодени за да функционираат и при услови на прашина, бучава и чести промени во структурата. Алармите може да бидат **зонски насочени**, што овозможува специфични делови од објектот да се известат без непотребно вознемирување на останатите делови.

Компонента	Опис

Сензори	Температура, чад, гасови, пламен, движење
Време на реакција	< 3 секунди (просечно)
Начин на алармирање	Звучен сигнал, светлосен сигнал, мобилна нотификација
Поврзаност	IoT, облак (cloud), гранично пресметување (edge computing)
Интеграција со гаснење пожар	ДА – автоматизирано активирање системи (прскалки CO_2)
Поддршка на XAI	ДА – визуелно и текстуално објаснување на алармот
Прилагодливост на терен	ДА – оптимизирано за услови на градилишта

Табела бр. 3. *Карактеристики на реалновременски алармни системи*

1.4.3. Интегрирани системи со прилагодливо учење

Во сржта на современите безбедносни иновации се наоѓаат **интегрираните системи со прилагодливо учење,** кои претставуваат синтеза на вештачка интелигенција, машинско учење и контекстуално разбирање на ризичните ситуации. Таквите системи не се веќе статични, туку **динамички се надградуваат врз основа на нови податоци и сценарија,** учејќи од сопственото искуство и притоа континуирано ја зголемуваат својата прецизност.

Прилагодливото учење овозможува системот да ги препознае не само директните закани (како што е ненадејно зголемување на температура или појава на чад), туку и

потенцијални обрасци на опасност, кои би останале незабележани во традиционалните системи. На пример, ако системот забележи дека одредена машина често предизвикува локално прегревање, а тоа во претходни случаи водело кон запалување, тој автоматски ќе ја означи како ризична и ќе предложи интервенција.

Овие интелигентни системи обично се состојат од **платформи коишто се поврзани со сензори, IoT-уреди, камери и базни податоци,** и користат **алгоритми за самообука** (self-learning models), кои со текот на времето го подобруваат однесувањето на системот без човечка интервенција. Тие исто така можат да водат **регистар на инциденти**, да генерираат **аналитички извештаи**, па дури и да предложат **оптимизации на безбедносните протоколи** базирани на акумулирано знаење.

Во градежната индустрија, каде што работните услови се променливи од ден на ден, **прилагодливите** системи претставуваат клучен елемент за справување со **непредвидливи и контекстуално зависни ризици.** Системите може да се обучуваат со локални податоци – на пример, историја на пожари на слични објекти или карактеристики на користените материјали – и со тоа да се прилагодуваат на специфичната работна средина.

Нивната интеграција со други модули, како автоматизирани аларми, платформи за визуелна анализа, мобилни апликации и системи за евакуација, создава **кохезивен и реактивен екосистем** што дејствува проактивно, а не само реактивно.

1.4.4. Примери од практиката

Интеграцијата на вештачка интелигенција и интелигентни системи во областа на пожарната безбедност веќе не е футуристичка визија, туку реалност што се применува во повеќе земји, индустрии и типови објекти – вклучително и во градежништвото. Преку конкретни примери од практиката, може да се согледа **реалната додадена вредност** на овие технологии, како и предизвиците и условите потребни за нивна ефикасна имплементација.

- **Пример 1: Интелигентни сензорски мрежи на високи градилишта – искуство од Јапонија**

Во контекст на една од технолошки најнапредните земји во светот, **Јапонија** претставува водечки пример за имплементација на интелигентни технологии во областа на пожарната безбедност, особено во урбано-инфраструктурни проекти. За време на изградбата на **новата зграда на Министерството за транспорт во Токио,** беше инсталиран

напреден систем од **интелигентни термосензори** распоредени низ сите нивоа на градилиштето, со особен фокус на деловите каде се вршат заварувања, сечење, електромонтажни и леснозаштитени активности.

Овој систем не е обичен алармен механизам. Тој користи **алгоритми базирани на машинско учење** (machine learning) што овозможуваат препознавање **обрасци на опасно однесување**, како на пример: постепено покачување на температурата без престан, прекумерна акумулација на прашина, истекување на запаливи течности или концентрација на чад во одредени области. За разлика од класичните сензори коишто активираат аларм при достигнување на зададена вредност, овие сензори **анализираа трендови во реално време** и врз основа на податоци од претходни случаи идентификуваа потенцијален пожар дури и пред неговата појава.

Во еден регистриран случај, системот забележал постепено зголемување на температурата кај складиште за градежни материјали. Иако не се активирале никакви класични аларми, системот испратил автоматско предупредување до контролниот центар. По проверката од страна на персоналот, се утврдило дека е оставен отворен електричен фен за сушење градежна пена во близина на запаливи материјали – ситуација што лесно можела да ескалира во пожар. Инсталираниот интелигентен систем **спречил инцидент уште пред да се појави искра.**

Дополнително, овие сензори биле интегрирани со **мобилна апликација** којашто му овозможува на надзорниот тим пристап до алармни сигнали, термички мапи и друго, како и **гласовно известување** ако некое подрачје достигне критичен праг на ризик. Апликацијата била поврзана со **централизиран систем за одлучување,** каде што сите податоци се складираат и користат за подобрување на идентификацијата на ризик преку самостојно учење на системот.

Овој пример од Јапонија ја покажува **реалната трансформација што ја овозможува вештачката интелигенција,** од пасивна до активна безбедност, и од едноставно алармирање кон **предиктивна и превентивна интервенција.** Ваквите решенија се особено релевантни за **високи објекти,** каде времето за реакција и координацијата се критични, а пристапот до сите зони во случај на пожар е ограничен.

- ***Пример 2: Примена на вештачка интелигенција за анализа на евакуациски сценарија – искуство од Хамбург, Германија***

Во процесот на изградба на новиот **подземен транспортен јазол во Хамбург, Германија**, се наметна потребата од усвојување напредни безбедносни практики што ќе им обезбедат максимална сигурност на идните корисници, но и на самите градежни работници во текот на изведбата. Со оглед на сложената архитектура на проектот, кој вклучува повеќе подземни коридори, спуштени нивоа и тесни комуникациски премини, традиционалниот пристап кон планирање на евакуацијата се покажа како недоволен.

Поради тоа, проектантскиот тим во соработка со истражувачка институција во Минхен, имплементирал **симулациски систем за моделирање евакуациски сценарија базиран на вештачка интелигенција,** користејќи **обучени алгоритми од типот reinforcement learning и agent – based modeling.** Целта на овој систем не била само да моделира статични евакуациски рути, туку да ги симулира **реалните движења на поединци и групи во услови на паника, ниска видливост, задимување и зголемена температура**, со цел да се идентификуваат можни блокади и тесни грла.

Системот бил обучен со **историски податоци од претходни пожари**, видеоанализи од евакуации и податоци добиени од теренски симулации. Преку моделот било откриено дека еден од главните спуштени коридори, иако првично предвиден како примарна евакуациска патека, **во случај на густ чад би бил практично нефункционален** поради недоволен притисок во системот за евакуација на чад. Дополнително, динамичкото моделирање покажало дека лицата коишто не се запознаени со објектот (пр. посетители) имаат тенденција да се насочат кон слепи зони, што би довело до дополнителна конфузија и загрозеност.

Врз основа на резултатите од симулациите, проектантите ги изменија критичните делови од архитектонскиот план:

- Била вметната **дополнителна евакуациска скала** со независна вентилација;
- Биле поставени **динамички информативни табли со LED-насоки** што се ажурираат во реално време според развојот на ризикот;

- Бил интегриран **интелигентен систем за контрола на толпата,** кој преку аудио- и визуелна стимулација го насочува движењето на луѓето во вистинската насока.

Според анализите изработени по завршувањето на промените, времето потребно за евакуација се скратува за **27 насто**, а **безбедносната оценка на објектот се зголемила од висок ризик на прифатливо ниво** според стандардите на Европската агенција за урбана безбедност.

Овој пример не само што демонстрира **успешна примена на вештачка интелигенција во реално архитектонско и градежно опкружување**, туку го отсликува и начинот на кој вештачката интелигенција може да го надмине човечкиот фактор во идентификување ризици што не се очигледни при традиционалната експертска процена. Особено значајно е што овие технологии овозможуваат **проактивна реакција**, уште во фазата на дизајн, а не дури по настанување на критична ситуација.



Слика бр. 8. *Анализа на евакуација во подземна инфраструктура*

- **Пример 3: Систем за автоматска интервенција со IoT и вештачка интелигенција – студија од САД**

Во рамките на проект во Остин, Тексас (САД), кој се однесувал на изградба на висококатен објект за комерцијално-станбена употреба, **бил применет систем за рана детекција и автоматска интервенција** што интегрира технологии од доменот на **Интернетот на нештата (IoT)** и **вештачката интелигенција.** Според достапните податоци, овој систем имал за цел да овозможи автоматизирана реакција во реално време при појава на пожари, без потреба од непосредна човечка интервенција, особено во ранливите фази на изградба кога присуството на запаливи материјали и отворени инсталации ја зголемува опасноста.

Техничката поставеност опфаќа **мрежа од сензори** што биле распределени низ целото градилиште и собирале информации за критични параметри – температура, влага, концентрации на гасови и чад, како и промени во протокот на воздух. Податоците се обработувале локално преку **edge computing архитектура**, што овозможило побрза интерпретација и одлуки врз зависност од централизирана серверска инфраструктура.

Од научната документација произлегува дека во системот биле интегрирани алгоритми за **машинско учење**, специјално обучени да идентификуваат обрасци поврзани со настани што претходат на пожар (на пример постепено зголемување на температурата со истовремена појава на запаливи соединенија). Во такви случаи, **автоматски се активирале механизми за гаснење**, базирани на еколошки агенси, со цел навремено смалување на ризикот.

Системот, исто така, бил поврзан со **локални алармни уреди и механизми за известување**, кои го иницирале процесот на евакуација и ги алармирале релевантните служби. При утврдување критична состојба, се активирале и **автоматски бариери за изолација на зоната на ризик**, при што бил овозможен проорганизиран пристап на итните служби и била избегната евентуална паника на теренот.

Од добиените технички извештаи произлегува дека **системот спречил најмалку три значајни инциденти**, од кои еден бил поврзан со прегревање на електричен панел, а другите два со манипулација на хемиски супстанции за обложување. Во сите случаи,

интервенцијата била извршена автономно, без потреба од човечки сигнал или активирање вработен персонал.

Овој пример се наведува во повеќе стручни публикации како **успешен модел за интегрирана технолошка заштита**, кој докажува дека преку IoT и ВИ е можно да се воспостави **предиктивна и реактивна заштита** на градилиштата, што значително ја зголемува безбедносната ефикасност и го минимизира влијанието на човечката грешка.

- ***Пример 4: Проект IFETool – предикција базирана на длабоко учење (Кина)***

Во рамките на интензивниот технолошки развој на полето на противпожарниот инженеринг во Кина, бил развиен и презентиран софтверскиот проект **Intelligent Fire Engineering Tool (IFETool)**, со поддршка на национални научно-истражувачки институти и универзитети. Системот претставува иновативен обид за автоматизирана процена на пожарна безбедност преку примена на **длабоко учење**, при што се предвидува еволуцијата на параметри како што се температура, видливост на чад и концентрација на јаглерод моноксид во сложени градежни структури.

Клучната методологија на IFETool се базира на претходно создадена обемна **база на симулирани податоци** – повеќе од 10 000 сценарија за пожари во атриумски простори со различна геометрија, нивоа на вентилација и видови запаливи материјали. Податоците се добиени преку **CFD-симулации** (Computational Fluid Dynamics), што овозможува соодветно моделирање на физиката на пожарот.

Длабокиот невронски модел, развиен како централна компонента на IFETool, е трениран со овие податоци да генерира **тенабилни профили** – односно информации за тоа колку време луѓето можат безбедно да останат во одредено подрачје пред изложеноста на критични параметри (ASET – Available Safe Egress Time). Точноста на прогнозите достигнува до **97 насто** при мерење со NRMSE (Normalized Root Mean Square Error) и SSIM (Structural Similarity Index), споредено со реалните CFD-симулации.

Посебна предност на IFETool е неговата способност за **брза процена на дизајнирани архитектонски решенија.** Применувајќи ја BIM-технологијата (Building Information Modeling), корисниците можат да внесат архитектонски цртеж, да ја означат локацијата на потенцијален пожар и веднаш да добијат симулирани сценарија со препораки

за подобрување на безбедносниот дизајн. Овој пристап значително го намалува времето за анализа, кое во класичните CFD-алатки изнесува неколку дена, додека со IFETool се постигнува за неколку минути.

Дополнително, софтверот овозможува и **визуализација на временските еволуции** на параметрите, преку 3D графички интерфејс што ги симулира димните слоеви, температурните градиенти и критичните зони во објектот. Со тоа, не само што се олеснува разбирањето на ризиците, туку се овозможува и поефикасна комуникација меѓу проектантите, безбедносните инженери и надзорните тела.

IFETool е препознаен во стручната литература како **револуционерен чекор кон автоматизација на инженерската противпожарна анализа**, особено во контекст на урбаните комплексни објекти каде што традиционалните пристапи се премногу бавни или неадекватно прецизни. Во рамки на пилот-проектите, алатката е применета на неколку нови мултифункционални згради во Шангај, при што се покажала како корисна во раното идентификување критични дизајнерски слабости.

1.5. BIM, дигитални близнаци и нивна примена во управување со ризици

Во услови на забрзана дигитална трансформација, градежниот сектор е сè повеќе изложен на барања за воведување напредни технолошки решенија коишто овозможуваат прецизно управување со безбедносни ризици. Особено значајни во оваа насока се концептите **Building Information Modeling (BIM)** и **дигитални близнаци (Digital Twins)**, кои претставуваат стратешки дигитални алатки за интелигентно моделирање, анализа и управување со физичката инфраструктура низ сите нејзини фази – од идејно проектирање до експлоатација.

BIM се заснова на создавање дигитална 3D репрезентација на физички објект којашто ги инкорпорира сите релевантни структурни, архитектонски, механички и електрични компоненти. Овој модел овозможува **визуелна симулација на објектот во предизградбена фаза**, како и анализа на потенцијалните ризици во однос на пожарната безбедност. Преку интеграција со софтвери за **компјутерски симулирана динамика на течности (CFD)**, BIM-моделите се користат за **тестирање на сценарија на ширење чад и**

оган, идентификација на критични точки за евакуација и распоредување сензори, детектори и гасители во најоптимални позиции.

Од друга страна, **дигиталниот близнак** претставува **динамична дигитална реплика на физичкиот објект**, која се ажурира во реално време преку податоци добиени од IoT-уреди и сензори. За разлика од BIM, кој е првенствено насочен кон фазата на проектирање, дигиталниот близнак ја покрива **експлоатацискатa и оперативната фаза**, овозможувајќи **континуирано следење критични параметри** (температура, концентрација на чад, присуство на гасови) и предвидување потенцијални ризици. Преку **интеграција на алгоритми за машинско учење**, дигиталниот близнак ја користи историјата на податоци за **рано откривање аномалии и автоматско активирање на интервенциски системи.**

Во синергетската примена BIM и дигиталните близнаци претставуваат **моќна платформа за управување со безбедносни сценарија** на градилишта и во сложени објекти. Тие овозможуваат:

- **Анализа на дизајнот и локацијата на критичните компоненти** (на пр. излезени рути, противпожарни системи);
- **Предикција на текот на потенцијални пожарни инциденти** со динамичка симулација;
- **Визуелно поддржани одлуки базирани на реалновременски информации**;
- **Едукација и обука преку виртуелни симулации** на кризна интервенција.

Во современите практики на градежно управување, овие технологии се сметаат за **критични компоненти на интелигентното инженерство за безбедност**, бидејќи овозможуваат не само реактивно туку и **предиктивно управување со ризикот**, со што значително се намалуваат последиците од несакани настани.

1.5.1. Улогата на BIM во симулација и визуализација

Building Information Modeling (BIM) претставува методолошки и технолошки пристап што овозможува **интегрирано дигитално моделирање на сите релевантни податоци** поврзани со еден градежен објект. Неговата примена оди подалеку од обичен 3D

дизајн – BIM ги обединува сите димензии на проектната реалност: просторна, временска, функционална, материјална и безбедносна. Во контекст на **пожарна безбедност**, BIM се афирмира како **суштинска алатка за симулација, визуализација и предвидување ризици**, особено во фазите на проектирање и анализа на сценарија.

