

Dragojla Popović

**VJEŠTAČKA INTELIGENCIJA U UPRAVLJANJU GRIJANJEM,
VENTILACIJOM I KLIMATIZACIJOM: POGLED U BUDUĆNOST
PAMETNIH ZGRADA**

– master rad –

Podgorica, 2024.

UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Dragojla Popović

**VJEŠTAČKA INTELIGENCIJA U UPRAVLJANJU GRIJANJEM,
VENTILACIJOM I KLIMATIZACIJOM: POGLED U BUDUĆNOST
PAMETNIH ZGRADA**

– master rad –

Podgorica, 2024.

PODACI I INFORMACIJE O STUDENTU

Ime i prezime:

Dragojla Popović

Datum i mjesto rođenja:

05.08.1999. godine, Pljevlja, Crna Gora

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina završetka studija:

Studijski program Primijenjenog računarstva, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore, 180 ECTS kredita, 2023. godine.

INFORMACIJE O MASTER RADU

Naziv master studija:

Master studije primijenjenog računarstva

Naslov rada:

Vještačka inteligencija u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom: pogled u budućnost pametnih zgrada

Fakultet na kojem je rad odbranjen:

Elektrotehnički fakultet

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave magistarskog rada:

11.03.2024. godine

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema:

16.05.2024. godine.

Komisija za ocjenu/odbranu rada:

Prof. Dr Vesna Popović-Bugarin, ETF Podgorica, predsjednik
Prof. dr Nikola Žarić, ETF Podgorica, mentor
Doc. Dr Miloš Brajović, ETF Podgorica, član

Mentor:

Prof. dr Nikola Žarić

Datum odbrane:

26.12.2024.

Ime i prezime autora: Dragojla Popović, BApp

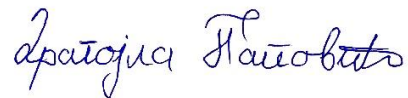
ETIČKA IZJAVA

U skladu sa članom 22 Zakona o akademskom integritetu i članom 18 Pravila studiranja na master studijama, pod krivičnom i materijalnom odgovornošću, izjavljujem da je master rad pod naslovom

"Vještačka inteligencija u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom: pogled u budućnost pametnih zgrada"

moje originalno djelo.

Podnosilac izjave,

A handwritten signature in blue ink, reading "Dragojla Popović".

Dragojla Popović, BApp

U Podgorici, dana 25.11.2024. godine

ZAHVALNICA

Ovaj rad posvećujem svojim roditeljima, koji su mi pružili neizmjernu ljubav, podršku i motivaciju tokom cijelog mog školovanja. Hvala Vam što ste uvijek bili uz mene, vjerovali da ću uspjeti!

APSTRAKT

Predmet istraživanja ovog rada je primjena vještačke inteligencije u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom, istražujući različite strategije, tehnologije i implementacijske izazove. Istovremeno, radom će se izvršiti identifikacija glavnih nedostataka u postojećim praksama, istraživanje novih tehnoloških trendova i procjena potencijala vještačke inteligencije za unapređenje energetske efikasnosti, udobnosti korisnika i održivosti sistema upravljanja grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u pametnim zgradama.

U istraživanju su kombinovane različite metode kako bi se pružio sveobuhvatan uvid u primjenu vještačke inteligencije u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u zgradama. Koristeći interdisciplinarni pristup koji obuhvata inženjerske, tehnološke i društvene nauke, analizirane su postojeće teorije, tehnologije i pristupi. Sintetički pristup integrisao je različite koncepte i rezultate istraživanja, dok je induktivni pristup omogućio izvođenje opštih zaključaka na osnovu specifičnih primjera ili studija slučaja. Apstraktni pristup fokusirao se na suštinske karakteristike i principe primjene vještačke inteligencije, dok je generalizacijski pristup omogućio izvođenje opštih zaključaka primjenjivih na različite situacije. Ovaj sveobuhvatan pristup omogućio je dublje razumijevanje kompleksnosti i primjene vještačke inteligencije u upravljanju unutrašnjom klimom u zgradama, uzimajući u obzir različite struke i sektore.

Rezultati istraživanja pokazuju da, iako postoje izazovi i nedostaci u analiziranom modelu, primjena vještačke inteligencije u HVAC kontroli predstavlja važan korak ka poboljšanju energetske efikasnosti i udobnosti korisnika. Korišćenje vještačke inteligencije omogućava dinamičnije i efikasnije prilagođavanje sistema na promjene u okolini i potrebama korisnika, što može rezultirati značajnim uštedama energije i poboljšanom udobnošću. Iako postoje izazovi poput ograničenja simulacija, osjetljivosti na pogrešne procjene, potrebe za preciznim treniranjem neuronskih mreža i složenosti održavanja sistema, ovi nedostaci mogu se prevazići kroz odgovarajuće unapređenje i optimizaciju sistema. Implementacija poboljšanja kao što su poboljšanje kvaliteta ulaznih podataka, integracija sa stvarnim vremenskim podacima, upotreba složenijih modela vještačke inteligencije i kontinuirano nadgledanje i optimizacija sistema mogu značajno poboljšati performanse i tačnost HVAC sistema. Sa odgovarajućim unapređenjem, primjena vještačke inteligencije u HVAC kontroli može ostvariti svoj puni potencijal u poboljšanju energetske efikasnosti i udobnosti korisnika.

Istraživanje se ističe kroz detaljnu analizu i integraciju različitih aspekata upravljanja grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom, kao i primjenu vještačke inteligencije za optimizaciju tih procesa. Kombinacija dubinske analize, istraživanja postojećih tehnoloških rješenja i primjene naprednih algoritama omogućava stvaranje novih uvida i smjernica za dalji napredak u ovoj oblasti. Ovo istraživanje će poslužiti kao osnova za dalje inovacije u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u zgradama, postižući razvoj efikasnijih, pametnijih i održivijih sistema koji će naći široku primjenu u različitim sektorima industrije.

Ključne riječi: vještačka inteligencija, grijanje, ventilacija i klimatizacija, pametne zgrade, upravljanje

ABSTRACT

The subject of this research is the application of artificial intelligence in heating, ventilation and air conditioning management, exploring different strategies, technologies and implementation challenges. At the same time, the work will identify key shortcomings in existing practices, research new technological trends and assess the potential of artificial intelligence to improve energy efficiency, user comfort and sustainability of heating, ventilation and air conditioning management systems in smart buildings.

The research combined different methods to provide a comprehensive insight into the application of artificial intelligence in the management of heating, ventilation and air conditioning in buildings. Using an interdisciplinary approach that encompasses engineering, technology, and social sciences, existing theories, technologies, and approaches are analyzed. The synthetic approach integrated different concepts and research results, while the inductive approach enabled drawing general conclusions based on specific examples or case studies. The abstract approach focused on the essential characteristics and principles of application of artificial intelligence, while the generalization approach made it possible to draw general conclusions applicable to different situations. This comprehensive approach enabled a deeper understanding of the complexity and application of artificial intelligence in indoor climate management in buildings, taking into account different professions and sectors.

The research results show that, although there are challenges and shortcomings in the analyzed model, the application of artificial intelligence in the control of heating, ventilation and air conditioning represents a key step towards improving energy efficiency and user comfort. The use of artificial intelligence enables a more dynamic and efficient adaptation of the system to changes in the environment and user needs, which can result in significant energy savings and improved comfort. Although there are challenges such as limitations of simulations, sensitivity to misjudgments, the need for precise training of neural networks, and the complexity of system maintenance, these shortcomings can be overcome through appropriate improvement and optimization of the system. Implementing improvements such as improving the quality of input data, integrating with real-time data, using more complex artificial intelligence models, and continuous system monitoring and optimization can significantly improve the performance and accuracy of HVAC systems. With appropriate improvement, the application of artificial intelligence in heating, ventilation and air

conditioning control can realize its full potential in improving energy efficiency and user comfort.

The research stands out through detailed analysis and integration of various aspects of heating, ventilation and air conditioning management, as well as the application of artificial intelligence to optimize these processes. The combination of in-depth analysis, research into existing technological solutions and the application of advanced algorithms enables the creation of new insights and guidelines for further progress in this key area. This research will serve as a basis for further innovation in the management of heating, ventilation and air conditioning in buildings, encouraging the development of more efficient, smarter and sustainable systems that will find wide application in different sectors of the industry.

Keywords: artificial intelligence, heating, ventilation and air conditioning, smart buildings, management

SPISAK SLIKA

Slika 1. Primjeri područja primjene vještačke inteligencije i uređaja pametnih zgrada

SPISAK TABELA

Tabela 1. Komparativni pregled dizajna i razvoja sistema rješenja za kontrolu HVAC sistema

Tabela 2. Komparativni pregled rezultata prikazanih rješenja demonstracija i procjena sistema za HVAC kontrolu

SADRŽAJ

ZAHVALNICA	I
APSTRAKT	II
ABSTRACT.....	IV
SPISAK SLIKA	VI
SPISAK TABELA	VII
UVOD	1
1. OSNOVE VJEŠTAČKE INTELIGENCIJE.....	7
1.1. Definicija vještačke inteligencije.....	7
1.2. Osnovni koncepti mašinskog učenja i dubokog učenja	8
1.3. Razvoj vještačke inteligencije kroz istoriju	11
1.4. Primjene vještačke inteligencije u različitim industrijama	12
2. KONCEPT PAMETNIH ZGRADA.....	16
2.1. Arhitektura budućnosti – koncepti i tehnologije pametnih zgrada	16
2.2. Područja primjene vještačke inteligencije u pametnim zgradama	17
2.3. Energetska efikasnost u pametnim zgradama	23
2.3.1. Integrisane tehnologije za optimizaciju energetske efikasnosti	23
2.3.2. Implementacija naprednih strategija upravljanja energijom u pametnim zgradama	24
2.3.3. Uticaj pametnih energetske sistema na održivost i ekologiju.....	25
2.4. Tehnologije ugradnje sistema upravljanja grijanjem, klimatizacijom i ventilacijom...25	
2.5. Izazovi u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u kompleksnim zgradama	27
2.6. Uloga vještačke inteligencije u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom	28
3. TRADICIONALNE I NAPREDNE STRATEGIJE KONTROLE UPRAVLJANJA GRIJANJEM, VENTILACIJOM I KLIMATIZACIJOM.....	31
3.1. Strategije tvrdog računarstva	31

3.2. Strategije mekog računarstva.....	32
3.3. Hibridne strategije.....	33
3.4. Prilagodljive-prediktivne strategije kontrole	33
4. IZAZOVI I ASPEKTI PRIMJENE VJEŠTAČKE INTELIGENCIJE U UPRAVLJANJU GRIJANJEM, VENTILACIJOM I KLIMATIZACIJOM U PAMETNIM ZGRADAMA	35
4.1. Prihvatanje od strane korisnika kao preduslov uspješne integracije vještačke inteligencije u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u pametnim zgradama	35
4.2. Tehnički izazovi primjene vještačke inteligencije u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u pametnim zgradama	36
4.3. Društveni i etički aspekti primjene vještačke inteligencije u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u pametnim zgradama.....	38
4.3.1. Društveni aspekti	38
4.3.2. Etički aspekti.....	40
5. SISTEM UPRAVLJANJA GRIJANJEM, VENTILACIJOM I KLIMATIZACIJOM ZASNOVAN NA VJEŠTAČKOJ INTELIGENCIJI ZA KOMERCIJALNE ZGRADE SA VIŠE ZONA.....	42
5.1. Dizajn i razvoj sistema za kontrolu grijanja, ventilacije i klimatizacije zasnovanog na vještačkoj inteligenciji	43
5.2. Demonstracija i procjena sistema za kontrolu grijanja, ventilacije i klimatizacije zasnovanog na vještačkoj inteligenciji.....	52
5.3. Kritički osvrt na prikazana rješenja i predlog dizajna AI-baziranog HVAC sistema za poslovne objekte	63
ZAKLJUČAK	76
LITERATURA	79

UVOD

Aktuelnost ovog istraživanja leži u sve većoj potrebi za efikasnim upravljanjem grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u zgradama (HVAC – heating, ventilation and climatization), s obzirom na globalni naglasak na postizanje što veće energetske efikasnosti, udobnosti korisnika i smanjenje emisija štetnih gasova. Tradicionalni HVAC sistemi često nisu adekvatni u zadovoljenju ovih zahtjeva, što rezultira nepotrebnom potrošnjom energije i nezadovoljstvom korisnika. Integracija vještačke inteligencije omogućuje dinamično prilagođavanje sistema prema promjenljivim uslovima korisničkim preferencijama i energetske zahtjevima, čime se postiže veća efikasnost i udobnost. Takođe, s obzirom na sve veći fokus na održivost i pametne tehnologije, tema upravljanja grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom uz pomoć vještačke inteligencije izuzetno je relevantna. Industrija, istraživačka zajednica i regulatorna tijela sve više prepoznaju potencijal ovakvih tehnoloških rješenja u ostvarivanju ciljeva održivosti i efikasnog korišćenja resursa. Stoga, istraživanje ove teme ne samo da je aktuelno već je i izuzetno primijenljivo, jer odražava ključni korak prema budućnosti pametnih i održivih zgrada koje će biti ključni igrači u urbanim sredinama širom svijeta.

Pametne zgrade su kompleksni sistemi koji koriste napredne tehnologije za automatsko upravljanje i nadgledanje različitih funkcija unutar zgrade radi poboljšanja udobnosti, efikasnosti i sigurnosti (Panchalingam & Chan, 2021). Ove tehnologije uključuju senzore, kontrolne sisteme, mrežnu povezanost i analitičke alate koji omogućavaju zgradi da prikuplja, analizira i reaguje na podatke iz njenog okruženja (Vijayan et al., 2020). Pametne zgrade često integrišu sisteme za upravljanje rasvjetom, grijanjem, ventilacijom, klimatizacijom, sigurnosnim sistemima, energetske efikasnošću i drugim aspektima kako bi optimizovale njihovu funkcionalnost i performanse (Szilagyi & Wira, 2018). Osnovni cilj pametnih zgrada je stvaranje prostora koji su energetske efikasni, udobni za stanovanje i rad, te ekonomični za održavanje, istovremeno pružajući korisnicima intuitivno iskustvo i kontrolu nad okolinom (Benavente-Peces, 2019; Mehmod et al., 2019; Merabet et al., 2021).

Vještačka inteligencija predstavlja granu računarstva koja se bavi razvojem sistema i tehnika koje omogućavaju računarima da obavljaju zadatke koji zahtijevaju inteligenciju. Osnovni cilj vještačke inteligencije je stvaranje računarskih sistema koji su sposobni da razmišljaju, uče, donose zaključke i rješavaju probleme na način sličan ljudskom razmišljanju

(Farzaneh et al., 2021). Ova disciplina obuhvata različita područja kao što su mašinsko učenje, duboko učenje, obrada prirodnog jezika, robotska automatizacija, računarski vid i druge tehnike (Alanne & Sierla, 2022). Primjene vještačke inteligencije su širokog spektra, obuhvatajući oblasti kao što su autonomni sistemi, medicina, finansije, proizvodnja, transport, zabava i mnoge druge (Borges et al., 2021). Osnovni koncepti u vještačkoj inteligenciji uključuju algoritme mašinskog učenja koji omogućavaju računarima da nauče iz podataka, ekspertne sisteme koji koriste znanje stručnjaka za donošenje odluka, kao i neuralne mreže koje oponašaju strukturu i funkciju ljudskog mozga kako bi obradile kompleksne informacije (Taddy, 2018). Vještačka inteligencija igra sve važniju ulogu u modernom društvu i postaje važna tehnologija u raznim industrijskim i svakodnevnim aplikacijama (Sleem & Elhenawy, 2023).

Istraživanje Ngarambe i saradnika (Ngarambe, Yun & Santamouris, 2020) ističe značajnu potrošnju energije u zgradama i izazove u postizanju ravnoteže između smanjenja potrošnje energije i održavanja komfora korisnika prostora. Konvencionalne metode upravljanja često pokazuju nestabilnost i nedostatak fokusa na udobnost, što otvara prostor za primjenu naprednih metoda vještačke inteligencije u optimizaciji energetske efikasnosti uz održavanje toplotne udobnosti. U istraživanju Tušara i saradnika (Tushara et al., 2018) proučavane su tehnike obrade signala putem IoT-a (Internet of Things – Internet stvari) za upravljanje zgradama, s fokusom na detekciju prisutnosti ljudi. Korišćene su tehnike transfernog učenja za prepoznavanje ljudi na osnovu slika snimljenih na ulazima zgrade, te tehnike učenja bez nadzora bazirane na dubokom učenju koristeći zvučne senzore. Ovo istraživanje ističe korist od informacija o prisutnosti ljudi za bolje upravljanje HVAC sistemima u zgradama, s ciljem smanjenja potrošnje i troškova električne energije. Studija Čenga i Lija (Cheng & Lee, 2019) istražuje primjenu tehnologije vještačke inteligencije za poboljšanje performansi HVAC sistema. Analizom 18 alata za kontrolu HVAC sistema, uočeno je da samo tri funkcije – vremenska prognoza, optimizacija i prediktivne kontrole – postaju dominantne. Iako se očekuju potencijalne uštede energije, ograničenja senzora poput nedostatka tačnosti u predikciji, otežavaju ostvarenje punog potencijala tehnologije. Istaknuta je potreba za daljim razvojem i unapređenjem alata vještačke inteligencije kako bi se postigle očekivane uštede energije u HVAC sistemima. Studija Merabeta i saradnika (Merabet et al. 2021) ističe doprinos građevinskih radova u potrošnji primarne energije putem HVAC sistema, istovremeno naglašavajući izazove u održavanju energetske efikasnosti i toplotne udobnosti. Korišćenje vještačke inteligencije za upravljanje zgradama pokazuje obećavajuće rezultate, ali

nedostatak kvalitetnih podataka iz stvarnog svijeta predstavlja ograničenje. Istraživanje ističe potencijal uštede energije i poboljšanje udobnosti primjenom vještačke inteligencije, ali istovremeno ukazuje na potrebu za daljim razvojem i prevazilaženjem prepreka u ovoj oblasti. Članak Aguilara i saradnika (Aguilar et al., 2019) predstavlja samoupravnu arhitekturu za multi-HVAC sisteme u zgradama, baziranu na konceptu autonomnog ciklusa zadataka analize podataka. Ova arhitektura ima za cilj unapređenje energetske efikasnosti, održavanje udobnosti u zatvorenom prostoru i maksimiziranje performansi opreme putem identifikacije i odabira optimalnog režima rada. Predložena arhitektura se oslanja na analizu podataka prikupljenih iz sistema i okruženja kako bi autonomno upravljala multi-sistemom, što je demonstrirano kroz studije slučaja sa različitim tipovima opreme, pokazujući njenu opštost i primjenjivost u različitim scenarijima. Istraživanje Alavadija i saradnika (Alawadi et al. 2020) istražuje ulogu pametnih zgrada u smanjenju nepotrebne potrošnje energije i poboljšanju korisničke udobnosti. Pametne zgrade automatizuju HVAC procese kako bi se optimizovala potrošnja energije i poboljšalo zadovoljstvo korisnika. Poređenjem 36 algoritama mašinskog učenja za predviđanje temperature unutar pametnih zgrada, istraživači su utvrdili da je EkstraTrees regresor postigao najvišu tačnost (97%) i najbolje performanse, ukazujući na njegovu efikasnost u optimizaciji potrošnje energije i poboljšanju korisničke udobnosti.

U posljednjih nekoliko decenija, pametne zgrade su postale fokus intenzivnih istraživanja i razvoja, te su postale značajne u kontekstu održivosti, energetske efikasnosti i udobnosti korisnika. Upravljanje grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom predstavlja vitalni dio ove paradigmatičke promjene, a vještačka inteligencija pruža mogućnosti za unapređenje ovih sistema na više nivoa. Kroz kombinaciju senzora, analize podataka i algoritama, vještačka inteligencija omogućava dinamično prilagođavanje rada HVAC sistema prema promjenljivim uslovima, potrebama korisnika i ciljevima održivosti. Ovaj istraživački rad se fokusira na detaljnu analizu primjene vještačke inteligencije u ovom kontekstu, istražujući različite strategije, tehnologije i implementacijske izazove. Istovremeno, radom je izvršena identifikacija ključnih nedostataka u postojećim praksama, istraživanje novih tehnoloških trendova i procjena potencijala vještačke inteligencije za unapređenje energetske efikasnosti, udobnosti korisnika i održivosti HVAC sistema u pametnim zgradama.

Motivacija za ovo istraživanje proizlazi iz sve veće potrebe za unapređenjem efikasnosti upravljanja grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u zgradama, uzimajući u obzir sve veći naglasak na energetska održivost, udobnost korisnika i smanjenje ekološkog otiska. Tradicionalni sistemi upravljanja često su ograničeni u svojoj sposobnosti prilagođavanja

promjenljivim uslovima i preferencijama korisnika, što dovodi do neefikasne potrošnje energije i nezadovoljstva korisnika. Stoga, motivacija za istraživanje leži u potrebi za pronalaženjem naprednih tehnoloških rješenja koja bi omogućila dinamično prilagođavanje HVAC sistema prema promjenljivim uslovima, uzimajući u obzir faktore poput spoljne temperature, prisustva korisnika i energetske potrošnje.

Svrha ovog istraživanja je istražiti mogućnosti primjene vještačke inteligencije u upravljanju HVAC sistemima u zgradama kako bi se unaprijedila efikasnost, udobnost korisnika i održivost. Kroz analizu trenutnih dostignuća, identifikaciju izazova i pružanje pregleda budućih perspektiva, cilj je stvoriti temelj za dalji razvoj i implementaciju ovih tehnologija u praksi.

Glavni ciljevi istraživanja uključuju:

- Proučavanje trenutnih dostignuća u primjeni vještačke inteligencije u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u zgradama kroz pregled relevantne literature i analizu postojećih tehnoloških rješenja;
- Identifikaciju ključnih izazova i prepreka koji mogu ograničiti širu implementaciju ovih tehnologija, uključujući tehničke, ekonomske, socijalne i regulatorne faktore;
- Analizu potencijalnih koristi primjene vještačke inteligencije u ovom kontekstu, uključujući optimizaciju energetske potrošnje, poboljšanje udobnosti korisnika i smanjenje ekološkog otiska;
- Identifikaciju smjernica za dalji razvoj i implementaciju ovih tehnologija u praksi, uzimajući u obzir praktične izazove i mogućnosti.

Kroz ostvarenje ovih ciljeva, nadamo se pružiti doprinos razvoju naprednih sistema upravljanja grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u zgradama, što će rezultirati efikasnijim korišćenjem resursa, većom udobnošću korisnika i smanjenjem negativnog uticaja na životnu sredinu.

Postavljena su tri istraživačka pitanja:

1. Kako vještačka inteligencija može unaprijediti efikasnost upravljanja grijanjem, klimatizacijom i ventilacijom u pametnim zgradama? Ovo pitanje fokusira se na potencijalne koristi primjene vještačke inteligencije u optimizaciji HVAC sistema u pametnim zgradama. Proučavanjem postojećih tehnoloških rješenja, analizom algoritama i metoda mašinskog učenja te identifikacijom mogućnosti prilagođavanja

sistema promjenljivim uslovima, istražuje se kako vještačka inteligencija može unaprijediti efikasnost i udobnost korisnika u takvim okruženjima.

2. Koje su ključne prepreke i izazovi u implementaciji HVAC sistema upravljanja zasnovanih na vještačkoj inteligenciji? Ovo istraživačko pitanje fokusira se na identifikaciju tehničkih, ekonomskih, socijalnih i regulatornih prepreka koje mogu ograničiti širu implementaciju HVAC sistema zasnovanih na vještačkoj inteligenciji. Analizom postojećih praksi, regulatornih okvira i društvenih faktora istražuje se kako savladati ove prepreke i omogućiti širu primjenu ovih tehnologija.
3. Kako novi trendovi i tehnološki napredak u vještačkoj inteligenciji mogu uticati na budućnost HVAC sistema u pametnim zgradama? Ovo pitanje istražuje potencijalne buduće trendove i tehnološki napredak u vještačkoj inteligenciji koji bi mogli uticati na evoluciju HVAC sistema u pametnim zgradama. Analizom istraživanja i projekcijama budućeg razvoja tehnologije, istražuje se kako će ovi napretci oblikovati buduće standarde i prakse u upravljanju unutrašnjom klimom u zgradama.

U ovom radu su primjenjene različite metode istraživanja kako bi se postigao cjelovit i dubinski uvid u oblasti primjene vještačke inteligencije u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u zgradama. Naš pristup je interdisciplinaran, kombinujući elemente inženjerskih, tehnoloških i društvenih nauka. Korišćen je analitički pristup kako bismo detaljno razdvojili i proučili različite aspekte vještačke inteligencije u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u zgradama. Analizirane su postojeće teorije, tehnologije i pristupe kako bismo dobili dublji uvid u kompleksnost ove teme. Primijenjen je sintetički pristup kako bismo integrisali različite koncepte, tehnologije i rezultate istraživanja o vještačkoj inteligenciji i upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u zgradama. Kombinovane su informacije i nalazi iz različitih izvora kako bismo stvorili cjelovitu sliku o ovom području. Korišćen je induktivni pristup kako bismo izvodili opšte zaključke na temelju specifičnih primjera ili studija slučaja o primjeni vještačke inteligencije u upravljanju unutrašnjom klimom u zgradama. Analizirani su pojedinačni slučajevi i izvođeni opšti principi ili trendovi iz njih. Primijenjivan je apstraktni pristup kako bismo izdvojili suštinske karakteristike i principe primjene vještačke inteligencije u upravljanju HVAC sistemima. Fokusirali smo se na ključne aspekte ovog područja, ignorišući manje važne detalje. Korišćen je generalizacijski pristup kako bismo izvodili opšte zaključke ili principe primjenljive na širi spektar situacija ili problema u kontekstu upravljanja grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u zgradama. Razmatrani su specifični primjeri i izvođeni opšti principi ili smjernice iz njih.

Ovaj sveobuhvatan pristup omogućio nam je dublje razumijevanje kompleksnosti i mogućnosti primjene vještačke inteligencije u upravljanju unutrašnjom klimom u zgradama, istovremeno osiguravajući da naše istraživanje bude relevantno i primjenjivo za različite struke i sektore.

Očekujemo da će istraživanje rezultirati dubljim razumijevanjem primjene vještačke inteligencije u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u zgradama, pružajući ključne zaključke. Prvo, identifikovaćemo ključne nedostatke u postojećim praksama upravljanja grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u komercijalnim zgradama, uključujući nedovoljnu energetska efikasnost, nedostatak prilagodljivosti, visoke troškove održavanja i nedostatak pouzdanosti sistema. Zatim ćemo kritički pregledati dostupne tehnologije i pristupe upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom, s fokusom na identifikaciju najefikasnijih pristupa za rješavanje identifikovanih nedostataka. Slijedi detaljna procjena prednosti i nedostataka trenutnih praksi upravljanja grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom, pružajući kritički uvid u efikasnost, udobnost, održivost i ekonomsku isplativost postojećih sistema. Takođe, data je kritička analiza primjene vještačke inteligencije u poboljšanju postojećih praksi upravljanja grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom, kako bismo procijenili potencijalne koristi integracije vještačke inteligencije. Konačno, dato je kritičko vrednovanje mogućnosti primjene novih pristupa u praksi, uključujući izvodljivost, praktičnost, ekonomske implikacije i potencijalne prepreke. Kroz ove rezultate istraživanja, očekuje se pružanje kritičkog osvrta na postojeće prakse upravljanja grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u komercijalnim zgradama i identifikacija potencijalnih poboljšanja ili alternativa koje bi mogle unaprijediti performanse sistema.

Praktična primjena ovih rezultata može imati značajan uticaj na različite sektore, uključujući komercijalne zgrade, industriju, javne institucije i stambene zajednice. Primjene u stvarnom svijetu uključivaće implementaciju naprednih sistema upravljanja grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom zasnovanih na vještačkoj inteligenciji, što će rezultirati poboljšanom energetska efikasnošću, udobnošću korisnika i pouzdanošću sistema.

1. OSNOVE VJEŠTAČKE INTELIGENCIJE

1.1. Definicija vještačke inteligencije

Vještačka inteligencija predstavlja granu informatičkih nauka koja se bavi razvojem sistema i mašina sposobnih za obavljanje zadataka koji zahtijevaju ljudsku inteligenciju (Kelly, Kaye & Oviedo-Trespalacios, 2023). Ovi zadaci uključuju prepoznavanje govora, analiza vizuelnih podataka, donošenje odluka i učenje iz iskustva. Vještačka inteligencija omogućava računarima i sistemima da simuliraju kognitivne procese koristeći napredne algoritme za analizu podataka, prilagođavanje novim informacijama i optimizaciju svojih performansi bez potrebe za stalnim ljudskim intervencijama (Finlay, 2020).

Vještačka inteligencija obuhvata širok spektar tehnika, od jednostavnih pravila odlučivanja do složenih modela mašinskog učenja. Ove tehnike omogućavaju sistemima da prepoznaju obrasce, predviđaju ishode i donose odluke s visokim stepenom tačnosti, često nadmašujući ljudsku sposobnost u zadacima kao što su pretraga podataka ili prepoznavanje lica (Jackson, 2019). Osnovna svrha vještačke inteligencije je automatizacija složenih zadataka, čime se poboljšava efikasnost i smanjuje mogućnost ljudske greške, dok istovremeno omogućava sistemima da se prilagođavaju promjenama i uče iz novih podataka (Ertel, 2018).

Vještačka inteligencija se dijeli na usku (slabu) i opštu (jaku) vještačku inteligenciju. Uska vještačka inteligencija je specijalizovana za obavljanje specifičnih zadataka u unaprijed definisanim domenima, dok opšta vještačka inteligencija predstavlja potencijalni budući razvoj u kojem bi mašine imale sposobnost obavljanja širokog spektra zadataka na nivou ljudske inteligencije. Opšta vještačka inteligencija bi omogućila mašinama da razumiju, uče i prilagođavaju se različitim situacijama, slično ljudskom razmišljanju (Flowers, 2019; Liu, 2021).

Jedan od osnovnih ciljeva razvoja vještačke inteligencije je stvaranje sistema koji autonomno uče i prilagođavaju se novim izazovima. Ova sposobnost omogućava sistemima vještačke inteligencije da postaju sve efikasniji vremenom, bez potrebe za stalnim programiranjem (Ertel, 2018). Zahvaljujući napretku u računarskoj snazi, velikim količinama podataka i naprednim algoritmima poput dubokog učenja, vještačka inteligencija je sve prisutnija u mnogim industrijama i svakodnevnom životu (Hunt, 2014). Od medicinske dijagnostike do autonomnih vozila, vještačka inteligencija transformiše način na koji živimo i

radimo, unapređujući efikasnost i kvalitet života. Ipak, s njenim razvojem otvaraju se i nova etička i društvena pitanja koja zahtijevaju pažljivu analizu, jer vještačka inteligencija donosi ne samo tehničke prednosti već i izazove u pogledu odgovornosti, sigurnosti i pravednosti.