Главната предност на BIM во овој домен се состои во можноста за **прецизна репрезентација на геометријата на објектот**, во комбинација со **инженерски, архитектонски и системски податоци** – што создава можност за **интеграција на пожарнобезбедносни компоненти** уште во најраните фази на планирање. Со тоа се овозможува идентификација на:

- **Потенцијални блокади на евакуациските патеки;**
- **Критични зони за ширење чад и топлина;**
- **Несоодветно димензионирани излези или вентилациони отвори;**
- **Интерференции меѓу електрични и механички системи што можат да предизвикаат пожар.**

Она што го прави BIM особено корисен е можноста за поврзување со **софистицирани симулациски алатки.** Преку **CFD-симулации (Computational Fluid Dynamics)**, BIM-моделите можат да се користат за **моделирање на развојот** на пожарот, ширење на чадот и температурната дистрибуција во затворен простор. Еден таков пример е интеграцијата со FDS (Fire Dynamics Simulator), која овозможува визуализација на развојот на пожарот според различни сценарија, како на пример:

- Дали пожарот настанува во централно јадро на зградата или во периферен дел;
- Како ќе реагира системот за вентилација;
- Колку време имаат луѓето за безбедна евакуација (ASET – Available Safe Egress Time).

Визуелните симулации генерирани преку BIM-платформи (на пр. Autodesk Revit или Bentley OpenBuildings) се користат и како **алатка за обука на персоналот**, преку симулации на вонредни ситуации и оптимизација на интервенциски протоколи. Дополнително, BIM овозможува **временско моделирање (4D)** – односно следење на секој

градежен елемент низ времето, што овозможува предвидување **ризични фази од градежниот процес**, како што се:

- Инсталација на запаливи материјали;
- Привремени електрични инсталации;
- Заварувачки активности и сечење;
- Монтажи на висококатници.

Во научната и стручна литература се документирани примери каде BIM бил користен за **анализа на пожарна отпорност на фасади**, **сценарија на евакуација од трговски центри**, или **редизајн на вентилациони системи со цел подобра екстракција на чад**. Значајно е да се нагласи дека BIM не е изолиран софтверски пакет, туку **платформа за колаборативно инженерство**, што овозможува сите чинители (архитекти, инженери, противпожарни експерти, надзорни тела) да учествуваат во заедничко моделирање и донесување одлуки.

1.5.2. Дигитални близнаци и динамичко следење параметри

Концептот на **дигитален близнак** (англ. *Digital Twin*) се развил од индустриската потреба за **реалновременско моделирање, анализа и контрола на физички системи**, преку нивна дигитална репликација. Во контекст на управување со пожарни ризици на градилишта, дигиталниот близнак е признат како една од **најнапредните алатки за интелигентно следење, дијагностика и предикција**, со што се надминуваат ограничувањата на традиционалните статички модели.

Во суштина, дигиталниот близнак претставува **виртуелна копија на физичкото градилиште или објект**, која е **постојано ажурирана преку податоци добиени од сензори, IoT-уреди, дронови, мобилни платформи и софтверски модули**. Овие податоци вклучуваат:

- Температура и влажност во реално време;
- Концентрација на запаливи гасови или чад;
- Притисок во инсталациите;

- Состојба на електричната мрежа;
- Позиција и движење на луѓе и машини.



Слика бр. 9. *Дигитален близнак за следење пожарни ризици на градилиште*

Поради својата способност да обработува големи количини податоци (big data) во реално време, дигиталниот близнак **овозможува аналитички увид во моменталната состојба на системот**, предвидување опасности и автоматска корекција или алармирање. Особено кога е поврзан со **машинско учење или системи за вештачка интелигенција**, дигиталниот близнак може:

- Да предвиди **настанување на пожар врз основа на аномалии во параметрите**;
- Да симулира **повеќе сценарија на ризик** и нивни последици;

- Да даде препораки за **оптимално лоцирање на интервенциски тимови**;
- Да овозможи **интерактивна обука и симулации** за безбедносниот персонал.

Примената во градежниот сектор е сè пошироко распространета. На пример, во Јапонија и Сингапур, дигитални близнаци се користат за континуирано следење на комплексни урбани градилишта, каде што безбедносните протоколи се строго автоматизирани. Во случај на зголемена температура или ненадеен пораст на токсични гасови, системот може автоматски да нареди евакуација, да активира локални системи за гаснење или да извести надлежни служби.

Друга значајна предност е способноста за повратна анализа (feedback loop) – односно, системот учи од секој регистриран инцидент, ги подобрува предикциските модели, и на тој начин го оптимизира управувањето со ризици.

Во академската и инженерската практика, дигиталните близнаци се веќе признати како критичен дел од четвртата индустриска револуција (Индустрија 4.0), со препорака за нивна интеграција во сите инфраструктурни проекти каде што постои динамична промена на ризици, какви што се градежните зони.

1.6. Организациска структура и менаџмент на безбедноста

Ефикасното управување со безбедноста на градилишта – особено кога станува збор за превенција и интервенција при пожари – зависи не само од техничката инфраструктура туку и од **организациската поставеност и хиерархијата на одговорностите** во рамки на проектот. Современите градилишта, особено оние што применуваат дигитални технологии, бараат **интегриран пристап каде човечките ресурси, техничките системи и податоците** се меѓусебно координирани низ целокупниот животен циклус на градежниот објект.

Во класичниот пристап, безбедносната структура најчесто се состоела од **единица за заштита на трудот**, инспектор или инженер за безбедност, и повремени надворешни консултанти. Сепак, со имплементацијата на **интелигентни системи, IoT-технологии, BIM и дигитални близнаци**, **структурата на безбедносниот менаџмент се проширува и трансформира**. Тоа значи дека безбедносниот инженер повеќе не е само пасивен

надзорник, туку **активен учесник во анализа, интерпретација на податоци и донесување одлуки**, во интеракција со дигиталната платформа на објектот.

Клучни елементи на модерната организациска поставеност:

- **Интегрирани тимови** – каде инженерот за безбедност соработува со ИКТ-специјалисти, проектанти, менаџери на ризик и одговорни лица за одржување;
- **Централизирана база на податоци** – со пристап за сите засегнати страни, што овозможува **реалновременско следење на состојбите** на терен;
- **Автоматизирани известувања** и аларми преку системи поврзани со мобилни уреди и комуникациски центри;
- **Интероперабилност со други системи**, како што се градските противпожарни служби, здравствени служби и надзорни тела;
- **Хиерархиски јасно дефинирани одговорности** при инциденти и јасна документација на безбедносни процедури.

Во еден добро структуриран безбедносен систем, **менаџментот на безбедноста** не е изолиран процес, туку е **интегриран во целокупниот менаџмент на проектот**, со поврзаност со KPI (Key Performance Indicators) за безбедност, регулаторни индикатори и ESG-стандарди (Environmental, Social, Governance).

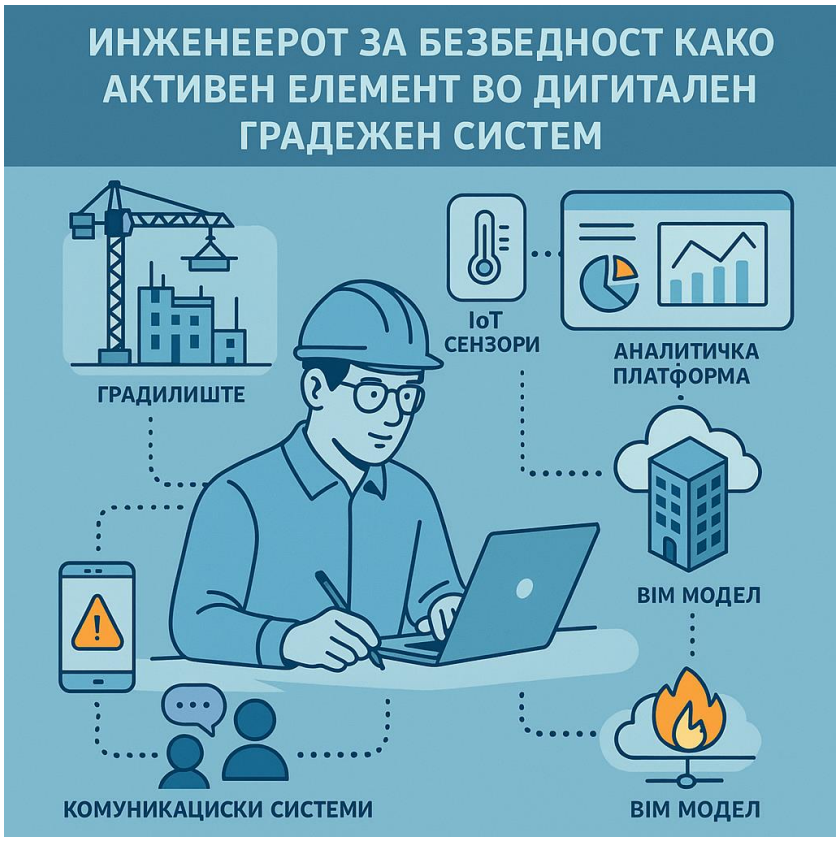


Дијаграм бр. 3. *Организациска структура за дигитално управување со безбедноста на градилиштата*

Овој организациски модел, кој се заснова на **податоци и дигитална комуникација**, овозможува зголемена **брзина на реакција, точност во проценатa на ризикот и намалување на времето за донесување критични одлуки**.

1.6.1. Инженерот за безбедност како дел од дигиталниот систем

Современите технолошки достигнувања во градежната индустрија не само што го менуваат начинот на проектирање и изградба, туку суштински го трансформираат и **професионалниот профил и функциите на инженерот за безбедност**. Наместо класична фигура што исклучиво спроведува проверки и составува извештаи, инженерот за безбедност денес е **интегриран учесник во дигиталниот екосистем на градилиштето**, дејствувајќи како посредник меѓу технологијата и организациската одлука, со проширени надлежности во анализа, евалуација и комуникација на ризици.



Слика бр. 10. *Улогата на инженерот за безбедност во дигитален градежен систем*

Во рамките на дигитално поддржаните процеси, инженерот за безбедност управува со:

- **Информации од IoT-сензори**, поставени на критични точки на градилиштето, преку кои во реално време се следат параметри како температура, концентрација на чад, вибрации или прегревање на електрична опрема;
- **Аналитички платформи**, кои користат машинско учење и алгоритми за прогноза на ризици, преку кои инженерот може проактивно да реагира пред настанување опасна ситуација;
- **BIM-модели**, каде во симулациона средина се анализира влијанието на разни безбедносни сценарија врз протокот на луѓе, пристапноста за евакуација и позиционирање опрема за интервенција;

- **Комуникациски системи**, што овозможуваат моментална размена на критични информации со сите засегнати страни – од работници до проект-менаџери и служби за интервенција.

Инженерот за безбедност, во ваков дигитален контекст, се позиционира како **аналитичар на ризик**, **модератор на податоци**, но и **носител на клучни безбедносни одлуки**. Со пристап до реалновременски информации, автоматизирани алармни системи и симулациони модули, тој не дејствува само реактивно – туку станува **прогностичар на инциденти**, активен фактор во минимизирање на последиците и оптимизирање на интервенциски планови.

Освен техничките вештини, ваквиот инженер мора да поседува и:

- **Интердисциплинарни знаења**, особено во делот на ИКТ, дигитална комуникација и алгоритамска логика;
- **Компетенции за работа со податоци**, односно способност за читање, интерпретација и визуализација на метрики;
- **Менаџерска способност за донесување брзи и рационални одлуки** во критични ситуации;
- **Развивање култура на безбедност**, преку едукација и координација на целиот тим.

Според некои истражувања, во проекти што имплементираат дигитални системи за управување со ризици, инженерот за безбедност учествува во **над 60 насто од клучните технички и безбедносни одлуки**, што претставува значителен пораст во споредба со традиционалната пракса каде што улогата му била ограничена на надзор и известување.

1.6.2. Управување со податоци и донесување одлуки

Во современите дигитализирани системи за управување со безбедноста на градилишта, **податоците претставуваат највреден ресурс за предвидување, анализа и донесување одлуки**. Оттаму, процесот на управување со податоци станува не само технички, туку и стратешки аспект во организациското функционирање, каде што е вклучен цел синџир на одговорни актери, алатки и технологии.

Особено значајна е **интероперабилноста меѓу системите** – IoT-сензори, софтвери за анализа, BIM-модели, алатки за симулација и предикција – кои заеднички генерираат огромен волумен на податоци, кои треба да бидат **структурирани, проверени, интерпретирани и презентирани во разбирлива и применлива форма**.

А. Категории и извор на податоци

Најчесто користени категории на податоци во контекст на пожарна безбедност и ризици на градилишта вклучуваат:

- **Технички сензорски податоци**: температура, влажност, чад, електрична потрошувачка, притисок во инсталации;
- **Податоци за човечко присуство и движење**: преку RFID-тагови, геолокациски сензори, видеонадзор;
- **Историски податоци за инциденти**, анализирани преку машинско учење;
- **Симулациони резултати** од софтвери како FDS, Pathfinder, BIM tools;
- **Реакции и интервенции** на системите – кога, како и од кого е одговорено на аларм, и со каква ефективност.

Овие податоци, без соодветно управување, можат да создадат информациски хаос. Затоа е клучна улогата на **Data Management System (DMS)** – централен систем за складирање, категоризација и безбедно управување со информациите.



Дијаграм бр. 4. *Процес на дигитално управување со податоци и донесување одлуки во градежната безбедност*

Б. Анализа и поддршка при одлучување

Управувањето со податоци не завршува со нивно прибирање. Суштинската вредност на дигиталната безбедносна структура е токму во **можноста за аналитичка обработка и автоматизирана поддршка при донесување одлуки (Decision Support System – DSS)**.

Преку алгоритми базирани на вештачка интелигенција, можно е:

- Да се изврши **анализа на шаблони (pattern recognition)** што претходат на инцидент;
- Да се генерираат **предиктивни сценарија** со веројатносна процена;
- Да се активираат **аларми и известувања во реално време**, според дефинирани прагови на толеранција;
- Да се понудат **предлог-акции**, базирани на најдобри практики и претходни резултати.

Овие функционалности создаваат **интелигентна основа за донесување рационални и навремени одлуки**, не само од инженерот за безбедност, туку и од целиот команден синџир.

В. Организациско влијание

Управувањето со податоци во безбедносниот систем има **директно влијание врз организациската култура и одговорност**, бидејќи:

- Ја зголемува **транспарентноста и отчетноста** во работата на тимовите;
- Овозможува **трајно следење на ефективноста** на мерките за безбедност;
- Ги поддржува обуките и континуираното усовршување на кадарот;
- Создава **услови за сертификација, усогласување со стандарди и законски регулативи**.

Според истражување спроведено во 2024 година во рамки на European Construction Safety Network, градилиштата што користат интегрирани системи за податоци и анализа бележат намалување на пожарни инциденти за **35 насто**, како и подобрување на времето за реакција за **над 50 насто**.

1.6.3. Етички и законски аспекти при користење интелигентни технологии

Интеграцијата на интелигентни технологии во областа на безбедноста на градилишта претставува не само технолошки напредок, туку и **нова етичка и правна димензија**, која бара внимателно разгледување. Системите базирани на вештачка интелигенција (ВИ), машинско и длабоко учење, сензорски мрежи, алгоритми за прогноза и автоматизирани механизми за интервенција имаат потенцијал суштински да го унапредат управувањето со ризици, но истовремено ја отвораат потребата од етичка одговорност, правна транспарентност и регулаторна усогласеност.

А. Етички предизвици

Најзначајните етички прашања поврзани со користењето интелигентни системи во градежната индустрија се однесуваат на:

Приватност и заштита на лични податоци

Многу интелигентни системи користат уреди за следење (камери, дронови, сензори) коишто прибираат огромен обем на лични и биометриски податоци – како движење, физиолошки параметри (отчукувања на срце, температура), локација, и понекогаш дури и аудиоснимки.

Според **Општата регулатива за заштита на личните податоци (GDPR)** во ЕУ, прибирањето вакви податоци мора да биде **јасно информирано, доброволно и со конкретна намена**. Приватноста на работниците мора да биде заштитена со механизми за енкрипција, пристап само за овластени лица и јасни политики за чување и бришење на податоците.

Автономија и донесување одлуки

Кога интелигентен систем активира аларм, предизвикува евакуација или идентификува ризичен работник, се поставува етичко прашање: **кој е одговорен за донесената одлука** – алгоритмот, инженерот или управителот на објектот? Во овие ситуации, се препорачува комбиниран модел на одлучување: **човечка контрола врз критични одлуки**, особено кога станува збор за животи и безбедност.

Алгоритамска пристрасност

Моделите за анализа на ризик, ако се обучени врз неурамнотежени податоци, можат да развијат пристрасни заклучоци – дискриминирајќи по возраст, пол или етничка припадност. Етички оправдана примена на ВИ подразбира **тестирање за фернес**, вклучување разновидни сетови на податоци и редовно ревидирање на алгоритмите.



Слика бр. 11. *Етички и законски аспекти при примена на ВИ во безбедноста на градилиштата*

Б. Правни аспекти и регулаторна рамка

Во правен контекст, примената на интелигентни технологии во доменот на безбедноста на градилишта е сè уште предмет на **развивачка регулатива**, но некои постојни закони веќе обезбедуваат релевантни насоки:

• Трудово законодавство и безбедност при работа

Согласно со **Законот за безбедност и здравје при работа на Република Северна Македонија**, работодавачот има обврска да обезбеди услови за безбедно извршување на работните задачи. Воведувањето интелигентни системи мора да биде **во функција на унапредување на тие услови**, без да создава дополнителен психосоцијален притисок врз вработените.

• Закони за електронска обработка на податоци

Законската рамка за **заштита на лични податоци** налага употребата на технологиите да биде придружена со **процедури за информирање, согласност и заштита на личноста**. Обезбедувањето право на увид, исправка или бришење податоци од страна на работникот е клучно.

• Стандарди за етичка ВИ (AI Ethics Guidelines)

Европската комисија има воспоставено **Етички насоки за доверлива ВИ** (2019), кои ги дефинираат принципите на:

– Човечка агенција и надзор;

– Робусност и безбедност;

– Приватност и управување со податоци;

– Транспарентност;

– Разновидност, недискриминација и фернес;

– Општествена благосостојба.

В. Препораки за интеграција на етика и законитост во системот

За да се овозможи одговорна и одржлива имплементација на интелигентни технологии во градежни проекти, се препорачува:

- **Развивање внатрешна политика за етичко користење на ВИ**, која ќе биде дел од организациската стратегија за безбедност;
- **Именување офицер за податоци и етичко управување**, кој ќе биде одговорен за усогласеност со законските и етичките обврски;
- **Обука на инженерите и персоналот за основите на дигитална етика** и безбедносна регулатива;
- **Вклучување на работниците во дискусија и формулирање политики**, за зголемена транспарентност и доверба;
- **Континуирано ревидирање на алгоритмите** со вклучување стручни лица за етика, право и технолошки развој.

1.7. Улогата на вештачката интелигенција во иднината на пожарната безбедност

Современите предизвици поврзани со пожарната безбедност на градилиштата бараат системи што се не само реактивни, туку и **предиктивни, приспособливи и самостојно оптимизирачки**. Во таа насока, вештачката интелигенција (ВИ) се наметнува како централен алат во трансформацијата на начините на кои се детектираат, анализираат и спречуваат пожарите, особено во динамички и ризични работни средини како што се градежните објекти.

Примената на ВИ го означува преминот од класичните системи на заштита – кои се темелат врз пасивни мерки и претходно дефинирани правила – кон системи што **учат од податоци**, **распознаваат обрасци** и **реагираат во реално време**. Ова е особено значајно во урбани контексти каде што комплексноста на проектите, бројноста на работниците и динамиката на активностите создаваат средина во која човечкото надгледување е ограничено.

Според актуелните истражувања, **иднината на пожарната безбедност се движи кон целосна дигитализација и автоматизација**, каде интелигентни системи ќе играат клучна улога во секој сегмент од управувањето со ризици – од идентификација и превенција, до интервенција и евалуација. Сензорските платформи ќе се надополнуваат со алгоритми за машинско учење, а визуализациите во реално време ќе овозможат координација меѓу тимовите на терен и централните контролни единици.

Меѓутоа, ваквата трансформација на пожарната безбедност не е без предизвици. Таа отвора прашања поврзани со **технолошката доверливост, правната одговорност и етичките рамки**, што претставува дополнителна обврска за развој на соодветна регулатива и стандардизација. Иднината на ВИ во пожарната безбедност, затоа, мора да се гради врз холистички пристап што ги обединува техничките, човечките и општествените димензии на безбедноста.

1.7.1. Потенцијали и ризици од автоматизацијата

Автоматизацијата, поттикната од напредокот во вештачката интелигенција, претставува клучен фактор во трансформацијата на пожарната безбедност, особено на градилиштата каде што ризиците се високи, условите непредвидливи, а времето за реакција

ограничено. Од една страна, автоматизацијата овозможува **драстично зголемување на ефикасноста**, **прецизноста** и **брзината на реакција**; од друга страна, отвора комплексен спектар на **технолошки, етички и организациски ризици**, кои бараат внимателна анализа и стратешко управување.

Потенцијали на автоматизацијата

Еден од најзначајните потенцијали на автоматизацијата во пожарната безбедност се огледува во **реалновременската обработка на податоци од сензорските мрежи**, што овозможува идентификација на опасни услови уште пред да настане пожар. Интелигентните системи можат да анализираат микроклиматски параметри (температура, влажност, концентрација на чад), да го следат движењето на луѓе и машини и да идентификуваат аномалии преку алгоритми за длабоко учење.

Дополнително, автоматизацијата овозможува **дистанцирано управување со критични процеси**, како што се активирање системи за гаснење, отворање безбедносни излези или известување противпожарни служби. Овие функционалности особено се важни на пространи и тешко достапни градилишта, каде што брзината на одлука и прецизното дејствување се од суштинско значење за спасување животи и минимизирање штети.

Во перспектива, автоматизацијата исто така носи потенцијал за **континуирано учење и подобрување на безбедносните протоколи**, преку анализа на претходни инциденти и симулации. Така, системите стануваат не само реактивни, туку и **предиктивни**, со способност да предложат корективни мерки, да го моделираат ризикот и да оптимизираат сценарија на евакуација.

Ризици и предизвици

Сепак, автоматизацијата не е без ризици. Најпрво, **зависноста од технологија** носи закана од системски грешки, сајбер напади, хардверски дефекти или софтверски багови, што може да резултира со доцнење или целосен колапс на алармниот систем. Во таков случај, довербата во автоматизираниот систем станува критична, а потребата од **редундантни (резервни) механизми** станува неопходна.

Друг значаен ризик е **намалувањето на човечката интервенција**, што може да доведе до губење професионални рефлекси, прекумерна зависност од системот и слабо обучен персонал во ситуации кога автоматизацијата откажува. Овој проблем бара нова стратегија за обука на кадарот, кој ќе биде подготвен да интервенира соодветно и во дигитално поддржана и во аналогна средина.

Исто така, автоматизацијата често ја поставува дилемата за **правната одговорност**: кој одговара во случај на пропуст – програмерот на системот, производителот на сензорите, операторот што го надгледувал или самиот инженер за безбедност? Ова е особено важно во правни рамки каде што законската регулатива за ВИ и автоматизирани одлуки сè уште е во фаза на развој.

Конечно, не треба да се занемарат и **етичките прашања** – како што се следење на работниците, собирање лични податоци, и потенцијална дискриминација врз основа на автоматизирана процена на ризик. Овие аспекти ја потенцираат потребата од **транспарентност, информираност и согласност**, како основа за одржлива и општествено прифатлива примена на ВИ во безбедносни системи.

Потенцијали	Ризици
Реалновремена детекција на опасност	Системски грешки и сајбер напади
Брза и автоматизирана реакција	Намалена човечка интервенција
Континуирано учење и адаптација	Непрегледност во одговорноста
Предвидување и превенција на пожари	Етички и правни дилеми

Табела бр. 4. *Потенцијали и ризици од автоматизацијата*

1.7.2. Перспективи за интегрирани системи на интелигентна заштита

Во современиот контекст на брзоразвиени технолошки процеси и сè поголеми очекувања за безбедност на работните средини, особено на високоризичните подрачја како што се градилиштата, интегрираните системи за интелигентна заштита се појавуваат како суштинска компонента во идниот развој на пожарната безбедност. Овие системи се темелат врз **конвергенција на повеќе технологии**, како што се вештачка интелигенција (AI), Интернет на нештата (IoT), сензорски мрежи, дигитални близнаци и автоматизирани алгоритми за одлука. Во иднина, се очекува тие да ја заменат фрагментираната и реактивна природа на традиционалните безбедносни модели со **сеопфатен, проактивен и динамичен пристап**.

Концепт на системска интеграција

Интегрираните системи функционираат преку **платформи што ги поврзуваат сите безбедносни слоеви** – од сензорската детекција, преку автоматското известување, до одлучувањето и извршувањето интервенции. Овие системи овозможуваат синхронизирана комуникација меѓу различните модули (алармни системи, евакуациски протоколи, вентилациски системи, системи за гаснење и видеосистеми), што резултира со **брза, прецизна и контекстуално адаптирана реакција**.

На пример, една интегрирана безбедносна платформа може симултано да:

- добие сигнал од сензор за температура што надминува критична граница;
- анализира дали има зголемена концентрација на чад преку визуелна обработка;
- спореди со податоците од дигиталниот близнак на објектот;
- и веднаш да активира алармен систем, да затвори одредени зони и да извести човечки оператори или автоматизирана служба за интервенција.

Таквата **интеграција не е само техничка, туку и когнитивна**, бидејќи системите користат алгоритми што учат од претходни инциденти и приспособливо ги подобруваат своите предиктивни и интервенциски способности.

Динамична предикција и адаптивна заштита

Особено важна перспектива во развојот на овие системи е можноста за **континуирано моделирање на ризикот во реално време**. Преку динамичко следење на параметри, системите не само што регистрираат промени, туку прават и процена на веројатноста за појава на пожарни сценарија. Овие модели се потпираат на податоци од теренот, но и од историјата на претходни настани, климатски услови, типови материјали, и присуство на луѓе.

Најнапредните форми на интегрирани системи веќе се користат во пилот-проекти во држави како Јапонија, Сингапур и Холандија, каде што дигитални близнаци и AI-системи се користат за да се симулираат **пожарни сценарија пред да започне изградбата на објектот**, а потоа истите модели се користат и во реално време за следење на ризикот.

Улога на инженерот за безбедност

Иако автоматизацијата и вештачката интелигенција го трансформираат начинот на кој се управува со безбедносните ризици, **инженерот за безбедност не се заменува, туку се трансформира во координатор на дигиталната безбедносна архитектура**. Во иднина, неговата улога ќе биде повеќе ориентирана кон **надзор на алгоритми, толкување на комплексни податоци и донесување стратегиски одлуки врз основа на податоци**, наместо само физичка инспекција на терен.

Предизвици и предуслови за развој

И покрај потенцијалот, потребна е **подобра регулаторна поддршка**, стандардизација на протоколите за комуникација меѓу системите, обука на кадарот и инвестиции во инфраструктурата. Бидејќи многу градилишта, особено во земјите во развој, работат со ограничени ресурси и ниска технолошка зрелост, потребна е фаза на транзиција и тестирање на овие системи, со цел да се адаптираат на различни локални услови.

II. Методолошки пристап на истражувањето

2.1. Појава на истражувањето

Во последните две децении, градежната индустрија бележи забрзан развој во однос на сложеноста на објектите, технологијата на градба и примената на нови материјали, што придонесува за зголемување на продуктивноста, но истовремено создава и нови безбедносни ризици. Особено загрижувачки е фактот што градежните локации, како динамични и отворени системи, претставуваат средини со висок степен на изложеност на **пожарни инциденти**, кои не само што предизвикуваат материјални штети, туку често водат до загуба на човечки животи. Во таков контекст, појавата на истражувањето произлегува како одговор на итната потреба за ревидирање и унапредување на постојните системи за заштита од пожари.

Традиционалните методи за управување со пожарна безбедност – вклучително пасивни стратегии (како поставување апарати за гаснење пожар или обележување излезни рути) и ограничени системи за алармирање – покажуваат низа слабости, особено кога се соочени со **брзонастапувачки инциденти**, **инфраструктури во изградба** и **ограничена екипираност на локациите**. Овие ограничувања го поттикнуваат интересот за иновации што ќе овозможат **реалновременска анализа**, **предикција на ризик** и **интегрирана интервенција** – што е возможно само преку примената на **вештачка интелигенција (ВИ)** и сродни дигитални технологии.

Поттик за истражувањето претставуваат и бројни меѓународни проекти и научни трудови коишто демонстрираат практична примена на ВИ во предикција на пожарни сценарија, како што е алатката **IFETool** (Intelligent Fire Engineering Tool) развиена во Кина, која комбинира длабоко учење и големи бази на податоци за симулација на пожар во големи објекти. Слични иницијативи се забележани и во Јапонија, каде што IoT-базирани мрежи се поставуваат на активни градилишта за следење температура, чад, хемиски испарувања и движење на работниците – системи коишто во реално време алармираат за можни пожари или евакуациски сценарија.

Соодветно на тоа, ова истражување не се темели само врз детекција на технолошки недостатоци, туку претставува обид за **интердисциплинарна интервенција** во доменот на безбедноста – обединувајќи инженерски, информатички, правни и

организациски аспекти. Фокусот не е само во самата ВИ како технологија, туку и во прашањето **како нејзината примена може да го подобри секојдневното управување со ризици**, да овозможи побрза реакција, и да ја редефинира улогата на инженерот за безбедност како активен учесник во дигиталниот систем.

Преку ова истражување се цели да се:

- изврши **сеопфатна анализа на примената на интелигентни системи за детекција, интервенција и предикција**;
- утврдат реалните **ограничувања и можности** на овие технологии во локален и глобален контекст;
- идентификуваат предизвиците поврзани со **законската регулатива, етичките аспекти и безбедносната култура** во градежните фирми;
- дадат **препораки за оптимизација на пожарната безбедност** преку систематско воведување интелигентни решенија.

Поради тоа, појавата на ова истражување се поставува како рефлексија на една современа потреба: да се преиспита статусот на пожарната безбедност на градилиштата во светлина на дигиталната трансформација и да се обезбеди рамка за **одржливи, предвидливи и технолошки засновани решенија**. Истовремено, истражувањето претставува и придонес кон академската дебата за улогата на вештачката интелигенција во управување со ризик, со што се отвора можност за **иновации, стандардизација и нови парадигми во инженерството за безбедност при работа**.

2.2. Предмет на истражувањето

Објектот на истражувањето претставува поширокото опкружување или доменот во кој се појавува феноменот што се истражува. Во рамки на оваа магистерска студија, **објектот на истражувањето е системот за управување со пожарна безбедност на градилиштата**, согледан низ призмата на современите технолошки трансформации, предизвиците на урбанизацијата, зголемената комплексност на инфраструктурните проекти, и потребата за приспособување кон динамични ризични средини.

Предметот на оваа магистерска работа е **примената на интелигентни технолошки системи – базирани на вештачка интелигенција (AI), машинско учење, сензорски мрежи и дигитални модели – во функција на унапредување на пожарната безбедност на градилиштата**.

Предметот на истражувањето е фокусиран на анализа на потенцијалот на новите технологии да ја надминат инерцијата на традиционалните безбедносни практики. Во таа смисла, се разгледуваат неколку клучни димензии:

1. **Способноста на AI-системите да вршат предикција** на потенцијални пожари преку моделирање податоци добиени од сензори, климатски услови, тип материјали и човечки активности;
2. **Можноста за реалновременска детекција** на прегревање, чад или промени во амбиенталните параметри преку IoT-уреди и edge computing;
3. **Интеграција на BIM и дигитални близнаци** за симулација на еволуција на пожари, пресметка на време за евакуација и анализа на сценарија;
4. **Развивање автоматизирани системи за алармирање и првична интервенција**, без потреба од човечка интервенција во критичните први секунди;
5. **Управување со податоци**, нивна верификација и користење во донесување одлуки во реално време;
6. **Етички и правни дилеми**, поврзани со автоматизацијата на одлучувањето, заштитата на лични податоци и одговорноста при грешки на алгоритмите.

На овој начин, предметот на истражувањето опфаќа не само **технички и инженерски аспекти**, туку и **организациски, регулаторни и етички прашања**, правејќи го истражувањето мултидисциплинарно и релевантно за повеќе научни и професионални области.

2.3. Цел на истражувањето

Целта на ова истражување е да се анализира, развие и предложи интегриран модел за унапредување на пожарната безбедност на градилиштата преку примена на современи интелигентни технологии и вештачка интелигенција. Во својата суштина, истражувањето

има за цел да ја надмине ограниченоста на традиционалните безбедносни системи, кои најчесто се засновани на реактивни мерки и човечки интервенции, и да понуди нов концепт којшто овозможува предикција, превенција и автоматизирана интервенција. На овој начин, целта не е само теоретска анализа на постојните состојби, туку и изработка на практични препораки што можат да бидат применети во реалниот градежен сектор.

Истражувањето е насочено кон навлегување во сложената природа на пожарните ризици на градилишта, кои се јавуваат како резултат на повеќе фактори: употреба на запаливи материјали, привремени инсталации, заварувачки и електрични активности, недоволна координација меѓу подизведувачите, како и ограничен пристап до соодветна опрема за интервенција. Целта е детално да се испитаат овие ризици и да се понуди визија како тие можат да бидат подобро контролирани преку примена на дигитални решенија. Вакви решенија вклучуваат системи за рана детекција базирани на IoT, алгоритми за машинско и длабоко учење коишто можат да препознаат модели што претходат на пожари, како и BIM- и дигитални близнаци коишто овозможуваат симулација на можни сценарија и процена на најсоодветните мерки за интервенција.