1.2. Osnovni koncepti mašinskog učenja i dubokog učenja

Osnovni koncepti mašinskog i dubokog učenja predstavljaju temeljne aspekte modernih tehnika vještačke inteligencije i igraju centralnu ulogu u razvoju naprednih algoritama i modela koji imaju sposobnost da automatski uče iz podataka, prilagođavaju se promjenama i rješavaju složene probleme. Razumijevanje ovih koncepata zahtijeva dublje poznavanje teorijskih osnova, uključujući računarstvo, linearnu algebru, statistiku i optimizacione metode, jer svaki od njih doprinosi stvaranju sistema koji su sposobni da predviđaju, klasifikuju, grupišu ili generišu podatke na osnovu obrazaca prisutnih u velikim skupovima podataka.

Mašinsko učenje se može definisati kao proces korišćenja algoritama i statističkih modela za obavljanje zadataka bez eksplicitnog programiranja. Njegova osnovna snaga leži u sposobnosti da automatski uči i prilagođava se promjenama i podacima na osnovu iskustva. Ovaj pristup koristi različite modele, koji mogu biti regresioni, klasifikacioni ili zasnovani na grupisanju, a svaki od njih rješava specifične tipove problema. Regresioni modeli, poput linearne regresije, koriste se za predikciju kontinuiranih vrijednosti, kao što su finansijske prognoze ili temperaturne promjene, dok su klasifikacioni modeli, kao što su potporne vektorske mašine (SVM), primijenjeni na zadatke gdje je cilj svrstati ulazne podatke u određene kategorije. Na primjer, klasifikacija slika u različite klase objekata ili kategorizacija medicinskih podataka radi dijagnostike bolesti može se efikasno obaviti korišćenjem ovih modela. Algoritmi za grupisanje, poput K-means ili hijerarhijskog grupisanja, omogućavaju otkrivanje skrivenih struktura u podacima gdje unaprijed definisane klase nisu dostupne, što je posebno korisno u oblastima poput analize tržišta ili genetskih istraživanja (Kotsiantis, Zaharkis & Pintelas, 2006; Ahuja et al., 2020; Helm et al., 2020; Gori, Betti & Melacci, 2023).

Svi ovi modeli oslanjaju se na podatke kao primarnu komponentu za treniranje. Podaci mogu biti strukturirani – organizovani u tabele sa definisanim kolonama i redovima, ili nestrukturirani – kao što su slike, zvukovi, video zapisi ili tekst. U procesu mašinskog učenja, podaci se obično dijele na trening set, koji se koristi za učenje modela, validacioni set, koji služi za podešavanje hiperparametara, i test set, koji omogućava procjenu konačnih

performansi modela. Dobri podaci su od velikog značaja, jer loš kvalitet ili neadekvatna količina podataka može značajno uticati na rezultate modela (Burkov, 2019; Alpaydin, 2021).

Jedna od najvažnijih komponenata u mašinskom učenju jeste funkcija gubitka, koja predstavlja mjeru odstupanja predikcija modela od stvarnih vrijednosti. Funkcija gubitka može biti kvadratna greška za regresione zadatke ili logaritamska funkcija gubitka za klasifikacione zadatke. Cilj je minimizirati ovu funkciju tokom treniranja modela, čime se postiže što tačnija predikcija ili klasifikacija. Za optimizaciju modela koristi se niz različitih algoritama, među kojima je najpoznatiji gradijentni spust, koji omogućava ažuriranje parametara modela tako da se minimizira funkcija gubitka (El Naqa & Murphy, 2015; Alpaydin, 2020).

Pored algoritama za optimizaciju, evaluacija performansi modela igra važnu ulogu u mašinskom učenju. Metrike evaluacije, kao što su tačnost, preciznost, odziv i F1-mjera, koriste se za ocjenu kvaliteta modela. Tačnost mjeri ukupni broj tačnih predikcija, dok preciznost mjeri koliko je tačnih pozitivnih predikcija među svim pozitivnim predikcijama. Odziv ocjenjuje koliko je tačnih pozitivnih predikcija među svim stvarnim pozitivnim vrijednostima, dok F1-mjera predstavlja harmonijsku sredinu preciznosti i odziva, pružajući balansiranu sliku performansi modela. Da bi se izbjegla zavisnost od pojedinačnog skupa podataka, koristi se kros-validacija, koja omogućava treniranje i testiranje modela na različitim podskupovima podataka, čime se obezbjeđuje robusnija i pouzdanija evaluacija (Helm et al., 2020; Gori, Betti & Melacci, 2023).

Duboko učenje, kao podskup mašinskog učenja, koristi napredne modele poznate kao vještačke neuronske mreže, koji su inspirisani strukturom i funkcijom bioloških neuronskih mreža u mozgu. Ove mreže sastoje se od velikog broja povezanih neurona raspoređenih u slojeve, gdje svaki neuron prima ulazne podatke, vrši određenu obradu kroz nelinearne funkcije i prenosi izlaz na naredni sloj (Buduma, Buduma & Papa, 2022).

Jednostavne neuronske mreže, koje sadrže samo jedan ili dva skrivena sloja, koriste se za relativno jednostavne zadatke. Međutim, duboke neuronske mreže (DNN), koje sadrže mnogo slojeva, omogućavaju modelima da uče i generalizuju složene i apstraktne reprezentacije podataka. Primjer primjene ovih mreža su konvolucijske neuronske mreže (CNN), koje su posebno pogodne za zadatke kao što je obrada slika. CNN koriste konvolucione slojeve za automatsko izdvajanje značenja iz slika, bez potrebe za ručnim definisanjem karakteristika. Ove mreže su postale standard za zadatke kao što su prepoznavanje objekata i klasifikacija slika u računarskom vidu (Sejnowski, 2020; Meedeniya, 2023; Zhang et al., 2023).

Za obradu sekvencijalnih podataka, poput teksta ili vremenskih serija, koriste se rekurentne neuronske mreže (RNN), koje imaju sposobnost pamćenja prethodnih stanja i relacija među podacima. Ova svojstva ih čine pogodnim za zadatke poput prirodne obrade jezika (NLP), prepoznavanja govora i prevoda teksta. Poseban tip RNN mreža, poznat kao LSTM (Long Short-Term Memory), omogućava efikasnije pamćenje dugoročnih zavisnosti, što je važno za složene sekvencijalne zadatke (Huang et al., 2019; Sejnowski, 2020; Zhang et al., 2023).

Jedan od najmoćnijih koncepata u dubokom učenju jeste transferno učenje, koje omogućava korišćenje prethodno obučениh modela za nove zadatke. Na primjer, model obučен na velikom skupu slika može se prilagoditi za specifične zadatke klasifikacije sa mnogo manje podataka, čime se značajno smanjuje vrijeme obuke i potrebni resursi. Transferno učenje je postalo posebno popularno u oblastima kao što su računarstvo u oblaku, obrada prirodnog jezika i medicinska dijagnostika, gdje je potrebno brzo treniranje modela na osnovu ograničenih podataka (Kelleher, 2019; Sejnowski, 2020).

Važan koncept u dubokom učenju je regularizacija, koja pomaže u sprječavanju prenaučенosti (overfitting), tj. pojave kada model postane previše specifičan za podatke na kojima je treniran, što umanjuje njegovu sposobnost da generalizuje na nove podatke. Tehnike kao što su dropout, L1/L2 regularizacija i normalizacija grupa (batch normalization) postale su standard u izgradnji dubokih mreža. Dropout tehnika se koristi tako što se nasumično isključuju određeni neuroni tokom obuke, čime se smanjuje zavisnost modela od specifičnih neuronskih veza, dok L1/L2 regularizacija dodaje ograničenje na velike težine u modelu, čime se sprečava njihovo prekomjerno prilagođavanje podacima (Sejnowski, 2020; Zhang et al., 2023; Prince, 2023).

Pored nadziranog učenja, duboko učenje bez nadzora omogućava analizu podataka bez korišćenja unaprijed kreiranih oznaka, odnosno labela podataka. Klastering, smanjenje dimenzionalnosti i generativni modeli poput varijacionih autoenkodera (VAE) i generativnih protivničkih mreža (GAN) predstavljaju napredne tehnike koje omogućavaju otkrivanje latentnih struktura u podacima ili kreiranje novih, sintetičkih podataka zasnovanih na distribuciji originalnih podataka. GAN mreže, u kojima dvije mreže (generator i diskriminator) rade zajedno kako bi kreirale realistične podatke, omogućile su ogroman napredak u oblasti generativne umjetnosti, kreiranja slika i sintetičke obrade podataka (Zhang et al., 2023; Vasudevan, S. Pulari & Vasudevan, 2021).

Napredak u oblasti mašinskog i dubokog učenja nastavlja da transformiše industrije, naučna istraživanja i svakodnevni život, omogućavajući rješenja koja su do nedavno bila nezamisliva.

1.3. Razvoj vještačke inteligencije kroz istoriju

Razvoj vještačke inteligencije kroz istoriju predstavlja kompleksan i uzbudljiv put inovacija, istraživanja i tehnoloških napredaka. Glavni trenuci u ovoj evoluciji oblikovali su našu percepciju o mogućnostima računarskih sistema. Pionirski rad u ovom polju počeo je 1943. godine, kada su Warren McCulloch i Walter Pitts objavili rad koji je postavio temelje za teorijske koncepte vještačkih neuronskih mreža. Ovaj rad je utemeljio koncept neuronskih mreža inspirisanih funkcijom ljudskog mozga, pružajući temelje za dalji razvoj u simulaciji mentalnih procesa putem računarskih sistema (De Blasio, Moreno-Díaz, & Moreno-Díaz, 2018).

Godina 1950. je bila prekretnica u istraživanju vještačke inteligencije, kada je Alan Turing objavio rad pod nazivom "Računari i misao". Turing je postavio pitanje "Da li mašine mogu da misle?", što je otvorilo osnovnu debatu o prirodi inteligencije i sposobnosti računarskih sistema da oponašaju ljudsko razmišljanje. Njegov rad postavio je temelje za dalji razvoj teorija u vještačkoj inteligenciji, inspirišući istraživače širom svijeta da istraže mogućnosti računarske inteligencije i njenog potencijala (Muggleton, 2014).

Period simboličke inteligencije, koji je započeo sa Dartmouth konferencijom 1956. godine, označava formalni početak polja vještačke inteligencije. Na ovoj konferenciji, istraživači kao što su John McCarthy, Marvin Minsky i drugi, postavili su ciljeve za razvoj vještačke inteligencije i raspravili mogućnosti računarskih sistema da imitiraju ljudsku inteligenciju (Moor, 2006). Tokom 60-ih i 70-ih godina, istraživači su se fokusirali na simboličke pristupe, uključujući simboličku logiku i ekspertne sisteme. Programi kao što je LISP omogućili su rad sa složenim simboličkim strukturama, dok su ekspertni sistemi, zasnovani na pravilima koja su formulisali stručnjaci iz specifičnih oblasti, korišćeni za donošenje zaključaka i rješavanje problema u tim domenima (Jaakkola et al., 2019; Natale & Ballatore, 2020). Iako su simbolički pristupi omogućili određeni napredak, postalo je jasno da imaju ograničenja u oblastima kao što su percepcija i obrada prirodnog jezika, što je dovelo do razvoja novih metoda (Basheer & Hajmeer, 2020).

Tokom 80-ih i 90-ih godina, polje vještačke inteligencije doživjelo je period poznat kao "zima vještačke inteligencije". Ovaj period, karakterisan finansijskim neuspjesima i nedostatkom značajnog napretka u glavnim oblastima, doveo je do smanjenja interesa i investicija u vještačku inteligenciju. Mnogi projekti nisu ispunili visoka očekivanja koja su ranije postavljena, što je dovelo do skepticizma među investitorima i smanjenja istraživačkih aktivnosti u ovom polju (Gonsalves, 2019). Pored finansijskih problema, istraživači su se okrenuli drugim oblastima, smatrajući da vještačka inteligencija nije bila održiva ili isplativa u tom trenutku. Ipak, ovaj period je pružio važne lekcije o potrebi za realističnim očekivanjima i dugoročnim istraživanjem (Muthukrishnan et al., 2020).

Kasnih 90-ih i početkom 21. vijeka, polje vještačke inteligencije je ponovo oživjelo zahvaljujući napretku u mašinskom učenju i dubokom učenju. Razvoj velikih datasetova i naprednih algoritama omogućio je značajne pomake u oblastima kao što su prepoznavanje slika, obrada prirodnog jezika i autonomna vožnja. Snažniji računarski resursi omogućili su bržu obradu podataka i obuku složenijih modela, dok su napredni algoritmi, inspirisani strukturom neuronskih mreža, omogućili sistemima da samostalno prepoznaju složene obrasce (Russell & Norvig, 2010; Li & Du, 2017). Ovi napreci su značajno ubrzali istraživanje i razvoj u vještačkoj inteligenciji, otvarajući vrata za nove inovacije i primjene. Danas se vještačka inteligencija koristi u širokom spektru aplikacija, od prepoznavanja glasa i slike do autonomne vožnje, i nastavlja da oblikuje naš svakodnevni život i tehnologiju (van Assen et al., 2022).

1.4. Primjene vještačke inteligencije u različitim industrijama

Primjene vještačke inteligencije su široke i uticajne u različitim industrijama, sa sve većim potencijalom za transformaciju poslovanja i društva. Ova tehnologija omogućava poboljšanja u sektoru zdravstva, finansija, proizvodnje, automobilske industrije, trgovine, obrazovanja, te medija i zabave.

U sektoru zdravstva, vještačka inteligencija unapređuje analizu medicinskih podataka, personalizovanu medicinu, upravljanje zdravstvenim dosijeima i pacijentskim podacima, kao i robotiku u operativnim procedurama i rehabilitaciji (Secinaro et al., 2021). Algoritmi mašinskog učenja omogućavaju precizniju dijagnostiku i ranije otkrivanje bolesti analizom laboratorijskih nalaza, medicinskih slika i genetskih informacija, što poboljšava ishode liječenja i smanjuje troškove zdravstvene zaštite (Lauritsen et al., 2020). Personalizovana medicina koristi vještačku inteligenciju za razvijanje individualizovanih tretmana i terapija na

osnovu genetskih i medicinskih podataka, čime se povećava efikasnost liječenja i minimiziraju nuspojave (Awwalu et al., 2015). Vještačka inteligencija takođe poboljšava upravljanje zdravstvenim dosijeima putem elektronskih kartona koji omogućavaju bržu razmjenu podataka i poboljšavaju koordinaciju zdravstvene zaštite, dok robotika doprinosi preciznosti u hirurškim zahvatima i rehabilitaciji (Stanfill & Marc, 2019; Andras et al., 2020; Garcia-Gonzalez et al., 2022).

U finansijskom sektoru, vještačka inteligencija se koristi za analizu finansijskih tržišta, detekciju prevara, automatizaciju bankarskih i osiguravajućih procesa, te personalizovano finansijsko planiranje (Pallathadk et al., 2023). Algoritmi mašinskog učenja analiziraju tržišne podatke za predikciju trendova i donošenje investicionih odluka na bazi informacija (Ashtiani & Raahemi, 2023). Detekcija prevara kroz analizu transakcija i obrazaca ponašanja korisnika poboljšava sigurnost i zaštitu od prevara (Mohanty & Mishra, 2023). Automatizacija procesa, uključujući obradu transakcija i odobravanje kredita, povećava efikasnost i smanjuje troškove poslovanja (Noreen et al., 2023). Vještačka inteligencija takođe omogućava personalizovano finansijsko planiranje na osnovu analize korisničkih podataka, čime se optimizuje upravljanje finansijama (Kunduru, 2023).

U proizvodnji i logistici, vještačka inteligencija doprinosi optimizaciji lanca snabdijevanja, prediktivnom održavanju, kontroli kvaliteta u realnom vremenu i primjeni robotike (Nwagwu et al., 2023). Analizom faktora kao što su potražnja i troškovi transporta, vještačka inteligencija pomaže u smanjenju troškova i poboljšanju efikasnosti lanca snabdijevanja (Richey et al., 2023). Prediktivno održavanje koristi podatke o performansama mašina za prevenciju kvarova i produžavanje vijeka trajanja opreme (Nwagwu et al., 2023). Kontrola kvaliteta u realnom vremenu omogućava brzu intervenciju u proizvodnom procesu kako bi se minimizirali gubici (Lekan, Aigbavboa & Emetere, 2023). Robotika automatizuje zadatke kao što su montaža i skladištenje, čime se povećava efikasnost i smanjuje rizik od grešaka (Nwagwu et al., 2023).

Automobilska industrija je značajno transformisana primjenom vještačke inteligencije, sa fokusom na samoupravljujuće automobile, tehnologije asistencije vozaču, analizu podataka o vožnji i personalizovana iskustva u vozilima (Llopis-Albert, Rubio & Valero, 2021). Samoupravljujući automobili i tehnologije asistencije koriste vještačku inteligenciju za autonomnu vožnju i poboljšanje sigurnosti i udobnosti (Gao & Bian, 2021). Analiza podataka o vožnji pomaže u identifikaciji uzroka nesreća i optimizaciji performansi vozila (Nwakanma

et al., 2023), dok personalizovana iskustva u vozilima uključuju prilagođene funkcije prema preferencijama korisnika, čime se poboljšava zadovoljstvo tokom vožnje (Kamran et al., 2022).

U sektoru trgovine i maloprodaje, vještačka inteligencija unapređuje preporučivanje proizvoda, analizu velikih podataka, optimizaciju cijena i promocija (Fu et al., 2023). Algoritmi vještačke inteligencije generišu personalizovane preporuke na osnovu prethodnih kupovina i ponašanja korisnika, što poboljšava korisničko iskustvo i povećava prodaju (Maxim, 2023). Analiza velikih podataka pomaže u upravljanju zalihama i praćenju trendova potrošnje, smanjujući gubitke i optimizujući ponudu (Abrardi, Cambini & Rondi, 2022). Dinamička optimizacija cijena i promocija omogućava trgovcima da povećaju profitabilnost i konkurentnost na tržištu (Rahmani et al., 2023).

Vještačka inteligencija uvodi važne inovacije u obrazovanju, omogućavajući personalizovano učenje, prilagođene kurikulume i napredne analitičke alate za praćenje napretka učenika (Chen, Chen & Lin, 2020). Personalizovano učenje koristi algoritme mašinskog učenja za prilagođavanje kurikuluma individualnim potrebama učenika, što poboljšava angažovanje i rezultate (Nalbant, 2021). Analitički sistemi omogućavaju kontinuirano praćenje akademskih performansi, identifikaciju slabih tačaka i prilagođavanje nastavnih strategija (Sharma et al., 2021). Virtuelni tutori i asistenti pružaju individualnu podršku kroz interaktivne platforme, unapređujući razumijevanje gradiva i vještine učenja (Mekni, 2021). Sumiranjem navedenog, integracija vještačke inteligencije u obrazovanje obećava poboljšanje kvaliteta obrazovanja i stvaranje inkluzivnijeg obrazovnog sistema.

Primjena vještačke inteligencije u sektoru medija i zabave donosi značajne prednosti. Algoritmi mašinskog učenja omogućavaju precizno preporučivanje sadržaja na osnovu korisničkih interesa, što povećava angažovanost i lojalnost korisnika (Anantrasirichai & Bull, 2022). Automatizacija produkcije sadržaja omogućava bržu izradu tekstova, videozapisa i drugih medijskih formi, smanjujući potrebu za ljudskom intervencijom (Chan-Olmsted, 2019). Analiza sentimenta i reakcija publike omogućava bolje razumijevanje stavova i emocija korisnika, pomažući u prilagođavanju komunikacijskih strategija (Meena, Jingar & Gupta, 2020). Ove primjene vještačke inteligencije unapređuju personalizaciju, efikasnost i razumijevanje publike, čime poboljšavaju konkurentnost medijskih kompanija (Karnouskos, 2020).

Vještačka inteligencija u građevinskoj industriji donosi inovacije koje poboljšavaju različite aspekte procesa. Algoritmi mašinskog učenja pomažu u generisanju optimalnih

dizajna i analizi terena, što omogućava efikasnije planiranje i smanjenje uticaja na okolinu (Oprach et al., 2019). Robotski sistemi i tehnologije proširene stvarnosti ubrzavaju izgradnju i poboljšavaju kvalitet radova. Softverske platforme za upravljanje projektima koriste vještačku inteligenciju za predviđanje rizika i optimizaciju resursa, čime se smanjuju troškovi i poboljšava vođenje projekata (Abioye et al., 2021; Korke et al., 2023). Pametno održavanje i tehnologije Interneta stvari doprinose produženju vijeka trajanja objekata i energetskej efikasnosti (Kazeem, Olawumi & Osunsanmi, 2023; Nehdi et al., 2024). Integracija vještačke inteligencije u građevinskoj industriji vodi ka efikasnijim i održivijim praksama.

2. KONCEPT PAMETNIH ZGRADA

2.1. Arhitektura budućnosti – koncepti i tehnologije pametnih zgrada

Pametne zgrade predstavljaju budućnost urbane arhitekture, kombinujući napredne tehnologije sa održivim dizajnom kako bi pružile energetske efikasne, tehnološki integrisane i ekološki prihvatljiva rješenja (King & Perry, 2017). Arhitektura pametnih zgrada fokusira se na kreiranje prostora koji koriste digitalne tehnologije za optimizaciju funkcionalnosti, smanjenje potrošnje resursa i poboljšanje kvaliteta života korisnika. Pametne zgrade integrišu senzore, automatizovane sisteme i vještačku inteligenciju kako bi neprekidno analizirale i prilagođavale svoje operacije, stvarajući dinamična i adaptivna okruženja (Al Dakheel et al., 2020).

Jedan od važnih koncepata arhitekture pametnih zgrada je ideja interaktivnog prostora – zgrade koja se može prilagoditi potrebama korisnika u realnom vremenu. To uključuje automatsko podešavanje temperature, osvetljenja, ventilacije i sigurnosnih sistema na osnovu prisutnosti korisnika ili spoljnih uslova, čime se postiže značajna ušteda energije i poboljšava udobnost. Ove zgrade često koriste sisteme za upravljanje energijom i pametne mreže kako bi maksimalno iskoristile obnovljive izvore energije i minimizovale otpad (Robyns et al., 2024).

Drugi važan koncept je integracija vještačke inteligencije i Interneta stvari (IoT) u arhitekturi zgrada. Senzori postavljeni širom objekta omogućavaju prikupljanje podataka o različitim aspektima rada zgrade, poput energetske potrošnje, kvaliteta vazduha, sigurnosnih prijetnji ili nivoa upotrebe prostora. Ovi podaci se obrađuju u realnom vremenu putem naprednih algoritama, omogućavajući automatske odgovore sistema ili upozorenja za upravitelje zgrada. Pametne zgrade stoga postaju samostalni entiteti, sposobni da se prilagode promjenama u okruženju, smanjujući troškove održavanja i potrošnju resursa (Serrano, 2022).

Povezivost i mrežna infrastruktura su temeljni elementi pametnih zgrada, omogućujući integraciju i komunikaciju između različitih uređaja i sistema unutar zgrade. Pametne zgrade koriste napredne mrežne tehnologije kako bi osigurale brzu i pouzdanu komunikaciju, što je bitno za koordinaciju različitih funkcija i sistema. Bežične tehnologije poput Wi-Fi-ja, Bluetooth-a i Zigbee-a su često korišćene u pametnim zgradama zbog njihove praktičnosti i fleksibilnosti. Wi-Fi omogućuje visokopropusnu bežičnu mrežu koja može podržavati širok raspon uređaja i aplikacija, od pametnih telefona do pametnih uređaja za kuću. Bluetooth se

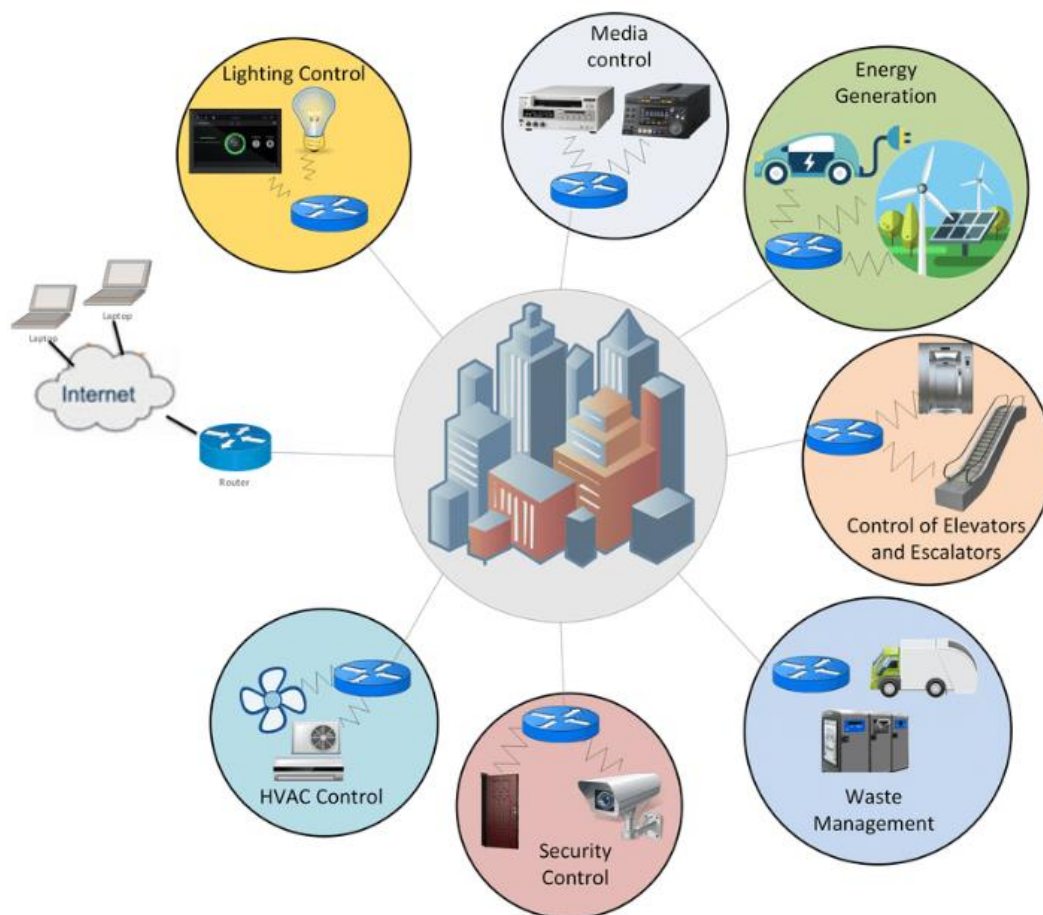
često koristi za lokalnu komunikaciju između uređaja u blizini, dok Zigbee pruža energetski efikasnu i pouzdanu mrežu za pametne uređaje koji zahtijevaju nisku potrošnju energije (Jia et al., 2019). Osim bežičnih tehnologija, pametne zgrade također mogu koristiti i žične mrežne tehnologije poput Ethernet-a ili Power over Ethernet (PoE) za pouzdanu i brzu mrežnu povezanost. Ethernet omogućuje visokopropusnu mrežnu vezu pogodnu za uređaje koji zahtijevaju stalnu i pouzdanu povezanost, poput sigurnosnih kamera ili sistema za upravljanje zgradom (Yaïci et al., 2020). Integracija različitih mrežnih tehnologija omogućuje pametnim zgradama da podrže različite aplikacije i sisteme, od upravljanja energijom i osvjetljenjem do sigurnosnih sistema i pametnih uređaja za kuću. Ova mrežna infrastruktura omogućuje fleksibilnost i skalabilnost, dajući mogućnost pametnim zgradama da se prilagode promjenjivim potrebama i zahtjevima korisnika (Qolomany et al., 2019).

Tehnologije pametnih zgrada uključuju različite aspekte: od integrisanih HVAC i pametnih osvjetljenja, do naprednih sigurnosnih rješenja poput biometrijskih skenera i nadzornih sistema zasnovanih na vještačkoj inteligenciji. Još jedan važan element je korišćenje obnovljivih izvora energije – solarnih panela, sistema za prikupljanje kišnice i geotermalnih sistema – koji omogućavaju zgradama da budu energetski samoodržive i ekološki odgovorne.

Pametne zgrade su često dio šireg koncepta pametnih gradova, gdje se zgrade povezuju u cjelovitu infrastrukturu koja omogućava optimalno korišćenje resursa na nivou cijelih naselja ili gradova. U tom kontekstu, arhitektura budućnosti neće biti ograničena samo na funkcionalnost i estetiku pojedinačnih objekata, već će uključivati integraciju zgrada s okolinom, stvarajući međusobno povezane, energetski efikasne i tehnološki napredne urbane prostore (Singh, Solanki & Sharma, 2021).

2.2. Područja primjene vještačke inteligencije u pametnim zgradama

Vještačka inteligencija postaje sve važniji faktor u razvoju pametnih zgrada, koje predstavljaju visokotehnološke objekte dizajnirane s ciljem optimizacije resursa, poboljšanja komfora korisnika i održivosti. Ove zgrade koriste napredne tehnologije koje omogućavaju integraciju različitih sistema putem mrežnih konekcija, a vještačka inteligencija igra značajnu ulogu u analizi podataka, donošenju odluka i automatskom upravljanju procesima unutar zgrade (Panchalingam & Chan, 2021). U nastavku su prikazana neka od područja primjene vještačke inteligencije u pametnim zgradama, kako bi se ukazalo na značaj koji vještačka inteligencija ima u kontekstu pametnih zgrada.



*Slika 1. Primjeri područja primjene vještačke inteligencije i uređaja pametnih zgrada
(Qolomany et al., 2019)*

HVAC sistemi predstavljaju područje u kojem vještačka inteligencija igra značajnu ulogu u optimizaciji potrošnje energije. Primjenom naprednih algoritama, ovi sistemi mogu analizirati trenutne vremenske prilike, unutrašnju temperaturu, kvalitet vazduha, kao i obrasce korišćenja prostora, čime se omogućava precizno prilagođavanje režima grijanja i hlađenja (Khan et al., 2024). Korišćenje vještačke inteligencije omogućava prognoziranje perioda kada će prostor biti korišćen, što olakšava podešavanje temperature u skladu sa zauzetošću prostora i smanjuje nepotrebno trošenje energije. Na ovaj način se ne samo poboljšava energetska efikasnost, već se i produžava vijek trajanja opreme, zahvaljujući optimizovanom radu sistema (Boutahri & Tilioua, 2024). Pored toga, spoljni faktori poput spoljne temperature, vlažnosti i intenziteta sunčeve svjetlosti, takođe se uzimaju u obzir, kako bi se stvorili idealni unutrašnji uslovi. Na primjer, tokom hladnijih perioda, vještačka inteligencija automatski povećava temperaturu radi postizanja komfora, dok u toplim uslovima koristi prirodnu ventilaciju kako bi smanjila potrebu za klimatizacijom (Merabet et al., 2021).

Upravljanje medijskim sistemima u pametnim zgradama je takođe značajno unaprijeđeno kroz primjenu vještačke inteligencije. Algoritmi zasnovani na podacima o korisničkim navikama mogu prilagoditi različite aspekte medijskog iskustva, poput kvaliteta zvuka i slike, ili čak odabrati sadržaje koji odgovaraju interesima i preferencijama korisnika. Ovi sistemi ne samo da poboljšavaju kvalitet korisničkog iskustva, već i smanjuju nepotrebnu potrošnju resursa, jer vještačka inteligencija automatski gasi uređaje ili smanjuje potrošnju energije kada nisu aktivno korišćeni (Luo, 2022; Karagöz & Tecim, 2022).