Дополнително, целта на истражувањето е да ја процени подготвеноста на организациите и инженерите за безбедност за имплементација на интелигентни технологии во нивната секојдневна пракса. Ова опфаќа испитување на нивото на знаење и техничка компетентност, степенот на прифаќање нови технологии, како и институционалните и регулаторните бариери што можат да го ограничат воведувањето на вакви системи. Со ова, целта се проширува и кон организациските и законските аспекти, со намера да се покаже дека технолошката иновација мора да оди рака под рака со институционална поддршка, етичка усогласеност и култура на безбедност.

Целта има и практична димензија – да се развијат конкретни стратегии за интегрирање на интелигентните системи во постојните безбедносни протоколи на градежните компании. Овие стратегии може да вклучуваат насоки за поставување сензорски мрежи, обука на инженерите и работниците за работа со нови технологии, имплементација на софтвер за анализа на податоци во реално време и усогласување со современите меѓународни стандарди за безбедност. Преку ова, целта е да се поттикне развој на еден

унифициран и проактивен систем што ќе го намали бројот на инциденти, ќе ја зголеми брзината на реакција и ќе придонесе за поголема заштита на човечки животи и имот.

Конечно, целта на истражувањето се надоврзува на глобалните трендови за дигитална трансформација на индустријата, развој на концептот паметни градови и промоција на одржлив развој. Со поставување на вештачката интелигенција како клучен елемент во безбедносното инженерство, се отвора можност не само за технички напредок, туку и за промена на целокупната култура на безбедност на градилиштата. Во таа смисла, целта на ова истражување е да обезбеди нова визија за иднината на пожарната безбедност – визија во која технологијата и човекот дејствуваат заеднички, а превенцијата и интелигентното управување со ризици стануваат основа на секое модерно градилиште.

2.4. Користени методи во истражувањето

Во процесот на изработка на овој магистерски труд, методите што ги применив имаа клучна улога во поставувањето систематски и валиден пристап кон проблемот што го истражував. Свесна за комплексноста на темата – интелигентни системи за управување со пожарна безбедност на градилиштата – од самиот почеток знаев дека не може да се потпирам само врз еден истражувачки метод, туку потребна беше комбинација на повеќе пристапи за да се добие целосна и прецизна слика за состојбата. Затоа мојата методолошка рамка ја изградив врз основа на повеќе меѓусебно поврзани методи и техники, кои во својата целина обезбедуваат и длабочина и широчина на истражувањето.

Најнапред, го користев **методот на анализа и синтеза**. Преку анализа на релевантна научна и стручна литература – книги, научни трудови, извештаи и меѓународни стандарди – ги систематизирав постојните знаења и теоретски пристапи поврзани со управувањето со пожарна безбедност. Овој метод ми овозможи да ги издвојам клучните концепти и да ги согледам слабостите во досегашните решенија, додека преку синтеза ги поврзав добиените сознанија во една кохерентна основа врз која ја надградував мојата анализа.

Потоа применив **компаративен метод**, со кој ги споредував традиционалните безбедносни системи со современите интелигентни решенија. На овој начин ги идентификував предностите и слабостите на двата пристапи и направив разлика меѓу

реактивните мерки што се користеле досега и проактивните мерки што ги овозможуваат новите технологии.

Исто така, користев и **метод на класификација**, преку кој ги групирав видовите пожари и ризиците карактеристични за градилиштата, но и ги категоризирав технолошките решенија (IoT-сензори, машинско учење, дигитални близнаци). Со оваа класификација создадов појасна структура и можност да се споредат различни аспекти на истражувањето.

За да ги обединам поединечните сознанија и да извлечам поширoки заклучоци, применив **метод на генерализација**. Овој метод ми овозможи од конкретните примери, студии на случаи и податоци што ги анализирав да извлечам општи препораки и принципи за примена на интелигентни системи во безбедносното инженерство.

Многу важен сегмент во моето истражување беа **емпириските методи**. Јас подготвив и спроведов анкетен прашалник насочен кон инженери за безбедност, проект-менаџери и работници на терен. Со анкетата ги испитав нивните ставови за ризиците од пожари, нивото на свесност и подготвеноста да се прифатат интелигентни технологии во безбедносните протоколи.

Во техничкиот дел на трудот, користев **метод на симулација и моделирање**. Со помош на CFD-алатки (како што е Fire Dynamics Simulator) и BIM-платформи, анализирав сценарија на развој на пожар, ширење чад и можни стратегии за евакуација. Ваквите симулации беа неопходни затоа што овозможија тестирање на сценарија коишто во реалност би биле премногу опасни и скапи за проверка.

Конечно, применив и **правно-компаративен метод** за анализа на регулативите и стандардите поврзани со безбедноста при работа и заштита од пожари. На овој начин го оценив степенот на усогласеност на локалното законодавство со европските и меѓународните стандарди, што ми овозможи да предложам насоки за негово унапредување.

Сумирано, преку оваа комбинација од аналитички, компаративни, емпириски и симулациски методи успеав да создадам интердисциплинарна рамка којашто овозможи истражувањето да биде и академски засновано и практично применливо. Убедена сум дека

токму овој пристап придонесе кон тоа мојот труд да даде научна, но и реална практична вредност за подобрување на пожарната безбедност на градилиштата.

2.4. Хипотетичка рамка

Формирањето на хипотетичката рамка претставува клучен методолошки инструмент преку кој истражувањето добива насока и проверливост. Основната цел на поставената рамка е да се утврди дали примената на интелигентни системи во управувањето со пожарната безбедност на градилиштата обезбедува значително повисоко ниво на заштита во споредба со традиционалните пристапи. Со тоа се создава основа за тестирање на претпоставките преку теоретска анализа, симулации и емпириски податоци.

Главна хипотеза

Интеграцијата на интелигентни системи базирани на IoT-технологии, машинско учење, длабоки невронски мрежи и дигитални близнаци овозможува повисок степен на превенција, навремено препознавање и поефикасно справување со пожарните ризици на градилиштата во споредба со конвенционалните безбедносни механизми.

Подхипотези

За проверка на главната хипотеза се формулираат следниве подхипотези:

1. **IoT- и сензорски мрежи**
   Примената на IoT-системи и сензорски мрежи овозможува рана детекција на пожарни индикатори и побрза активација на алармните механизми, со што се намалува веројатноста за ескалација на пожарот.

2. **Машинско и длабоко учење**
   Алгоритмите за машинско и длабоко учење имаат капацитет да обработуваат големи количини податоци и да идентификуваат обрасци коишто не се лесно препознатливи за човек или за класични системи за детекција, што резултира со попрецизни предиктивни модели.

3. **BIM-технологии и дигитални близнаци**
   Интегрирањето на BIM-технологијата и дигиталните близнаци овозможува симулација на различни пожарни сценарија и динамичко следење на параметри во

реално време, што придонесува за поефикасно планирање на евакуацијата и навремена интервенција.

4. **Организациски фактори**

   Ефективноста на интелигентните системи во голема мера зависи од организациската поддршка. Интеграцијата на ваквите технологии во организациската структура, со активна вклученост на инженерите за безбедност, придонесува за зголемена свесност, дисциплина и култура на безбедност кај сите учесници во градежниот процес.

III. Анализа на истражувањето

3.1. Презентација на резултатите од анкетниот прашалник

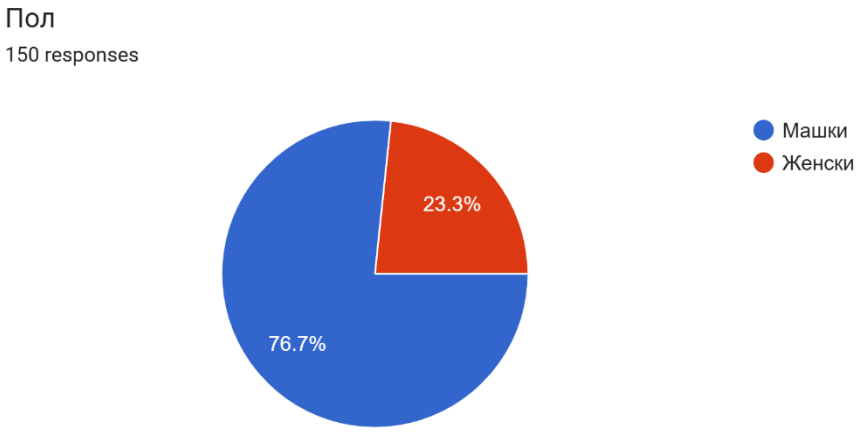
Цел на анкетниот прашалник беше да се обезбедат релевантни сознанија за ставовите, свесноста и искуствата на испитаниците во врска со пожарната безбедност на градилиштата, како и за можностите и предизвиците поврзани со интеграцијата на интелигентни системи во оваа област. Со спроведувањето на анкетата се настојува да се добијат податоци коишто ќе овозможат проверка на поставената хипотеза, според која примената на современи технологии – како што се IoT-сензорските мрежи, алгоритмите за машинско и длабоко учење, BIM-технологијата и дигиталните близнаци – придонесува за поефикасна превенција, навремено препознавање и справување со пожарните ризици на градилиштата во споредба со традиционалните безбедносни механизми.

Резултатите се прикажани систематски за секое прашање од анкетниот прашалник. За секоја група прашања изработени се табеларни и графички прикази, проследени со аналитичка интерпретација, со цел да се утврди степенот на усогласеност на одговорите со поставените подхипотези. На тој начин, анализата обезбедува јасна слика за тековната состојба на свесноста и подготвеноста за примена на интелигентни системи, но и за организациските фактори коишто го олеснуваат или отежнуваат нивното воведување.

Прашање 1. Пол

Пол	Број на испитаници
Машки	115
Женски	35
Вкупно	**150**

Табела бр. 5. *Прашање 1.*



Дијаграм бр. 5. *Прашање 1.*

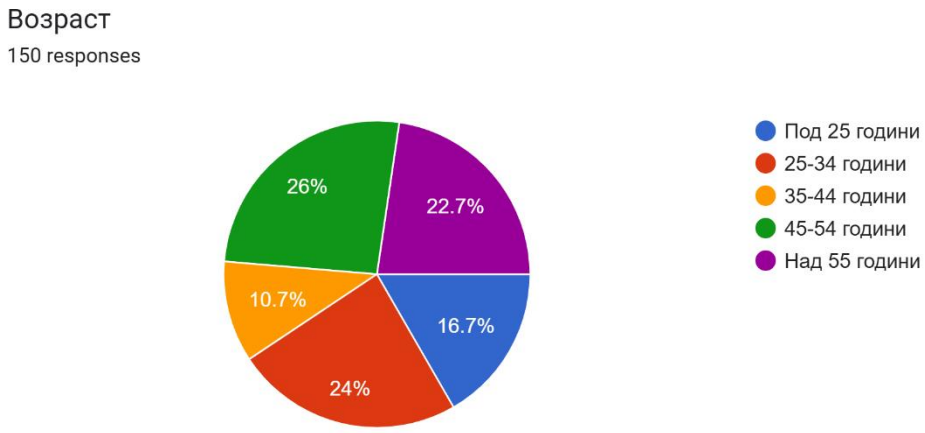
Од вкупно 150 анкетирани лица, 115 (77 %) се од машки пол, а 35 (23 %) од женски пол. Ваквата распределба укажува дека поголемиот дел од испитаниците припаѓаат на машката популација, што е очекувано со оглед на специфичниот контекст на градежниот сектор, каде традиционално доминира машката работна сила. Сепак, присуството на 23 % испитанички од женски пол претставува значаен показател за постепеното зголемување на учеството на жени во различни сегменти од индустријата, вклучително и во области поврзани со безбедноста и инженерството. Оваа структура на примерокот овозможува да се согледаат евентуалните разлики во перцепцијата и свесноста за пожарната безбедност и примената на интелигентните системи во зависност од полот на испитаниците.

Прашање 2. Возраст

Возраст	**Број на испитаници**
Под 25 години	25
25 – 34 години	36
35 – 44 години	16

45 – 54 години	39
Над 55 години	34
Вкупно	**150**

Табела бр. 6. *Прашање 2.*



Дијаграм бр. 6*. Прашање 2.*

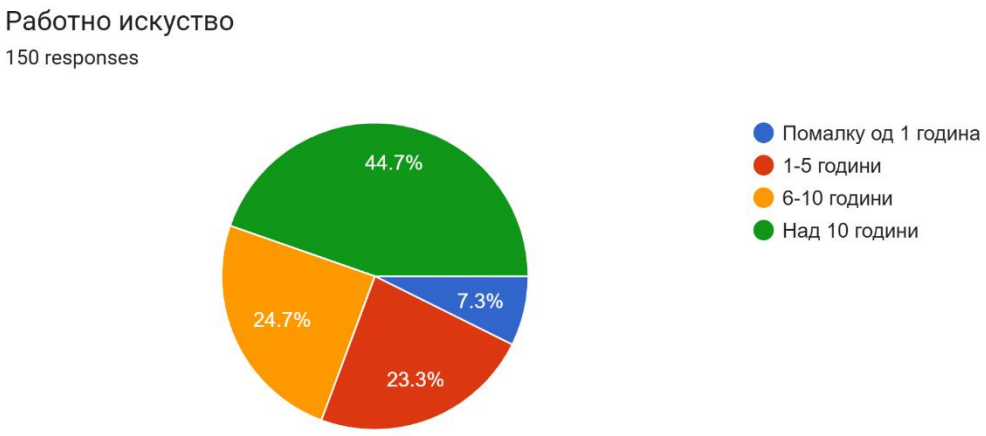
Од вкупниот број на испитаници, најзастапена е возрасната група од **45 до 54 години** со 39 лица (26 %), проследена со групата од **25 до 34 години** со 36 лица (24 %). Значајно присуство се забележува и кај категоријата **над 55 години** (34 лица, 23 %), што укажува на големо учество на поискусни и подолговремено вработени работници во истражувањето. Помалку застапени се младите под **25 години** (25 лица, 17 %) и групата од **35 до 44 години** (16 лица, 10 %).

Овие резултати покажуваат дека примерокот ги опфаќа сите возрасни категории, но со доминација на средновозрасни и постари испитаници. Ваквата структура е значајна бидејќи овозможува да се согледаат разликите во ставовите и свесноста за пожарна безбедност и примена на интелигентни системи во зависност од работното искуство и генерациската припадност. Особено е важно учеството на групите над 45 години, бидејќи нивното искуство и подолгогодишна практика во индустријата може да влијаат врз нивната перцепција за новите технолошки решенија.

Прашање 3. Работно искуство

Работно искуство	Број на испитаници
Помалку од 1 година	11
1 – 5 години	35
6 – 10 години	37
Над 10 години	67
Вкупно	**150**

Табела бр. 7. *Прашање 3.*



Дијаграм бр. 7. *Прашање 3.*

Резултатите покажуваат дека најголем дел од испитаниците имаат **повеќе од 10 години работно искуство** – вкупно 67 лица (45 %). Овој факт укажува дека во анкетата учествувале претежно поискусни лица, чија експертиза и долгогодишно практично познавање на работните процеси може значително да влијае врз нивната перцепција за безбедносните ризици и примена на нови технологии.

Групата со **6 до 10 години искуство** е застапена со 37 лица (25 %), а речиси еднакво голема е и групата со **1 до 5 години искуство** (35 лица, 23 %). Овие категории претставуваат средноискусни работници коишто можат да понудат балансирана перспектива меѓу традиционалните практики и отвореноста кон нови решенија.

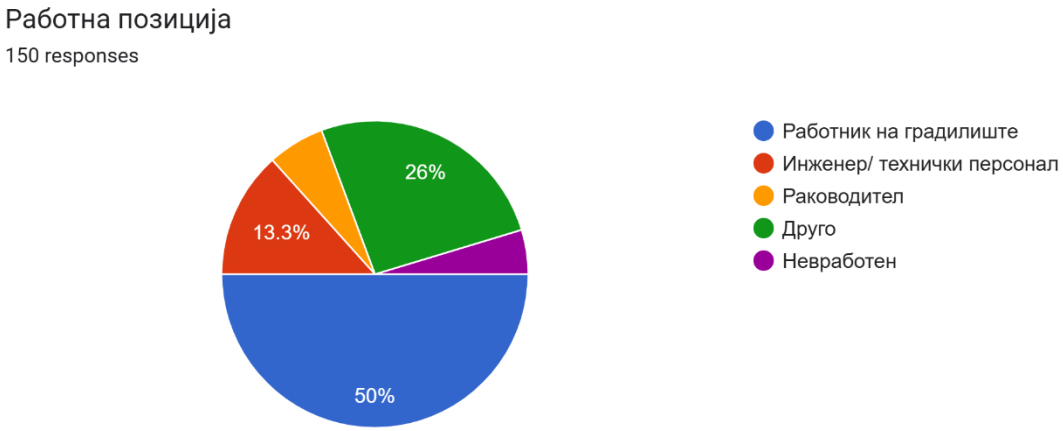
Најмалку застапени се испитаниците со **помалку од една година искуство** – само 11 лица (7 %). Ова е очекувано, имајќи предвид дека градежниот сектор бара постепено стекнување на стручност и дека нововработените често се соочуваат со почетни ограничувања во учество на специфични активности.