Kada je riječ o generisanju energije, pametne zgrade koje koriste vještačku inteligenciju uspijevaju na optimalan način iskoristiti obnovljive izvore energije, kao što su solarni paneli ili vjetroturbine. Algoritmi vještačke inteligencije analiziraju podatke o vremenskim uslovima, obrazcima potrošnje i trenutnim potrebama zgrade, omogućujući efikasno preusmjeravanje energije između skladištenja i trenutne upotrebe (Yu et al., 2021). Ova tehnologija ne samo da smanjuje zavisnost od tradicionalnih izvora energije, već i značajno doprinosi smanjenju emisija štetnih gasova koji izazivaju efekat staklene bašte (Aguilar et al., 2021a). Integracija obnovljivih izvora energije poput solarne i vjetroenergije sa naprednim upravljačkim sistemima omogućava pametnim zgradama postizanje veće energetske efikasnosti i održivosti. Ovakav pristup je važan za budućnost ekološki prihvatljive gradnje i smanjenje ekološkog otiska urbanih sredina.

Kontrola liftova i pokretnih stepenica još je jedno područje primjene vještačke inteligencije. Ovi sistemi analiziraju podatke o kretanju ljudi unutar zgrade i koriste te informacije za optimizaciju rada. Na primjer, liftovi se mogu unaprijed pozicionirati na spratove gdje se očekuje najveći transport, čime se smanjuje vrijeme čekanja za korisnike i smanjuje potrošnja energije. Takođe, vještačka inteligencija može prilagoditi rad pokretnih stepenica prema trenutnim zahtjevima zgrade, tako da one rade samo kada su u upotrebi (Siikonen, 1997; Jamaludin, Rahim & Hew, 2020; Osimpov et al., 2022).

Sistemi za upravljanje otpadom u pametnim zgradama oslanjaju se na vještačku inteligenciju kako bi automatizovali i unaprijedili procese prikupljanja, sortiranja i reciklaže otpada. Senzori postavljeni na različite lokacije unutar zgrade omogućavaju precizno praćenje vrste i količine otpada u realnom vremenu, dok napredni algoritmi analiziraju te podatke kako bi optimizovali cijeli proces. Zahvaljujući ovoj tehnologiji, moguće je bolje koordinisati postupke prikupljanja otpada, smanjiti učestalost odvoza, te poboljšati efikasnost reciklaže. Automatsko sortiranje otpada predstavlja još jednu prednost ovih sistema, gdje se različiti

materijali klasifikuju i odvajaju na licu mjesta, smanjujući potrebu za dodatnim ljudskim angažovanjem. Ovaj pristup ne samo da doprinosi održivosti, već i značajno smanjuje ekološki otisak zgrada, omogućavajući im da efikasnije upravljaju resursima (Shukla & Hait, 2022; Gupta & Tandon, 2023). Vještačka inteligencija u ovim sistemima koristi sofisticirane analitičke metode kako bi prepoznala obrasce u generisanju otpada i dala preporuke za optimizaciju procesa recikliranja. Na primjer, na osnovu podataka dobijenih od senzora, mogu se identifikovati najčešće vrste otpada i predložiti specifične strategije za razdvajanje na izvoru ili povećanje udjela recikliranih materijala. Ovakav pristup može pomoći u prepoznavanju materijala koji se mogu ponovo koristiti, a takođe omogućava predlaganje novih metoda za smanjenje ukupne količine otpada. Osim toga, algoritmi vještačke inteligencije mogu pružiti detaljne preporuke za poboljšanje postojećih procedura upravljanja otpadom, bilo da je riječ o povećanju kapaciteta za reciklažu ili boljoj integraciji održivih praksi u svakodnevne operacije unutar zgrade (Shahsavari et al., 2021; Mohan et al., 2021).

Vještačka inteligencija igra značajnu ulogu u unapređenju sigurnosnih sistema pametnih zgrada, omogućavajući primjenu naprednih metoda nadzora i zaštite. Integrirani sistemi, koji uključuju prepoznavanje lica, analitiku video podataka i automatizovane sisteme za identifikaciju prijetnji, omogućavaju unaprijed detektovanje potencijalnih sigurnosnih rizika. Ovi pametni sigurnosni sistemi brzo analiziraju velike količine informacija, prepoznaju obrasce ponašanja i reaguju na opasnosti u realnom vremenu, čime se značajno povećava nivo sigurnosti u zgradama (Khairuddin, Shahbudin & Kassim, 2021). Kontinuirana analiza video zapisa sa kamera postavljenih unutar i izvan objekta pomaže u identifikaciji sumnjivih aktivnosti. Algoritmi mašinskog učenja automatski detektuju neobična ponašanja, poput osobe koja se kreće na sumnjiv način ili ostavlja predmete na neuobičajenim mjestima (Ciholas et al., 2019; Vijayan et al., 2020). Kada vještačka inteligencija identifikuje sumnjive aktivnosti, može automatski generisati upozorenja sigurnosnim službama, omogućavajući brzu reakciju i sprečavanje incidenata. Osim video nadzora, bitni aspekti sigurnosnih sistema uključuju kontrolu pristupa i detekciju požara. Sistemi za kontrolu pristupa koriste različite metode autentifikacije, poput kartica i biometrijskih podataka, osiguravajući da samo ovlašćeni korisnici imaju pristup osjetljivim područjima (Ciholas et al., 2019). Integrirani sistemi detekcije požara koriste senzore za identifikaciju dima, plamena i promjena temperature, automatski pokrećući uzbunjivače kako bi upozorili korisnike prostora na opasnost (Saeed et al., 2018). Optimizacija sigurnosnih protokola predstavlja još jedan važan aspekt, jer AI može analizirati širok spektar podataka kako bi identifikovao ranjivosti u sigurnosnim mjerama. Ova

analiza uključuje proučavanje podataka o pristupu, korišćenju sigurnosnih sistema i praćenju mrežnog pristupa. Na osnovu dobijenih informacija, vještačka inteligencija može predložiti poboljšanja, kao što su višestruka autentifikacija ili povećanje nadzora, čime se dodatno jača sigurnost zgrade (Wendzel et al., 2017; Thakur et al., 2021). Integracija svih ovih sistema omogućava cjelovit pristup sigurnosnim potrebama zgrade, pružajući zaštitu korisnicima prostora i imovini, a vještačka inteligencija je važan faktor u unapređenju efikasnosti i sigurnosti ovih sistema.

Prediktivno održavanje u pametnim zgradama, vođeno vještačkom inteligencijom, omogućava proaktivno upravljanje infrastrukturom, optimizujući rad i smanjujući troškove održavanja. Korišćenjem senzora i naprednih algoritama, vještačka inteligencija analizira podatke o performansama sistema u realnom vremenu i predviđa moguće kvarove prije nego što se oni dogode (Bouabdallaoui et al., 2021; Luo, 2022). Na taj način, umjesto reaktivnog ili preventivnog pristupa, prediktivno održavanje omogućava intervencije samo kada su zaista potrebne, čime se produžava vijek trajanja opreme i smanjuju prekidi u radu. Ova tehnologija takođe doprinosi povećanju sigurnosti, jer osigurava pravovremeno održavanje važnih sistema kao što su liftovi, HVAC oprema i sigurnosni sistemi, minimizujući rizike od nepredviđenih kvarova ili nesreća (Bouabdallaoui et al., 2021; Panchalingam & Chan, 2021).

Optimizacija resursa vode igra bitnu ulogu u postizanju održivosti pametnih zgrada, pri čemu vještačka inteligencija predstavlja napredni alat za efikasnije korišćenje ovog dragocjenog resursa. Uz pomoć sofisticiranih analitičkih tehnika, vještačka inteligencija može temeljno analizirati obrasce potrošnje vode unutar objekata. Senzori instalirani u sistemima za distribuciju vode prikupljaju podatke o potrošnji, što omogućava detaljno razumijevanje upotrebe vode u različitim uslovima (Barroso, Bustos & Núñez, 2023). Analizom prikupljenih podataka, vještačka inteligencija predviđa buduće trendove potrošnje, uzimajući u obzir klimatske promjene, sezonske varijacije i specifične obrasce korišćenja. Ova prediktivna analiza otvara mogućnosti za uštede i unapređenje strategija upravljanja vodnim resursima (Palermo et al., 2022). Jedna od značajnih aplikacija vještačke inteligencije u ovom kontekstu su automatski sistemi za navodnjavanje, ispiranje i filtraciju. Na osnovu analize podataka, vještačka inteligencija može optimizovati raspored navodnjavanja zelenih površina ili prilagoditi intenzitet ispiranja u toaletima i drugim uređajima. Takođe, ovi sistemi mogu identifikovati i lokalizovati potencijalne gubitke u vodovodnim mrežama, predlažući efikasne mjere za njihovo otklanjanje, čime se dodatno smanjuju gubici vode (Howell Rezgui & Beach, 2017).

Upravljanje energijom je značajan faktor u povećanju održivosti pametnih zgrada, a vještačka inteligencija igra centralnu ulogu u optimizaciji njene potrošnje. Kroz analizu podataka prikupljenih putem senzora, algoritmi dubokog učenja prepoznaju energetske obrasce i kreiraju efikasne strategije za uštedu (Chui, Lytras & Visvizi, 2018). Ovi sistemi automatski prilagođavaju rad uređaja poput grijanja, hlađenja i osvjetljenja na osnovu faktora kao što su spoljašnja temperatura i prisutnost korisnika, čime se smanjuje nepotrebna potrošnja (Attoue, Shahrour & Younes, 2018). Takođe, vještačka inteligencija može prepoznati optimalne trenutke za korišćenje energije i predložiti mjere za smanjenje potrošnje uređaja koji troše previše (Yu et al., 2021). Kontinuirano praćenje energetske potrošnje putem senzora omogućava pravovremenu optimizaciju, čime pametne zgrade postaju još efikasnije u smanjenju energetske potrošnje i troškova (Farzaneh et al., 2021; Huang, Koroteev & Rynkovskaya, 2022).

Sistemi za upravljanje prostorom u pametnim zgradama igraju važnu ulogu u optimizaciji korišćenja resursa. Korišćenjem naprednih tehnologija, ovi sistemi omogućavaju planiranje i organizovanje prostora na temelju stvarnih potreba korisnika (Sinopoli, 2009). Na primjer, funkcionalnosti poput rezervacije radnih mjesta ili prostorija olakšavaju korisnicima da putem aplikacija ili računarskih sistema pronađu i rezervišu odgovarajuće resurse, kao što su konferencijske dvorane ili radni stolovi. Ovo doprinosi efikasnijem planiranju događaja i sastanaka, čime se osigurava optimalna iskorišćenost prostora (Lee et al., 2012). Osim rezervacija, senzorski sistemi kontinuirano prate kako se prostor koristi, omogućavajući analizu trendova i obrazaca. Ova analiza pomaže menadžerima zgrada u donošenju odluka na osnovu dostupnih informacija o prilagođavanju rasporeda ili reorganizaciji prostora na osnovu stvarne upotrebe (Berawi et al., 2017). Na primjer, automatsko prilagođavanje prostora poput učionica ili konferencijskih sala može uključivati podešavanje temperature, osvjetljenja ili rasporeda sjedenja, kako bi se prostor dinamično prilagodio aktivnostima korisnika (Park et al., 2018). Vještačka inteligencija ima značajnu ulogu u daljoj optimizaciji korišćenja prostora. Analizom podataka prikupljenih putem senzora, sistema za rezervacije i drugih izvora, AI može prepoznati neiskorišćene prostore ili one koji nisu optimalno upotrijebljeni. Na temelju tih informacija, vještačka inteligencija predlaže strategije za poboljšanje iskorišćenosti, poput reorganizacije rasporeda ili prenamjene prostorija (Panchalingam & Chan, 2021). Na taj način se efikasnije upravlja resursima i poboljšava fleksibilnost prostora u skladu s promjenama u potrebama korisnika, bilo da se radi o kancelarijskim prostorima, konferencijskim dvoranama ili zajedničkim prostorijama (Genkin & McArthur, 2023). Ovim pristupom se omogućava kako

bolja iskorišćenost prostora, tako i povećana efikasnost upravljanja pametnim zgradama, uz prilagođavanje prostora korisničkim potrebama u realnom vremenu.

Kombinovanjem svih ovih sistema, vještačka inteligencija transformiše pametne zgrade u dinamične, samoodržive ekosisteme koji mogu samostalno prilagođavati svoje operacije i resurse prema trenutnim potrebama korisnika i uslovima okoline. U konačnom, pametne zgrade sa vještačkom inteligencijom ne samo da smanjuju potrošnju energije i unapređuju ekološku održivost, već i povećavaju komfor, sigurnost i ukupnu efikasnost poslovanja, postavljajući novi standard u dizajnu i upravljanju urbanim prostorima.

2.3. Energetska efikasnost u pametnim zgradama

Energetska efikasnost u pametnim zgradama je koncept koji se odnosi na optimizaciju potrošnje energije u građevinama korišćenjem tehnologije, senzora, i automatizacije. Pametne zgrade koriste različite tehnološke inovacije kako bi smanjile potrošnju energije, povećale udobnost korisnika i smanjile troškove održavanja.

2.3.1. Integrisane tehnologije za optimizaciju energetske efikasnosti

U cilju postizanja maksimalne energetske efikasnosti u pametnim zgradama, važan faktor je integracija naprednih tehnologija koje omogućavaju međusobno povezivanje svih sistema unutar objekta. Korišćenjem IoT senzora, svi bitni parametri vezani za potrošnju energije mogu se kontinuirano pratiti i analizirati. Ovi senzori se postavljaju u različite dijelove zgrade, uključujući HVAC sisteme, i potrošnju električne energije uređaja. Pametni termostati i senzori temperature omogućavaju dinamičku kontrolu sistema grijanja i hlađenja, čime se smanjuje nepotrebna potrošnja energije u prostorijama koje nisu u upotrebi ili kada vanjski uslovi to zahtijevaju (Metallidou, Psannis & Egyptiadou, 2020; Kumar et al., 2021).

Pored toga, integracija tehnologija za skladištenje energije, kao što su baterijski sistemi, omogućava zgradama da skladište višak energije proizvedene iz obnovljivih izvora, kao što su solarni paneli. Na ovaj način, energetska sistem pametne zgrade postaje sposoban da koristi ovu skladištenu energiju u periodima kada je potražnja za energijom veća ili kada su izvori energije ograničeni. Dalje, sofisticirani softverski alati za upravljanje energijom omogućavaju ne samo optimizaciju potrošnje, već i predviđanje obrazaca potrošnje, što dodatno doprinosi efikasnosti. Svi ovi elementi čine zgradu sposobnom da minimizira svoje energetske troškove,

smanji emisiju štetnih gasova i poboljša ukupnu ekološku održivost (Xu et al., 2020; Zhang et al., 2022).

2.3.2. Implementacija naprednih strategija upravljanja energijom u pametnim zgradama

Za postizanje optimalnog upravljanja energijom u pametnim zgradama, važno je uvođenje naprednih strategija koje se oslanjaju na analitičke alate i sisteme zasnovane na vještačkoj inteligenciji. Ovi sistemi omogućavaju zgradama da predviđaju energetske potrebe na osnovu istorijskih podataka, ali i da se prilagode u realnom vremenu na promjene u okruženju i ponašanju korisnika. Na primjer, primjena algoritama mašinskog učenja omogućava sistemima u pametnim zgradama da neprestano optimizuju potrošnju energije, učeći iz prethodnih obrazaca potrošnje i prilagođavajući se na osnovu očekivanih potreba (De Paola et al., 2014; Minoli, Sohraby & Occhiogrosso, 2017).

Napredne strategije uključuju i upotrebu tzv. energetske mikromreže, gdje pametne zgrade postaju decentralizovani energetske sistemi sposobni za proizvodnju, skladištenje i distribuciju vlastite energije. Ovi sistemi omogućavaju fleksibilnost u upravljanju energijom, gdje se višak proizvedene energije može skladištiti ili vraćati u distributivnu mrežu, čime se smanjuje pritisak na javne energetske sisteme i poboljšava stabilnost cjelokupne mreže. Takođe, ove strategije omogućavaju zgradama da smanje energetske gubitke kroz precizno upravljanje napajanjem u realnom vremenu, čime se povećava pouzdanost i efikasnost cjelokupnog sistema (Zhang, Shah & Papageorgiou, 2013; Ożadowicz, 2017).

Pored ovih strategija, implementacija sistema za upravljanje zgradama (BMS) igra značajnu ulogu u optimizaciji energetske efikasnosti. BMS je centralizovani sistem koji nadgleda i upravlja svim tehničkim sistemima zgrade, uključujući rasvjetu, grijanje, ventilaciju i klimatizaciju, te energetske sisteme. Integracijom BMS-a sa vještačkom inteligencijom i analitičkim alatima, zgrade mogu postići visoki nivo automatizacije i kontrole. BMS omogućava praćenje i analiziranje podataka u stvarnom vremenu, što omogućava pravovremene odluke o prilagođavanju potrošnje energije na osnovu trenutnih uslova i potreba. Takođe, omogućava usklađivanje različitih sistema u zgradi kako bi se osigurala maksimalna energetska efikasnost i udobnost korisnika (Minoli, Sohraby & Occhiogrosso, 2017; Degha, Laallam & Said, 2019).

Uvođenje ovih strategija i sistema doprinosi stvaranju energetski održivih zgrada, gdje se energija koristi na najefikasniji mogući način, uz minimalne gubitke i negativan uticaj na okolinu.

2.3.3. Uticaj pametnih energetskih sistema na održivost i ekologiju

Jedan od najvažnijih ciljeva pametnih zgrada je smanjenje ekološkog otiska kroz implementaciju pametnih energetskih sistema. Ovi sistemi omogućavaju zgradama da postanu značajno energetski efikasnije, što ima direktan uticaj na smanjenje emisija štetnih gasova i smanjenje potrošnje fosilnih goriva. Korišćenje lokalnih obnovljivih izvora energije, poput solarnih i vjetroturbina, postaje centralni aspekt pametnih zgrada, čime se smanjuje potreba za korišćenjem neobnovljivih izvora i oslanjanjem na centralizovane energetske sisteme (Lund 2014; Kylili & Fokaides, 2015).

Pametni energetski sistemi takođe omogućavaju upravljanje potrošnjom u skladu sa zahtjevima održivosti, uključujući praćenje emisija ugljen-dioksida i drugih resursa koji su važni za očuvanje životne sredine. Uz napredne analitičke alate, ovi sistemi mogu identifikovati oblasti u kojima dolazi do rasipanja energije i predložiti korektivne mjere koje će dodatno poboljšati energetske efikasnosti (Kylili & Fokaides, 2015; Yang, Clements-Croome & Marson, 2017).

Pametne zgrade time postaju ne samo energetski efikasne, već i glavni akteri u borbi protiv klimatskih promjena. Njihova sposobnost da smanje emisije gasova koji dovode do efekta staklene bašte i smanje potrošnju energije doprinosi širem cilju očuvanja prirodnih resursa i zaštite životne sredine, dok istovremeno osiguravaju visok nivo komfora i funkcionalnosti za korisnike (Rocha, Siddiqui & Stadler, 2015). Ovaj pristup uspostavlja balans između tehnološkog napretka, energetske efikasnosti i ekološke održivosti, postavljajući standarde za buduće generacije zgrada.

2.4. Tehnologije ugradnje sistema upravljanja grijanjem, klimatizacijom i ventilacijom

Tehnologije ugradnje HVAC sistema obuhvataju specijalizovane alate, metode i napredne pristupe koji omogućavaju efikasno i precizno postavljanje komponenti za grijanje, ventilaciju i klimatizaciju. Moderni standardi zahtijevaju korišćenje inovativnih tehnoloških

rješenja koja optimizuju proces instalacije, smanjuju troškove rada i osiguravaju dugoročnu pouzdanost sistema. U pametnim zgradama, ovi sistemi moraju biti integrisani sa senzorima i digitalnim platformama za upravljanje, čineći proces instalacije još zahtjevnijim i tehnički naprednijim (McQuiston et al., 2023).

Jedan od ključnih aspekata savremenih tehnologija ugradnje su digitalni alati za projektovanje i simulaciju. Primjena BIM (building information modeling) tehnologije omogućava trodimenzionalno modeliranje HVAC sistema i simulaciju protoka vazduha, gubitaka toplote i distribucije temperature. Paralelno s tim, CAD softveri sa specijalizovanim HVAC modulima omogućavaju precizno dizajniranje ruta za cijevi, ventilacione kanale i opremu, smanjujući rizik od greški tokom instalacije (Wenya, 2020; Zhao et al., 2021; Wang et al., 2022).

Napredne metode postavljanja cijevi i kanala uključuju upotrebu prethodno izrađenih fleksibilnih cijevi koje omogućavaju brzo i jednostavno povezivanje, naročito u teško dostupnim prostorima. Modularni ventilacioni kanali predstavljaju još jedno praktično rješenje, jer dolaze kao fabrički pripremljeni elementi koji se lako montiraju na licu mjesta, čime se ubrzava proces ugradnje i smanjuje potreba za dodatnim prilagođavanjima. Tehnologija push-fit spajanja eliminiše potrebu za zavarivanjem, što dodatno pojednostavljuje proces i smanjuje troškove (McQuiston et al., 2023).

Korišćenje mašina za preciznu obradu tokom instalacije dodatno podiže kvalitet ugradnje. Laserska nivelacija omogućava precizno postavljanje cijevi, kanala i opreme uz minimalna odstupanja. Mašine za savijanje cijevi prilagođavaju materijale specifičnim prostornim zahtjevima, dok automatizovani alati za bušenje i rezanje osiguravaju preciznost prilikom pravljenja otvora u zidovima i podovima (Zhai, 2022; McQuiston et al., 2023).

Savremene tehnologije posebno se fokusiraju na smanjenje vremena instalacije. Prethodno montirane HVAC jedinice, kao što su ventilacioni sistemi sa rekuperacijom, isporučuju se kao gotovi moduli spremni za ugradnju. Pored toga, brzi priključci za električne instalacije i rashladne fluide standardizuju proces i čine ga efikasnijim (Sugarman, 2020; McQuiston et al., 2023).

IoT tehnologije dodatno unapređuju proces ugradnje HVAC sistema u pametnim zgradama. Pametni alati za instalaciju, opremljeni senzorima za mjerenje pritiska, protoka vazduha i temperature, omogućavaju detekciju nepravilnosti u realnom vremenu. Digitalni skeneri prostora mapiraju enterijere i pomažu u određivanju optimalnih pozicija za instalaciju

komponenti, čime se dodatno smanjuju greške i povećava preciznost (Sugarman, 2020; McQuiston et al., 2023).

Ekološke tehnologije sve više postaju standard u procesu ugradnje. Spajanja bez zavarivanja smanjuju upotrebu štetnih materijala, dok se reciklažni materijali za ventilacione kanale koriste za minimiziranje uticaja na životnu sredinu. Ove mjere osiguravaju da instalacija HVAC sistema zadovoljava stroge ekološke norme (Sugarman, 2020; Zhai, 2022; McQuiston et al., 2023).

Prednosti savremenih tehnologija ugradnje uključuju smanjenje vremena potrebnog za instalaciju za 30-50% u poređenju s tradicionalnim metodama, precizniju montažu koja smanjuje potencijalne greške i potrebu za naknadnim intervencijama, kao i mogućnost daljinskog nadzora tokom ugradnje uz pomoć pametnih uređaja (McQuiston et al., 2023).

Tehnologije ugradnje HVAC sistema omogućavaju brži, efikasniji i precizniji proces, uz istovremeno smanjenje troškova i povećanje kvaliteta. Njihova primjena u pametnim zgradama dodatno osigurava dugotrajnost sistema, visoke standarde energetske efikasnosti i održivosti, kao i veću udobnost i sigurnost korisnika.

2.5. Izazovi u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u kompleksnim zgradama

Upravljanje HVAC sistemima u kompleksnim zgradama suočava se s nizom izazova koji mogu značajno uticati na njihovu efikasnost i udobnost. Neki od glavnih izazova su sljedeći (Chenari, Carrilho & da Silva, 2016; Cai et al., 2018; Olama et al., 2018; Wang, Wang & Tang, 2019; Gibbons & Javed, 2023):

- Varijabilni prostorni uslovi – Različite prostorije unutar kompleksnih zgrada imaju specifične namjene, orijentaciju prema suncu i različitu izloženost spoljnim faktorima, što otežava postizanje konzistentne temperature i kvaliteta vazduha u cijeloj zgradi. Promjenjive potrebe korisnika i uticaj spoljašnjih klimatskih uslova dodatno komplikuju održavanje stabilnog ambijenta u zgradama;
- Koordinacija HVAC sistema – U kompleksnim zgradama često postoji više sistema koji moraju funkcionisati u savršenoj sinergiji kako bi se postigla optimalna efikasnost. Nedovoljna integracija i nesklad u radu sistema grijanja, hlađenja i ventilacije može rezultirati nepotrebnim energetske gubicima ili smanjenom udobnošću za korisnike;

- Dinamične promjene opterećenja – Tokom dana opterećenje HVAC sistema može značajno varirati, uslovljeno fluktuacijama u broju korisnika, promjenama spoljnjih temperatura i aktivnostima unutar zgrade. Efikasno upravljanje ovim promjenama zahtijeva brza prilagođavanja sistema kako bi se očuvala optimalna udobnost, uz istovremeno minimiziranje potrošnje energije;
- Održavanje energetske efikasnosti – Osiguranje kontinuirane energetske efikasnosti može biti izazovno u okruženju kompleksnih zgrada. Sistem mora biti precizno podešen prema stvarnim potrebama prostora, dok bilo kakvi propusti u održavanju ili nadzoru mogu rezultirati nepotrebnim energetskim gubicima i smanjenom funkcionalnošću;
- Visoki troškovi implementacije – Uvođenje naprednih tehnologija za upravljanje HVAC sistemima često iziskuje značajna ulaganja u infrastrukturu, kao i obuku osoblja. Ovi inicijalni troškovi mogu predstavljati prepreku za uvođenje najnovijih tehnoloških rješenja koja povećavaju efikasnost i smanjuju dugoročne operativne troškove;
- Usklađenost s regulativama – Kompleksne zgrade moraju poštovati stroge standarde vezane za energetske efikasnost i kvalitet vazduha, što zahtijeva pažljivu implementaciju i kontinuirano praćenje HVAC sistema kako bi se osigurala potpuna usklađenost sa zakonodavstvom.

Efikasno prevazilaženje ovih izazova zahtijeva sveobuhvatan pristup koji uključuje pametne tehnologije, napredne sisteme upravljanja i stručno obučeno osoblje. Samo na taj način moguće je postići održivu, energetski efikasnu i udobnu unutrašnju klimu u kompleksnim zgradama.

2.6. Uloga vještačke inteligencije u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom

Vještačka inteligencija postaje sve značajniji faktor u upravljanju HVAC sistemima u zgradama, zahvaljujući svojoj sposobnosti optimizacije, predviđanja i prilagođavanja promjenljivim zahtjevima. U nastavku su navedeni načini na koje vještačka inteligencija poboljšava upravljanje HVAC sistemima.

Jedan od osnovnih doprinosa vještačke inteligencije leži u analizi podataka. Kroz prikupljanje i obradu velikih količina informacija, poput energetskih potreba, unutrašnjih i spoljnjih uslova zgrade, sistemi vještačke inteligencije mogu prepoznati obrasce i trendove. Ovi

podaci dolaze putem senzora koji prate temperaturu, vlažnost, prisutnost osoba i druge značajne parametre. Na osnovu tih informacija, vještačka inteligencija je u stanju da precizno predvidi potrebe za grijanjem, hlađenjem i ventilacijom. Na primjer, ako primijeti postepeno povećanje temperature tokom ljetnih dana, može prilagoditi hlađenje kako bi se održala optimalna udobnost unutar zgrade, dok u zimskim danima može unaprijed povećati kapacitet grijanja (Sleem & Elhenawy, 2023; Zhuang et al., 2023a). Ova sposobnost omogućava real-time prilagođavanje postavki sistema, čime se postiže visoka efikasnost i smanjenje energetske potrošnje.

Vještačka inteligencija takođe značajno doprinosi dinamičkoj optimizaciji rada HVAC sistema. Ovi sistemi mogu automatski prilagođavati rad prema trenutnim potrebama, uzimajući u obzir brojne faktore, uključujući broj prisutnih osoba, spoljnu temperaturu i vlažnost. Tako, primjer, tokom vrućih ljetnih dana, vještačka inteligencija može povećati kapacitet hlađenja i prilagoditi protok vazduha kako bi osigurala ugodnu temperaturu u prostorijama. Tokom zime, vještačka inteligencija može na sličan način regulisati grijanje, pružajući optimalne uslove uz minimalnu potrošnju energije (Homod et al., 2023; Erişen, 2023). Ovaj pristup rezultira povećanjem energetske efikasnosti, smanjenjem troškova i poboljšanjem kvaliteta unutrašnjeg okruženja.

Prediktivno održavanje predstavlja jednu od važnih primjena vještačke inteligencije u HVAC sistemima. Zahvaljujući naprednim algoritmima i analizi podataka prikupljenih putem senzora, vještačka inteligencija ima sposobnost prepoznavanja mogućih kvarova ili slabosti u radu sistema prije nego što se oni pojave. Ovaj pristup omogućuje identifikovanje anomalija i neobičnih obrazaca koji mogu nagovještavati potencijalne probleme (Hosamo et al., 2023). Na osnovu ovakvih podataka, sistemi vještačke inteligencije su u mogućnosti da proaktivno predlože intervencije, generišući upozorenja i preporuke za preventivno održavanje. Na primjer, u slučaju detektovanja neočekivanog rasta temperature u određenom dijelu HVAC sistema, vještačka inteligencija može automatski poslati obavještenje o potrebi provjere i intervencije na tom segmentu (Zhuang et al., 2023a). Prednost ovog pristupa leži u smanjenju neplaniranih zastoja, ali i značajnom sniženju troškova povezanih s popravkama. Umjesto reaktivnog pristupa, gdje se na kvarove reaguje nakon što se dogode, prediktivno održavanje omogućuje pravovremene preventivne akcije, čime se produžava vijek trajanja opreme i osigurava neprekidno i pouzdano funkcionisanje HVAC sistema (Chen et al., 2023).

Personalizacija je još jedna značajna funkcija vještačke inteligencije. Na osnovu preferencija korisnika, sistemi vještačke inteligencije mogu prilagoditi postavke HVAC sistema kako bi osigurali optimalne uslove za svakog pojedinca. Na primjer, vještačka inteligencija može prilagoditi temperaturu u prostorijama prema željama korisnika, dok istovremeno uzima u obzir spoljne faktore, poput temperature i sunčevog zračenja, kako bi pružila maksimalnu udobnost i energetske efikasno upravljanje (Du et al., 2023; Li & Du, 2023). Na ovaj način, vještačka inteligencija pruža personalizirano iskustvo uz optimizovanu potrošnju resursa (Aldakheel, Bahrar & El Mankibi, 2023; Zhou et al., 2023).

Kontinuirano učenje omogućava sistemima vještačke inteligencije da s vremenom postanu sve sofisticiraniji. Kroz prikupljanje novih podataka i povratnih informacija, ovi sistemi se neprestano prilagođavaju kako bi poboljšali svoje performanse. Ova sposobnost im omogućava da optimalno reaguju na promjene u uslovima okoline, poput promjena u temperaturi ili vlažnosti, čime se osigurava stalna energetska efikasnost (Jang, Kim & Catalão, 2021). Takođe, putem povratnih informacija korisnika, vještačka inteligencija može precizno prilagođavati svoje operacije kako bi kontinuirano poboljšavala korisničko iskustvo (Afram et al., 2017).

Sveukupno, vještačka inteligencija igra važnu ulogu u modernizaciji upravljanja HVAC sistemima u zgradama. Njena sposobnost prilagođavanja, optimizacije i prediktivnog održavanja čini je značajnim alatom za povećanje energetske efikasnosti, smanjenje operativnih troškova i poboljšanje udobnosti korisnika u pametnim zgradama.

3. TRADICIONALNE I NAPREDNE STRATEGIJE KONTROLE UPRAVLJANJA GRIJANJEM, VENTILACIJOM I KLIMATIZACIJOM

3.1. Strategije tvrdog računarstva

Strategije tvrdog računarstva u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u zgradama koriste fiksne algoritme i pravila kako bi kontrolisale rad sistema. Ovi sistemi obično imaju unaprijed definisane postavke i parametre koji se ne mijenjaju dinamično u zavisnosti od stvarnih uslova ili potreba korisnika (Gholamzadehmir et al., 2020).

Jedna od tradicionalnih strategija tvrdog računarstva je upravljanje prema vremenskom rasporedu. U ovom pristupu, rad HVAC sistema je unaprijed programiran prema vremenskim intervalima ili rasporedu aktivnosti u zgradi. Na primjer, sistem grijanja ili hlađenja može biti programiran da se aktivira u određeno vrijeme ujutro prije dolaska korisnika ili da se automatski isključi noću kada nema aktivnosti (Haniff et al., 2013).

Druga strategija tvrdog računarstva uključuje korišćenje pravila i pragova za kontrolu sistema. Na primjer, sistem može imati unaprijed definisane pragove temperature, gdje se grijanje ili hlađenje automatski aktiviraju ako temperatura pređe određenu granicu. Ovi sistemi obično ne uzimaju u obzir dinamične promjene u uslovima unutar zgrade ili preferencije korisnika, već se oslanjaju na fiksne postavke (Chen et al., 2022).

Iako strategije tvrdog računarstva mogu biti jednostavne za implementaciju i održavanje, one često nisu tako efikasne kao strategije mekog računarstva jer nedostaje prilagodljivost i preciznost. Nedostatak dinamičnog prilagođavanja može rezultirati neefikasnim korišćenjem energije i nedovoljnom udobnošću korisnika, posebno u slučajevima kada se uslovi unutar zgrade mijenjaju nepredvidljivo.

Sumiranjem navedenog, strategije tvrdog računarstva u upravljanju sistemima upravljanja grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom koriste fiksne algoritme i pravila i oslanjaju se na unaprijed definisane postavke, što može rezultirati nedostatkom prilagodljivosti i preciznosti u odnosu na naprednije strategije mekog računarstva.

3.2. Strategije mekog računarstva

Strategije mekog računarstva predstavljaju jedan od pristupa upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom koji se koristi kako bi se postigla optimalna udobnost korisnika uz minimalnu potrošnju energije. Ovaj pristup se zasniva na primjeni algoritama i metoda koji uzimaju u obzir različite parametre i uslove unutar zgrade kako bi se donijele odluke o radu sistema upravljanja grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom (Gholamzadehmir et al., 2020).

Jedna od tradicionalnih strategija mekog računarstva je upravljanje zasnovano na termostatu. U ovom pristupu, termostati se koriste za mjerenje temperature unutar prostorija i za regulaciju grijanja ili hlađenja prema postavljenim parametrima. Međutim, ovi tradicionalni termostati imaju ograničenja u smislu preciznosti i prilagodljivosti, jer se oslanjaju samo na mjerenje temperature, a ne uzimaju u obzir druge faktore poput prisutnosti ljudi ili spoljnih uslova (Yu et al., 2018).

Napredne strategije mekog računarstva uključuju primjenu sofisticiranijih algoritama i tehnika za dinamično upravljanje HVAC sistemima. To može uključivati korišćenje senzora za praćenje prisutnosti ljudi, mjerenje nivoa osvjjetljenja, detekciju kvaliteta vazduha i druge relevantne parametre. Na osnovu ovih podataka, napredni algoritmi mogu donositi dinamične odluke o prilagođavanju rada HVAC sistema prema stvarnim potrebama korisnika i uslovima u prostoriji (Bashir & Alotaibi, 2020).

Primjeri naprednih strategija mekog računarstva uključuju adaptivno upravljanje temperature, gdje se temperatura automatski prilagođava zavisno od prisutnosti ljudi i spoljnih uslova, kao i upravljanje prema rasporedu aktivnosti, gdje se grijanje ili hlađenje prilagođavaju prema rasporedu korišćenja prostorija unutar zgrade (Naidu & Rieger, 2011).

Ove napredne strategije mekog računarstva omogućuju preciznije i prilagodljivije upravljanje HVAC sistemima, što rezultira većom udobnošću korisnika i većom energetsom efikasnošću. Integracija naprednih senzora, algoritama i tehnika mekog računarstva omogućuje stvaranje inteligentnih HVAC sistema koji se prilagođavaju promjenjivim potrebama unutar zgrade, omogućujući dinamično reagovanje na različite zahtjeve.

3.3. Hibridne strategije

Hibridne strategije u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u zgradama kombinuju elemente kako bi iskoristile prednosti kako tradicionalnih, tako i naprednih pristupa. Ovaj pristup omogućuje fleksibilnost i prilagodljivost sistema, omogućujući istovremeno stabilnost i efikasnost (Peng et al., 2022).

Jedan primjer hibridne strategije je kombinacija tradicionalnog vremenskog rasporeda s naprednim algoritmima prilagođavanja. To znači da se osnovni raspored aktivira u određeno vrijeme, ali se sistem prilagođava prema stvarnim uslovima u zgradi korišćenjem senzora i analize podataka. Na primjer, unaprijed definisani raspored grijanja ili hlađenja može se prilagoditi prema spoljnim temperaturama ili prisutnosti ljudi u prostorijama (Peng et al., 2022).

Drugi primjer hibridne strategije može uključivati kombinaciju tvrdih pravila s mogućnošću ručnog upravljanja. Sistem može imati unaprijed definisane pragove ili postavke koje se primjenjuju automatski, ali korisnicima se takođe može omogućiti ručno upravljanje određenim postavkama prema njihovim preferencijama (Gomis, Fiorentini & Daly, 2021).

Hibridne strategije takođe mogu uključivati elemente prilagodljivih algoritama koji uče iz istorijskih podataka i prilagođavaju svoje postavke kako bi optimizovali rad sistema s vremenom. Ovo kombinovanje različitih pristupa omogućuje sistemu da pruži optimalno rješenje za različite uslove i potrebe (Peng et al., 2022).

Prednost hibridnih strategija je u tome što mogu iskoristiti prednosti različitih pristupa dok minimiziraju njihove nedostatke. Ovi sistemi mogu biti fleksibilni i prilagodljivi, omogućujući stabilnost i energetske efikasnosti u različitim scenarijima. Hibridne strategije često predstavljaju kompromis između složenosti i efikasnosti, pružajući optimalno rješenje za mnoge aplikacije u upravljanju HVAC sistemima u zgradama (Hamdy & Mauro, 2019).

3.4. Prilagodljive-prediktivne strategije kontrole

Prilagodljive-prediktivne strategije kontrole u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom koriste napredne algoritme koji uzimaju u obzir dinamične promjene u uslovima unutar zgrade kako bi predvidjeli buduće potrebe i optimizovali rad sistema. Ovi

sistemi kombinuju elemente prilagodljivosti i prediktivne analize kako bi osigurali optimalnu udobnost korisnika uz minimalnu potrošnju energije (Gholamzadehmir et al., 2020).

Osnovna ideja prilagodljivih-prediktivnih strategija je kontinuirano praćenje uslova unutar zgrade, kao što su temperatura, vlažnost vazduha, prisutnost ljudi i spoljni uslovi, i korišćenje ovih podataka za predviđanje budućih potreba HVAC sistema. Na osnovu ovih predikcija, sistem može dinamično prilagoditi rad HVAC sistema kako bi se osigurala udobnost korisnika uz minimalnu potrošnju energije (Schmelas et al., 2016).

Ove strategije obično koriste napredne matematičke modele i algoritme za predviđanje budućih potreba sistema. Na primjer, algoritmi mašinskog učenja mogu analizirati istorijske podatke o potrošnji energije, spoljnim uslovima i aktivnostima korisnika kako bi identifikovali uzorke i trendove, i predvidjeli buduće potrebe sistema (Gholamzadehmir et al., 2020).

Jedna od osnovnih prednosti prilagodljivih-prediktivnih strategija je njihova sposobnost optimizacije rada HVAC sistema na osnovu stvarnih potreba i uslova u zgradi. Ovi sistemi mogu dinamično reagovati na promjene u uslovima unutar zgrade i automatski prilagoditi rad sistema kako bi se osigurala udobnost korisnika uz minimalnu potrošnju energije (Schmelas, Feldmann & Bollin, 2017).

Međutim, implementacija ovih strategija može zahtijevati složene sisteme senzora i napredne algoritme, što može rezultirati većom složenošću i troškovima. Takođe, pouzdanost ovih sistema može zavisiti od pouzdanosti prediktivnih modela i kvaliteta podataka koji se koriste za analizu (Hassan & Abdelaziz, 2021).

U cjelini, prilagodljive-prediktivne strategije kontrole predstavljaju napredan pristup upravljanju HVAC sistemima koji kombinuje prilagodljivost i prediktivnu analizu kako bi osigurao optimalnu udobnost korisnika uz minimalnu potrošnju energije. Ovi sistemi imaju potencijal za značajne energetske uštede i poboljšanje efikasnosti sistema u zgradama.

4. IZAZOVI I ASPEKTI PRIMJENE VJEŠTAČKE INTELIGENCIJE U UPRAVLJANJU GRIJANJEM, VENTILACIJOM I KLIMATIZACIJOM U PAMETNIM ZGRADAMA

4.1. Prihvatanje od strane korisnika kao preduslov uspješne integracije vještačke inteligencije u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u pametnim zgradama

Korisnici pametnih zgrada očekuju visok nivo kontrole nad svojim okruženjem i udobnošću. Prihvatanje od strane korisnika je važno za širu primjenu HVAC sistema, jer korisnici moraju biti zadovoljni performansama sistema i interfejsom za upravljanje. Ako korisnici doživljavaju frustracije ili nezadovoljstvo sa HVAC sistemom, to može uticati na njihovo opšte mišljenje o pametnoj zgradi i njenu efikasnost. Prihvatanje primjene vještačke inteligencije u HVAC sistemima pametnih zgrada od strane korisnika može biti izazovno iz nekoliko razloga (Wang & Srinivasan, 2017; Serale et al., 2018; Jia et al., 2019; Satrio et al., 2019; Zhao et al., 2019; Hong et al., 2020; Mirnaghi & Haghighat, 2020; Zhuang et al., 2023):

- Nedostatak razumijevanja – Mnogi korisnici možda nemaju potpuno razumijevanje vještačke inteligencije i kako se koristi u HVAC sistemima. Nedostatak transparentnosti i edukacije može dovesti do nepovjerenja i otpora prema novim tehnologijama;
- Strah od gubitka kontrole – Korisnici mogu biti zabrinuti zbog gubitka kontrole nad svojim okruženjem, posebno ako se odluke donose automatski od strane algoritama vještačke inteligencije. Strah od nedostatka mogućnosti prilagođavanja postavki ili intervenisanja u slučaju problema može biti prepreka prihvatanju;
- Sigurnosne brige – Povećana upotreba vještačke inteligencije u kontroli HVAC sistema može izazvati zabrinutost korisnika u vezi sa sigurnošću podataka. Ovo uključuje brigu o privatnosti podataka o korisničkim navikama, kao i zabrinutost zbog mogućnosti hakovanja sistema ili zloupotrebe podataka;
- Nedostatak povjerenja u performanse – Korisnici mogu imati sumnje u performanse vještačke inteligencije u donošenju odluka u realnom vremenu, kao i u sposobnost sistema da adekvatno reaguje na promjenljive uslove okoline. Loše iskustvo korisnika

ili neefikasnost sistema mogu dodatno smanjiti povjerenje u primjenu vještačke inteligencije;

- Kulturni i organizacioni faktori – U nekim slučajevima, otpor prema novim tehnologijama može biti posledica kulturnih ili organizacionih faktora. To može uključivati tradicionalne pristupe upravljanju ili otpor prema promjenama u načinu rada.

Prevazilaženje ovih izazova zahtijeva angažovanje korisnika putem edukacije i komunikacije, kao i obezbjeđivanje transparentnosti u vezi sa primjenom vještačke inteligencije u sistemima grijanja, ventilacije i klimatizacije. Takođe je važno da se uključe korisnici u proces donošenja odluka i da im se omogući prilika za davanje povratnih informacija kako bi se osiguralo da njihove potrebe i zabrinutosti budu adekvatno adresirane.

4.2. Tehnički izazovi primjene vještačke inteligencije u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u pametnim zgradama

Primjena vještačke inteligencije u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u pametnim zgradama nosi sa sobom niz tehničkih izazova. U nastavku je prikazano nekoliko glavnih tehničkih izazova (Afram et al., 2017; Afroz et al., 2018; Tushar et al., 2018; Zhao et al., 2019; Ghahramani et al., 2020; Ngarambe, Yun & Santamouris, 2020; Aguilar et al., 2021a; Bécue, Praça & Gama, 2021; Selvam et al., 2021; Yao, & Shekhar, 2021; Himuer et al., 2023; Franki, Majnarić & Višković, 2023;

- Senzorska tehnologija – Efikasna primjena vještačke inteligencije u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom zahtijeva precizne i pouzdane senzore koji mogu kontinuirano mjeriti parametre kao što su temperatura, vlažnost, kvalitet vazduha i prisutnost ljudi. Tehnički izazov leži u razvoju senzora koji su dovoljno precizni, ekonomični i otporni na spoljne uticaje, omogućujući sistemima da pruže optimalnu udobnost i energetske efikasnost;
- Povezanost i interoperabilnost – Integracija različitih HVAC sistema, kao i njihova interoperabilnost s drugim sistemima u zgradi (npr. osvetljenje, sigurnost), može biti složen tehnički izazov. Potrebno je osigurati da različiti sistemi mogu komunicirati međusobno i dijeliti podatke kako bi se omogućila efikasna primjena vještačke inteligencije;

- Algoritmi i modeli učenja – Razvoj preciznih i robusnih algoritama dubokog učenja i drugih tehnika mašinskog učenja koji mogu analizirati velike količine podataka i donositi složene odluke u stvarnom vremenu predstavlja tehnički izazov. Potrebno je istražiti različite modele učenja i prilagoditi ih specifičnim potrebama HVAC sistema u pametnim zgradama;
- Optimizacija energetske efikasnosti – Jedan od osnovnih ciljeva primjene vještačke inteligencije u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom je optimizacija energetske efikasnosti. Tehnički izazov leži u razvoju algoritama i sistema koji mogu dinamično prilagođavati operacije sistema kako bi minimizirali potrošnju energije, uz istovremeno osiguranje udobnosti korisnika;
- Skalabilnost i prilagodljivost – Pametne zgrade mogu imati različite potrebe i zahtjeve u pogledu HVAC sistema, zavisno od veličine, namjene i geografskog položaja zgrade. Tehnički izazov leži u razvoju sistema koji su skalabilni i prilagodljivi kako bi zadovoljili različite scenarije primjene, bez obzira na veličinu ili kompleksnost zgrade;
- Sigurnost podataka i privatnost – Kako vještačka inteligencija uključuje prikupljanje i analizu podataka o aktivnostima i preferencijama korisnika, tehnički izazov leži u osiguravanju visokih standarda sigurnosti podataka i zaštite privatnosti korisnika;
- Robusnost u stvarnom vremenu – Sistemi vještačke inteligencije moraju biti sposobni brzo reagovati na promjene u okolini i dinamično prilagođavati operacije sistema. Izazov leži u razvoju algoritama koji su dovoljno brzi i robusni kako bi funkcionisali u stvarnom vremenu, uz minimalno kašnjenje i greške;
- Otpornost na smetnje – Sistemi vještačke inteligencije u pametnim zgradama mogu biti izloženi različitim smetnjama i ometanjima, poput nestanka električne energije, kvarova na senzorima ili komunikacijskih problema. Tehnički izazov leži u osiguranju otpornosti sistema na takve smetnje kako bi se osigurao kontinuiran rad;
- Optimizacija resursa – Upravljanje resursima poput energije, vode i materijala igra važnu ulogu u održivosti pametnih zgrada. Tehnički izazov leži u razvoju algoritama i sistema koji mogu optimizovati korišćenje tih resursa uz minimalni uticaj na životnu sredinu;
- Interpretacija nepotpunih ili nejasnih podataka – Senzori mogu pružiti nepotpune ili nejasne podatke, što može otežati donošenje preciznih odluka. Tehnički izazov leži u razvoju tehnika obrade podataka koje su sposobne interpretirati takve podatke i donijeti informisane odluke;

- Kompatibilnost s postojećim infrastrukturnim sistemima – U mnogim slučajevima, pametne zgrade već imaju postojeće infrastrukturne sisteme za upravljanje grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom. Tehnički izazov je osigurati da nova rješenja vještačke inteligencije budu kompatibilna s tim postojećim sistemima i da ih je moguće integrisati bez većih prepreka.

Suočavanje s nizom tehničkih izazova zahtijeva holistički pristup koji uključuje saradnju stručnjaka iz različitih disciplina. Ovo uključuje eksperte iz područja računarstva, elektrotehnike, mašinstva, tehnologije senzora, sigurnosti podataka i drugih relevantnih područja. Međutim, značajno je naglasiti da rješavanje ovih izazova ne može biti jednokratni napor. Naprotiv, zahtijeva kontinuiranu saradnju među stručnjacima različitih područja kako bi se osiguralo da se tehnologija i prakse stalno poboljšavaju. Uz to, neophodna je stalna inovacija i istraživanje, posebno u primjeni vještačke inteligencije u pametnim zgradama, kako bi se osiguralo da su rješenja u skladu s najnovijim tehničkim i sigurnosnim standardima. Ovaj dinamični pristup ključan je za stvaranje održivih i efikasnih tehnoloških rješenja koja će odgovoriti na sve složenije zahtjeve modernog društva.

4.3. Društveni i etički aspekti primjene vještačke inteligencije u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u pametnim zgradama

U ovom dijelu rada razmotreni su društveni i etički aspekti primjene vještačke inteligencije u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u pametnim zgradama. Kako bi primjena vještačke inteligencije u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u pametnim zgradama bila etički i društveno odgovorna, važno je uzeti u obzir ove aspekte i aktivno raditi na minimiziranju negativnih uticaja dok se istovremeno maksimizira korist za društvo.

4.3.1. Društveni aspekti

Primjena pametnih HVAC sistema u zgradama nosi značajne društvene i ekonomske aspekte, uključujući pravednost i dostupnost, ekonomski uticaj te zapošljavanje i tržište rada. Ove dimenzije su ključne za osiguravanje inkluzivnog i održivog razvoja.

Pametni HVAC sistemi trebaju biti dizajnirani tako da omogućavaju svim korisnicima jednak pristup udobnosti i energetske efikasnosti, uključujući različite socioekonomske grupe,

osobe s invaliditetom, i druge marginalizovane zajednice (Uddin, Lee & 2023). To zahtijeva inkluzivne pristupe u dizajnu, kao što su interfejsi prilagođeni korisnicima sa specifičnim potrebama, kao i mogućnosti personalizacije podešavanja temperature i ostalih parametara (Taheri Hosseini & Razban, 2022).

Integracija vještačke inteligencije u pametne HVAC sisteme može značajno smanjiti troškove energije i održavanja, doprinoseći dugoročnim uštedama. Ipak, neophodno je obratiti pažnju na potencijalne finansijske izazove za korisnike s nižim prihodima, kako bi se izbjeglo povećanje ekonomskih opterećenja (Farzaneh et al., 2021; Abdel-Jaber & Dirks, 2024). Integracija vještačke inteligencije u pametne HVAC sisteme značajno doprinosi smanjenju operativnih troškova, uključujući račune za energiju i održavanje. Ovo je posebno značajno za domaćinstva s nižim prihodima, koja su osjetljivija na promjene cijena energije (Vattano, 2014; Cauchi et al., 2018). Iako ovi sistemi nude značajne dugoročne uštede, početni troškovi mogu predstavljati prepreku. Subvencionisanje nabavke i instalacije, kao i dostupnost povoljnih kreditnih linija, ključni su za ublažavanje ovog problema (Farzaneh et al., 2021; Abdel-Jaber & Dirks, 2024). Pored toga, potrebno je osigurati ravnomjernu dostupnost tehnologije kako bi se izbjegle ekonomske i socijalne nejednakosti (Ghofrani, Nazemi & Jafari, 2019).

Automatizacija povezana s primjenom vještačke inteligencije u HVAC sistemima može smanjiti potrebu za manuelnim radom, ali istovremeno otvara prilike za nova radna mjesta u oblastima razvoja, instalacije i održavanja pametnih sistema (Liu & Jiang, 2021; Xie, Ramakrishna & Manganelli, 2022). Drugim riječima, važno je razmotriti potencijalne promjene u potrebama za radnom snagom koje bi mogle proizaći iz uvođenja vještačke inteligencije (Minoli, Sohraby & Occhiogrosso, 2017). Kako bi se radnici prilagodili novim zahtjevima, potrebno je ulagati u programe prekvalifikacije i obuke za tehnološke vještine. Ove mjere osiguravaju balans između tehnološkog napretka i socijalne pravednosti (Lee & Chen, 2022).

Implementacijom ovih mjera može se postići ravnoteža između ekonomskih i društvenih koristi, uz minimiziranje potencijalnih negativnih efekata na osjetljive kategorije korisnika i radne snage. Ovo doprinosi ciljevima održivog razvoja i socijalne inkluzije.

4.3.2. Etički aspekti

Primjena vještačke inteligencije u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom donosi niz etičkih izazova, posebno u vezi sa zaštitom podataka korisnika i odgovornošću sistema za predikciju i donošenje odluka.

Sistemi zasnovani na AI analiziraju podatke o navikama korisnika kako bi optimizovali rad HVAC uređaja. Ovo prikupljanje i obrada informacija otvaraju pitanje očuvanja privatnosti korisnika. Važno je uspostaviti jasne smjernice koje definišu procese prikupljanja, skladištenja i korišćenja ovih podataka, čime bi se spriječile zloupotrebe i obezbijedila sigurnost podataka (Nguyen & Aiello, 2013). Transparentnost u radu ovih sistema igra značajnu ulogu. Korisnicima treba omogućiti jasan uvid u to koje informacije sistem prikuplja, zašto ih koristi i na koji način doprinosi radu HVAC uređaja. Uspostavljanje politika privatnosti koje su lako razumljive i dostupne korisnicima doprinosi njihovom povjerenju u tehnologiju (Farzaneh et al., 2021). Uz to, bezbjednost podataka mora biti prioritet. To podrazumijeva korišćenje tehnika kao što su enkripcija i zaštita od neovlašćenog pristupa, kao i redovno ažuriranje sigurnosnih protokola kako bi se minimalizovali rizici od sajber prijetnji. Osim zaštite podataka, od velikog značaja je i svrha za koju se prikupljene informacije koriste. Podaci korisnika trebaju služiti isključivo za optimizaciju funkcija sistema, bez ikakvih sekundarnih namjena poput komercijalne eksploatacije ili pravljenja korisničkih profila, čime bi se kršila njihova prava (Mylrea & Gourisetti, 2017).

Odgovornost inteligentnih sistema predikcije i odlučivanja ključan je aspekt u primjeni sistema vještačke inteligencije u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u pametnim zgradama. Algoritmi koji stoje iza ovih sistema moraju biti transparentni i odgovorni, s ciljem osiguranja da ne rezultiraju nepravednim ili diskriminatornim postupcima i da korisnici imaju mogućnost razumijevanja i prilagođavanja načina na koji se njihovi podaci koriste (Azuatalam et al., 2020). Transparentnost u radu algoritama omogućava korisnicima bolji uvid u način funkcionisanja sistema, uključujući podatke koji se obrađuju i odluke koje se donose. Informisanje korisnika o načinu na koji algoritmi analiziraju podatke i dolaze do zaključaka doprinosi razumijevanju i povjerenju u ovakve tehnologije (Ngarambe, Yun & Santamouris, 2020). Takođe, odgovornost i nepristrasnost algoritama od suštinskog su značaja. Izbjegavanje bilo kakvih pristranosti koje mogu dovesti do diskriminatornih odluka važno je za očuvanje integriteta sistema. Testiranje i evaluacija algoritama u fazi razvoja omogućavaju otkrivanje i uklanjanje potencijalnih nepravilnosti, čime se obezbjeđuje pravedan tretman svih

korisnika (Szilagyi & Wira, 2018). Ove mjere omogućavaju da sistemi vještačke inteligencije, ugrađeni u HVAC uređaje, funkcionišu na način koji je u skladu s visokim etičkim standardima. Transparentni i odgovorni algoritmi ne samo da unapređuju iskustvo korisnika već i povećavaju njihovu spremnost da prihvate i koriste ovakve inovacije u pametnim zgradama.

Implementacijom navedenih mjera osigurava se ne samo zaštita korisnika, već i šira društvena prihvaćenost ovih tehnologija. Transparentni, odgovorni i etički razvijeni HVAC sistemi zasnovani na vještačkoj inteligenciji mogu postati ključni za unapređenje kvaliteta života u pametnim zgradama i ostvarenje njihovog punog potencijala na tržištu.

5. SISTEM UPRAVLJANJA GRIJANJEM, VENTILACIJOM I KLIMATIZACIJOM ZASNOVAN NA VJEŠTAČKOJ INTELIGENCIJI ZA KOMERCIJALNE ZGRADE SA VIŠE ZONA

Energetska efikasnost i udobnost u višezonskim komercijalnim zgradama danas predstavljaju značajne izazove, posebno u kontekstu upravljanja HVAC sistemima. Zbog kompleksnosti ovih sistema, korišćenje naprednih tehnologija postaje neophodno za postizanje optimalne učinkovitosti. Upravo iz tog razloga, razvijeni su HVAC sistemi zasnovani na vještačkoj inteligenciji, koji nude inovativna rješenja za smanjenje energetske potrošnje i poboljšanje udobnosti u takvim zgradama.

Integracija vještačke inteligencije u HVAC sisteme, bez obzira na namjenu zgrada – bilo da su stambene ili komercijalne – ima slične ciljeve, ali postoje značajne razlike u pristupu i implementaciji, uslovljene različitim potrebama i karakteristikama tih objekata (King & Perry, 2017; Lee & Lee, 2023; Yussuf & Asfour, 2024):

- Skala i složenost sistema – Komercijalne zgrade, u poređenju sa stambenim, obično posjeduju veće i kompleksnije HVAC sisteme, koji moraju efikasno opsluživati veći broj korisnika, prostorije različitih veličina i specifične klimatske zahtjeve. Za komercijalne objekte potrebni su fleksibilniji i skalabilniji sistemi vještačke inteligencije kako bi se obuhvatili složeniji scenariji;
- Fleksibilnost i prilagodljivost – U komercijalnim zgradama susreće se širok spektar aktivnosti i korisnika, što zahtijeva veću fleksibilnost u upravljanju klimatskim uslovima. Vještačka inteligencija u tim zgradama mora biti sposobna da odgovori na različite zahtjeve korisnika i varijabilne uslove u različitim zonama objekta;
- Energetska efikasnost i troškovi – Optimizacija potrošnje energije i smanjenje troškova glavni su prioriteti u komercijalnim zgradama. Vještačka inteligencija može analizirati faktore poput rasporeda korisnika, korišćenja prostora i vremenskih uslova kako bi optimizovala rad HVAC sistema, čime se smanjuju operativni troškovi i povećava energetska efikasnost;
- Sigurnost i bezbjednost – Dodatni zahtjevi u pogledu sigurnosti, poput zaštite od požara, kontrolisanog pristupa i nadzora sistema, često su prisutni u komercijalnim zgradama. Vještačka inteligencija može integrisati napredne sigurnosne mehanizme

koji omogućavaju nadzor nad radom HVAC sistema, te osiguravaju bezbjednost korisnika i imovine;

- Administrativne potrebe – Upravljanje i održavanje HVAC sistema u komercijalnim zgradama često zahtijeva naprednu administraciju. Vještačka inteligencija može automatizovati administrativne procese, omogućiti praćenje performansi i generisanje izvještaja o potrošnji energije, čime se olakšava upravljanje resursima.

Za razliku od toga, u stambenim zgradama, primjena vještačke inteligencije u HVAC sistemima primarno se fokusira na poboljšanje udobnosti korisnika prostora, povećanje energetske efikasnosti i automatizaciju svakodnevnih aktivnosti. S druge strane, u komercijalnim zgradama akcenat je stavljen na efikasno upravljanje resursima, prilagodljivost poslovnim potrebama i sigurnost (King & Perry, 2017).

5.1. Dizajn i razvoj sistema za kontrolu grijanja, ventilacije i klimatizacije zasnovanog na vještačkoj inteligenciji

Jala i saradnici (Yayla et al., 2022) su razvili napredan sistem za HVAC kontrolu zasnovan na vještačkoj inteligenciji, sa ciljem optimizacije energetske efikasnosti u komercijalnim zgradama sa više zona. Ovaj sistem koristi vještačke neuronske mreže (Artificial Neural Network – ANN) za predikciju broja korisnika u različitim zonama objekta, čime se omogućava adaptacija HVAC sistema u realnom vremenu bez potrebe za senzorima koji tradicionalno prate temperaturu i prisustvo korisnika. Glavna inovacija ovog dizajna je primjena algoritama za predikciju okupacije koji, uz pomoć istorijskih podataka o ponašanju korisnika i vremenskim uslovima, omogućavaju sistemu da unaprijed prilagodi rad ventilacije, grijanja i hlađenja, smanjujući time potrošnju energije. Poseban doprinos ovog sistema ogleda se u njegovoj sposobnosti da odgovori na promjene u realnim uslovima, poput naglih skokova u broju korisnika ili promjena spoljašnjih klimatskih uslova. Ovakav model smanjuje potrebu za trenutnim odgovorom sistema na promjene, čime se izbjegava prekomjerna potrošnja energije koja je česta kod tradicionalnih HVAC sistema. Iako je sistem dizajniran da funkcioniše bez upotrebe senzora za okupaciju, autori su omogućili upotrebu dodatnih senzora za nadgledanje unutrašnjih uslova (npr. CO₂, vlažnost), kako bi se osigurala dodatna kontrola u slučajevima gdje se predikcije ne poklapaju sa stvarnim uslovima (Yayla et al., 2022).