Ваквата распределба создава можност да се согледаат разликите во ставовите и свесноста за пожарната безбедност според должината на работното искуство, што претставува значаен индикатор за проверка на поставените подхипотези.

Прашање 4. Работна позиција

Работна позиција	Број на испитаници
Работник на градилиште	75
Инженер/технички персонал	20
Раководител	9
Невработен	7
Друго	39
Вкупно	**150**

Табела бр. 8. *Прашање 4.*



Дијаграм бр. 8. *Прашање 4.*

Најголем дел од испитаниците – **75 лица или 50 %** – се вработени како **работници на градилиште**. Овој резултат е очекуван, бидејќи токму оваа категорија претставува најголем дел од оперативната сила во градежниот сектор и е директно изложена на ризици од пожари и други опасности на работното место.

Категоријата **друго**, со 39 испитаници (26 %), покажува дека во анкетата учествувале и лица коишто не припаѓаат строго на класичните професионални улоги, но сепак се поврзани со секторот. Во оваа група можат да се вклучат административни работници, поддржувачки персонал или лица коишто индиректно се вклучени во градежните процеси.

Инженер/технички персонал е застапен со 20 испитаници (13 %), што претставува значајна група во контекст на истражувањето, бидејќи токму инженерите имаат клучна улога во интеграцијата на нови технолошки решенија и обезбедување на пожарната безбедност.

Раководители се застапени со 9 лица (6 %), додека **невработени** има 7 испитаници (5 %). Иако се малубројни, овие категории се важни бидејќи даваат увид во ставовите на оние што носат одлуки на управувачко ниво и на оние што во моментов не се вклучени во работниот процес, но можат да понудат различна перспектива.

Овие резултати ја нагласуваат разновидноста на примерокот, со што се овозможува подлабока анализа на перцепциите и ставовите за пожарната безбедност и интелигентните системи во зависност од професионалната улога на испитаниците.

Прашање 4. Дали сте запознаен/-а со постојните мерки за пожарна безбедност на работното место?

Одговор	Број на испитаници
Да	102
Делумно	36
Не	13
Вкупно	**151**

Табела бр. 9. *Прашање 5.*



Дијаграм бр. 9. *Прашање 5.*

Најголем дел од испитаниците, **102 лица или 68 %**, одговориле дека се **целосно запознаени** со постојните мерки за пожарна безбедност на своето работно место. Ова е позитивен показател што укажува дека кај мнозинството постои свесност за воспоставените протоколи и процедури.

Сепак, значителен дел – **36 лица или 24 %** – одговориле со **делумно**, што укажува на постоење празнини во информираноста или во практичната применливост на мерките. Овој резултат покажува потреба од дополнителни обуки и јасна комуникација на безбедносните политики.

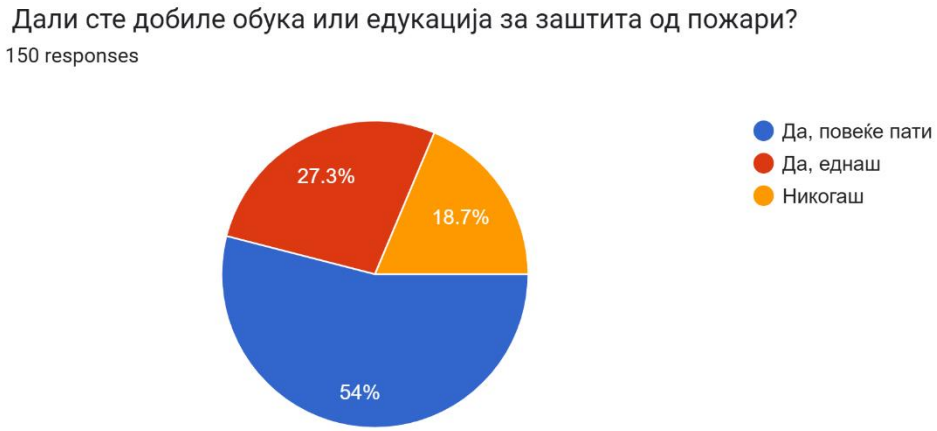
Загрижувачки е што **13 испитаници (8 %)** воопшто не се запознаени со мерките за пожарна безбедност. Овој сегмент претставува ризичен фактор, бидејќи нивното непознавање може директно да влијае врз ефикасноста на евакуацијата и превентивните активности при настанување пожар.

Оваа распределба покажува дека иако доминира позитивна слика, сепак постои простор за подобрување во системот на информирање и едукација на работниците, што е во согласност со подхипотезата којашто нагласува дека ефективноста на безбедносните мерки зависи од нивната практична усвоеност и организациска поддршка.

Прашање 6. Дали сте добиле обука или едукација за заштита од пожари?

Одговор	Број на испитаници
Да, повеќе пати	80
Да, еднаш	41
Не	28
Вкупно	**149**

Табела бр. 10. *Прашање 6.*



Дијаграм бр. 10. *Прашање 6.*

Повеќето испитаници, **80 лица (54 %)**, изјавиле дека **повеќе пати учествувале** во обуки или едукации за заштита од пожари. Овој резултат е позитивен индикатор дека значителен дел од работната сила е континуирано изложен на практична и теоретска подготовка за справување со пожарни ризици.

Со **да, еднаш** одговориле **41 испитаник (28 %)**, што укажува на минимално, но сепак присутно искуство со обуки. Иако оваа група има одредено познавање, повторувањето на вакви активности е неопходно за одржување на актуелно ниво на компетенции.

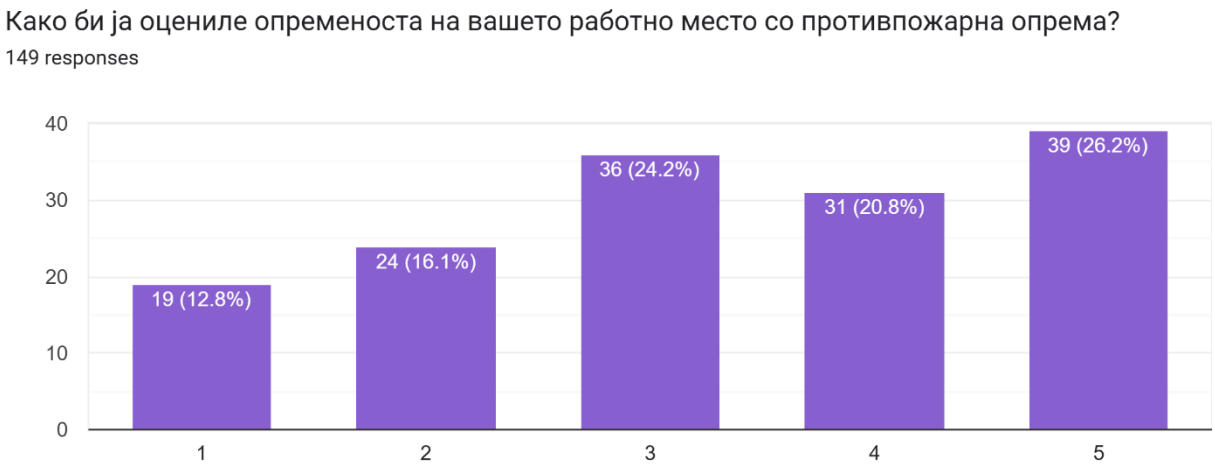
Загрижувачки е што **28 лица (19 %)** никогаш не учествувале во обука или едукација за заштита од пожари. Овој резултат ја истакнува потребата од дополнителни напори од страна на организациите за да се опфатат сите работници, бидејќи отсуството на обука значително го зголемува ризикот од несоодветна реакција во реално опасна ситуација.

Заклучокот е дека иако мнозинството има искуство со обуки, постои простор за унапредување на обемот и фреквенцијата на ваквите активности, што е во согласност со организациската подхипотеза за важноста на системската поддршка и развој на безбедносната култура.

Прашање 7. Како би ја оцениле опременоста на работното место со противпожарна опрема?

Оценка (1 – 5)	Број на испитаници
1 – Многу слабо опремено	19
2	24
3	36
4	30
5 – Одлично опремено	39
Вкупно	**148**

Табела бр. 11. *Прашање 7.*



Дијаграм бр. 11. *Прашање 7.*

Резултатите укажуваат на разноликост во перцепцијата на испитаниците за степенот на опременост со противпожарна опрема. Најголем број од нив, **39 лица (26 %)**,

дале максимална оценка **5 – одлично опремено**, што покажува дека постојат работни места каде што опременоста е на задоволително ниво.

Од друга страна, значителен дел од испитаниците – **36 лица (24 %)** – дале средна оценка **3**, што сигнализира умерена, но недоволна опременост. Блиску до оваа група се и оние коишто оцениле со **4** – вкупно **30 лица (20 %)**, што може да се толкува како релативно добро, но сепак со простор за подобрување.

Загрижувачки е присуството на **19 испитаници (13 %)** коишто сметаат дека нивното работно место е **многу слабо опремено**, како и дополнителни **24 лица (16 %)** коишто дале оценка **2**. Вкупно **43 испитаници (29 %)** ја оценуваат опременоста негативно.

Овие резултати укажуваат на значителна хетерогеност во инфраструктурната подготвеност за справување со пожари. Иако дел од организациите се добро опремени, постои исто толку значаен дел каде што недостига противпожарна опрема. Овој дисбаланс ја нагласува потребата од систематска интервенција и усогласување на стандардите со цел да се обезбеди еднаков степен на заштита за сите работници.

Прашање 8. Дали сте учествувале во практична вежба за евакуација или гаснење пожар?

Одговор	Број на испитаници
Да	97
Не	52
Вкупно	**149**

Табела бр. 12. *Прашање 8.*



Дијаграм бр. 12. *Прашање 8.*

Од вкупно 149 испитаници, **97 лица (65 %)** учествувале во практична вежба за евакуација или гаснење пожар. Овој резултат е охрабрувачки и покажува дека мнозинството работници имаат практично искуство во справување со вакви ситуации. Практичните вежби претставуваат суштински елемент во развојот на безбедносната култура, бидејќи обезбедуваат реална симулација на услови коишто можат да се појават во случај на пожар.

Сепак, **52 лица (35 %)** изјавиле дека никогаш не учествувале во вакви активности. Овој податок е значаен, бидејќи укажува дека една третина од испитаниците немаат практична подготовка за ефикасно реагирање во итна ситуација. Недостатокот на искуство може да ја намали ефикасноста на колективната реакција при вистински пожар и претставува слабост во системот за управување со ризици.

Заклучокот е дека иако мнозинството работници се практично подготвени, потребно е пошироко системско опфаќање на сите категории на вработени за да се постигне унифицирано ниво на подготвеност. Овој аспект директно се надоврзува на организациската подхипотеза којашто ја нагласува важноста на институционалната поддршка за развој на безбедносна култура.

Прашање 9. Дали сте слушнале за примена на IoT-системи (сензори, паметни уреди) во областа на пожарната безбедност?

Одговор	Број на испитаници
Да	70
Не	80
Вкупно	**150**

Табела бр. 13. *Прашање 9.*



Дијаграм бр. 12. *Прашање 9.*

Резултатите покажуваат дека **70 испитаници (47 %)** се запознаени со примена на **IoT-системи** во областа на пожарната безбедност, додека **80 испитаници (53 %)** никогаш не слушнале за ваква примена.

Овој резултат е особено значаен бидејќи укажува дека и покрај сè поголемата примена на интелигентни технологии во светски рамки, свесноста за нивните можности во локален контекст сè уште е ограничена. Недостатокот на информации кај повеќе од половина од испитаниците ја нагласува потребата за едукација и промоција на ваквите системи.

Фактот што речиси половина од учесниците сепак се запознаени со IoT-решенија претставува позитивен сигнал дека постои основа за понатамошна интеграција. Овој

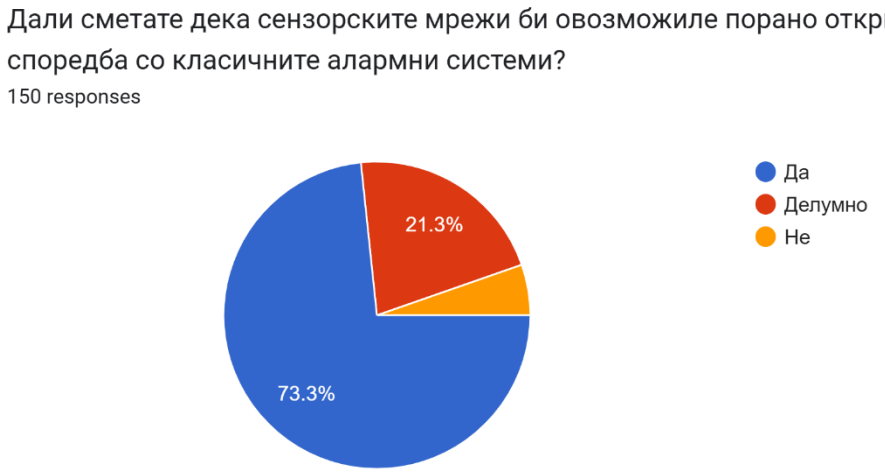
сегмент може да биде поттикнувачки фактор за организациите да инвестираат во нови технологии, особено ако постои поддршка од инженерите за безбедност и соодветни обуки.

Ваквата распределба директно ја поткрепува првата подхипотеза, според која примената на IoT-системи и сензорски мрежи овозможува рана детекција и побрза реакција, но исто така ја нагласува потребата од ширење на знаењето и практичното воведување на овие технологии во градежниот сектор.

Прашање 10. Дали сметате дека сензорските мрежи би овозможиле порано откривање пожар во споредба со класичните алармни системи?

Одговор	Број на испитаници
Да	110
Делумно	31
Не	8
Вкупно	**149**

Табела бр. 14. *Прашање 10.*



Дијаграм бр. 14. *Прашање 10.*

Апсолутното мнозинство од испитаниците – **110 лица (74 %)** – сметаат дека **сензорските мрежи овозможуваат порано откривање пожар** во споредба со класичните алармни системи. Овој резултат јасно укажува дека постои силна доверба во супериорноста на современите IoT-решенија.

Дополнителни **31 испитаник (21 %)** одговориле **делумно**, што покажува дека постои одредена скепса или недоволна информираност за конкретните предности на сензорските технологии.

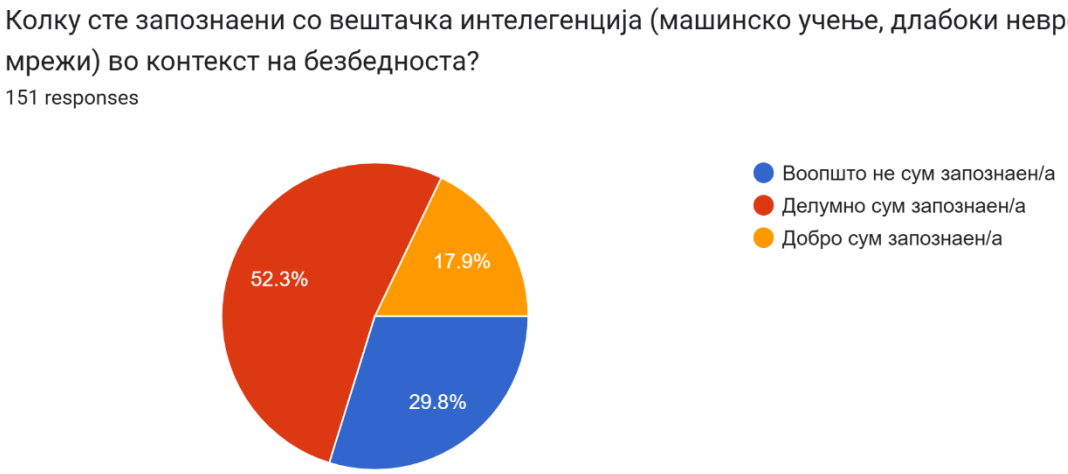
Само **8 лица (5 %)** сметаат дека сензорските мрежи не нудат предност во однос на традиционалните системи. Иако се малуброjни, нивните одговори укажуваат дека постојат одредени групи што сè уште имаат поголема доверба во конвенционалните механизми или им недостигаат конкретни искуства со примена на нови технологии.