Džoi i saradnici (Joe et al., 2023) su razvili napredan model zasnovan na prediktivnoj kontroli (Model predictive control – MPC) za optimizaciju rada HVAC sistema u

komercijalnim zgradama sa više zona, koristeći inovativan pristup koji kombinuje decentralizovane i centralizovane modele. Glavni cilj ovog dizajna je bio pojednostavljivanje kompleksnog procesa modeliranja višezonskih sistema, a istovremeno zadržavanje visoke preciznosti u predviđanju termalnih performansi zgrade. Dizajn se oslanja na dva glavna modela: detaljni model zgrade, koji koristi decentralizovani pristup za razdvajanje zona i omogućava preciznu kontrolu termalnih uslova u svakoj zoni, i lumped model, koji pojednostavljuje proces modeliranja tretirajući zgradu kao jednu termalnu masu. Ovaj lumped model značajno smanjuje inženjerske troškove, što je važno kod primjene MPC-a na velike zgrade ili u slučajevima kada je potrebna brza implementacija sistema. Glavna inovacija ovog pristupa je sposobnost integrisanja globalne tačke podešavanja za više zona, što omogućava optimizovano upravljanje cijelom zgradom bez potrebe za detaljnim modeliranjem svake pojedinačne zone. Autori su koristili tzv. grey-box modeliranje, koje kombinuje fizičke karakteristike zgrade sa podacima dobijenim iz eksperimentalnih mjerenja. Ovaj pristup omogućava visok nivo preciznosti predikcije termalnih uslova u zgradi, dok istovremeno zadržava relativno nisku računarsku složenost. Osnovna prednost ovog modela je to što omogućava predviđanje unutrašnje temperature i energetske potrebe zgrade, uzimajući u obzir vremenske uslove i unutrašnje faktore, poput broja korisnika i unutrašnjih izvora toplote (poput opreme i rasvjete). Osim toga, autori su istakli važnost korišćenja fleksibilnosti u radu HVAC sistema, posebno kada su u pitanju varijacije u cijeni električne energije (npr. uvođenje perioda sa visokim i niskim tarifama), što omogućava dodatne uštede. U dizajnu je ugrađen algoritam koji omogućava korišćenje prije-hlađenja, tj. strategije unaprijednog hlađenja zgrade tokom jeftinijih perioda, što smanjuje potrebu za hlađenjem u periodima visoke potrošnje i viših cijena struje (Joe et al., 2023).

Salim i saradnici (Saleem et al. 2024) su se bavili razvojem naprednog sistema za upravljanje energijom u zgradama (BEMS) koji koristi vještačku inteligenciju za optimizaciju rada HVAC sistema. Fokus je na povećanju energetske efikasnosti i poboljšanju unutrašnjeg komfora putem automatizovanih kontrolnih algoritama koji prilagođavaju rad HVAC komponenti u realnom vremenu na osnovu podataka iz okruženja. Sistem koristi široku mrežu senzora raspoređenih po zgradi za prikupljanje informacija o glavnim parametrima, kao što su temperatura, relativna vlažnost, prisutnost korisnika, protok vazduha i nivo kvaliteta unutrašnjeg vazduha. Jedan od najvažnijih tehničkih aspekata sistema je njegova sposobnost adaptivnog upravljanja zgradom pomoću modela zasnovanih na učenju. Ovi modeli uče obrasce potrošnje energije i ponašanje korisnika zgrade, omogućavajući sistemu da automatski

donosi odluke o optimalnom vremenu za pokretanje, pauziranje ili podešavanje HVAC sistema, bez potrebe za ljudskom intervencijom. Na primjer, korišćenjem istorijskih podataka o temperaturi i vremenskim prognozama, sistem predviđa potrebne energetske resurse i prilagođava rad kako bi spriječila prekomjerna potrošnja tokom perioda najveće potražnje, što rezultira smanjenjem troškova. Osnovni element ovog dizajna je integracija vještačke inteligencije putem ekspertnih sistema i algoritama mašinskog učenja koji koriste istorijske podatke i senzorske ulaze u realnom vremenu. Ekspertni sistem koristi pravila zasnovana na bazi znanja o energetskej potrošnji zgrada, čime se određuje idealan nivo potrošnje za različite uslove u zgradi, dok algoritmi mašinskog učenja, kao što su regresioni modeli i klasterovanje, prepoznaju obrasce u podacima i prilagođavaju rad sistema na osnovu stvarnog stanja u prostorijama. Sistem takođe koristi napredne algoritme za kontrolu ventilacije sa promjenljivom zapreminom (VAV) i regulaciju protoka vazduha. Ovaj mehanizam omogućava HVAC sistemima da isporučuju precizno kontrolisanu količinu vazduha na osnovu trenutnih uslova i zahtjeva korisnika. Kada senzori detektuju povećanje broja ljudi u prostoriji, sistem automatski povećava protok svježeg vazduha i prilagođava temperaturu kako bi održao optimalne uslove. Ovaj pristup smanjuje nepotrebnu potrošnju energije u praznim prostorijama, čime se poboljšava efikasnost rada sistema (Saleem et al. 2024).

Ju i saradnici (Yu et al., 2020) su razvili napredan sistem za kontrolu HVAC u komercijalnim zgradama, koristeći multi-agentni sistem zasnovan na dubokom pojačanom učenju. Ovaj pristup dizajniran je sa ciljem smanjenja potrošnje energije, posebno u zgradama sa više zona, gdje je potrebno upravljati temperaturnim uslovima i kvalitetom vazduha u različitim zonama u realnom vremenu. Jedan od glavnih inovativnih elemenata ovog dizajna je primjena Markovljeve igre, koja omogućava koordinaciju između agenata zaduženih za različite zone unutar zgrade. Svaka zona ima svog agenta koji prikuplja podatke o unutrašnjoj i spoljašnjoj temperaturi, koncentraciji CO₂, broju korisnika i ostalim relevantnim parametrima, čime se omogućava optimalno prilagođavanje sistema grijanja, hlađenja i ventilacije bez potrebe za eksplicitnim modelima termalne dinamike zgrade. Poseban doprinos ovog sistema je njegova sposobnost prilagođavanja promjenama u stvarnim uslovima – kao što su varijacije u cijeni električne energije, broj korisnika u zoni i spoljašnji klimatski uslovi. Zahvaljujući decentralizovanom upravljanju i upotrebi mehanizma pažnje, sistem može efikasno upravljati velikim brojem zona, što ga čini skalabilnim i pogodnim za kompleksne zgrade. Na kraju, sistem ne samo da optimizuje energetske efikasnost već i značajno poboljšava termalni komfor korisnika.

Li i Li (Lee & Lee, 2023) detaljno opisuju razvoj naprednog sistema za HVAC kontrolu, uz primjenu vještačke inteligencije, s posebnim naglaskom na energetska efikasnost. Kroz analizu više od 1.700 istraživačkih radova i 88 konkretnih studija slučaja, autori su osmislili model koji integriše vještačku inteligenciju s naprednim tehnikama kontrole poput modelno prediktivne kontrole (MPC), kao i optimizacije bazirane na evolutivnim algoritmima. U osnovi ovog pristupa je dvostruki dijamant PRISMA model, koji kombinuje divergirajuće i konvergirajuće faze razvoja dizajna. Ovaj model omogućava istraživačima da široko istraže problem dizajniranja energetski efikasnih HVAC sistema koristeći vještačku inteligenciju, te da usredsrede svoju pažnju na najučinkovitije pristupe. Jedan od važnih aspekata ovog dizajna je upotreba naprednih neuronskih mreža (ANN) i drugih metoda vještačke inteligencije poput dubokog učenja (DL) i pojačanog učenja (RL). Ove metode omogućavaju sistemima da ne samo da uče na osnovu istorijskih podataka, već i da se prilagođavaju u realnom vremenu na promjene u spoljnim uslovima, broju korisnika i unutrašnjem toplotnom opterećenju. Poseban naglasak stavljen je na potrebu za nadogradnjom hardverskih komponenti HVAC sistema kako bi se algoritmi vještačke inteligencije mogli efikasno primijeniti. Kroz analizu postojećih studija, autori zaključuju da je hardverska nadogradnja važna za postizanje optimalnih rezultata, jer kontrolni sistemi vještačke inteligencije često zahtijevaju brži odziv i veću preciznost od tradicionalnih sistema (Lee & Lee, 2023).

Bird i saradnici (Bird et al., 2022) su predstavili modelno prediktivnu kontrolu (MPC) kao rješenje za optimizaciju HVAC sistema u komercijalnim zgradama, koristeći kombinaciju postojećih BMS (Building Management System) tehnologija i cloud baziranih platformi. Ovaj dizajn je posebno razvijen da bi se smanjili troškovi energije i emisije ugljen-dioksida uz očuvanje termalnog komfora. Glavna inovacija ovog pristupa je upotreba cloud servisa za integraciju sa postojećim kontrolnim HVAC sistemima, što omogućava jednostavnije uvođenje naprednih kontrolnih mehanizama bez velikih kapitalnih troškova za zamjenu hardvera. Modelno prediktivna kontrola koristi matematičke modele zgrade, kao što je ARX (autoregressive with exogenous inputs), koji omogućava sistemu da predviđa promjene u unutrašnjoj temperaturi na osnovu spoljašnjih uticaja poput temperature, kao i potrošnje energije. MPC koristi optimizacione algoritme da u svakom trenutku izračuna optimalne vrijednosti za podešavanje temperature i brzinu ventilacije kako bi se smanjila energetska potrošnja, zadržao komfor i optimizovale emisije. Za razliku od tradicionalnih PI kontrolera (Proportional-Integral), MPC koristi prediktivne informacije poput vremenskih prognoza i promjena u cijenama energije, što omogućava unaprijedno podešavanje rada sistema.

Korišćenjem AWS IoT Core servisa, podaci iz BMS sistema šalju se u cloud, gdje MPC analizira i upravlja HVAC sistemom u realnom vremenu, smanjujući tako potrebu za lokalnim serverima i olakšavajući primjenu na više lokacija. Na ovaj način, sistem postiže veću fleksibilnost i skalabilnost, dok se smanjuje potreba za visokim tehničkim znanjem prilikom implementacije (Bird et al., 2022).

Aguilar i saradnici (Aguilar et al., 2021b) su razvili napredan autonomni sistem za upravljanje više HVAC podsistema u pametnim zgradama, fokusirajući se na fazu pokretanja sistema i optimizaciju tranzitnog režima. Ovaj sistem koristi autonomne cikluse analize podataka (ACODAT), čime omogućava optimizovanu kontrolu od trenutka pokretanja sistema do postizanja stabilnog radnog režima. Jedna od glavnih inovacija ovog pristupa je da, za razliku od većine postojećih sistema koji se fokusiraju na stabilno stanje, ovaj sistem upravlja cijelim procesom prelaska između početnog pokretanja i postizanja zadate temperaturne tačke podešavanja, a sve uz minimalnu potrošnju energije i maksimalan komfor korisnika. Arhitektura sistema zasnovana na ACODAT pristupu koristi dva glavna modula – nadzorni modul (SM) i modul za optimizaciju (OM). Nadzorni modul prikuplja podatke iz različitih HVAC podsistema i analizira performanse, dok modul za optimizaciju prilagođava operativne modove (OpM) kako bi sistem postigao zadati cilj, uzimajući u obzir faktore poput trenutnih cijena energije i kapaciteta podsistema. U tu svrhu koriste se napredni algoritmi mašinskog učenja, kao što su logistička regresija (LR), random forest (RF) i support vector machines (SVM), koji detektuju anomalije u ponašanju sistema. Za predikciju unutrašnjih promjena u sistemu koristi se višeslojni perceptron (MLP), što omogućava optimizaciju u realnom vremenu i prilagođavanje operativnih modova u zavisnosti od trenutnih uslova. Tokom faze pokretanja, HVAC podsistemi prolaze kroz period tranzicije kako bi postigli stabilno stanje bez prekomerne potrošnje energije ili odstupanja od optimalnih temperaturnih uslova. Osnovni cilj ovog pristupa je omogućiti da sistem autonomno prepozna kada HVAC podsistem ne napreduje prema zadatoj referentnoj tački (tački podešavanja) i interveniše promjenom operativnog moda kako bi se osigurala maksimalna energetska efikasnost i očuvao termalni komfor. Modularni dizajn ACODAT arhitekture omogućava jednostavno proširenje i integraciju novih tehnika upravljanja, čime se osigurava dugoročna fleksibilnost sistema (Aguilar et al., 2021b).

Hoseni Gaurabpasi i Nik-Bakht (Hosseini Gourabpasi & Nik-Bakht, 2021) su predložili napredni sistem za automatsku detekciju i dijagnostiku kvarova (AFDD) u HVAC sistemima, zasnovan na tehnologijama vještačke inteligencije i rudarenja podataka. Sistem koristi FP-

Growth algoritam za otkrivanje čestih obrazaca kvarova i stvaranje pravila asocijacije, čime se omogućava identifikacija uzročnih veza između kvarova u sistemu i njihovih simptoma. Na ovaj način, sistem ne samo da detektuje probleme kada se pojave, već i predviđa potencijalne kvarove na osnovu istorijskih podataka i operativnih obrazaca. Jedan od glavnih tehničkih aspekata ovog sistema je primjena hibridnog modela detekcije kvarova, koji kombinuje nadzirane i nenadzirane metode mašinskog učenja. Algoritmi kao što su podrška vektorima (SVM), neuronske mreže (ANN), i klasterovanje koriste se za identifikaciju različitih tipova kvarova, od jednostavnih grešaka do kompleksnih “mekih” kvarova koji postepeno smanjuju efikasnost sistema. Za treniranje modela korišćeni su opsežni podaci prikupljeni iz više HVAC sistema, uključujući informacije o temperaturi, vlažnosti, protoku vazduha, pritisku i potrošnji energije, čime je omogućena veća tačnost u detekciji anomalija. Posebna pažnja je posvećena optimizaciji rada sistema u realnom vremenu. Sistem koristi prikupljene podatke kako bi autonomno prilagodio rad HVAC komponenti, kao što su ventilatori, pumpe, i čileri. Na primjer, kada sistem otkrije smanjeni protok vazduha zbog blokade filtera, algoritam odmah predlaže akcije za uklanjanje problema, kao što su zamjena filtera ili podešavanje protoka. Ovaj sistem omogućava bolje planiranje održavanja i sprječava kritične kvarove koji mogu izazvati duže prekide u radu i povećane troškove. Integracija sa sistemima za upravljanje zgradama (BMS) omogućava automatsko prikupljanje podataka i kontinuirano nadgledanje HVAC sistema. AFDD model ne samo da prepoznaje uzroke kvarova, već i pruža preporuke za optimizaciju rada sistema na bazi istorijskih podataka i obrazaca potrošnje. Takođe, sistem je sposoban da unaprijed prepozna odstupanja od normalnog rada, što omogućava preventivno djelovanje, smanjujući mogućnost neočekivanih kvarova i produžujući vijek trajanja opreme (Hosseini Gourabpasi & Nik-Bakht, 2021).

Kliangkhlao i saradnici (Kliangkhlao et al., 2024) predlažu napredni kauzalni model preventivnog održavanja HVAC sistema zasnovan na vještačkoj inteligenciji, koji koristi podatke u stvarnom vremenu kako bi identifikovao potencijalne kvarove i omogućio pravovremeno održavanje. U središtu ovog pristupa je strukturni kauzalni model (SCM) koji identifikuje uzročno-posljedične veze između glavnih varijabli sistema, omogućavajući ne samo detekciju problema, već i razumijevanje razloga zašto do njih dolazi. Ova sposobnost objašnjenja kvarova važna je za efikasno održavanje i optimizaciju rada HVAC sistema. Kauzalni model koristi podatke prikupljene putem IoT senzora postavljenih u glavnim komponentama HVAC sistema, kao što su filteri, kompresori, rashladni fluidi i ventilatori. Senzori kontinuirano prikupljaju podatke o temperaturi, vlažnosti, protoku vazduha, potrošnji

energije i opterećenju sistema, što omogućava detaljno praćenje performansi. Integracija IoT tehnologije sa modelima vještačke inteligencije omogućava automatizovano prikupljanje i analizu podataka bez potrebe za ručnim intervencijama, čime se osigurava kontinuirano nadgledanje i analiza stanja sistema. Glavni tehnički aspekt ovog sistema je upotreba algoritama za rudarenje podataka i mašinsko učenje, koji prepoznaju obrasce u podacima i predviđaju predkvar događaje – tj. kvarove koji se javljaju u ranoj fazi, prije nego što dovedu do ozbiljnijih problema. Na primjer, povećano opterećenje ventilatora i nagli pad efikasnosti hlađenja mogu signalizirati zagušenje filtera, a povećanje temperature rashladnog fluida može ukazivati na curenje ili kvar kompresora. Regresione metode i Bayesovska mreža koriste se za prepoznavanje uzročno-posljedičnih odnosa između tih faktora i problema u radu sistema, što omogućava tehničarima da pravovremeno intervenišu. Model se oslanja na kombinaciju objašnjivih modela vještačke inteligencije i uzročno-posljedičnih veza kako bi identifikovao ne samo statističke korelacije, već i razumijevanje kako i zašto određene promjene u operativnim varijablama dovode do potencijalnih kvarova. Ovo omogućava prediktivnu analitiku, ali i dublje uvide u samu prirodu kvarova, što značajno poboljšava proces održavanja. Kroz primjenu strukturnih uzročno-posljedičnih modela, sistem može predložiti tehničarima konkretne mjere za prevenciju, kao što su zamjena filtera, podešavanje kompresora ili održavanje ventilatora (Kliangkhlao et al., 2024).

Komparativni pregled predloženih rješenja

U komparativnoj analizi rješenja za kontrolu HVAC sistema, možemo ih podijeliti u četiri grupe na osnovu tipa korišćenih tehnologija i specifičnih zahtjeva okruženja: neuronske mreže i mašinsko učenje, modelno prediktivna kontrola (MPC), multi-agentni sistemi, i sistemi za detekciju kvarova.

Neuronske mreže i mašinsko učenje – Jala i saradnici (Yayla et al., 2022) koriste neuronske mreže (ANN) kako bi predvidjeli broj korisnika u zgradama sa višezonskim rasporedom. Ova metoda je izabrana zbog svoje sposobnosti da uči iz istorijskih podataka, čime se omogućava efikasna adaptacija HVAC sistema na promjene bez dodatnih senzora. Ovo rješenje daje najbolje rezultate u dinamičnim okruženjima poput tržnih centara, gdje se broj korisnika često mijenja tokom dana, omogućavajući optimizaciju potrošnje energije i smanjenje troškova. Slično tome, Salim i saradnici (Saleem et al., 2024) se oslanjaju na mašinsko učenje u kombinaciji sa ekspertnim sistemima za prilagođavanje rada HVAC sistema u realnom vremenu. Ovaj pristup je izabran zbog svoje fleksibilnosti i brze reakcije na

promjene, čime se obezbeđuje efikasno upravljanje u prostorima gdje se brzo mijenja broj korisnika. Ovaj model je posebno efikasan u restoranima i kafićima, gdje je potrebno konstantno prilagođavanje uslova. Li i Li (Lee & Lee 2023) koriste neuronske mreže (ANN) u kombinaciji sa evolutivnim algoritmima i MPC. Ovaj pristup omogućava postizanje optimalnih performansi, ali zahtijeva nadogradnju hardverskih komponenti, što ga čini skupljim. Njihovo rješenje daje najbolje rezultate u novim ili renoviranim zgradama, gdje se može implementirati savremena tehnologija, omogućavajući maksimalnu energetska efikasnost.

Modelno prediktivna kontrola (MPC) – Džoi i saradnici (Joe et al., 2023) i Bird i saradnici (Bird et al., 2022) se fokusiraju na modelno prediktivnu kontrolu (MPC), ali s različitim pristupima. Džoi i saradnici (Joe et al., 2023) koriste decentralizovane i centralizovane modele sa lumped modelom, koji pojednostavljuje proces modeliranja, čime se smanjuju troškovi inženjeringa. Ovaj model daje najbolje rezultate u stabilnim uslovima, gdje su unutrašnji faktori predvidivi. Nasuprot tome, Bird i saradnici (Bird et al., 2022) implementiraju cloud platformu za integraciju MPC sistema sa postojećim BMS sistemima, što omogućava jednostavnu adaptaciju bez velikih ulaganja. Ovaj pristup je efikasan u postojećim zgradama koje žele poboljšati svoje performanse bez značajnog preuređenja. Razlika između ovih pristupa leži u fleksibilnosti rješenja Džoi i saradnika (Joe et al., 2023) u složenim zgradama naspram jednostavnosti rješenja Birda i saradnika (Bird et al., 2022) za brzu integraciju.

Multi-agentni sistemi – Ju i saradnici (Yu et al., 2020) koriste multi-agentni sistem zasnovan na dubokom pojačanom učenju. Ovaj model omogućava decentralizovano upravljanje HVAC sistemima kroz Markovljeve igre, što omogućava efikasno prilagođavanje promenljivim uslovima korišćenja i vremenskim promjenama. Ovaj pristup daje najbolje rezultate u situacijama gdje su klimatski uslovi dinamični i nepredvidivi, omogućavajući optimalnu potrošnju energije.

Sistemi za detekciju kvarova – Hoseni i saradnici (Hosseini Gourabpasi & Nik-Bakht, 2021) razvili su sistem za automatsku detekciju i dijagnostiku kvarova (AFDD) koristeći FP-Growth algoritam za prepoznavanje obrazaca kvarova. Ovaj pristup kombinuje nadzirane i nenadzirane metode mašinskog učenja, čime se obezbeđuje visoka tačnost detekcije. Ovaj model je posebno koristan u komercijalnim zgradama gdje se očekuje brz odgovor na probleme, čime se smanjuju troškovi održavanja. Kiangkhlaio i saradnici (Kiangkhlaio et al., 2024) koriste kauzalni model preventivnog održavanja, koji analizira podatke prikupljene sa

IoT senzora za identifikaciju potencijalnih kvarova. Njihov model omogućava razumijevanje uzročno-posljedičnih veza, čime se pruža dublje razumijevanje problema i omogućava pravovremena intervencija. Ova metoda se pokazuje veoma efikasnom u industrijskim okruženjima gdje je proaktivno održavanje glavno za smanjenje zastoja. Aguilar i saradnici (Aguilar et al., 2021b) razvili su autonomni sistem za upravljanje više HVAC podсистема fokusirajući se na optimizaciju tranzitnih režima. Ovaj sistem koristi ACODAT arhitekturu i algoritme mašinskog učenja za detekciju anomalija. Ovaj model daje najbolje rezultate u složenim zgradama koje zahtijevaju visoku efikasnost i pouzdanost tokom prelaznih faza.

Tabela 1. Komparativni pregled dizajna i razvoja sistema rješenja za kontrolu HVAC sistema

Autori	Tip mreže/tehnologije	Glavne prednosti	Optimalne situacije
Yayla et al., 2022	neuronske mreže (ANN)	smanjenje troškova senzora, optimizacija potrošnje	dinamične zgrade sa promjenjivim brojem korisnika
Yu et al. (2020)	multi-agentni sistem	decentralizovana kontrola, bolja prilagodljivost	kompleksna okruženja sa varijabilnim klimatskim uslovima
Joe et al. (2023)	modelno prediktivna kontrola (MPC)	veća preciznost u upravljanju višezonskim zgradama	složenije zgrade sa više zona
Bird et al. (2022)	modelno prediktivna kontrola (MPC)	fleksibilnost, lakša implementacija	zgrade sa postojećim BMS sistemima
Saleem et al. (2024)	ekspertni sistemi, mašinsko učenje	automatsko prilagođavanje, brza implementacija	zgrade sa brzim promjenama u korišćenju prostora
Li & Li (2023)	modelno prediktivna kontrola (MPC), neuronske mreže, evolutivni algoritmi	dugoročne uštede, visoka efikasnost	renovirane zgrade ili nove zgrade
Hosseini Gourabpasi & Nik-Bakht, (2021)	AFFD, FP-Growth	rano otkrivanje kvarova, smanjenje troškova održavanja	složeniji sistemi sa potrebnim preventivnim održavanjem
Kliangkhlao et al. (2024)	kauzalni model	razumevanje uzročno-posljedičnih veza, prediktivna analitika	proaktivno održavanje
Aguilar et al. (2021b)	ACODAT arhitektura	optimizacija operativnih modova, minimalna potrošnja energije	zgrade sa više energetskehtjeva

Izvor: Autor, 2024.

5.2. Demonstracija i procjena sistema za kontrolu grijanja, ventilacije i klimatizacije zasnovanog na vještačkoj inteligenciji

Jala i saradnici (Yayla et al., 2022) su demonstrirali su svoj HVAC sistem zasnovan na vještačkoj inteligenciji koristeći višestruke simulacije koje porede tradicionalni senzorski sistem i novi sistem zasnovan na predikciji putem neuronskih mreža. Autori su primijenili podatke prikupljene tokom dvogodišnjeg perioda iz stvarnog okruženja, odnosno tržnog centra u Istanbulu, kako bi stvorili model simulacije koji vjerodostojno reflektuje stvarne uslove. Oni su testirali četiri različita scenarija upravljanja HVAC sistemima: S1 – potpuno aktivni sistem bez ikakve kontrole; S2 – sistem sa tradicionalnim kontrolama na osnovu senzora temperature i CO₂, S3 –sistem zasnovan na vještačkoj inteligenciji sa predikcijom broja korisnika; i S4 – sistem vještačke inteligencije sa unaprijed podešenim prehlađivanjem. Rezultati simulacija su

pokazali da je sistem zasnovan na vještačkoj inteligenciji (S3 i S4) ostvario značajnu prednost u pogledu energetske efikasnosti. Na primjer, u poređenju sa potpuno aktivnim sistemom (S1), S3 je postigao smanjenje potrošnje energije od najmanje 10%, dok je S4 sa funkcijom prehladivanja omogućio još veće uštede. Ove uštede dolaze iz optimizovanog upravljanja termalnim uslovima zgrade, gdje sistem koristi predikciju broja korisnika kako bi se unaprijed prilagodio očekivanim skokovima u okupaciji i tako izbjegao energetske intenzivne prilagođavanja u realnom vremenu. Simulacijski scenariji su, prema autorima, odabrani kako bi se obuhvatile različite dinamike upravljanja zgradom, uključujući promjene u vremenskim uslovima, unutrašnjoj temperaturi i broju korisnika. U S3, neuronske mreže su omogućile predikciju okupacije u satnim intervalima, čime se postiglo značajno smanjenje potrebe za konstantnim radom HVAC sistema na maksimalnim kapacitetima. Iako je ovaj sistem pružio zadovoljavajuće rezultate u simulacijama, autori ističu da u realnim uslovima može postojati potreba za dodatnim senzorima za praćenje temperature i CO₂ nivoa kako bi se osigurala dodatna preciznost, posebno u slučajevima kada se predikcije značajno razlikuju od stvarnih podataka. Jedan od osnovnih elemenata evaluacije jeste poređenje između senzorskih sistema i sistema vještačke inteligencije. Tradicionalni senzorski sistemi (S2) su pokazali znatno lošije performanse u odnosu na sisteme vještačke inteligencije. Naime, senzori su često kasnili u reakciji na promjene u broju korisnika i promjene u spoljnim klimatskim uslovima, što je rezultiralo većom potrošnjom energije, posebno tokom perioda sa naglim porastima broja korisnika, kao što je vrijeme ručka u tržnom centru. Sistemi vještačke inteligencije, s druge strane, unaprijed su predviđali promjene i time smanjivali energetske potrošnje. Posebno je zanimljiv rezultat postignut u scenariju S4, gdje je sistem aktivirao prehladivanje zgrade prije očekivanih skokova u broju korisnika, koristeći predikcije na osnovu prethodnih podataka o okupaciji i vremenskim uslovima. Ovaj scenario pokazao se najefikasnijim u simulacijama, jer je omogućio da sistem hladi zgradu unaprijed, čime se izbjeglo trošenje energije na brzo hlađenje tokom perioda visoke okupacije, kada bi potražnja za hlađenjem dostigla vrhunac. Prehladivanje je bilo posebno korisno u zonama sa velikim brojem korisnika, gdje je brzo prilagođavanje termalnih uslova bilo osnova za održavanje komfora, ali i za smanjenje opterećenja na sam HVAC sistem. Međutim, treba napomenuti da su svi rezultati dobijeni na osnovu simulacija, što nosi određena ograničenja. Iako su simulacije izvedene na realnim podacima iz tržnog centra, u realnom svijetu postoji mnoštvo nepredvidivih faktora koji mogu uticati na performanse sistema. Na primjer, vanredni događaji, promjene u radu objekta ili nagle promjene u vremenskim uslovima mogu značajno uticati na preciznost predikcija i efikasnost sistema. U takvim slučajevima, sistem vještačke inteligencije može zahtijevati česte

revizije svojih prediktivnih modela kako bi se održao optimalan rad. Autori takođe priznaju da je sistem zasnovan na relativno jednostavnom modelu neuronske mreže, što može ograničiti njegovu skalabilnost u mnogo kompleksnijim zgradama sa specifičnim zahtjevima u različitim zonama. Još jedan važan rezultat simulacija je procjena termalnog komfora korisnika. Autori su prikazali da sistemi vještačke inteligencije ne samo da smanjuju potrošnju energije, već i poboljšavaju nivo komfora za korisnike, što je od suštinske važnosti za zgrade sa velikim brojem posjetilaca, poput tržnih centara. Brza prilagodljivost sistema, u kombinaciji sa njegovom sposobnošću da unaprijed prepoznaje potrebe za hlađenjem ili grijanje, omogućava održavanje stabilnih termalnih uslova, bez uobičajenih oscilacija koje su česte kod senzorskih sistema (Yayla et al., 2022).

Džoi i saradnici (Joe et al., 2023) su izvršili demonstraciju sistema zasnovanog na vještačkoj inteligenciji putem detaljnih simulacija koje su koristile stvarne podatke o temperaturama, solarnom zračenju, te unutrašnjem toplotnom opterećenju zgrada sa višestrukim zonama. Fokus simulacija je bio na poređenju efikasnosti dva pristupa – detaljnog modela i uprošćenog lumped modela, uz upotrebu različitih vremenskih i tarifnih uslova. Jedan od glavnih rezultata simulacija pokazao je da MPC sa detaljnim modelom zgrade omogućava veće uštede energije i optimizovano korišćenje HVAC sistema u odnosu na tradicionalnu povratnu kontrolu. Uštede u troškovima hlađenja su se kretale od 9,2% do 12,4%, u zavisnosti od vremenskih uslova i primjenjene strukture cijene struje (razlika između perioda visoke i niske tarife). Detaljan model, zahvaljujući svojoj preciznosti, omogućava svakoj zoni da optimalno koristi svoje karakteristike – poput veličine, termalne mase i položaja, kako bi maksimizirala uštede. S druge strane, lumped model je pokazao nešto manji potencijal uštede energije (oko 9,2% u prosjeku), ali je i dalje pružio značajne uštede u poređenju sa tradicionalnim pristupom povratne kontrole. Ovaj model koristi globalnu tačku podešavanja temperature za sve zone, što dovodi do manjeg stepena preciznosti u kontroli svake pojedinačne zone. To je u simulacijama dovelo do slučajeva prehladivanja u nekim zonama, ali je ukupna energetska efikasnost sistema i dalje bila značajna. Kroz analizu različitih vremenskih uslova, autori su otkrili da veće razlike u solarnom zračenju i spoljnim temperaturama dovode do većih prednosti MPC sistema, naročito kada se koristi detaljan model. Lumped model je pokazao bolje performanse tokom ekstremnijih vremenskih uslova (veća solarna radijacija i viša spoljašnja temperatura), kada su zgrade više opterećene potrebama za hlađenjem. Procjena performansi ukazala je na to da je lumped pristup efikasan i skalabilan za široku primjenu, posebno u zgradama sa sličnim termalnim karakteristikama u

svim zonama. Međutim, u situacijama kada različite zone zahtijevaju različite temperaturne tačke podešavanja, detaljan model pruža znatno bolje rezultate. Osim toga, autori su istakli da bi dodatna optimizacija mogla poboljšati performanse lumped modela, posebno u situacijama sa kompleksnijim zahtjevima za kontrolu temperature (Joe et al., 2023).