Овие резултати ја потврдуваат првата подхипотеза од истражувањето, според која IoT-системите и сензорските мрежи овозможуваат рана детекција и побрза активација на алармни механизми. Одговорите покажуваат дека свесноста за оваа предност е висока, што создава основа за понатамошна практична имплементација во градежниот сектор.

Прашање 11. Колку сте запознаен/-а со вештачка интелигенција (машинско учење, длабоки невронски мрежи) во контекст на безбедноста?

Одговор	Број на испитаници
Добро сум запознаен/-а	27
Делумно сум запознаен/-а	78
Воопшто не сум запознаен/-а	45
Вкупно	**150**

Табела бр. 15. *Прашање 11.*



Дијаграм бр. 15. *Прашање 11.*

Најголем дел од испитаниците – **78 лица (52 %)** – изјавиле дека се **делумно запознаени** со концептите на вештачка интелигенција, вклучително машинско учење и длабоки невронски мрежи. Овој резултат покажува дека кај мнозинството постои основна свесност, но не и целосно разбирање на потенцијалот на овие технологии.

Значаен сегмент – **45 лица (30 %)** – изјавиле дека се **воопшто не запознаени**. Овој податок е индикатор за голем недостиг од информации и образование во оваа област, што претставува пречка за поширока интеграција на интелигентни системи во практиката.

Само **27 испитаници (18 %)** изјавиле дека се **добро запознаени** со примената на вештачка интелигенција во контекст на безбедноста. Иако малуброjна, оваа група може да се смета за потенцијален носител на промени и иновации во организациите, бидејќи поседува релевантно знаење и капацитет за примена на нови решенија.

Овие резултати ја потврдуваат втората подхипотеза од истражувањето, која предвидува дека алгоритмите за машинско и длабоко учење имаат капацитет за поефикасна обработка на податоци и предвидување ризици. Но, истовремено ја нагласуваат и потребата од едукација и развој на знаења кај поширокатa работна сила за да се овозможи нивна практична имплементација.

Прашање 12. Дали сметате дека алгоритмите за машинско учење можат да предвидат и предупредат за пожарни ризици поефикасно од човек?

Одговор	Број на испитаници
Да	76
Делумно	64
Не	10
Вкупно	**150**

Табела бр. 16. *Прашање 12.*



Дијаграм бр. 16. *Прашање 12.*

Повеќето испитаници, **76 лица (51 %)**, изразиле согласност дека **алгоритмите за машинско учење** можат да предвидат и предупредат за пожарни ризици поефикасно од човек. Овој резултат ја рефлектира довербата во способноста на напредните технологии да обработуваат големи количини податоци и да идентификуваат обрасци коишто би можеле да останат непрепознаени од страна на луѓето.

Значителен дел – **64 испитаници (43 %)** – одговориле **делумно**, што укажува на одредена резервираност или недоверба во целосната замена на човековата процена. Ова е индикатор дека дел од работната сила верува во комбиниран пристап – каде алгоритмите претставуваат поддршка, но не и единствено средство за предвидување.

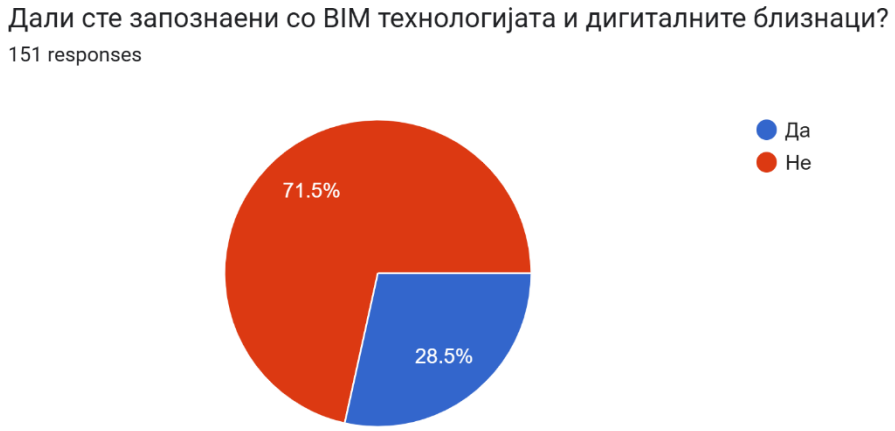
Само **10 лица (6 %)** сметаат дека алгоритмите не се поефикасни од човек. Ова малцинство може да произлегува од недоволно познавање на технологијата или поголема доверба во човечката интуиција и искуство.

Овие резултати се во согласност со втората подхипотеза, според која алгоритмите за машинско и длабоко учење обезбедуваат попрецизни предиктивни модели во споредба со традиционалните пристапи. Но, истовремено ја нагласуваат потребата за интегриран систем во кој технологијата ќе дејствува како поддршка на инженерите и работниците, наместо како целосна замена.

Прашање 13. Дали сте запознаен/-а со BIM-технологијата и дигиталните близнаци?

Одговор	Број на испитаници
Да	43
Не	107
Вкупно	**150**

Табела бр. 17. *Прашање 13.*



Дијаграм бр. 17. *Прашање 13.*

Големо мнозинство од испитаниците – **107 лица (71 %)** – изјавиле дека **не се запознаени** со BIM-технологијата и дигиталните близнаци. Ова укажува на сериозен недостаток на информации и практична примена на овие современи методологии во локалниот контекст.

Од друга страна, **43 испитаници (29 %)** одговориле дека се запознаени со овие технологии. Иако ова претставува малцинска група, сепак е индикативно дека постои одредено ниво на информираност и потенцијална подготвеност за прифаќање на иновативни решенија.

Овој резултат ја потврдува третата подхипотеза од истражувањето, според која BIM-технологијата и дигиталните близнаци претставуваат клучни алатки за симулација на пожарни сценарија и динамичко следење на ризиците. Недоволната свесност кај мнозинството испитаници ја нагласува потребата од дополнителни едукации и практични демонстрации за нивната примена.

Заклучокот е дека иако постои одредена база на информирани лица, најголем дел од работната сила во градежниот сектор сè уште не е запознаена со можностите што ги нуди оваа технологија, што претставува сериозен предизвик за нејзина интеграција во иднина.

Прашање 14. Колку сметате дека симулациите со дигитални близнаци можат да помогнат во подобро планирање на евакуација?

Оценка (1 – 5)	Број на испитаници
1 – воопшто не помагаат	4
2	13
3	45
4	31
5 – многу помагаат	56
Вкупно	**149**

Табела бр. 18. *Прашање 14.*



Дијаграм бр. 18. *Прашање 14.*

Резултатите покажуваат дека најголем број испитаници, **56 лица (38 %)**, дале максимална оценка – **многу помагаат**, изразувајќи високо ниво на доверба во корисноста на дигиталните близнаци за планирање на евакуација.

Веднаш по нив следуваат **45 испитаници (30 %)**, кои одговориле со **3**, што укажува на умерено позитивно, но не целосно убедено гледиште. Дополнително, **31 испитаник (21 %)** ја оцениле корисноста со **4**, што е знак за значителен, но не максимален оптимизам.

Спротивно на ова, **13 лица (9 %)** дале оценка **2**, а само **4 лица (3 %)** ја сметаат оваа технологија за воопшто непомошна (**1**). Овие резултати укажуваат дека иако постојат одредени скептици, тие се во малубројни.

Оваа распределба потврдува дека и покрај ниското ниво на општа запознаеност со BIM-технологијата и дигиталните близнаци (како што се покажа во претходното прашање), испитаниците препознаваат висок потенцијал во нивната примена. Тоа претставува значајна поддршка на третата подхипотеза, според која симулациите овозможуваат поефикасно планирање на евакуацијата и навремено справување со ризици.

Прашање 15. Дали организацијата каде што работите инвестира во нови технологии за безбедност?

Одговор	Број на испитаници
Да	49
Делумно	51
Не	50
Вкупно	**150**

Табела бр. 19. *Прашање 15.*



Дијаграм бр. 19. *Прашање 15.*

Резултатите укажуваат на речиси рамномерна распределба меѓу трите можни одговори, што открива хетерогеност во пристапот на организациите кон инвестирање во нови технологии за безбедност.

- **49 испитаници (33 %)** сметаат дека нивната организација инвестира во нови технологии, што претставува позитивен сигнал за постоење иновативни практики во одредени компании.
- **51 испитаник (34 %)** одговорил **делумно**, што укажува на тоа дека инвестициите се селективни, недоволни или ограничени само на одредени сегменти.

- **50 испитаници (33 %)** изјавиле дека нивната организација воопшто не инвестира во вакви технологии, што ја потврдува конзервативноста на дел од секторот и потенцијалниот недостиг од ресурси.

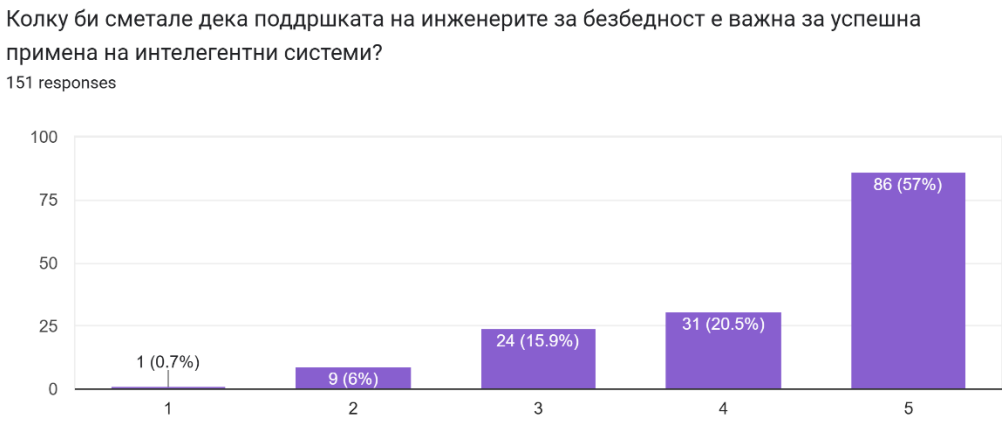
Овие резултати јасно покажуваат дека иако постојат примери на позитивни практики, генерално гледано, нема унифицирана стратегија за воведување нови безбедносни технологии. Оваа констатација ја поткрепува четвртата подхипотеза, која нагласува дека организациската поддршка е клучен фактор за успешна интеграција на интелигентните системи.

Прашање 16. Колку сметате дека поддршката на инженерите за безбедност е важна за успешна примена на интелигентни системи?

Оценка (1 – 5)	Број на испитаници
1 – воопшто не е важна	1
2	9

3	24
4	30
5 – многу е важна	86
Вкупно	**150**

Табела бр. 20. *Прашање 16.*



Дијаграм бр. 20. *Прашање 16.*

Апсолутното мнозинство од испитаниците, **86 лица (57 %)**, дале максимална оценка **5 – многу е важна**, со што се нагласува клучната улога на инженерите за безбедност во успешната интеграција на интелигентни системи. Овој резултат јасно ја потврдува организациската подхипотеза дека технолошките решенија можат да бидат ефективни само ако постои силна институционална и стручна поддршка.

Значителен дел – **30 испитаници (20 %)** – одговориле со **4**, што исто така укажува на високо ниво на согласност, но со мала резерва. Со тоа, може да се заклучи дека дури 77 % од испитаниците ја согледуваат поддршката на инженерите како критичен фактор за успешна примена.

Меѓу умерените одговори, **24 лица (16 %)** дале оценка **3**, што може да се толкува како неутрална или неодлучна позиција. Малцинството одговори – **2** со 9 лица (6 %) и **1** со

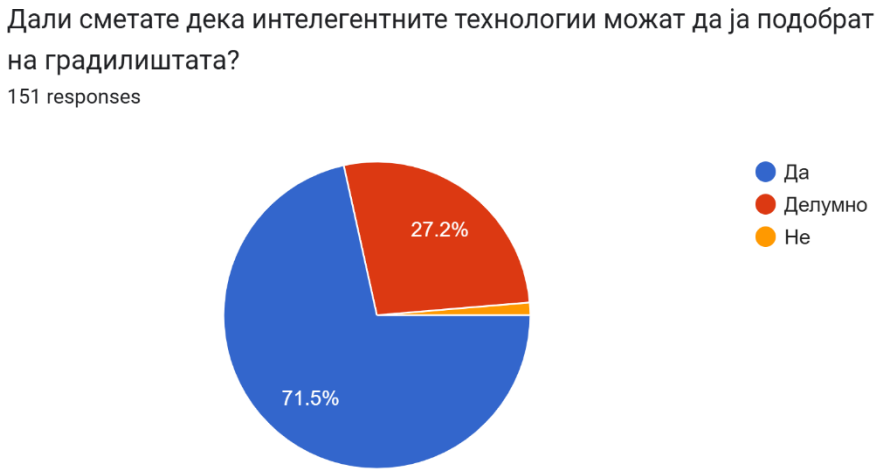
само еден испитаник (1 %) – укажуваат на минимално присуство на скепса за улогата на инженерите.

Оваа распределба јасно ја поткрепува важноста на човечкиот фактор и експертизата во процесот на дигитална трансформација. Иако интелигентните системи се технолошки напредни, нивната имплементација зависи од компетентноста, надзорот и поддршката на инженерите за безбедност.

Прашање 17. Дали сметате дека интелигентните технологии можат да ја подобрат безбедносната култура на градилиштата?

Одговор	Број на испитаници
Да	108
Делумно	40
Не	2
Вкупно	**150**

Табела бр. 21. *Прашање 17.*



Дијаграм бр. 21. *Прашање 17.*

Апсолутното мнозинство од испитаниците – **108 лица (72 %)** – сметаат дека **интелигентните технологии можат да ја подобрат безбедносната култура на**

градилиштата. Овој резултат е силен индикатор за постоење позитивен став кон примена на современи технолошки решенија во градежниот сектор.

Значителен дел од испитаниците – **40 лица (27 %)** – одговориле **делумно**. Овој сегмент укажува на умерен оптимизам, но и на извесна резервираност, веројатно поврзана со сомнеж во тоа колку брзо и ефикасно овие технологии можат да се имплементираат во практиката.

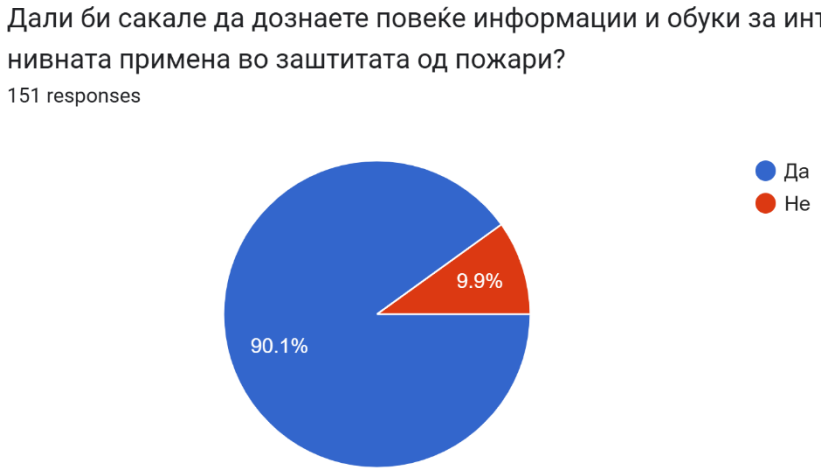
Само **2 испитаници (1 %)** изразиле целосна недоверба (**не**), што укажува дека скептицизмот е речиси занемарлив.

Овие резултати ја потврдуваат главната хипотеза на истражувањето, според која интеграцијата на интелигентни системи овозможува значајно унапредување на безбедносната култура, превенција и справување со пожарни ризици. Доминирачкиот позитивен став кај испитаниците покажува дека постои силна основа за практична примена и развој на ваквите решенија.

Прашање 18. Дали би сакал/-а да дознаете повеќе информации и обуки за интелигентните системи и нивната примена во заштитата од пожари?

Одговор	Број на испитаници
Да	135
Не	15
Вкупно	**150**

Табела бр. 22. *Прашање 18.*



Дијаграм бр. 22. *Прашање 18.*

Апсолутното мнозинство на испитаниците – **135 лица (90 %)** – изразиле интерес да дознаат повеќе информации и да учествуваат во обуки за интелигентните системи и нивната примена во заштитата од пожари. Овој резултат јасно покажува дека постои висока подготвеност за надградување на знаењата и вклучување во современи технолошки решенија.