Salim i saradnici (Saleem et al. 2024) su izvršili BEMS testiranje u poslovnoj zgradi od 852,2 m² koja koristi napredni centralizovani HVAC sistem sa više zona. Sistem je evaluiran tokom perioda od četiri mjeseca, prikupljajući podatke o potrošnji energije, kvalitetu unutrašnjeg vazduha i nivou termalnog komfora korisnika. HVAC sistem zgrade je opremljen jedinicama sa promjenljivom zapreminom vazduha (VAV), koje su kontrolisane algoritmima zasnovanim na prikupljenim podacima o stanju prostora i trenutnim potrebama za grijanjem, hlađenjem i ventilacijom. Rezultati demonstracije su pokazali značajna poboljšanja u energetske efikasnosti. U poređenju sa tradicionalnim sistemima upravljanja koji su radili na unaprijed definisanim rasporedima, BEMS je omogućio smanjenje ukupne potrošnje energije HVAC sistema za 10% do 15%. To je postignuto kroz pametno upravljanje ventilatorima, čilerima i grijačima, koji su se uključivali samo kada su senzori detektovali stvarnu potrebu za intervencijom. Na primjer, tokom perioda kada je broj korisnika u prostorijama bio manji, sistem je automatski smanjivao ventilaciju i temperaturne postavke, smanjujući tako nepotrebnu potrošnju. Još jedan važan aspekt evaluacije bio je analiza prilagođavanja unutrašnjih uslova. Korišćenje senzora za mjerenje kvaliteta unutrašnjeg vazduha omogućilo je sistemu da automatski detektuje kada je potrebna veća ventilacija zbog povećane koncentracije CO₂ ili vlage, osiguravajući konstantan dotok svježeg vazduha u prostorijama sa velikom okupljenošću korisnika. Osim toga, sistem je analizirao nivo prirodnog svjetla, te je dinamički prilagođavao osvjjetljenje i ventilaciju u prostorijama, što je smanjilo energetske zahtjeve tokom dana sa višim nivoom prirodne svjetlosti. Poseban naglasak je stavljen na testiranje sistema tokom različitih vremenskih uslova, što je omogućilo evaluaciju fleksibilnosti BEMS-a u različitim klimatskim scenarijima. Tokom toplih dana, sistem je efikasno optimizovao rad čilera i ventilacijskih jedinica, minimizirajući potrošnju energije pomoću naprednih algoritama predviđanja koji su se oslanjali na vremenske prognoze. Prilagođavanje zatvaranjem roletni i korišćenjem prirodne ventilacije doprinijelo je smanjenju opterećenja na HVAC sisteme tokom dana sa visokim temperaturama. Sistem je također pokazao visoku pouzdanost i otpornost na promjene u dinamici prostora. Korišćenjem istorijskih podataka o upotrebi prostora, BEMS je predviđao obrasce korišćenja zgrade, prilagođavajući rad HVAC sistema u skladu sa tim predviđanjima. Ovaj prediktivni model

omogućio je preciznije upravljanje resursima, čime se smanjila potreba za intervencijama i neplaniranim održavanjem (Saleem et al. 2024).

Ju i saradnici (Yu et al., 2020) su demonstrirali efikasnost svog sistema putem simulacija koje koriste stvarne podatke o potrošnji energije, spoljnim temperaturama i broju korisnika u zgradama. Rezultati simulacija su pokazali da sistem značajno smanjuje energetske potrošnje, pri čemu uštede energije iznose od 56% do 75% u poređenju sa tradicionalnim HVAC sistemima. Pored ušteda energije, sistem se pokazao izuzetno robusnim, prilagođavajući se promjenama u broju korisnika i spoljašnjim temperaturnim uslovima, čak i u situacijama sa velikim promjenama u kratkom vremenskom periodu. Demonstracije su pokazale da sistem efikasno održava zadati nivo termalnog komfora i kvaliteta vazduha, bez obzira na promjene u spoljašnjim uslovima. Važan rezultat procjene je i sposobnost sistema da fleksibilno upravlja resursima tokom perioda sa visokim cijenama električne energije, čime dodatno smanjuje operativne troškove. Ovaj sistem takođe omogućava kontinuirano praćenje i prilagođavanje parametara kao što su pozicija ventila i brzina ventilacije, čime se smanjuje opterećenje na glavne komponente sistema. Time je sistem ne samo efikasan već i održiv, osiguravajući dugoročne uštede i poboljšanu energetske efikasnost u pametnim zgradama (Yu et al., 2020).

Li i Li (Lee & Lee, 2023) su sprovedi demonstraciju ovog HVAC sistema zasnovanog na vještačkoj inteligenciji kroz simulacije i realne eksperimente u različitim tipovima zgrada. Autori su kroz 88 slučajeva analizirali rezultate primjene vještačke inteligencije na različite sisteme, uključujući sisteme za grijanje, hlađenje, ventilaciju i hlađenje pomoću rashladnih uređaja. U mnogim slučajevima, upotreba tehnologije vještačke inteligencije dovela je do značajnog smanjenja potrošnje energije, pri čemu su uštede varirale od 20% do čak 73%, u zavisnosti od specifičnog tipa sistema i uslova primjene. U kontekstu energetske efikasnosti, jedan od najefikasnijih modela pokazao se MPC (modelno prediktivna kontrola). Rezultati iz stvarnih eksperimentalnih studija pokazali su da ovaj pristup može postići uštede energije od do 30% kod sistema za hlađenje, dok je kod grijanja postignut sličan nivo optimizacije. Korišćenje MPC omogućava precizno predviđanje toplotnog opterećenja u zgradama, uz optimizaciju korišćenja energije na osnovu vanjskih uslova i unutrašnjih potreba. Jedan od glavnih rezultata rada je zaključak da, iako vještačka inteligencija može donijeti značajne uštede, za optimalnu primjenu je često potrebno nadograditi hardverske komponente HVAC sistema. Poboljšanja u komponentama poput ventilatora, sistema za distribuciju vazduha i rashladnih uređaja omogućavaju da algoritmi vještačke inteligencije brže i preciznije

upravljaju unutrašnjim klimatskim uslovima, smanjujući tako potrošnju energije bez gubitka komfora za korisnike. Autori su takođe naglasili važnost realnog testiranja i upotrebe podataka iz stvarnih aplikacija kako bi se ocijenila stvarna efikasnost sistema. U mnogim slučajevima, sistemi vještačke inteligencije su se pokazali efikasnijima u stvarnim uslovima nego u simulacijama, što ukazuje na sposobnost sistema da uči i prilagođava se kroz vrijeme. (Lee & Lee, 2023).

Bird i saradnici (Bird et al., 2022) su sproveli demonstraciju sistema u stvarnom okruženju, na primjeru zgrade u maloprodajnom sektoru u Velikoj Britaniji. Ova zgrada koristi dva uređaja za obradu vazduha (AHU), koji su prethodno kontrolisani PI kontrolnim sistemima. Autori su izvršili simulaciju MPC rješenja u trajanju od dva mjeseca, upoređujući ga sa postojećim PI kontrolerima. Cilj je bio da se uporede troškovi energije, emisije CO₂ i postizanje termalnog komfora u scenarijima sa ekonomskom i karbonskom optimizacijom. Rezultati simulacija su pokazali da MPC ostvaruje značajne energetske uštede. U scenariju ekonomske optimizacije, postignuto je smanjenje potrošnje energije od 650 kWh i ušteda od 240 dolara (što je poboljšanje od 1,7% u poređenju sa baznim PI kontrolerom). Iako je postignuta slična ušteda i u scenariju karbonske optimizacije (smanjenje energije za 800 kWh), redukcija emisija ugljen-dioksida bila je minimalna zbog ograničenja u fleksibilnosti sistema grijanja, koji nije mogao da pomjeri potrošnju energije na period sa nižom emisijom ugljen-dioksida. Jedan od glavnih faktora koji su ograničili punu efikasnost MPC sistema je brzina gubitka toplote u zgradi, koja nije dozvoljavala zadržavanje toplote tokom noćnih perioda sa nižom cijenom struje ili manjom emisijom ugljen-dioksida. Autori su zaključili da bi ugradnja termalnih skladišta ili poboljšanje izolacije zgrade mogla dodatno povećati efikasnost MPC kontrolnih sistema, što bi omogućilo značajnije pomjeranje potrošnje energije i bolje iskorišćenje povoljnih perioda niske emisije. Zaključci ove studije ukazuju da MPC sistemi mogu donijeti značajne uštede u specifičnim okruženjima, ali njihova primjena mora biti pažljivo prilagođena karakteristikama zgrade. Pored toga, analiza je pokazala da je cloud bazirani MPC sistem vrlo fleksibilan i lako primjenjiv na različite tipove zgrada, čime se otvaraju mogućnosti za širu primjenu u komercijalnim zgradama sa postojećim BMS sistemima (Bird et al., 2022).

Aguilar i saradnici (Aguilar et al., 2021b) su sproveli demonstraciju autonomnog sistema na sistemu grijanja, ventilacije i klimatizacije zgrade Teatro Real u Madridu, koja ima složen sistem klimatizacije sastavljen od više HVAC podsistema, uključujući vazduh-voda toplotne pumpe i voda-voda rashladne uređaje. Eksperimenti su pokazali da je autonomni

sistem efikasan u smanjenju potrošnje energije, posebno tokom faze pokretanja sistema. Simulacije su pokazale da je potrošnja energije smanjena za oko 35% u fazi predhlađenja zgrade, dok je u periodu stabilnog rada ostvarena dodatna ušteda energije od 5% do 6%. Ovi rezultati su postignuti optimizacijom operativnih modova rashladnih uređaja i toplotnih pumpi, kao i prilagođavanjem brzine ventilatora i protoka vode kako bi se smanjila ukupna energetska potrošnja. Takođe, sistem je uspješno prepoznao i reagovao na različite izazove, poput prekomjerne potrošnje energije i usporenog postizanja zadate tačke podešavanja. U slučajevima kada su rashladni uređaji trošili više energije od očekivanog, sistem je automatski prilagodio operativne modove kako bi smanjio potrošnju i poboljšao koeficijent performansi (COP), koji je varirao između 2 i 4,2 u zavisnosti od specifičnog scenarija. Detekcija abnormalnosti u ponašanju sistema bila je izuzetno precizna, sa stopom uspješnosti od preko 90%, što je omogućilo sistemu da brzo interveniše i prilagodi se promjenama u performansama, čime je postignuta glatka tranzicija iz faze pokretanja u stabilni rad. Zaključno, ovaj autonomni sistem za upravljanje HVAC podsistemima pokazuje visok nivo efikasnosti, omogućavajući značajne uštede energije i optimizaciju operativnih modova. Sistem je sposoban da autonomno detektuje i reaguje na probleme u realnom vremenu, osiguravajući balans između energetske efikasnosti i očuvanja komfora korisnika. Rezultati ove studije ukazuju na potencijal za primjenu ovog pristupa u drugim kompleksnim zgradama, s mogućnošću daljeg prilagođavanja i proširenja funkcionalnosti sistema kako bi se postigla još veća fleksibilnost i efikasnost u radu HVAC sistema (Aguilar et al., 2021b).

Hoseni Gaurabpasi i Nik-Bakht (Hosseini Gourabpasi & Nik-Bakht, 2021) su validirali kroz niz simulacija i stvarnih eksperimenata u različitim komercijalnim zgradama. U cilju procjene efikasnosti predloženog AFDD sistema, autori su primijenili model u zgradama sa kompleksnim HVAC sistemima, uključujući više ventilacionih jedinica, toplotnih pumpi, i rashladnih uređaja. Eksperimenti su se fokusirali na identifikaciju glavnih kvarova, kao što su curenje rashladnog sredstva, neispravnost ventilatora, i problematična kalibracija senzora. Sistem je uspio detektovati kvarove koji su tradicionalno teški za identifikaciju, poput zaglavljivanja ventila ili postepenog smanjenja efikasnosti čilera. Jedan od najvažnijih rezultata demonstracije bio je smanjenje potrošnje energije kroz optimizaciju rada komponenti nakon detekcije kvarova. Eksperimentalni rezultati pokazuju da je primjena AFDD sistema omogućila smanjenje energetske troškova od 10% do 15%, prvenstveno kroz pravovremenu identifikaciju i popravku kvarova, kao i kroz optimizaciju rada ventilacionih i rashladnih jedinica. Takođe, korišćenjem napredne analitike, sistem je predvidio kvarove na osnovu

istorijskih podataka, omogućavajući proaktivno održavanje i izbjegavanje neplaniranih prekida u radu. Procjena performansi sistema pokazala je visoku tačnost u detekciji kvarova, sa prosječnom stopom tačnosti većom od 90%, dok su lažno pozitivne detekcije bile minimalne. Ovo je omogućilo korisnicima zgrada da bolje planiraju održavanje i smanje operativne troškove. Osim toga, analiza ponašanja sistema tokom vremenskih perioda visokog opterećenja pokazala je da AFDD sistem efikasno prilagođava rad HVAC komponenti, čime se izbjegava prekomjerna potrošnja energije i smanjuje rizik od pregrijavanja ili preopterećenja sistema. U poređenju sa tradicionalnim metodama upravljanja održavanjem, predloženi model AFDD je omogućio značajne uštede u troškovima rada i energije. Studije slučaja iz stvarnih zgrada ukazuju na to da se vrijeme reakcije na identifikovane kvarove značajno smanjilo, što je dovelo do boljih performansi HVAC sistema i produženja životnog vijeka opreme. Sistem je takođe unaprijedio pouzdanost i dostupnost HVAC sistema, čime je osiguran stabilan rad zgrada tokom perioda visokih temperaturnih opterećenja (Hosseini Gourabpasi & Nik-Bakht, 2021).

Kliangkhlao i saradnici (Kliangkhlao et al., 2024) su, u cilju validacije predloženog kauzalnog modela preventivnog održavanja, autori su sproveli eksperimente u stvarnim uslovima u komercijalnom kafiću u Tajlandu. Ovaj kafić koristi inverter klima uređaj kapaciteta 24.500 BTU/h (7.2 kW), čiji je rad praćen putem IoT senzora instaliranih u osnovnim komponentama sistema. Podaci su prikupljeni tokom perioda od 12 mjeseci, uz fokus na detekciju predkvar događaja kao što su zagušenje filtera, promjene u potrošnji energije, promjene temperature rashladnog fluida i opterećenje ventilatora. Korišćenjem podataka prikupljenih sa senzora, kauzalni model je detektovao niz potencijalnih kvarova. Na primjer, zabilježeno je da kada je spoljna temperatura prelazila 30°C, a unutrašnja temperatura nije postizala željenu tačku podešavanja zbog smanjenog protoka vazduha, uzrok je bio zagušenje filtera. Sistem je automatski identifikovao ovaj problem kao predkvar događaj i preporučio tehničarima da očiste ili zamijene filter prije nego što dođe do kvara kompresora. U drugom slučaju, povećanje temperature rashladnog fluida ukazivalo je na curenje rashladnog sredstva, što je moglo izazvati ozbiljniji kvar ukoliko nije pravovremeno otkriveno. Rezultati testiranja pokazali su da je sistem postigao tačnost predikcije predkvar događaja veću od 90%, što je značajno smanjilo troškove održavanja i downtime sistema. Korišćenjem uzročno-posljedičnih modela, tehničari su imali bolje razumijevanje osnovnih uzroka problema, što je omogućilo efikasnije preventivne mjere i smanjenje broja neplaniranih kvarova. Na primjer, tokom ljetnih mjeseci, kada je klima uređaj radio pod visokim opterećenjem, sistem je uspješno prepoznao zagušenje filtera i smanjenje efikasnosti ventilatora, što je rezultiralo

blagovremenom zamjenom filtera i održavanjem kompresora. Pored toga, demonstracija je pokazala da je korišćenje kauzalnog modela za prediktivno održavanje smanjilo ukupnu potrošnju energije HVAC sistema za 12%, jer je sistem omogućio efikasnije planiranje održavanja i smanjenje opterećenja tokom kritičnih perioda rada. U poređenju sa tradicionalnim reaktivnim pristupima održavanja, gdje se tehničari pozivaju nakon pojave kvarova, ovaj sistem je omogućio znatno ranije otkrivanje problema, čime su se smanjili troškovi popravki i povećala pouzdanost sistema. Zaključno, model zasnovan na kauzalnoj vještačkoj inteligenciji ne samo da pruža precizne predikcije kvarova, već i omogućava tehničarima dublje razumijevanje razloga zašto dolazi do određenih problema. Ova kombinacija prediktivnih sposobnosti i objasnjivih uzročno-posljedičnih odnosa čini ovaj model idealnim za preventivno održavanje HVAC sistema u komercijalnim i industrijskim zgradama, čime se poboljšava energetska efikasnost i produžava vijek trajanja opreme (Kliangkhlao et al., 2024).

Komparativni pregled predloženih rješenja

Kada je riječ o prikazanim demonstracijama sistema za HVAC kontrolu, rješenja se mogu grupisati prema tehnologijama koje koriste za postizanje energetske efikasnosti, omogućavajući detaljniju analizu prednosti svakog pristupa.

Neuronske mreže i mašinsko učenje – Jala i saradnici (Yayla et al. 2022) testirali su rješenje zasnovano na neuronskim mrežama (ANN) u tržišnom centru, poredeći tradicionalne senzorske sisteme sa onima koji koriste predikciju broja korisnika putem mašinskog učenja. Rezultati su pokazali smanjenje potrošnje energije do 10%, uz dodatne uštede korišćenjem strategije unaprijednog hlađenja (S4 scenario). Ovaj model se pokazao naročito efikasnim u dinamičnim okruženjima gdje broj korisnika često varira. Mogućnost predikcije fluktuacija i automatskog prilagođavanja rada sistema omogućila je optimalno upravljanje potrošnjom energije, što rezultira značajnim energetske uštedama i poboljšanom stabilnošću rada. Salim i saradnici (Saleem et al. 2024) testirali su BEMS sistem zasnovan na mašinskom učenju u poslovnoj zgradi. Sistem je postigao energetske uštede između 10% i 15%, uz automatsko prilagođavanje protoka zraka unutrašnjim uslovima i potrebama korisnika. Pored energetske efikasnosti, ovaj sistem je omogućio poboljšanje kvaliteta unutrašnjeg vazduha i optimizaciju osvetljenja, čime je značajno unaprijeđena udobnost i radna sredina korisnika, što je od velikog značaja u poslovnim prostorima. Ovaj model pokazuje dodatne prednosti u smislu fleksibilnosti i adaptivnosti u zgradama sa promjenljivim uslovima korišćenja.

Modelno prediktivna kontrola (MPC) – Džoi i saradnici (Joe et al. 2023) testirali su svoj MPC model u višezonskim zgradama, postizujući uštede energije od 92% do 124%, u zavisnosti od vremenskih uslova i strukture cijena energije. Iako je lumped model jednostavniji za implementaciju, omogućio je manje preciznu kontrolu, ali je ipak ostvario značajne uštede, naročito u zgradama gdje su unutrašnji uslovi relativno stabilni. Ovaj model se pokazao izuzetno efikasnim u zgradama sa više zona, gdje je potrebno osigurati balans između jednostavnosti implementacije i energetske efikasnosti. Li i Li (Lee & Lee 2023) sproveli su simulacije na 88 slučajeva, koristeći MPC tehnologiju u kombinaciji sa naprednim algoritmima mašinskog učenja. Njihova studija pokazala je smanjenje potrošnje energije do 30% kod sistema za hlađenje. Ovaj model se ističe u zgradama sa visokim energetske zahtjevima, gdje je primjena naprednih tehnologija neophodna za postizanje optimalne efikasnosti. Korišćenje kombinacije MPC i mašinskog učenja omogućava precizniju kontrolu i prilagođavanje vremenskim uslovima i specifičnim potrebama zgrade. Bird i saradnici (Bird et al. 2022) testirali su MPC model u maloprodajnoj zgradi, postizujući uštede od 17% u scenariju ekonomske optimizacije. Međutim, iako je sistem bio efikasan u smislu ušteda troškova, ograničeni efekat na smanjenje emisija CO₂ bio je posljedica specifičnih karakteristika same zgrade. Ovaj model je pokazao naročitu korisnost u zgradama gdje je prioritet ekonomska optimizacija, dok je njegov potencijal za smanjenje ekološkog otiska manji u okruženjima sa ograničenim mogućnostima za smanjenje emisija.

Sistemi za detekciju kvarova i preventivno održavanje – Hoseni i saradnici (Hosseini Gourabpasi & Nik-Bakht 2021) sproveli su eksperimente u komercijalnim zgradama, fokusirajući se na detekciju kvarova putem AFDD sistema (sistem za automatsku detekciju i dijagnostiku kvarova). AFDD je omogućio smanjenje troškova za 10% do 15%, uz tačnost detekcije kvarova preko 90%. Glavna prednost ovog sistema je njegova sposobnost da brzo identifikuje kvarove i preduzme preventivne mjere, čime se značajno smanjuju troškovi održavanja i vrijeme zastoja. Posebno je koristan u velikim komercijalnim zgradama gdje čak i mali kvarovi mogu izazvati ozbiljne poremećaje u radu. Kiangkhlaio i saradnici (Kiangkhlaio et al. 2024) testirali su kauzalni model preventivnog održavanja u kafiću, postigavši tačnost predikcije kvarova od preko 90%. Njihov sistem je takođe smanjio potrošnju energije za 12%, omogućavajući tehničarima dublje razumijevanje uzroka kvarova i preduzimanje proaktivnih mjera za smanjenje rizika od ozbiljnih oštećenja sistema. Ovaj model je pokazao posebnu efikasnost u manjim komercijalnim prostorima, gdje je preventivno održavanje neophodno za kontinuitet rada i smanjenje operativnih troškova.

Multi-agentni i autonomni sistemi – Ju i saradnici (2020) su primijenili multi-agentni sistem zasnovan na dubokom pojačanom učenju u zgradama sa višezonskim rasporedom. Njihovi testovi su pokazali smanjenje potrošnje energije u rasponu od 56% do 75%, zavisno od specifičnosti zgrade i promjenljivih klimatskih uslova. Ovaj pristup omogućava decentralizovano upravljanje HVAC sistemima, uz visoku prilagodljivost promjenama u broju korisnika i klimatskim varijablama. Korišćenjem Markovljevih igara i agenata, omogućena je decentralizovana koordinacija između različitih komponenti HVAC sistema, čime se postiže optimalna raspodjela resursa i smanjuje potreba za centralizovanim nadzorom. Glavne prednosti ovog modela uključuju efikasno prilagođavanje promjenljivim uslovima i visoku fleksibilnost u upravljanju potrošnjom energije, naročito u zgradama sa dinamičnim uslovima korišćenja, kao što su zgrade sa promjenljivim brojem korisnika ili promjenljivim spoljnim klimatskim uslovima. Aguilar i saradnici (2021b) testirali su autonomni sistem u kompleksnoj zgradi i postigli smanjenje potrošnje energije do 35% tokom faze predhlađenja. Sistem je optimizovao rad više HVAC podsistema, omogućavajući stabilan rad uz minimalne energetske gubitke. Ovaj model se pokazao naročito korisnim u velikim i kompleksnim zgradama gdje je potrebna koordinacija više sistema u cilju postizanja maksimalne energetske efikasnosti i stabilnosti. Autonomni pristup ovog sistema omogućava visoku pouzdanost i minimizaciju ručnih intervencija, čime se povećava sigurnost i optimizuje rad zgrade.

Tabela 2. Komparativni pregled rezultata prikazanih rješenja demonstracija i procjena sistema za HVAC kontrolu

Autori	mjesto testiranja	smanjenje potrošnje energije	dodatni rezultati	glavne prednosti
Yayla et al., 2022	tržni centar	do 10%	unaprijedno hlađenje	efikasnost u uslovima promjene korisnika
Joe et al. (2023)	višezonske zgrade	92 do 124%	visoka preciznost	efikasno upravljanje složenim zgradama
Bird et al. (2022)	maloprodajna zgrada	17%	ograničeni efekat na smanjenje emisija CO ₂	fleksibilnost i jednostavna implementacija
Yu et al. (2020)	višezonske zgrade	56 do 75%	decentralizovano upravljanje	visoka prilagodljivost promjenama korisnika i klimatskih uslova
Saleem et al (2024)	poslovna zgrada	10 do 15%	poboljšanje kvaliteta unutrašnjeg vazduha	automatsko prilagođavanje
Li & Li (2023)	različiti slučajevi	do 30%	visoka efikasnost	veća efikasnost u složenim scenarijima
Hosseini Gourabpasi & Nik-Bakht, (2021)	komercijalne zgrade	10 do 15%	tačnost detekcije preko 90%	rano otkrivanje kvarova
Kliangkhlao et al. (2024)	Kafić	12%	dublje razumijevanje kvarova	proaktivno održavanje
Aguilar et al. (2021b)	kompleksna zgrada	do 35%	stabilan rad sa minimalnim gubicima	optimizacija tokom prelaznih režima

Izvor: Autor, 2024.

5.3. Kritički osvrt na prikazana rješenja i predlog dizajna AI-baziranog HVAC sistema za poslovne objekte

Prikazana istraživanja donose značajan doprinos razumijevanju primjene vještačke inteligencije u HVAC sistemima u komercijalnim zgradama. Fokus na povećanje energetske efikasnosti, optimizaciju operativnih troškova i poboljšanje korisničkog komfora u skladu je s globalnim trendovima održivog razvoja i pametnog upravljanja zgradama. Ipak, moguće je uočiti nekoliko ključnih izazova i ograničenja.

Ograničenja u generalizaciji rezultata – Iako mnoga istraživanja donose obećavajuće rezultate, većina je zasnovana na simulacijama ili testiranjima u kontrolisanim okruženjima. Na primjer, primjena neuronskih mreža i MPC sistema često se pokazuje vrlo efikasnom u

simulacijama, s rezultatima uštede energije između 10% i 75%. Međutim, ove simulacije ne reflektuju uvijek u potpunosti kompleksnost i dinamičnost stvarnih uslova u komercijalnim zgradama. Faktori poput naglih promjena u broju korisnika, vanrednih događaja ili nepredvidivih klimatskih uslova mogu značajno uticati na performanse sistema. Potrebna su opsežnija longitudinalna istraživanja u realnim okruženjima kako bi se osigurala pouzdanost i robustnost ovih rješenja.

Tehnički i implementacijski izazovi – Integracija vještačke inteligencije zahtijeva značajna infrastrukturna ulaganja, uključujući nadogradnju hardverskih komponenti i instalaciju široke mreže senzora. Ovi troškovi mogu biti prepreka za širu implementaciju. Istraživanja ne nude dovoljno praktičnih smjernica o tome kako optimizovati troškove implementacije ili riješiti izazove kompatibilnosti sa postojećim sistemima za upravljanje zgradama (BMS). Ovo predstavlja značajnu prepreku u primjeni, posebno za male i srednje kompanije.

Potreba za prilagodljivošću i skalabilnošću – Dok su prikazani multi-agentni sistemi i algoritmi za detekciju kvarova (AFDD) pokazali visok nivo adaptivnosti u kompleksnim okruženjima, njihov uspjeh zavisi od specifičnih karakteristika zgrade i njenog načina korišćenja. Skalabilnost ovih sistema prema različitim tipovima zgrada (npr. manji komercijalni objekti/ velike poslovne zgrade) ostaje upitna. Nadalje, složenost algoritama, kao što su Markovljeve igre ili kauzalni modeli, može ograničiti njihovu primjenu u širim razmjerama bez značajnih tehničkih intervencija i stručnog nadzora.

Fokus na energetske efikasnost naspram održivosti – Iako su uštede energije impresivne, većina istraživanja nije dovoljno analizirala širi kontekst održivosti. Na primjer, smanjenje emisije ugljen-dioksida je često ograničeno zbog nedovoljne fleksibilnosti sistema u optimizaciji emisija u različitim periodima potrošnje. Sistemi kao što su MPC koji integrišu cloud tehnologije pokazuju potencijal u smanjenju karbonskog otiska, ali njihov stvarni efekat zavisi od načina na koji energija dolazi do zgrade (npr. obnovljivi izvori energije).

Nedostatak standardizacije i interoperabilnosti – Prikazana rješenja razvijaju se u izolovanim istraživačkim okvirima bez dovoljno standardizacije koja bi omogućila lakšu integraciju i interoperabilnost između različitih sistema i tehnologija. Ovo otežava razmjenu podataka i sinhronizaciju rada između HVAC sistema i drugih pametnih sistema u zgradama, poput sigurnosnih ili sistema za upravljanje energijom.

Istraživanja prikazana u ovom radu pružaju čvrstu osnovu za dalji razvoj i primjenu vještačke inteligencije u HVAC sistemima. Međutim, iako su rezultati obećavajući, postoji potreba za kritičkim sagledavanjem praktičnih aspekata implementacije, dugoročne pouzdanosti i šireg uticaja na održivost. Buduća istraživanja trebala bi se fokusirati na razvoj rješenja koja su ne samo tehnološki napredna već i ekonomski isplativa i skalabilna za različite tipove zgrada, s naglaskom na holistički pristup održivosti.

Na osnovu analize literature, predlaže se dizajn AI-baziranog HVAC sistema za poslovne zgrade sa višezonskim rasporedom, fokusirajući se na energetske efikasnost, termalni komfor i minimalno održavanje. Sistem bi uključivao napredne metode prikupljanja podataka, modelno prediktivnu kontrolu (MPC), mašinsko učenje i tehnologije preventivnog održavanja.

Osnovne komponente predloženog sistema

Glavna kontrolna platforma – Glavna kontrolna platforma predstavlja centralizovani sistemski čvor u okviru AI-baziranog HVAC rješenja, omogućavajući efikasno upravljanje i optimizaciju svih povezanih procesa. Platforma se oslanja na napredne algoritme vještačke inteligencije, obezbjeđujući visok nivo prilagodljivosti i preciznosti u radu. Njena arhitektura osmišljena je za simultano prikupljanje, analizu i obradu velike količine podataka u realnom vremenu, što je važno za osiguranje optimalnih performansi i energetske efikasnosti.

Osnovne funkcionalnosti glavne kontrolne platforme omogućavaju optimizaciju upravljanja energijom i komforom u zgradama kroz nekoliko glavnih oblasti. Analitika u realnom vremenu omogućava kontinuirano prikupljanje podataka sa raznovrsnih senzora raspoređenih po zgradi, koji prate informacije o temperaturi, relativnoj vlažnosti, kvalitetu vazduha, prisustvu korisnika i potrošnji energije. Pored senzorskih podataka, platforma integriše spoljašnje faktore, poput vremenskih prognoza, koje pomažu u predviđanju potreba za grijanjem, hlađenjem i ventilacijom, kao i tarifnih podataka o energiji, koji omogućavaju platformi da optimizuje potrošnju energije, koristeći je intenzivnije u periodima nižih tarifa. Svi ovi podaci se obrađuju u realnom vremenu, što omogućava platformi da automatski prilagođava rad HVAC sistema trenutnim uslovima i potrebama. Ovaj proces smanjuje energetske gubitke i obezbjeđuje optimalan komfor za korisnike.

Prediktivna analitika je još jedan važan aspekt platforme. Kroz integraciju MPC i algoritama mašinskog učenja, platforma analizira istorijske podatke kako bi predvidjela buduće potrebe sistema. MPC koristi matematičke modele za simulaciju različitih operativnih scenarija, što omogućava optimizaciju rada HVAC sistema na osnovu očekivanog termalnog

opterećenja. Algoritmi mašinskog učenja analiziraju prethodne obrasce potrošnje i ponašanja korisnika, predviđajući fluktuacije broja korisnika, sezonske promjene i dinamičke promjene u unutrašnjoj klimi. Ova sposobnost predikcije omogućava sistemu da predviđa zahtjeve i unaprijed prilagodi rad, čime se minimizuje potreba za reaktivnim prilagođavanjem koje često vodi ka većim troškovima energije.

Glavna kontrolna platforma je takođe osmišljena da se bezprijekorno povezuje sa postojećim BMS platformama. Bez obzira na starost ili tip postojećeg BMS-a, platforma omogućava lako integrisanje, čime se značajno smanjuju troškovi implementacije. Postojeće infrastrukture ne zahtijevaju obimne nadogradnje, dok nova funkcionalnost donosi poboljšanja u efikasnosti kroz naprednu analitiku i optimizaciju. Na taj način, zgrade koje već koriste BMS mogu usvojiti napredne tehnologije bez potrebe za velikim kapitalnim ulaganjima.

Korisnički interfejs platforme je intuitivan i omogućava menadžerima zgrada i tehničarima lako upravljanje i nadzor nad sistemom. Interfejs uključuje vizualizaciju podataka u realnom vremenu, koja prikazuje osnovne operativne parametre, poput unutrašnje temperature, nivoa CO₂ i potrošnje energije. Takođe, omogućava automatsko generisanje detaljnih izvještaja o energetske potrošnji, identifikaciju potencijalnih problema i prijedloge za optimizaciju. Alarmni sistemi automatski obavještavaju korisnike o detektovanim anomalijama, kvarovima ili situacijama koje zahtijevaju intervenciju. Korisnici takođe mogu ručno postaviti parametre rada za specifične zone ili koristiti unaprijed definisane operativne režime za različite scenarije, čime se omogućava visoka fleksibilnost i prilagodljivost sistema.

Prednosti glavne kontrolne platforme uključuju efikasnost i optimizaciju, jer integracijom podataka iz različitih izvora i napredne analitike platforma obezbjeđuje visok nivo energetske efikasnosti, smanjujući operativne troškove. Takođe, sistem je skalabilan i fleksibilan, dizajniran da bude prilagodljiv različitim vrstama zgrada, omogućavajući skaliranje funkcionalnosti u skladu sa rastućim potrebama. Kontinuirano praćenje i analiza performansi smanjuju potrebu za reaktivnim održavanjem, čime se povećava pouzdanost HVAC sistema. Ova platforma je bitan element za pametne zgrade koje žele da maksimiziraju svoju efikasnost i operativnu autonomiju koristeći AI tehnologije.

Senzorska mreža – Senzorska mreža je osnovni sloj za prikupljanje podataka u AI-baziranom HVAC sistemu. Ova mreža se sastoji od raznovrsnih IoT senzora koji kontinuirano prate ključne parametre unutrašnjeg i spoljašnjeg okruženja. Podaci prikupljeni sa senzora služe kao osnova za donošenje odluka, optimizaciju performansi sistema i održavanje komfora

korisnika. Vrste senzora i njihova uloga uključuju senzore za temperaturu, vlažnost i kvalitet vazduha, senzore za prisustvo korisnika, kao i senzore za potrošnju energije.

Senzori za temperaturu, vlažnost i kvalitet vazduha imaju važnu ulogu u održavanju unutrašnje mikrokline i kvalitetnog vazduha u zgradi. Praćenje temperature omogućava HVAC sistemu da precizno reaguje na promjene uslova, održavajući optimalne temperaturne postavke u različitim zonama. Mjerenje relativne vlažnosti takođe je važno jer vlažnost ima značajan uticaj na komfor korisnika i energetske potrebe sistema. Precizna kontrola vlažnosti omogućava zadržavanje prijatnog ambijenta uz minimizaciju potrošnje energije. Praćenje kvaliteta vazduha obuhvata mjerenje koncentracije ugljen-dioksida (CO₂), čime senzori omogućavaju održavanje odgovarajuće ventilacije i sprečavaju akumulaciju štetnih gasova u prostoru. Takođe, senzori za PM_{2.5} i PM₁₀ čestice detektuju prisustvo sitnih čestica prašine i drugih zagađivača u vazduhu. Na osnovu podataka, sistem može povećati ventilaciju ili aktivirati filtere za prečišćavanje vazduha.

Senzori za prisustvo korisnika detektuju prisustvo i broj korisnika u prostorijama, omogućavajući dinamičku kontrolu HVAC sistema. Infracrvena (IR) tehnologija koristi se za detekciju kretanja i prisustva osoba kroz emitovanje i detekciju infracrvenih zraka. Ultrazvučni senzori emituju zvučne talase visokih frekvencija i analiziraju refleksiju kako bi utvrdili prisustvo korisnika. Kamere sa algoritmima za obradu slike predstavljaju naprednije senzore koji koriste računarsku viziju za precizno brojanje korisnika, uz zadržavanje visokog nivoa privatnosti. Podaci sa ovih senzora omogućavaju optimizaciju potrošnje energije smanjenjem rada HVAC sistema u prostorijama koje nijesu zauzete, dok se u prostorijama sa povećanim brojem korisnika automatski povećava ventilacija i prilagođavaju temperaturne postavke.

Senzori za potrošnju energije prate potrošnju energije glavnih komponenti HVAC sistema, kao što su kompresori, ventilatori, grijači i čileri. Mjerenje potrošnje pomaže u identifikaciji energetskih gubitaka i optimizaciji rada. Podaci omogućavaju detekciju odstupanja u radu, što može ukazivati na kvar ili neefikasnost. Praćenjem potrošnje energije po komponentama, sistem identifikuje područja sa visokim energetskim troškovima i predlaže konkretne mjere za njihovu optimizaciju.

Prednosti senzorske mreže uključuju precizno praćenje u realnom vremenu, omogućavajući sistemu da brzo detektuje promjene i prilagodi rad HVAC-a kako bi se očuvala energetska efikasnost i komfor korisnika. Podaci sa senzora takođe predstavljaju osnovu za napredne algoritme optimizacije, koji omogućavaju prediktivnu analitiku i optimizaciju rada

sistema. Smanjenje troškova i potrošnje energije ostvaruje se smanjenjem rada HVAC komponenti u neiskorišćenim prostorijama i prilagođavanjem na osnovu stvarnih potreba, što dovodi do značajnih ušteda energije. Povećanje dugoročne pouzdanosti takođe je prednost, jer senzorska mreža detektuje potencijalne kvarove i odstupanja u radu, omogućavajući preventivne intervencije koje produžavaju vijek trajanja opreme.

Adaptivni HVAC podsistem – Adaptivni HVAC podsistem predstavlja značajan element AI-baziranog HVAC sistema, dizajniran da se kontinuirano prilagođava različitim operativnim uslovima, vremenskim promjenama i potrebama korisnika. Njegova arhitektura osigurava efikasno korišćenje resursa uz očuvanje visokog nivoa komfora. Komponente i funkcionalnosti ovog podsistema obuhvataju nekoliko naprednih metoda i strategija koje omogućavaju optimizaciju rada HVAC sistema. Jedna od glavnih komponenata je MPC, koja koristi matematičke modele za optimizaciju rada sistema. MPC omogućava predviđanje potreba za grijanjem, hlađenjem i ventilacijom, umjesto reaktivnog prilagođavanja. Matematički modeli na kojima MPC počiva simuliraju termičke procese u zgradi, uzimajući u obzir faktore poput toplotne mase zgrade, unutrašnjih izvora toplote (poput ljudi i opreme) i spoljašnjih klimatskih uslova. Na osnovu istorijskih podataka i trenutnih uslova, MPC predviđa buduće promjene u termalnim potrebama, što omogućava unaprijed prilagođavanje rada HVAC sistema, čime se izbegavaju nagle promjene temperature. Osim toga, MPC balansira između energetske efikasnosti i komfora korisnika, optimizujući rad HVAC komponenti kako bi se smanjila nepotrebna potrošnja energije, a istovremeno održali optimalni unutrašnji uslovi.

Prehlađivanje i predgrijavanje predstavljaju funkcionalnosti koje omogućavaju adaptivnom HVAC podsistemu da koristi povoljne vremenske i tarifne uslove za unaprijednu pripremu zgrade za promjene u termalnim zahtjevima. Prehlađivanje se primenjuje tokom noći, kada su spoljne temperature niže i cijene električne energije povoljnije, a sistem koristi ovu priliku da smanji potrebe za intenzivnim hlađenjem tokom dana. Na primjer, zgrada se unaprijed hladi do optimalnog nivoa, čime se izbjegava korišćenje energije u periodima visokih tarifa. Slično tome, pregrijavanje se primjenjuje u zimskim uslovima, kada sistem tokom noći zagrijava prostorije koristeći jeftiniju energiju, smanjujući opterećenje na HVAC sistem tokom jutarnjih sati kada je potrošnja najveća. Integracija sa podacima o cijenama električne energije omogućava dodatne uštede, jer sistem dinamički prilagođava vrijeme i intenzitet prehlađivanja ili predgrijavanja u skladu sa trenutnim tarifama.

Prilagodljivo upravljanje zonama omogućava individualno upravljanje klimatskim uslovima u različitim dijelovima zgrade, čime se postiže maksimalna fleksibilnost i efikasnost. Svaka zona zgrade može imati različite zahtjeve u pogledu temperature i ventilacije. Na primjer, prostorije koje se koriste za sastanke mogu zahtijevati niže temperature zbog veće koncentracije korisnika, dok skladišni prostori mogu imati manje rigorozne zahtjeve. Sistem koristi senzorske podatke o prisutnosti korisnika, temperaturi i vlažnosti kako bi prilagodio rad HVAC komponenti u svakoj zoni. Na taj način, prazne prostorije dobijaju minimalan nivo grijanja ili hlađenja, dok se prostorije sa velikim brojem korisnika intenzivnije klimatizuju. Ova funkcionalnost omogućava smanjenje ukupne potrošnje energije, jer se energija efikasno raspoređuje prema stvarnim potrebama.

Prednosti adaptivnog HVAC podsistema su mnogobrojne. Prvo, visoka energetska efikasnost je postignuta korišćenjem predikcije i prilagodljive kontrole, što značajno smanjuje nepotrebnu potrošnju energije. Takođe, sistem povećava komfor korisnika, jer se dinamički prilagođava njihovim potrebama, održavajući konstantne termalne i ventilacione uslove. Optimizacija troškova je još jedna značajna prednost, jer prehlađivanje i predgrijavanje omogućavaju korišćenje jeftinije energije, dok prilagodljivo upravljanje zonama smanjuje potrošnju u prostorijama koje nisu u upotrebi. Konačno, smanjenje opterećenja na komponentama sistema produžava vijek trajanja opreme i smanjuje troškove održavanja, čime se obezbjeđuje dugoročna efikasnost sistema.

Sistem za detekciju kvarova i preventivno održavanje – Sistem za detekciju kvarova i preventivno održavanje je još jedna komponenta adaptivnog HVAC sistema, osmišljena da osigura dugoročnu pouzdanost i optimalan rad svih njegovih dijelova. Kroz napredne tehnologije mašinskog učenja i uzročno-posljedične analize, sistem omogućava ranu identifikaciju potencijalnih problema i preduzimanje preventivnih mjera prije nego što dođe do ozbiljnih kvarova.

Funkcionalnosti ovog sistema uključuju hibridne modele mašinskog učenja, koji kombinuju nadzirane i nenadzirane algoritme za detekciju kvarova i anomalija u radu sistema. Nadzirani algoritmi uče na osnovu označenih istorijskih podataka o prethodnim kvarovima. Na primjer, ako su ranije zabilježeni slučajevi smanjenog protoka vazduha zbog zagušenja filtera, algoritam će prepoznati slične obrasce u budućnosti. Nenadzirani algoritmi analiziraju kontinuirane senzorske podatke kako bi identifikovali odstupanja od uobičajenog ponašanja sistema, čak i kada za te anomalije nisu dostupni prethodni podaci. Ovo omogućava otkrivanje

novih vrsta kvarova, kao što su neočekivane fluktuacije u potrošnji energije ili nepravilnosti u radu kompresora. Praktične primjene ovih modela uključuju detekciju curenja rashladnog sredstva ili neispravnosti ventilatora na osnovu promjena u temperaturi i pritisku sistema. Ovi modeli mogu u realnom vremenu identifikovati i najmanje anomalije koje mogu prerasti u ozbiljnije kvarove.

Kauzalni modeli za održavanje koriste uzročno-posljedične analize kako bi omogućili precizno identifikovanje faktora koji dovode do kvarova, čime se omogućava donošenje efikasnih preventivnih mjera. Sistem analizira podatke kako bi otkrio uzročne veze između različitih parametara, na primjer, smanjena efikasnost ventilatora može biti rezultat zagušenja filtera ili prekomjernog opterećenja motora. Prediktivna dijagnostika omogućava predviđanje kvarova prije nego što se pojave simptomi koji bi korisnici mogli primijetiti. Na primjer, povećanje temperature rashladnog fluida može ukazivati na potencijalno curenje rashladnog sredstva, omogućavajući tehničarima da pravovremeno reaguju. Na osnovu uzročno-posljedične analize, sistem predlaže najefikasnije akcije za rješavanje problema, smanjujući potrebu za nepotrebnim intervencijama.

Automatizacija održavanja omogućava automatizovano preduzimanje mjera održavanja, čime se smanjuje potreba za ljudskom intervencijom i rizik od grešaka. Kada sistem detektuje problem, automatski generiše preporuke za tehničare, kao što su čišćenje ili zamjena filtera, podešavanje ventilatora ili punjenje rashladnog sredstva. U određenim slučajevima, sistem može samostalno pokrenuti preventivne mjere. Na primjer, ako senzor detektuje zagušenje filtera, sistem automatski povećava brzinu ventilatora kako bi privremeno nadoknadio smanjeni protok vazduha dok se filter ne očisti. Takođe, na osnovu podataka o radu i starosti komponenti, sistem kreira plan preventivnog održavanja kako bi se osiguralo da sve komponente rade unutar svojih optimalnih performansi.

Prednosti sistema za detekciju kvarova i preventivno održavanje uključuju smanjenje neplaniranih zastoja, jer rano otkrivanje i rješavanje problema sprječava ozbiljnije kvarove koji bi mogli dovesti do prekida rada HVAC sistema. Takođe, smanjuje operativne troškove, jer preventivne mjere održavanja i optimizacija rada komponenti smanjuju potrebu za skupim popravkama i zamjenom dijelova. Kontinuirana kontrola i održavanje svih komponenti osiguravaju produženje vijeka trajanja opreme, bez gubitka performansi. Povećana pouzdanost sistema garantuje visoku pouzdanost HVAC operacija, što je ključno za poslovne zgrade gdje su stabilni unutrašnji uslovi od suštinskog značaja. Ovaj podsistem ne samo da optimizuje rad

HVAC sistema, već i unapređuje cjelokupno upravljanje resursima, pružajući veću sigurnost, uštede i efikasnost.

Tehnike prikupljanja podataka

Efikasan rad AI-baziranog HVAC sistema zavisi od prikupljanja, obrade i analize podataka. Tehnike prikupljanja podataka igraju važnu ulogu u omogućavanju prilagođavanja u realnom vremenu i dugoročne optimizacije rada sistema. Ove tehnike osiguravaju kontinuirani dotok relevantnih informacija iz različitih izvora kako bi se donijele pravovremene i informisane odluke.

Prikupljanje podataka sa IoT senzora – IoT senzori predstavljaju osnovni izvor podataka za HVAC sistem, pružajući neprekidno praćenje različitih parametara unutar i izvan zgrade. Osnovne funkcionalnosti senzora uključuju praćenje temperature i vlažnosti, čime se kontinuirano prikupljaju podaci o trenutnim termičkim uslovima u prostorijama i spoljašnjem okruženju. Takođe, senzori za mjerenje kvaliteta vazduha, kao što su CO₂, PM_{2.5} i PM₁₀, pružaju podatke o kvalitetu unutrašnjeg vazduha, omogućavajući sistemu da prilagodi ventilaciju prema trenutnim potrebama. Detekcija prisutnosti korisnika je takođe značajna funkcionalnost, jer IoT senzori detektuju broj i kretanje korisnika u prostoru, optimizujući rad HVAC sistema na osnovu trenutne zauzetosti prostorija. Praćenje potrošnje energije je još jedan važan aspekt, jer senzori prate potrošnju električne energije glavnih komponenti, pružajući uvid u efikasnost sistema i identifikaciju potencijalnih problema.

Prednosti kontinuiranog praćenja uključuju preciznu kontrolu u realnom vremenu, jer senzori omogućavaju brze reakcije na promjene uslova, čime se osigurava optimalan rad sistema. Takođe, IoT senzori omogućavaju fleksibilnu skalabilnost, jer se lako mogu integrisati i proširiti kako bi pokrili dodatne zone ili funkcionalnosti, čineći HVAC sistem još efikasnijim i prilagodljivijim potrebama korisnika.

Analiza istorijskih podataka – Prikupljeni podaci iz prošlosti igraju važnu ulogu u obuci i poboljšanju prediktivnih modela koji upravljaju HVAC sistemom. Izvori istorijskih podataka uključuju informacije o potrošnji energije, koje pomažu u identifikaciji obrazaca i optimizaciji potrošnje HVAC sistema u različitim vremenskim periodima. Podaci o korisničkim obrascima, kao što su prisutnost korisnika, njihove preferencije i ponašanje, omogućavaju prilagođavanje rada sistema prema specifičnim potrebama. Takođe, istorijski podaci o vremenskim uslovima, uključujući temperaturu, vlažnost i druge klimatske faktore, koriste se za predikciju budućih uslova i pripremu sistema za različite scenarije.

Primjena analize istorijskih podataka obuhvata obuku mašinskih algoritama, koji koriste ove podatke za identifikaciju obrazaca i predviđanje budućih događaja. Na primjer, na osnovu podataka o ranijim sezonskim promjenama, sistem može unaprijed prilagoditi režim rada, optimizirajući time potrošnju energije. Takođe, analiza istorijskih podataka pomaže u identifikaciji energetski intenzivnih perioda, što omogućava planiranje strategija za smanjenje potrošnje tokom perioda najvećih opterećenja.

Prednosti analize istorijskih podataka uključuju poboljšanu preciznost predikcija, jer korišćenjem velikih setova istorijskih podataka, sistem postaje sve bolji u predviđanju promjena. Na osnovu prethodnih iskustava, sistem može prilagoditi svoje strategije za efikasniji rad u budućnosti, čime se ostvaruju značajne uštede u energiji i resursima.

Kombinacija lokalne i cloud analitike – Ova tehnika kombinuje prednosti lokalne (on-premises) i cloud obrade podataka, omogućavajući optimalnu ravnotežu između brzine reakcije i dugoročne optimizacije. Lokalna obrada podataka omogućava brze reakcije, jer lokalni serveri omogućavaju momentalnu analizu ključnih podataka, kao što su trenutna temperatura, kvalitet vazduha i prisutnost korisnika. Smanjenje kašnjenja je postignuto time što se podaci obrađuju lokalno, osiguravajući da sistem brzo reaguje na promjene u realnom vremenu, poput naglog povećanja broja korisnika. Sa druge strane, cloud analitika omogućava dugoročnu analizu i skalabilnost, jer se podaci prenose u cloud platforme gdje se vrši dubinska analiza, uključujući trening složenih modela mašinskog učenja i identifikaciju dugoročnih obrazaca. Cloud platforme omogućavaju obradu i skladištenje velikih količina podataka, čime se povećava fleksibilnost sistema.

Prednosti kombinovanog pristupa uključuju optimizaciju u realnom vremenu, pri čemu lokalna obrada omogućava brzo reagovanje, dok cloud analitika pruža strateške uvide za dugoročno unapređenje sistema. Korišćenje clouda smanjuje troškove infrastrukture, jer smanjuje potrebu za opsežnim lokalnim kapacitetima, dok istovremeno omogućava pristup naprednoj analitici. Takođe, povećana pouzdanost je postignuta jer su podaci sigurno skladišteni i dostupni sa različitih lokacija, čime se smanjuje rizik od gubitka informacija ili zastoja.

Tehnike prikupljanja podataka omogućavaju kontinuirani tok informacija neophodnih za efikasan rad HVAC sistema. Kombinacija praćenja u realnom vremenu sa IoT senzora, analize istorijskih podataka i integracije lokalne i cloud analitike osigurava optimalne performanse, energetske uštede i poboljšanje korisničkog komfora.

Kako i zašto ovaj sistem obezbjeđuje maksimalnu efikasnost?

AI-bazirani HVAC sistem projektovan je da optimizuje energetske resurse, smanji operativne troškove i poveća pouzdanost, a sve to uz održavanje visokog nivoa udobnosti za korisnike. Ova efikasnost se postiže kombinacijom naprednih tehnologija, prediktivne kontrole i automatizovanih mehanizama prilagođavanja.

Prediktivna kontrola i prilagođavanje – Prediktivna kontrola koristi napredne algoritme MPC-a i mašinskog učenja kako bi predviđela buduće zahtjeve sistema i prilagodila rad unaprijed. Unaprijedno planiranje potrošnje energije omogućava sistemu da analizira istorijske podatke, trenutne senzorske unose i vremenske prognoze kako bi anticipirao promjene u termalnim zahtjevima. Na primjer, ako se očekuje porast spoljne temperature, sistem će unaprijed smanjiti rad grijača ili povećati hlađenje, čime se izbjegavaju energetske intenzivne reakcije u realnom vremenu. Dinamičko prilagođavanje omogućava sistemu da na osnovu podataka o trenutnim uslovima (npr. broj korisnika u prostoriji, unutrašnja temperatura) kontinuirano prilagođava rad HVAC komponenti. Ovo omogućava preciznu kontrolu klimatizacije, smanjujući nepotrebnu potrošnju energije. Optimizacija prema korisničkim obrascima koristi analizu obrazaca korišćenja prostorija kako bi sistem optimizovao rad u skladu sa predviđenim rasporedima zauzetosti, izbjegavajući nepotrebno grijanje ili hlađenje praznih prostorija. Prediktivna kontrola je efikasna jer eliminiše kašnjenja i nagle promjene u radu sistema, smanjujući potrošnju energije potrebnu za reaktivna prilagođavanja. Na ovaj način se minimiziraju energetske gubici i osigurava kontinuirana optimizacija.

Rano otkrivanje kvarova – Sistem za detekciju kvarova koristi napredne algoritme mašinskog učenja i uzročno-posljedične analize kako bi otkrio nepravilnosti u radu prije nego što one prouzrokuju ozbiljne kvarove. Kontinuirano praćenje performansi glavnih komponenti, poput kompresora i ventilatora, omogućava identifikaciju anomalija kao što su povećana potrošnja energije, smanjen protok vazduha ili fluktuacije temperature. Na osnovu detektovanih anomalija, sistem predlaže preventivne mjere kroz prediktivno održavanje, uključujući zamjenu filtera, punjenje rashladnog sredstva ili podešavanje ventilatora, kako bi se spriječila potpuna neispravnost. Preventivnim pristupom sistem značajno smanjuje vrijeme zastoja i prekida rada, što je od ključne važnosti za poslovne objekte gdje kontinuitet HVAC sistema direktno utiče na produktivnost i zadovoljstvo korisnika. Rano otkrivanje kvarova i prediktivno održavanje produžavaju vijek trajanja opreme, smanjujući potrebu za skupim

popravljkama i hitnim intervencijama. Ovaj pristup takođe doprinosi smanjenju troškova održavanja i operativnih zastoja, čime se osigurava dugoročna efikasnost i pouzdanost sistema.

Prehlađivanje i predgrijavanje – Sistem za prehlađivanje i predgrijavanje koristi vremenske i tarifne prognoze kako bi unaprijed prilagodio termalne uslove zgrade u periodima povoljnijih cijena energije. Tokom noći, kada su cijene električne energije niže, sistem obavlja prehlađivanje prostorija, čime smanjuje potrebu za intenzivnim hlađenjem tokom dana kada su cijene više. Slično tome, u zimskim mjesecima sistem sprovodi predgrijavanje, koristeći jeftiniju energiju tokom noći kako bi unaprijed zagrijao prostorije. Ovo značajno smanjuje opterećenje HVAC sistema tokom jutarnjih sati kada potrošnja energije naglo raste. Integracija sa podacima o tarifama električne energije omogućava optimizaciju rada sistema u skladu sa povoljnim cijenama, čime se maksimiziraju uštede. Na ovaj način, korišćenjem jeftinije energije i raspodjelom opterećenja na periodima sa nižim tarifama, sistem značajno smanjuje operativne troškove bez ugrožavanja komfora korisnika.

Ovaj AI-bazirani HVAC sistem obezbjeđuje maksimalnu efikasnost kombinovanjem prediktivne kontrole, ranog otkrivanja kvarova i optimizacije potrošnje energije. Smanjuje operativne troškove, produžava vijek trajanja opreme i osigurava visoke standarde udobnosti, što ga čini ključnim za poslovne zgrade koje teže energetskej efikasnosti i održivosti.

Sličnosti i razlike u odnosu na rješenja iz literature

Sličnosti – AI-bazirani HVAC sistem koji se ovdje predlaže, dijeli niz karakteristika sa postojećim rješenjima opisanima u relevantnoj literaturi. Ovi radovi naglašavaju značaj korišćenja naprednih tehnologija kao što su modelno prediktivna kontrola (MPC), neuronske mreže i multi-agentni sistemi za postizanje energetske efikasnosti i optimizacije resursa.

MPC istaknuta je kao važna tehnologija koja omogućava anticipaciju budućih uslova na osnovu trenutnih i istorijskih podataka. MPC optimizuje rad HVAC sistema predviđanjem termalnih zahtjeva i omogućava preciznu kontrolu u stvarnom vremenu. Predloženi sistem, kao i oni opisani u literaturi, koristi MPC za balansiranje između energetske efikasnosti i komfora korisnika, smanjujući potrošnju energije bez kompromisa po pitanju unutrašnjih klimatskih uslova.

Neuronske mreže se često koriste za složenu analizu podataka i predikciju ponašanja HVAC sistema u različitim scenarijima. Ovi modeli se obučavaju na velikim skupovima podataka, omogućavajući preciznu predikciju promjena u termalnim potrebama i

prilagođavanje sistema u stvarnom vremenu. Oba sistema koriste neuronske mreže za poboljšanje tačnosti prediktivne analitike i prilagođavanje promjenama u okruženju.

Multi-agentni sistemi omogućavaju decentralizovano upravljanje različitim komponentama HVAC sistema kroz interakciju više autonomnih agenata, čime se povećava fleksibilnost i skalabilnost. Predloženi sistem i pristupi opisani u literaturi koriste multi-agentne sisteme za koordinaciju različitih zona zgrade, omogućavajući optimizaciju potrošnje energije u skladu sa specifičnim potrebama svake zone.

Razlike – Predloženi sistem nadograđuje postojeća rješenja kroz implementaciju dodatnih metoda i tehnika koje nisu opisane u prikazanim radovima, čime se značajno poboljšavaju efikasnost i skalabilnost sistema. Jedna od osnovnih razlika je integracija kauzalnih modela koji omogućavaju identifikaciju uzročno-posljedičnih odnosa između različitih operativnih parametara sistema. Za razliku od tipičnih dijagnostičkih modela koji samo detektuju anomalije, kauzalni modeli analiziraju uzroke problema. Na primjer, ako se detektuje povećanje potrošnje energije ventilatora, kauzalni model može ukazati na zagušenje filtera kao primarni uzrok. Ova funkcionalnost omogućava proaktivno donošenje odluka, smanjujući učestalu potrebu za skupim i hitnim popravkama, dok produžava vijek trajanja sistema.

Još jedna značajna razlika je korišćenje hibridne arhitekture za obradu podataka koja kombinuje prednosti lokalne (on-premises) i cloud analitike. Obrada ključnih podataka u realnom vremenu putem lokalne analitike omogućava brze reakcije na promjene u uslovima, čime se osigurava trenutna optimizacija rada sistema. Istovremeno, dublja analiza i skladištenje podataka odvijaju se u cloud okruženju, gdje se koriste složeni algoritmi za obuku modela, dugoročno planiranje i identifikaciju obrazaca. Ova kombinacija obezbjeđuje skalabilnost, jer cloud omogućava obradu velikih količina podataka i obuku modela bez opterećenja lokalne infrastrukture, dok lokalna analitika omogućava nisku latenciju i brze reakcije.

ZAKLJUČAK

Na početku rada su postavljena tri istraživačka pitanja. Prvo istraživačko pitanje glasil je: Kako vještačka inteligencija može unaprijediti efikasnost upravljanja grijanjem, klimatizacijom i ventilacijom u pametnim zgradama? Integracija vještačke inteligencije u ove sisteme omogućava optimizaciju potrošnje energije putem analize podataka o potrošnji energije, vremenskim uslovima i unutrašnjim parametrima zgrade. Korišćenjem algoritama mašinskog učenja, vještačka inteligencija može prilagoditi HVAC sistem kako bi se minimizirala potrošnja energije uz održavanje udobnosti korisnika. Takođe, vještačka inteligencija može omogućiti prediktivno održavanje identifikujući potencijalne probleme prije njihovog pojavljivanja i prilagođavajući sistem kako bi se spriječili kvarovi. Personalizovano upravljanje postavkama HVAC sistema takođe je moguće kroz učenje preferencija korisnika, što rezultira većom udobnošću i zadovoljstvom korisnika.

Drugo istraživačko pitanje glasil je: Koje su ključne prepreke i izazovi u implementaciji sistema upravljanja grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom zasnovanih na vještačkoj inteligenciji? Implementacija sistema upravljanja grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom zasnovanih na vještačkoj inteligenciji u pametnim zgradama suočava se s nizom ključnih prepreka i izazova. Prihvatanje od strane korisnika je za uspjeh ovih sistema, budući da korisnici očekuju visok nivo kontrole nad svojim okruženjem i udobnošću. Nedostatak razumijevanja vještačke inteligencije, strah od gubitka kontrole, sigurnosne brige i nedostatak povjerenja u performanse samo su neki od izazova koji mogu otežati prihvatanje primjene vještačke inteligencije u ovim sistemima. Tehnički izazovi uključuju potrebu za preciznim senzorima, povezanošću i interoperabilnošću sistema, razvojem efikasnih algoritama učenja i optimizacijom energetske efikasnosti. Društveni i etički aspekti takođe igraju važnu ulogu, posebno u vezi s pitanjima pravednosti, privatnosti podataka i odgovornosti algoritama. Prevazilaženje ovih prepreka zahtijeva holistički pristup koji uključuje angažovanje korisnika, saradnju stručnjaka iz različitih disciplina te poštovanje etičkih principa i standarda privatnosti podataka.

Treće istraživačko pitanje glasil je: Kako novi trendovi i tehnološki napredak u vještačkoj inteligenciji mogu uticati na budućnost sistema upravljanja grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u pametnim zgradama? Napredak u vještačkoj inteligenciji obećava značajne inovacije za budućnost sistema upravljanja grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u pametnim zgradama. Razvoj naprednijih algoritama mašinskog učenja i dubokog učenja

omogućiće preciznije predviđanje potreba za grijanjem, hlađenjem i ventilacijom, što će rezultirati većom energetsom efikasnošću i udobnošću korisnika. Integracija sistema vještačke inteligencije s Internetom stvari omogućići će detaljnije analize i bolje upravljanje unutrašnjom klimom. Takođe, napredak u autonomnim sistemima omogućiće automatizaciju i autonomiju u upravljanju HVAC sistemima, što će rezultirati još većom efikasnošću i smanjenjem potrebnog nadzora. Personalizacija postavki HVAC sistema prema individualnim preferencijama korisnika uz adaptivno prilagođavanje okolini i promjenljivim uslovima takođe će biti naglašena u budućnosti.