Само **15 лица (10 %)** одговориле со **не**, што претставува маргинален дел од примерокот. Овој сегмент може да биде поврзан со скепса, недостиг на интерес или недоволно разбирање на практичните придобивки од овие системи.

Ваквите резултати се мошне значајни бидејќи ја потврдуваат потребата од организирање систематски обуки, семинари и практични работилници. Тие директно ја поддржуваат главната хипотеза, според која интеграцијата на интелигентните технологии во голема мера зависи од подготвеноста и вклученоста на работната сила.

Заклучокот е дека во градежниот сектор постои високо ниво на заинтересираност и отвореност за нови знаења, што претставува силна основа за успешна примена на интелигентни системи за пожарна безбедност.

3.2. Тестирање хипотези

Формирањето и тестирањето на хипотезите претставува суштински методолошки процес што овозможува систематска проверка на поставените претпоставки. Главната хипотеза во ова истражување се однесува на интеграцијата на интелигентните системи во управувањето со пожарната безбедност на градилиштата и предвидува дека ваквата интеграција овозможува повисок степен на превенција, навремено препознавање и поефикасно справување со пожарните ризици во споредба со традиционалните безбедносни механизми. За да се потврди или отфрли оваа хипотеза, беа формулирани четири подхипотези чија валидност беше проверувана преку резултатите од анкетниот прашалник.

Подхипотеза 1: IoT и сензорски мрежи

Првата подхипотеза претпоставува дека примената на IoT-системи и сензорски мрежи овозможува рана детекција на пожарни индикатори и побрза активација на алармните механизми. Резултатите од анкетата покажуваат дека 47 % од испитаниците веќе слушнале за примена на IoT-системи во областа на пожарната безбедност, додека 53 % не се запознаени. И покрај оваа недоволна свесност, големо мнозинство од 74 % смета дека сензорските мрежи овозможуваат порано откривање пожар во споредба со класичните алармни системи. Само 5 % одговориле негативно. Овие резултати јасно ја потврдуваат подхипотезата, демонстрирајќи дека испитаниците препознаваат значајна предност на современите IoT-решенија, иако практичната запознаеност со овие технологии е сè уште ограничена.

Подхипотеза 2: Машинско и длабоко учење

Втората подхипотеза се однесува на капацитетот на алгоритмите за машинско и длабоко учење да обработуваат големи количини податоци и да идентификуваат обрасци коишто не се лесно препознатливи за човекот, што резултира со попрецизни предиктивни модели. Податоците покажуваат дека 52 % од испитаниците се делумно запознаени со примената на вештачка интелигенција во областа на безбедноста, 30 % воопшто не се запознаени, а само 18 % изјавиле дека се добро информирани. И покрај ова, 51 % сметаат дека алгоритмите за машинско учење можат да предвидат пожарни ризици поефикасно од човек, додека 43 % изразиле делумна согласност. Само 6 % одговориле негативно. Овие резултати ја потврдуваат подхипотезата: иако информативната основа е релативно ниска,

перцепцијата на ефикасноста на алгоритмите е претежно позитивна, што укажува на потенцијал за нивна практична примена во превентивни системи.

Подхипотеза 3: BIM-технологии и дигитални близнаци

Третата подхипотеза предвидува дека интеграцијата на BIM-технологијата и дигиталните близнаци овозможува симулација на различни пожарни сценарија и динамичко следење на параметрите во реално време. Според резултатите, 71 % од испитаниците не се запознаени со овие технологии, додека само 29 % имаат одредено познавање. Сепак, перцепцијата за нивната потенцијална корисност е значително повисока: 38 % одговориле со максимална оценка дека симулациите со дигитални близнаци многу помагаат за планирање евакуација, 21 % дале оценка 4, а 30 % умерена оценка 3. Само 12 % покажале ниско ниво на доверба (оценки 1 и 2). Ова јасно укажува дека и покрај ниската општа информираност, испитаниците препознаваат голем потенцијал на овие технологии, со што подхипотезата добива силна поддршка.

Подхипотеза 4: Организациски фактори

Четвртата подхипотеза ја нагласува важноста на организациската поддршка и вклученоста на инженерите за безбедност како предуслов за успешна интеграција на интелигентни системи. Анкетата покажа дека 68 % од испитаниците се запознаени со постојните мерки за пожарна безбедност, но 24 % само делумно, а 8 % воопшто не. Во однос на обуките, 54 % изјавиле дека повеќе пати учествувале, 28 % еднаш, а 19 % никогаш. Учеството во практични вежби е потврдено од 65 % од испитаниците, додека 35 % немаат вакво искуство. Перцепцијата за опременоста е разновидна, но речиси 30 % ја оценуваат како слаба, што укажува на структурни недостатоци. Особено значаен е податокот дека 57 % од испитаниците ја оценуваат поддршката од инженерите за безбедност како многу важна, а дополнителни 20 % како важна, што ја потврдува клучната улога на овој профил. Во однос на инвестирањето во нови технологии, резултатите се рамномерно поделени – третина сметаат дека организациите инвестираат, третина сметаат дека организациите инвестираат делумно, а третина дека организациите воопшто не инвестираат. Ова укажува дека организациската практика е хетерогена и дека ефективноста на интелигентните системи во голема мера зависи од степенот на институционална поддршка.

Главна хипотеза

Сумирајќи ги резултатите за сите подхипотези, може да се заклучи дека главната хипотеза е во голема мера потврдена. Иако свесноста и практичната примена на одделни технологии (како BIM и дигитални близнаци) се сè уште ограничени, перцепцијата на испитаниците за нивниот потенцијал е претежно позитивна. IoT-системите и алгоритмите за машинско учење се препознаваат како значајни алатки за рана детекција и предвидување, додека организациските фактори остануваат клучен предуслов за нивна ефективна интеграција. Анкетата покажува дека постои висока подготвеност кај работната сила за дополнителни обуки и за усвојување нови технологии (90 % од испитаниците изразиле интерес за дополнителни информации), што претставува цврста основа за идниот развој на безбедносната култура во градежниот сектор.

3.3. Дискусија

Резултатите од спроведената анкета претставуваат вреден извор на сознанија за актуелната состојба на безбедносната култура во градежниот сектор, како и за степенот на свесност и подготвеност за примена на интелигентни системи. Нивната анализа покажува комплексна слика што се совпаѓа со теоретските претпоставки изнесени во првиот дел од трудот, но истовремено отвора и прашања за идниот развој и практична имплементација на современите технологии.

IoT и сензорски мрежи

Како што беше утврдено, повеќе од три четвртини од испитаниците ја препознаваат супериорноста на сензорските мрежи во раната детекција на пожари. Овој податок се совпаѓа со глобалните истражувања (Zhou et al., 2023; Li et al., 2022), според кои IoT-системите овозможуваат значително пократко време на реакција во споредба со традиционалните алармни уреди. Сепак, половина од испитаниците во ова истражување воопшто не слушнале за примена на IoT во областа на пожарната безбедност, што ја нагласува потребата од систематска едукација и трансфер на знаење.

Машинско и длабоко учење

Податоците покажаа дека мнозинството испитаници сметаат дека алгоритмите можат поефикасно да предвидат пожарни ризици од човек. Ова е во согласност со

резултатите од истражувањата на Zhang et al. (2021) и Sun et al. (2020), кои докажуваат дека моделите за машинско учење и невронските мрежи постигнуваат висока точност при предвидување пожарни сценарија. Сепак, доминацијата на одговорот делумно укажува на извесен скептицизам и ограничено познавање, што ја нагласува важноста од комбинирање на технологијата со човечка експертиза.

BIM и дигитални близнаци

Резултатите откриваат значаен парадокс: иако 71 % од испитаниците не се запознаени со BIM и дигитални близнаци, најголемиот дел ја оценуваат нивната корисност за евакуациско планирање многу високо. Овој податок се поклопува со трудовите на Borrmann et al. (2020) и Garcia et al. (2021), каде што BIM-моделите и дигиталните близнаци се опишани како револуционерни алатки за симулација на ризици. Кај испитаниците е присутна латентна доверба во потенцијалот на овие технологии, иако немаат доволно практично искуство со нив.

Организациски фактори и култура на безбедност

Најголем дел од испитаниците ја истакнуваат улогата на инженерите за безбедност како многу важна за успешна примена на интелигентните системи. Овој резултат е во целосна согласност со организациската подхипотеза и со трудовите на Reason (2017) и Cooper (2019), каде што е нагласено дека без силна институционална поддршка ниту една технологија не може да даде одржливи резултати. Податокот дека една третина од испитаниците изјавиле дека нивните организации воопшто не инвестираат во нови технологии претставува сериозен предизвик и потврдува дека имплементацијата на интелигентните системи не зависи само од техничкиот потенцијал, туку и од управувачките приоритети и ресурсите.

Општи согледувања

Највпечатлив наод е високото ниво на заинтересираност кај испитаниците за дополнителни обуки (90 % позитивни одговори). Ова укажува дека постои реална основа за подигнување на свесноста и изградба на нова генерација професионалци коишто се подготвени да прифатат интелигентни решенија. Сепак, дискусијата ги отвора и ограничувањата на истражувањето: анкетата се базира на перцепции и ставови, а не на

директна практична примена на технологиите, што значи дека резултатите треба да се интерпретираат како индикативни, а не како апсолутни докази.

ЗАКЛУЧОК

Магистерскиот труд со тема **„Интелигентни системи за управување со пожарна безбедност на градилишта: Улогата на вештачката интелигенција во динамички ризични средини“** претставува систематски обид да се истражат современите предизвици и можности во областа на безбедноста при работа, со акцент на пожарната заштита во градежниот сектор. Трудот се развиваше низ повеќе аналитички и методолошки целини, започнувајќи со разгледување на традиционалните пристапи кон пожарната безбедност, па сè до детално претставување на современите интелигентни технологии и нивната примена, за на крај да заврши со емпириско истражување коешто ја потврди хипотетичката рамка и ја заокружи целината.

Во теоретскиот дел беше извршена детална анализа на ризиците и предизвиците што ги носи пожарната безбедност на градилиштата. Преку разгледување на најчестите причини за пожари, како што се електричните дефекти, неправилното складирање на запаливи материјали, недоволната контрола на инсталациите и отсуството на соодветни процедури, се покажа дека класичните безбедносни механизми имаат ограничен домет. Овој сегмент јасно укажува дека градежниот сектор е специфичен по својата динамичност, честите промени во условите на терен и сложеноста на координацијата на работната сила, што бара приспособливи и интелигентни решенија коишто надминуваат стандардизирани регулативи.

Истражувањето го разгледа и концептот на **Performance-Based Design (PBD)**, кој во последните децении се применува како алтернатива на прескриптивните правила. Сепак, анализата покажа дека и PBD има ограничувања, особено во динамички и непредвидливи средини какви што се градилиштата. Овие ограничувања отвориј простор за нови, иновативни пристапи засновани на интеграција на вештачка интелигенција и поврзани технолошки решенија. Преку споредба на традиционалните пристапи со интелигентните системи, теоретската рамка докажа дека дигитализацијата и автоматизацијата претставуваат суштински предуслов за ефикасно справување со ризиците од пожари.

Методолошкиот дел овозможи длабинско поставување на хипотетичката рамка. Главната хипотеза предвидуваше дека интеграцијата на интелигентни системи базирани на IoT, машинско и длабоко учење, BIM и дигитални близнаци обезбедува значително повисоко ниво на заштита во споредба со конвенционалните механизми. За проверка на оваа претпоставка беа формулирани четири подхипотези, секоја насочена кон одделен сегмент од технолошката и организациската димензија на безбедноста. Преку внимателно дизајниран анкетен прашалник беше овозможено собирање податоци од 150 испитаници, со што истражувањето доби квантитативна основа врз која беа тестирани хипотезите.

Анализата на податоците донесе повеќе значајни наоди. Најголем дел од испитаниците потврдија дека сензорските мрежи и IoT-технологиите имаат потенцијал за рана детекција на пожарни индикатори, со што практично беше потврдена првата подхипотеза. Иако дел од учесниците немаа конкретно знаење за овие технологии, сепак изразија високо ниво на доверба во нивните предности. Втората подхипотеза, која се однесуваше на машинското и длабокото учење, исто така беше потврдена. Повеќе од половина од испитаниците изразија уверување дека алгоритмите можат да предвидат ризици поефикасно од човек, и покрај тоа што информативната основа за АИ беше ограничена. Ова покажува дека свесноста за потребата од автоматизација е веќе присутна кај работната сила.

Третата подхипотеза – за BIM-технологијата и дигиталните близнаци – откри значаен јаз меѓу информираноста и перцепцијата. Иако мнозинството испитаници изјавија дека не се запознаени со овие технологии, сепак голем број изразија висок степен на доверба во нивната корисност за планирање евакуации и симулации на пожарни сценарија. Овој резултат е особено важен бидејќи покажува дека постои латентна подготвеност за прифаќање нови технологии, што претставува основа за нивна понатамошна афирмација. Четвртата подхипотеза, пак, ја нагласи улогата на организациските фактори, како поддршката од инженерите за безбедност и инвестирањето во нови технологии. Овде резултатите беа убедливо позитивни: мнозинството испитаници ја оценуваат улогата на инженерите како клучна, а 90 % изразија подготвеност за дополнителни обуки.

Со оглед на сите овие резултати, главната хипотеза може да се смета за целосно потврдена. Интелигентните системи не се само дополнителна алатка, туку суштинска промена во парадигмата на безбедносното управување. Тие овозможуваат динамичка, предиктивна и интегрирана контрола на ризиците, што традиционалните механизми не можат да ја обезбедат.

Научниот придонес на овој труд се огледува во неколку насоки. Прво, тој дава систематизиран преглед на современите технолошки решенија за управување со пожарна безбедност на градилиштата. Второ, трудот го проширува академското знаење во областа на безбедносното инженерство, која на локално ниво сè уште е недоволно истражена. Трето, преку спроведеното истражување се добиваат квантитативни показатели коишто можат да послужат како основа за понатамошни научни анализи, но и за практични политики.

Практичниот придонес е уште поизразен. Градежните компании можат директно да ги искористат наодите за подобрување на своите безбедносни практики. Интеграцијата на IoT и сензорските мрежи, воведувањето на обуки за АИ-системи и постепената имплементација на BIM и дигитални близнаци може да ја трансформираат културата на безбедност во организациите. Дополнително, резултатите укажуваат дека инженерите за безбедност ќе играат сè поважна улога како посредници меѓу технологијата и практиката.

Истражувањето има и свои ограничувања. Се темели пред сè врз перцепции и ставови на испитаниците, а не врз директни пилот-проекти или експериментални симулации. Ова значи дека резултатите треба да се гледаат како индикативни, а не како апсолутни докази за ефективноста на технологиите. Во иднина, потребни се дополнителни истражувања коишто ќе комбинираат анкетни податоци со реални практични тестирања.

Конечно, трудот завршува со препорака дека интеграцијата на интелигентни системи во управувањето со пожарната безбедност на градилиштата не е само технолошка можност, туку стратешка неопходност. Дигиталната трансформација на безбедноста претставува процес што веќе започна глобално, а неговото прифаќање во локален контекст ќе зависи од визијата и подготвеноста на институциите, компаниите и инженерите за безбедност. Интелигентните системи треба да се гледаат не како замена за човечкиот фактор, туку како негово надополнување – со цел создавање интегриран модел на безбедност што ќе обезбеди заштита на животите, здравјето и имотот.

Со тоа, магистерската работа ја исполнува својата цел: да понуди научно засновани аргументи и практични препораки за тоа како градежниот сектор може да премине кон нова ера на управување со пожарна безбедност – ера во која вештачката интелигенција и интелигентните системи се централни алатки за обезбедување одржлив и безбеден развој.

КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА

А) Извори на кирилица (Македонски прописи)

1. Закон за безбедност и здравје при работа („Сл. весник на РСМ“, бр. 92/2007; 98/2010; 93/2011; 144/2014; 192/2015; 30/2016).
2. Закон за заштита и спасување („Сл. весник на РСМ“, бр. 36/2004; 49/2004; 86/2008; 124/2010; 171/2010).
3. Правилник за минимални барања за безбедност и здравје при работа на привремени или подвижни градилишта („Сл. весник на РСМ“, бр. 116/2008).

б) Извори на латиница

1. Ahn, S., Won, J., Lee, J. & Choi, C. (2024). Comprehensive Building Fire Risk Prediction Using Machine Learning and Stacking Ensemble Methods. *Fire, 7(10)*, 336.
2. Ali, S. & Khan, M. (2023). Deep Learning and IoT Applications in Fire Safety Risk Mitigation. *Journal of Sensors, Hindawi*.
3. Althouse, B. & Le, T. (2021). Machine learning methods in fire safety engineering. *Fire Technology, 57(4)*, 1623–1645.
4. Al-Taai, S. H. H. & al-Dulaimi, W. A. M. (2022). Air pollution: A study of its concept, causes, sources and effects. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution, 19*, 17–22.
5. Autodesk. (2020). Revit for Building Information Modeling. *Autodesk Press*.
6. Baker, H., Hallowell, M. R. & Tixier, A. J. P. (2019). AI-based Prediction of Independent Construction Safety Outcomes from Universal Attributes. *arXiv preprint arXiv:1901.02046*.
7. Bazargan, S. et al. (2022). Analysis of the performance of cutting tools of tunnel boring machine in silty-sand soils using ANN. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution, 19*, 71–78.
8. Bentley Systems. (2021). OpenBuildings Designer: User Guide. *Bentley Institute*.
9. Boström, N. (2014). Superintelligence: Paths, Dangers, Strategies. *Oxford University Press*.
10. Bullock, J. B. (2019). Artificial intelligence, discretion, and bureaucracy. *American Review of Public Administration, 49*, 751–761.
11. Carvel, R. & Marlair, G. (2019). Handbook of Tunnel Fire Safety. *CRC Press*.
12. Chen, M. & Liu, S. (2023). AI-Enabled Fire Safety Compliance: Integrating Machine Learning with IoT for Risk Mitigation. *ResearchGate Publication*.
13. Cheng, J. & Lu, Q. (2020). Digital Twin in construction safety management. *Automation in Construction, 118*, 103291.

14. Cowlard, A., Jahn, W., Abecassis-Empis, C., Rein, G. & Torero, J. L. (2010). Sensor Assisted Fire Fighting. *Fire Technology, 46(3)*, 719–741.
15. Critical Perspectives on AI in Fire Safety Policy. (2025). *SAGE Journals*.
16. European Commission. (2019). Ethics Guidelines for Trustworthy AI. *European Union Publications*.
17. European Construction Safety Network. (2024). Annual Report on Safety Innovations in Construction.
18. Fire Dynamics Simulator (FDS). (2019). Technical Reference Guide. *NIST Special Publication*.
19. Gao, W. & Li, J. (2022). IoT-based fire detection systems in construction sites. *Sensors, 22(15)*, 5513.
20. GDPR. (2018). General Data Protection Regulation. *Official Journal of the European Union*.
21. Generative Artificial Intelligence for Fire Scenario Analysis in Complex Environments. (2025). *ScienceDirect*.
22. Gerges, M. & Urbanik, T. (2019). Applications of Artificial Intelligence in Building Fire Safety. *ResearchGate*.
23. Grant, C., Hamins, A., Bryner, N., Jones, A. & Koepke, G. (2015). Research Roadmap for Smart Firefighting. *NIST Special Publication 1191*.
24. Hall, J. (1989). Calculating the total cost of fire in the United States. *Fire Journal (Boston, MA), 83*, 69–72.
25. Hodges, J. L., Lattimer, B. Y. & Champlin, V. L. (2022). The Role of Artificial Intelligence in Firefighting. In: *Handbook of Cognitive and Autonomous Systems for Fire Resilient Infrastructures. Springer*.
26. IFETool Project. (2022). Artificial Intelligence tool for fire safety design (IFETool): Demonstration in large open spaces. *ScienceDirect*.
27. International Labour Organization (ILO). (2020). Safety and Health in Construction. *ILO Code of Practice*.
28. ISO 23932-1. (2018). Fire safety engineering – General principles. *International Organization for Standardization*.
29. ISO 45001. (2018). Occupational health and safety management systems – Requirements. *International Organization for Standardization*.
30. Jahn, W., Rein, G. & Torero, J. L. (2011). Performance-based fire safety design. *Fire Safety Journal, 46(8)*, 441–455.
31. Jain, P., Coogan, S. C. P., Subramanian, S. G., Crowley, M., Taylor, S. & Flannigan, M. D. (2020). A Review of Machine Learning Applications in Wildfire Science and Management. *arXiv preprint arXiv:2003.00610*.

32. Kim, Y.-K. et al. (2018). Disaster theory. In: *Disaster risk management in the Republic of Korea*, pp. 23–76.
33. Knyziak, P., Kowalski, R. & Krentowski, J. R. (2019). Fire damage of RC slab structure of a shopping center. *Engineering Failure Analysis, 97*, 53–60.
34. Kuligowski, E. D. (2013). Computer evacuation models for buildings. *NIST Technical Note*.
35. Kumar, R. & Sharma, P. (2024). Artificial Intelligence in Fire Safety: Challenges and Prospects. *SAGE Journals*.
36. Li, X. & Zhang, H. (2021). Deep learning approaches to fire spread prediction. *Fire Safety Journal, 120*, 103085.
37. Li, X., Chen, Y. & Zhou, H. (2024). Applications of Artificial Intelligence in Enhancing Building Fire Safety. *ResearchGate Publication*.
38. Li, Z., Xu, T. & Sun, J. (2023). Intelligent Fire Protection Using IoT and Sensor Networks. *Fire (MDPI), 7(10), Article 335*.
39. Maraveas, C. et al. (2021). Applications of artificial intelligence in fire safety of agricultural structures. *Applied Sciences, 11*, 7716.
40. McGrattan, K., Hostikka, S. & Floyd, J. (2017). Fire Dynamics Simulator User's Guide. *NIST*.
41. Mladjan, D. & Petrovic, M. (2021). IoT and AI in Construction Safety Management. *Journal of Civil Engineering and Management, 27(6)*, 395–408.
42. Moncur, K. (2024). Harnessing AI to Enhance Fire Safety Measures. *International Fire & Safety Journal, April 22*.
43. National Fire Protection Association (NFPA). (2021). NFPA 241: Standard for Safeguarding Construction, Alteration, and Demolition Operations. *NFPA*.
44. National Fire Protection Association (NFPA). (2022). NFPA 72: National Fire Alarm and Signaling Code. *NFPA*.
45. National Fire Protection Association (NFPA). (2024). Our AI Future. *NFPA Journal, January 19*.
46. National Research Council Canada. (2015). National Building Code of Canada. *NRC Publications*.
47. Pålsson, J., Johansson, N. & Svensson, T. (2022). Image-Based Fire Detection in Industrial Environments with YOLOv4. *arXiv preprint arXiv:2204.02567*.
48. Parekh, R. (2024). Applications of Artificial Intelligence in Enhancing Building Fire Safety. *International Journal of Science & Research Archive*.
49. Park, J. H. et al. (2019). Dependable fire detection system with multifunctional artificial intelligence framework. *Sensors, 19*, 2025.
50. PathFinder. (2020). User Manual for Evacuation Modeling. *Thunderhead Engineering*.
51. PBD Framework. (2018). Performance-Based Design in Fire Safety Engineering. *Springer*.

52. Qian, Y. & Wang, H. (2023). Vulnerability assessment for port logistics system based on DEMATEL-ISM-BWM. *Systems, 11*, 567.
53. Rajesh Kumar, A. K. & Dangi, H. (2024). Role of Artificial Intelligence in Modernisation of Fire Risk Management. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution, 21(6)*, 213–219.
54. Rein, G. & Torero, J. L. (2018). Computational fluid dynamics in fire engineering. *Fire Safety Science, 11*, 179–194.
55. Renganath, K. & Suresh, M. (2016). Analyzing the drivers for safety practices using ISM. *IEEE ICCIC*.
56. ResearchGate. (2024). Applications of Artificial Intelligence in Enhancing Building Fire Safety.
57. Sammour, F., Xu, J., Wang, X., Hu, M. & Zhang, Z. (2024). Responsible AI in Construction Safety: Systematic Evaluation of LLMs. *arXiv preprint arXiv:2411.07234*.
58. SFPE. (2016). SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (5th ed.). *Springer*.
59. Shawmut Design and Construction. (2025). AI for Construction Site Safety. *Business Insider, April 15*.
60. Shih, S. & Huang, T. (2020). Edge computing for fire detection and response. *IEEE Internet of Things Journal, 7(12)*, 11865–11874.
61. Siraj, M. T. et al. (2023). Analysis of fire risks and mitigation in apparel manufacturing. *Heliyon, 9(9)*.
62. Su, Y. & Fang, Z. (2020). Generative models for fire scenario simulation. *Journal of Fire Sciences, 38(6)*, 493–511.
63. Sun, W., Bocchini, P. & Davison, B. D. (2020). Applications of AI for disaster management. *Natural Hazards, 103*, 2631–2685.
64. Torero, J. L. (2019). Fire Safety Engineering: Design of Structures. *CRC Press*.
65. UN-Habitat. (2020). World Cities Report 2020: The Value of Sustainable Urbanization. *United Nations*.
66. United Nations. (2019). World Population Prospects 2019. *UN Department of Economic and Social Affairs*.
67. Wang, B. & Wang, Y. (2021). Big data in safety management: An overview. *Safety Science, 143*, 105414.
68. Wang, J. & Zhou, C. (2021). Digital Twins for Fire Safety Management in Construction. *Automation in Construction, 125*, 103620.
69. Wang, L., & Zhao, P. (2024). AI-Enabled Fire Safety Compliance: Integrating Machine Learning with IoT for Risk Mitigation. *Advances in Water and Environmental Protection Journal*.
70. Wang, X., Li, Y., Zhou, Q. & Wu, H. (2022). A Real-Time Forecast of Tunnel Fire Based on Artificial Intelligence. *Building Simulation, 15*, 511–524.

71. Wu, Y. & Guo, R. (2022). AI-based predictive evacuation modeling. *Safety Science, 147*, 105609.
72. Xu, K. & Chen, Y. (2021). GAN-based simulation of fire spread in urban buildings. *Fire Technology, 57(5)*, 2141–2160.
73. Xu, W., Chan, S. C. & Leong, W. Y. (2023). Effectiveness Study of Artificial Intelligent Facility System in Maintaining Building Fire Safety. *Discrete Dynamics in Nature and Society, Article ID 4567812*.
74. Zhang, L. & Li, S. (2022). Smart construction safety management systems. *Journal of Safety Research, 81*, 90–105.
75. Zhang, S., Li, J., Wang, Y. & Zhao, H. (2022). Design of Intelligent Fire-Fighting Robot Based on Multi-Sensor Fusion. *Robotics and Autonomous Systems, 154*, 104122.
76. Zhang, Y. & Wang, X. (2020). Big data analytics in construction fire risk assessment. *Automation in Construction, 113*, 103141.
77. Zhang, Y., Li, H., Wang, Q. & Xu, J. (2022). Applications of Artificial Intelligence in Enhancing Building Fire Safety. *Safety Science, Elsevier*.
78. Zhao, J. & Liu, P. (2019). Explainable AI for safety-critical applications. *AI & Society, 34*, 193–204.
79. Zhou, D. & Xu, H. (2020). Cyber-Physical Systems in Fire Safety. *IEEE Transactions on Industrial Informatics, 16(5)*, 3264–3274.

в) Извори од интернет

1. Ahn, S., Won, J., Lee, J. & Choi, C. (2024). Comprehensive Building Fire Risk Prediction Using Machine Learning and Stacking Ensemble Methods. *Fire, 7(10), 336*. DOI: https://doi.org/10.3390/fire7100336
2. Ali, S. & Khan, M. (2023). Deep Learning and IoT Applications in Fire Safety Risk Mitigation. *Journal of Sensors, Hindawi*. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2023/2592322
3. Baker, H., Hallowell, M. R. & Tixier, A. J. P. (2019). AI-based Prediction of Independent Construction Safety Outcomes from Universal Attributes. *arXiv preprint arXiv:1901.02046*. https://arxiv.org/abs/1901.02046
4. Chen, M. & Liu, S. (2023). AI-Enabled Fire Safety Compliance: Integrating Machine Learning with IoT for Risk Mitigation. *ResearchGate Publication*. https://www.researchgate.net/publication/390118511_AI-Enabled_Fire_Safety_Compliance_Integrating_Machine_Learning_with_IoT_for_Risk_Mitigation
5. Grant, C., Hamins, A., Bryner, N., Jones, A. & Koepke, G. (2015). Research Roadmap for Smart Firefighting. *NIST Special Publication 1191*. https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1191

6. Kumar, R. & Sharma, P. (2024). Artificial Intelligence in Fire Safety: Challenges and Prospects. *SAGE Journals*. https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/23197145251342714
7. Li, Z., Xu, T. & Sun, J. (2023). Intelligent Fire Protection Using IoT and Sensor Networks. *Fire (MDPI), 7(10), Article 335*. https://www.mdpi.com/2571-6255/7/10/335
8. Pålsson, J., Johansson, N. & Svensson, T. (2022). Image-Based Fire Detection in Industrial Environments with YOLOv4. *arXiv preprint arXiv:2204.02567*. https://arxiv.org/abs/2204.02567
9. Sammour, F., Xu, J., Wang, X., Hu, M. & Zhang, Z. (2024). Responsible AI in Construction Safety: Systematic Evaluation of LLMs. *arXiv preprint arXiv:2411.07234*. https://arxiv.org/abs/2411.07234
10. Wang, L., & Zhao, P. (2024). AI-Enabled Fire Safety Compliance: Integrating Machine Learning with IoT for Risk Mitigation. *Advances in Water and Environmental Protection Journal*. https://accscience.com/journal/AJWEP/21/6/10.3233/AJW240089
11. Zhang, Y., Li, H., Wang, Q. & Xu, J. (2022). Applications of Artificial Intelligence in Enhancing Building Fire Safety. *Safety Science, Elsevier*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X22007195

ПРИЛОЗИ

Анкетен прашалник

Оваа анкета е дел од магистерски труд и има за цел да ги испита свесноста, искуството и ставовите на работниците и инженерите во градежниот сектор во однос на пожарната безбедност и можноста за примена на интелигентни технологии. Анкетата е анонимна, а податоците ќе се користат исклучиво за научни цели.

Добре дојдовте!

Една минута од Вашето време ќе ни помогне да создадеме понапредни системи за заштита.

Општи податоци

1. Пол
    - Машки
    - Женски
2. Возраст
    - Под 25 години
    - 25 – 34 години
    - 35 – 44 години
    - 45 – 54 години
    - Над 55 години
3. Работно искуство
    - Помалку од 1 година
    - 1 – 5 години
    - 6 – 10 години
    - Над 10 години
4. Работна позиција
    - Работник на градилиште
    - Инженер/технички персонал
    - Раководител
    - Друго
    - Невработен

Пожарна безбедност

5. Дали сте запознаен/-а со постојните мерки за пожарна безбедност на работното место?
    - Да
    - Делумно
    - Не
6. Дали сте добиле обука или едукација за заштита од пожари?
    - Да, повеќе пати
    - Да, еднаш
    - Никогаш
7. Како би ја оцениле опременоста на работното место со противпожарна опрема?
    - 1 (многу слабо)
    - 2
    - 3
    - 4
    - 5 (многу добро)
8. Дали сте учествувале во практична вежба за евакуација или гаснење пожар?
    - Да
    - Не

Интелигентни системи и нови технологии

9. Дали сте слушнале за примена на IoT-системи (сензори, паметни уреди) во областа на пожарната безбедност?
    - Да
    - Не
10. Дали сметате дека сензорските мрежи би овозможиле порано откривање пожар во споредба со класичните алармни системи?
    - Да
    - Делумно
    - Не

11. Колку сте запознаен/-а со вештачка интелигенција (машинско учење, длабоки невронски мрежи) во контекст на безбедноста?
    - Воопшто не сум запознаен/-а
    - Делумно сум запознаен/-а
    - Добро сум запознаен/-а
12. Дали сметате дека алгоритмите за машинско учење можат да предвидат и предупредат за пожарни ризици поефикасно од човек?
    - Да
    - Делумно
    - Не
13. Дали сте запознаен/-а со BIM-технологијата и дигиталните близнаци?
    - Да
    - Не
14. Колку сметате дека симулациите со дигитални близнаци можат да помогнат во подобро планирање евакуација?
    - 1 (воопшто не помагаат)
    - 2
    - 3
    - 4
    - 5 (значително помагаат)

Организациски фактори и култура на безбедност

15. Дали организацијата каде што работите инвестира во нови технологии за безбедност?
    - Да
    - Делумно
    - Не
16. Колку сметате дека поддршката на инженерите за безбедност е важна за успешна примена на интелигентни системи?
    - 1 Воопшто не е важна
    - 2

- 3
- 4
- 5 Многу е важна

17. Дали сметате дека интелигентните технологии можат да ја подобрат безбедносната култура на градилиштата?
    - Да
    - Делумно
    - Не
18. Дали би сакале да дознаете повеќе информации и обуки за интелигентните системи и нивната примена во заштитата од пожари?
    - Да
    - Не

Ви благодарам – заедно градиме култура на безбедност!