Naučni doprinos ovog istraživanja leži u detaljnoj analizi i integraciji različitih aspekata upravljanja grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom te primjeni vještačke inteligencije u optimizaciji tih procesa. Kombinacija dubinske analize, istraživanja postojećih tehnoloških rješenja i primjene naprednih algoritama omogućiće nam da donesemo nove uvide i smjernice za dalji razvoj ove važne oblasti. Ovo istraživanje pruža temelj za dalje inovacije u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u zgradama, podstičući razvoj efikasnijih, pametnijih i održivih sistema koji će imati široku primjenu u različitim sektorima industrije.

Ograničenja ovog istraživanja obuhvataju ograničenu dostupnost podataka o konkretnim sistemima za upravljanje grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom, što može uticati na dubinu analize i preciznost zaključaka. Fokusiranje isključivo na kritički pregled postojećih praksi može ograničiti istraživanje novih pristupa ili tehnologija u ovoj oblasti. Moguća pristrasnost autora u odabiru pregledanih praksi može uticati na objektivnost zaključaka. Takođe, nedostatak eksperimentalnih potvrda može smanjiti pouzdanost rezultata, dok istraživanje trenutnog stanja može propustiti predviđanje budućih trendova ili inovacija.

Predlozi za dalje istraživanje uključuju dublju analizu specifičnih primjera primjene vještačke inteligencije u upravljanju grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom u različitim vrstama zgrada kako bi se detaljnije razumjeli izazovi i beneficije u različitim kontekstima. Takođe, istraživanje socio-ekonomskih faktora može pružiti uvid u prepreke ili podsticaje za usvajanje novih tehnologija upravljanja grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom. Dalje istraživanje bi trebalo istražiti adaptivne pristupe upravljanja grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom koji se mogu prilagoditi promjenljivim uslovima, kao što su promjene u vremenskim uslovima ili broj korisnika u zgradi. Analiza uticaja korisničkih preferencija takođe je bitna, jer može pomoći u razumijevanju kako lični prioriteti utiču na percepciju i usvajanje novih tehnologija. Sve ove oblasti istraživanja mogu doprinijeti daljem razvoju

upravljanja grijanjem, ventilacijom i klimatizacijom zasnovanog na vještačkoj inteligenciji i omogućiti implementaciju efikasnijih, udobnijih i održivijih sistema u zgradama.

LITERATURA

1. Abdel-Jaber, F., & Dirks, K. N. (2024). A Review of Cooling and Heating Loads Predictions of Residential Buildings Using Data-Driven Techniques. *Buildings*, 14(3), 752.
2. Abdolrasol, M. G., Hussain, S. S., Ustun, T. S., Sarker, M. R., Hannan, M. A., Mohamed, R., ... & Milad, A. (2021). Artificial neural networks based optimization techniques: A review. *Electronics*, 10(21), 2689.
3. Abioye, S. O., Oyedele, L. O., Akanbi, L., Ajayi, A., Delgado, J. M. D., Bilal, M., ... & Ahmed, A. (2021). Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges. *Journal of Building Engineering*, 44, 103299.
4. Abrardi, L., Cambini, C., & Rondi, L. (2022). Artificial intelligence, firms and consumer behavior: A survey. *Journal of Economic Surveys*, 36(4), 969-991.
5. Aguilar, J., Garces-Jimenez, A., Gallego-Salvador, N., De Mesa, J. A. G., Gomez-Pulido, J. M., & García-Tejedor, À. J. (2019). Autonomic management architecture for multi-HVAC systems in smart buildings. *IEEE Access*, 7, 123402-123415.
6. Aguilar, J., Garces-Jimenez, A., R-moreno, M. D., & García, R. (2021a). A systematic literature review on the use of artificial intelligence in energy self-management in smart buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111530.
7. Aguilar, J., Garcés-Jiménez, A., Gómez-Pulido, J. M., Moreno, M. D. R., De Mesa, J. A. G., & Gallego-Salvador, N. (2021b). Autonomic Management of a Building's Multi-HVAC System Start-Up. *Ieee Access*, 9, 70502-70515.
8. Afram, A., Janabi-Sharifi, F., Fung, A. S., & Raahemifar, K. (2017). Artificial neural network (ANN) based model predictive control (MPC) and optimization of HVAC systems: A state of the art review and case study of a residential HVAC system. *Energy and Buildings*, 141, 96-113.
9. Afroz, Z., Shafiullah, G. M., Urmee, T., & Higgins, G. (2018). Modeling techniques used in building HVAC control systems: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 83, 64-84.
10. Ahuja, R., Chug, A., Gupta, S., Ahuja, P., & Kohli, S. (2020). Classification and clustering algorithms of machine learning with their applications. *Nature-inspired computation in data mining and machine learning*, 225-248.

11. Al Dakheel, J., Del Pero, C., Aste, N., & Leonforte, F. (2020). Smart buildings features and key performance indicators: A review. *Sustainable Cities and Society*, 61, 102328.
12. Alanne, K., & Sierla, S. (2022). An overview of machine learning applications for smart buildings. *Sustainable Cities and Society*, 76, 103445.
13. Alawadi, S., Mera, D., Fernández-Delgado, M., Alkhabbas, F., Olsson, C. M., & Davidsson, P. (2020). A comparison of machine learning algorithms for forecasting indoor temperature in smart buildings. *Energy Systems*, 1-17.
14. Aldakheel, J., Bahrar, M., & El Mankibi, M. (2023). Indoor environmental quality evaluation of smart/artificial intelligence techniques in buildings—a review. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 396, p. 01101). EDP Sciences.
15. Anantrasirichai, N., & Bull, D. (2022). Artificial intelligence in the creative industries: a review. *Artificial intelligence review*, 1-68.
16. Andras, I., Mazzone, E., van Leeuwen, F. W., De Naeyer, G., van Oosterom, M. N., Beato, S., ... & Mottrie, A. (2020). Artificial intelligence and robotics: a combination that is changing the operating room. *World journal of urology*, 38, 2359-2366.
17. Alpaydin, E. (2020). *Introduction to machine learning*. MIT press.
18. Alpaydin, E. (2021). *Machine learning*. MIT press.
19. Ashtiani, M. N., & Raahemi, B. (2023). News-based intelligent prediction of financial markets using text mining and machine learning: A systematic literature review. *Expert Systems with Applications*, 217, 119509.
20. Attoue, N., Shahrour, I., & Younes, R. (2018). Smart building: Use of the artificial neural network approach for indoor temperature forecasting. *Energies*, 11(2), 395.
21. Awwalu, J., Garba, A. G., Ghazvini, A., & Atuah, R. (2015). Artificial intelligence in personalized medicine application of AI algorithms in solving personalized medicine problems. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 7(6), 439.
22. Azuatalam, D., Lee, W. L., de Nijs, F., & Liebman, A. (2020). Reinforcement learning for whole-building HVAC control and demand response. *Energy and AI*, 2, 100020.
23. Barroso, S., Bustos, P., & Núñez, P. (2023). Towards a cyber-physical system for sustainable and smart building: a use case for optimising water consumption on a smartcampus. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 14(5), 6379-6399.
24. Basheer, I. A., & Hajmeer, M. (2000). Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application. *Journal of microbiological methods*, 43(1), 3-31.

25. Bashir, M. B., & Alotaibi, A. A. (2020). Smart buildings Cooling and Heating Load Forecasting Models. *IJCSNS*, 20(12), 79.
26. Bécue, A., Praça, I., & Gama, J. (2021). Artificial intelligence, cyber-threats and Industry 4.0: Challenges and opportunities. *Artificial Intelligence Review*, 54(5), 3849-3886.
27. Behrooz, F., Ramli, A. R., & Samsudin, K. (2011). A survey on applying different control methods approach in building automation systems to obtain more energy efficiency. *International Journal of the Physical Sciences*, 6(9), 2308-14.
28. Benavente-Peces, C. (2019). On the energy efficiency in the next generation of smart buildings—Supporting technologies and techniques. *Energies*, 12(22), 4399.
29. Berawi, M. A., Miraj, P., Sayuti, M. S., & Berawi, A. R. B. (2017, November). Improving building performance using smart building concept: Benefit cost ratio comparison. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1903, No. 1). AIP Publishing.
30. Bird, M., Daveau, C., O'Dwyer, E., Acha, S., & Shah, N. (2022). Real-world implementation and cost of a cloud-based MPC retrofit for HVAC control systems in commercial buildings. *Energy and Buildings*, 270, 112269.
31. Borges, A. F., Laurindo, F. J., Spínola, M. M., Gonçalves, R. F., & Mattos, C. A. (2021). The strategic use of artificial intelligence in the digital era: Systematic literature review and future research directions. *International Journal of Information Management*, 57, 102225.
32. Bouabdallaoui, Y., Lafhaj, Z., Yim, P., Ducoulombier, L., & Bennadji, B. (2021). Predictive maintenance in building facilities: A machine learning-based approach. *Sensors*, 21(4), 1044.
33. Boutahri, Y., & Tilioua, A. (2024). Machine learning-based predictive model for thermal comfort and energy optimization in smart buildings. *Results in Engineering*, 22, 102148.
34. Buduma, N., Buduma, N., & Papa, J. (2022). *Fundamentals of deep learning*. O'Reilly Media, Inc.
35. Burkov, A. (2019). *The hundred-page machine learning book*. Andriy Burkov.
36. Cai, M., Ramdasalli, S., Pipattanasomporn, M., Rahman, S., Malekpour, A., & Kothandaraman, S. R. (2018). Impact of HVAC set point adjustment on energy savings and peak load reductions in buildings. In *2018 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)* (pp. 1-6). IEEE.

37. Cauchi, N., Hoque, K. A., Stoelinga, M., & Abate, A. (2018). Maintenance of smart buildings using fault trees. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 14(3-4), 1-25.
38. Chan-Olmsted, S. M. (2019). A review of artificial intelligence adoptions in the media industry. *International journal on media management*, 21(3-4), 193-215.
39. Chen, L., Chen, P., & Lin, Z. (2020). Artificial intelligence in education: A review. *Ieee Access*, 8, 75264-75278.
40. Chen, J., Zhang, L., Li, Y., Shi, Y., Gao, X., & Hu, Y. (2022). A review of computing-based automated fault detection and diagnosis of heating, ventilation and air conditioning systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112395.
41. Chenari, B., Carrilho, J. D., & da Silva, M. G. (2016). Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1426-1447.
42. Cheng, C. C., & Lee, D. (2019). Artificial intelligence-assisted heating ventilation and air conditioning control and the unmet demand for sensors: Part 1. Problem formulation and the hypothesis. *Sensors*, 19(5), 1131.
43. Chui, K. T., Lytras, M. D., & Visvizi, A. (2018). Energy sustainability in smart cities: Artificial intelligence, smart monitoring, and optimization of energy consumption. *Energies*, 11(11), 2869.
44. Ciholas, P., Lennie, A., Sadigova, P., & Such, J. M. (2019). The security of smart buildings: a systematic literature review. *arXiv preprint arXiv:1901.05837*.
45. De Blasio, G., Moreno-Díaz, A., & Moreno-Díaz, R. (2018). McCulloch's Relation to Connectionism and Artificial Intelligence. In *Computer Aided Systems Theory–EUROCAST 2017: 16th International Conference, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, February 19-24, 2017, Revised Selected Papers, Part I* 16 (pp. 41-48). Springer International Publishing.
46. De Paola, A., Ortolani, M., Lo Re, G., Anastasi, G., & Das, S. K. (2014). Intelligent management systems for energy efficiency in buildings: A survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 47(1), 1-38.
47. Degha, H. E., Laallam, F. Z., & Said, B. (2019). Intelligent context-awareness system for energy efficiency in smart building based on ontology. *Sustainable computing: informatics and systems*, 21, 212-233.

48. Du, Z., Liang, X., Chen, S., Zhu, X., Chen, K., & Jin, X. (2023). Knowledge-infused deep learning diagnosis model with self-assessment for smart management in HVAC systems. *Energy*, 263, 125969.
49. El Naqa, I., & Murphy, M. J. (2015). *What is machine learning?* Springer International Publishing.
50. Erişen, S. (2023). A Systematic Approach to Optimizing Energy-Efficient Automated Systems with Learning Models for Thermal Comfort Control in Indoor Spaces. *Buildings*, 13(7), 1824.
51. Ertel, W. (2018). *Introduction to artificial intelligence*. Springer.
52. Fan, F. L., Xiong, J., Li, M., & Wang, G. (2021). On interpretability of artificial neural networks: A survey. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*, 5(6), 741-760.
53. Farzaneh, H., Malehmirchegini, L., Bejan, A., Afolabi, T., Mulumba, A., & Daka, P. P. (2021). Artificial intelligence evolution in smart buildings for energy efficiency. *Applied Sciences*, 11(2), 763.
54. Finlay, J. (2020). *An introduction to artificial intelligence*. Crc Press.
55. Flowers, J. C. (2019). Strong and Weak AI: Deweyan Considerations. In *AAAI spring symposium: Towards conscious AI systems*, 2287(7).
56. Franki, V., Majnarić, D., & Višković, A. (2023). A comprehensive review of artificial intelligence (AI) companies in the power sector. *Energies*, 16(3), 1077.
57. Fu, H. P., Chang, T. H., Lin, S. W., Teng, Y. H., & Huang, Y. Z. (2023). Evaluation and adoption of artificial intelligence in the retail industry. *International Journal of Retail & Distribution Management*, 51(6), 773-790.
58. Gao, X., & Bian, X. (2021). Autonomous driving of vehicles based on artificial intelligence. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 41(4), 4955-4964.
59. Garcia-Gonzalez, A., Fuentes-Aguilar, R. Q., Salgado, I., & Chairez, I. (2022). A review on the application of autonomous and intelligent robotic devices in medical rehabilitation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44(9), 393.
60. Genkin, M., & McArthur, J. J. (2023). B-SMART: A reference architecture for artificially intelligent autonomic smart buildings. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 121, 106063.

61. Ghahramani, A., Galicia, P., Lehrer, D., Varghese, Z., Wang, Z., & Pandit, Y. (2020). Artificial intelligence for efficient thermal comfort systems: Requirements, current applications and future directions. *Frontiers in built environment*, 6, 49.
62. Ghofrani, A., Nazemi, S. D., & Jafari, M. A. (2019). HVAC load synchronization in smart building communities. *Sustainable Cities and Society*, 51, 101741.
63. Gholamzadehmir, M., Del Pero, C., Buffa, S., & Fedrizzi, R. (2020). Adaptive-predictive control strategy for HVAC systems in smart buildings—A review. *Sustainable Cities and Society*, 63, 102480.
64. Gibbons, L., & Javed, S. (2023). Cost-optimal analysis of energy efficient hvac solution-sets for low-energy apartment buildings. *Energy and Buildings*, 295, 113332.
65. Gomis, L. L., Fiorentini, M., & Daly, D. (2021). Potential and practical management of hybrid ventilation in buildings. *Energy and Buildings*, 231, 110597.
66. Gonsalves, T. (2019). The summers and winters of artificial intelligence. In *Advanced methodologies and technologies in artificial intelligence, computer simulation, and human-computer interaction* (pp. 168-179). IGI Global.
67. Gori, M., Betti, A., & Melacci, S. (2023). *Machine Learning: A constraint-based approach*. Elsevier.
68. Gupta, A., & Tandon, U. (2023). Emergence of AI enabled smart buildings in India: a road towards sustainable performance. *Global Knowledge, Memory and Communication*.
69. Hamdy, M., & Mauro, G. M. (2019). Optimizing hybrid ventilation control strategies toward zero-cooling energy building. *Frontiers in Built Environment*, 5, 97.
70. Haniff, M. F., Selamat, H., Yusof, R., Buyamin, S., & Ismail, F. S. (2013). Review of HVAC scheduling techniques for buildings towards energy-efficient and cost-effective operations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 94-103.
71. Hassan, M. A., & Abdelaziz, O. (2021). A novel adaptive predictive control strategy of hybrid radiant-air cooling systems in hot and dry climates. In *15Th Int. Conf. Heat Transf. Fluid* (pp. 77-84). Mech. Thermodyn.
72. Helm, J. M., Swiergosz, A. M., Haeberle, H. S., Karnuta, J. M., Schaffer, J. L., Krebs, V. E., ... & Ramkumar, P. N. (2020). Machine learning and artificial intelligence: definitions, applications, and future directions. *Current reviews in musculoskeletal medicine*, 13, 69-76.
73. Homod, R. Z., Yaseen, Z. M., Hussein, A. K., Almusaed, A., Alawi, O. A., Falah, M. W., ... & Eltaweel, M. (2023). Deep clustering of cooperative multi-agent reinforcement

- learning to optimize multi chiller HVAC systems for smart buildings energy management. *Journal of Building Engineering*, 65, 105689.
74. Hong, T., Wang, Z., Luo, X., & Zhang, W. (2020). State-of-the-art on research and applications of machine learning in the building life cycle. *Energy and Buildings*, 212, 109831.
 75. Hosamo, H. H., Nielsen, H. K., Kraniotis, D., Svennevig, P. R., & Svidt, K. (2023). Improving building occupant comfort through a digital twin approach: A Bayesian network model and predictive maintenance method. *Energy and Buildings*, 288, 112992.
 76. Hosseini Gourabpasi, A., & Nik-Bakht, M. (2021). Knowledge Discovery by Analyzing the State of the Art of Data-Driven Fault Detection and Diagnostics of Building HVAC. *CivilEng 2021*, 2, 986–1008.
 77. Howell, S., Rezgui, Y., & Beach, T. (2017). Integrating building and urban semantics to empower smart water solutions. *Automation in Construction*, 81, 434-448.
 78. Huang, J., Koroteev, D. D., & Rynkovskaya, M. (2022). Building energy management and forecasting using artificial intelligence: Advance technique. *Computers and Electrical Engineering*, 99, 107790.
 79. Huang, K., Hussain, A., Wang, Q. F., & Zhang, R. (2019). *Deep learning: fundamentals, theory and applications* (Vol. 2). Springer.
 80. Hunt, E. B. (2014). *Artificial intelligence*. Academic Press
 81. Jaakkola, H., Henno, J., Mäkelä, J., & Thalheim, B. (2019, May). Artificial intelligence yesterday, today and tomorrow. In *2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)* (pp. 860-867). IEEE.
 82. Jackson, P. C. (2019). *Introduction to artificial intelligence*. Courier Dover Publications.
 83. Jamaludin, J., Rahim, N. A., & Hew, W. P. (2009). Development of a self-tuning fuzzy logic controller for intelligent control of elevator systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22(8), 1167-1178.
 84. Jang, Y. E., Kim, Y. J., & Catalão, J. P. (2021). Optimal HVAC system operation using online learning of interconnected neural networks. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(4), 3030-3042.

85. Jia, M., Komeily, A., Wang, Y., & Srinivasan, R. S. (2019). Adopting Internet of Things for the development of smart buildings: A review of enabling technologies and applications. *Automation in Construction*, 101, 111-126.
86. Joe, J., Im, P., Cui, B., & Dong, J. (2023). Model-based predictive control of multi-zone commercial building with a lumped building modelling approach. *Energy*, 263, 125494.
87. Kamran, S. S., Haleem, A., Bahl, S., Javaid, M., Prakash, C., & Budhhi, D. (2022). Artificial intelligence and advanced materials in automotive industry: Potential applications and perspectives. *Materials Today: Proceedings*, 62, 4207-4214.
88. Karagöz, E., & Tecim, V. (2022). An integrated model and application for smart building systems with artificial intelligence. In *The Impact of Artificial Intelligence on Governance, Economics and Finance, Volume 2* (pp. 15-40). Singapore: Springer Nature Singapore.
89. Karnouskos, S. (2020). Artificial intelligence in digital media: The era of deepfakes. *IEEE Transactions on Technology and Society*, 1(3), 138-147.
90. Kazeem, K. O., Olawumi, T. O., & Osunsanmi, T. (2023). Roles of Artificial Intelligence and Machine Learning in Enhancing Construction Processes and Sustainable Communities. *Buildings*, 13(8), 2061.
91. Kelleher, J. D. (2019). *Deep learning*. MIT press.
92. Kelly, S., Kaye, S. A., & Oviedo-Trespalacios, O. (2023). What factors contribute to the acceptance of artificial intelligence? A systematic review. *Telematics and Informatics*, 77, 101925.
93. Khairuddin, M. H., Shahbudin, S., & Kassim, M. (2021, August). A smart building security system with intelligent face detection and recognition. In *Iop conference series: Materials science and engineering* (Vol. 1176, No. 1, p. 012030). IOP Publishing.
94. Khan, O., Parvez, M., Seraj, M., Yahya, Z., Devarajan, Y., & Nagappan, B. (2024). Optimising building heat load prediction using advanced control strategies and Artificial Intelligence for HVAC system. *Thermal Science and Engineering Progress*, 49, 102484.
95. King, J., & Perry, C. (2017). *Smart buildings: Using smart technology to save energy in existing buildings* (pp. 1-46). Washington, DC: American Council for an Energy-Efficient Economy.

96. Kliangkhlao, M., Haruehansapong, K., Yeranee, K., & Sahoh, B. (2024). Causal Artificial Intelligence-driven Approach for HVAC Preventive Maintenance Explanation. *IEEE Access*.
97. Korke, P., Gobinath, R., Shewale, M., & Khartode, B. (2023). Role of Artificial Intelligence in Construction Project Management. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 405, p. 04012). EDP Sciences.
98. Kotsiantis, S. B., Zaharakis, I. D., & Pintelas, P. E. (2006). Machine learning: a review of classification and combining techniques. *Artificial Intelligence Review*, 26, 159-190.
99. Kumar, A., Sharma, S., Goyal, N., Singh, A., Cheng, X., & Singh, P. (2021). Secure and energy-efficient smart building architecture with emerging technology IoT. *Computer Communications*, 176, 207-217.
100. Kunduru, A. R. (2023). Artificial intelligence advantages in cloud Fintech application security. *Central Asian Journal of Mathematical Theory and Computer Sciences*, 4(8), 48-53.
101. Kylili, A., & Fokaides, P. A. (2015). European smart cities: The role of zero energy buildings. *Sustainable cities and society*, 15, 86-95.
102. Lauritsen, S. M., Kristensen, M., Olsen, M. V., Larsen, M. S., Lauritsen, K. M., Jørgensen, M. J., ... & Thiesson, B. (2020). Explainable artificial intelligence model to predict acute critical illness from electronic health records. *Nature communications*, 11(1), 3852.
103. Lee, J. K., Lee, J., Jeong, Y. S., Sheward, H., Sanguinetti, P., Abdelmohsen, S., & Eastman, C. M. (2012). Development of space database for automated building design review systems. *Automation in Construction*, 24, 203-212.
104. Lee, D., & Chen, L. (2022). Sustainable Air-Conditioning Systems Enabled by Artificial Intelligence: Research Status, Enterprise Patent Analysis, and Future Prospects. *Sustainability*, 14(12), 7514.
105. Lee, D., & Lee, S. T. (2023). Artificial intelligence enabled energy-efficient heating, ventilation and air conditioning system: Design, analysis and necessary hardware upgrades. *Applied Thermal Engineering*, 235, 121253.
106. Lekan, A., Aigbavboa, C., & Emetere, M. (2023). Managing quality control systems in intelligence production and manufacturing in contemporary time. *International Journal of Construction Management*, 23(8), 1436-1446.
107. Li, D., & Du, Y. (2017). *Artificial intelligence with uncertainty*. CRC press.

108. Li, F., & Du, Y. (2023). Intelligent multi-zone residential HVAC control strategy based on deep reinforcement learning. In *Deep Learning for Power System Applications: Case Studies Linking Artificial Intelligence and Power Systems* (pp. 71-96). Cham: Springer International Publishing.
109. Luo, J. (2022). A bibliometric review on artificial intelligence for smart buildings. *Sustainability*, 14(16), 10230.
110. Liu, B. (2021). Weak AI" is Likely to Never Become" Strong AI", So What is its Greatest Value for us?. *arXiv preprint arXiv:2103.15294*.
111. Liu, Z., & Jiang, G. (2021). Optimization of intelligent heating ventilation air conditioning system in urban building based on BIM and artificial intelligence technology. *Computer Science and Information Systems*, 18(4), 1379-1394.
112. Llopis-Albert, C., Rubio, F., & Valero, F. (2021). Impact of digital transformation on the automotive industry. *Technological forecasting and social change*, 162, 120343.
113. Luo, J. (2022). A bibliometric review on artificial intelligence for smart buildings. *Sustainability*, 14(16), 10230.
114. Lund, H. (2014). *Renewable energy systems: a smart energy systems approach to the choice and modeling of 100% renewable solutions*. Academic Press.
115. Maxim, B. (2023). AI revolutionising customer experience through personalisation and intelligent experiences. *Journal of AI, Robotics & Workplace Automation*, 2(3), 237-245.
116. McQuiston, F. C., Parker, J. D., Spitler, J. D., & Taherian, H. (2023). *Heating, ventilating, and air conditioning: analysis and design*. John Wiley & Sons.
117. Meedeniya, D. (2023). *Deep learning: A beginners' guide*. CRC Press.
118. Mehmood, M. U., Chun, D., Han, H., Jeon, G., & Chen, K. (2019). A review of the applications of artificial intelligence and big data to buildings for energy-efficiency and a comfortable indoor living environment. *Energy and Buildings*, 202, 109383.
119. Mekni, M. (2021). An artificial intelligence based virtual assistant using conversational agents. *Journal of Software Engineering and Applications*, 14(9), 455-473.
120. Meena, M. R., Jingar, M. P., & Gupta, S. (2020). Artificial intelligence: A digital transformation tool in entertainment and media industry. *Our Heritage*, 68(1), 4661-4675.

121. Merabet, G. H., Essaaidi, M., Haddou, M. B., Qolomany, B., Qadir, J., Anan, M., ... & Benhaddou, D. (2021). Intelligent building control systems for thermal comfort and energy-efficiency: A systematic review of artificial intelligence-assisted techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 110969.
122. Metallidou, C. K., Psannis, K. E., & Egyptiadou, E. A. (2020). Energy efficiency in smart buildings: IoT approaches. *IEEE Access*, 8, 63679-63699.
123. Minoli, D., Sohraby, K., & Occhiogrosso, B. (2017). IoT considerations, requirements, and architectures for smart buildings—Energy optimization and next-generation building management systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(1), 269-283.
124. Mirnaghi, M. S., & Haghighat, F. (2020). Fault detection and diagnosis of large-scale HVAC systems in buildings using data-driven methods: A comprehensive review. *Energy and Buildings*, 229, 110492.
125. Mohan, M., Chetty, R. K., Azeem, K. M., Vishal, P., Poornasai, B., & Sriram, V. (2021). Modelling and simulation of autonomous indoor robotic wastebin in webots for waste management in smart buildings. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1012, No. 1, p. 012022). IOP Publishing.
126. Mohanty, B., & Mishra, S. (2023). Role of Artificial Intelligence in Financial Fraud Detection. *Academy of Marketing Studies Journal*, 27(S4).
127. Moor, J. (2006). The Dartmouth College artificial intelligence conference: The next fifty years. *Ai Magazine*, 27(4), 87-87.
128. Muggleton, S. (2014). Alan Turing and the development of Artificial Intelligence. *AI communications*, 27(1), 3-10.
129. Muthukrishnan, N., Maleki, F., Ovens, K., Reinhold, C., Forghani, B., & Forghani, R. (2020). Brief history of artificial intelligence. *Neuroimaging Clinics*, 30(4), 393-399.
130. Mylrea, M., & Gourisetti, S. N. G. (2017). Cybersecurity and optimization in smart “autonomous” buildings. *Autonomy and Artificial Intelligence: A Threat or Savior?*, 263-294.
131. Naidu, D. S., & Rieger, C. G. (2011). Advanced control strategies for HVAC&R systems—An overview: Part II: Soft and fusion control. *Hvac&R Research*, 17(2), 144-158.
132. Nalbant, K. G. (2021). The importance of artificial intelligence in education: a short review. *Journal of Review in science and engineering*, 2021, 1-15.

133. Natale, S., & Ballatore, A. (2020). Imagining the thinking machine: Technological myths and the rise of artificial intelligence. *Convergence*, 26(1), 3-18.
134. Ngarambe, J., Yun, G. Y., & Santamouris, M. (2020). The use of artificial intelligence (AI) methods in the prediction of thermal comfort in buildings: Energy implications of AI-based thermal comfort controls. *Energy and Buildings*, 211, 109807.
135. Noreen, U., Shafique, A., Ahmed, Z., & Ashfaq, M. (2023). Banking 4.0: Artificial intelligence (AI) in banking industry & consumer's perspective. *Sustainability*, 15(4), 3682.
136. Nwagwu, U., Niaz, M., Chukwu, M. U., & Saddique, F. (2023). The influence of artificial intelligence to enhancing supply chain performance under the mediating significance of supply chain collaboration in manufacturing and logistics organizations in Pakistan. *Traditional Journal of Multidisciplinary Sciences*, 1(02), 29-40.
137. Nwakanma, C. I., Ahakonye, L. A. C., Njoku, J. N., Odirichukwu, J. C., Okolie, S. A., Uzundu, C., ... & Kim, D. S. (2023). Explainable artificial intelligence (xai) for intrusion detection and mitigation in intelligent connected vehicles: A review. *Applied Sciences*, 13(3), 1252.
138. Olama, M. M., Kuruganti, T., Nutaro, J., & Dong, J. (2018). Coordination and control of building HVAC systems to provide frequency regulation to the electric grid. *Energies*, 11(7), 1852.
139. Oprach, S., Bolduan, T., Steuer, D., Vössing, M., & Haghsheno, S. (2019). Building the future of the construction industry through artificial intelligence and platform thinking. *Digitale Welt*, 3, 40-44.
140. Osipov, V., Zhukova, N., Subbotin, A., Glebovskiy, P., & Evnevich, E. (2022). Intelligent escalator passenger safety management. *Scientific reports*, 12(1), 5506.
141. Ozbay, F. A., & Alatas, B. (2020). Fake news detection within online social media using supervised artificial intelligence algorithms. *Physica A: statistical mechanics and its applications*, 540, 123174.
142. Ożadowicz, A. (2017). A new concept of active demand side management for energy efficient prosumer microgrids with smart building technologies. *Energies*, 10(11), 1771.
143. Palermo, S. A., Maiolo, M., Brusco, A. C., Turco, M., Pirouz, B., Greco, E., ... & Piro, P. (2022). Smart technologies for water resource management: An overview. *Sensors*, 22(16), 6225.

144. Pallathadka, H., Ramirez-Asis, E. H., Loli-Poma, T. P., Kaliyaperumal, K., Ventayen, R. J. M., & Naved, M. (2023). Applications of artificial intelligence in business management, e-commerce and finance. *Materials Today: Proceedings*, 80, 2610-2613.
145. Panchalingam, R., & Chan, K. C. (2021). A state-of-the-art review on artificial intelligence for Smart Buildings. *Intelligent Buildings International*, 13(4), 203-226.
146. Park, S., Park, S. H., Park, L. W., Park, S., Lee, S., Lee, T., ... & Park, S. (2018). Design and implementation of a smart IoT based building and town disaster management system in smart city infrastructure. *Applied Sciences*, 8(11), 2239.
147. Peng, Y., Lei, Y., Tekler, Z. D., Antanuri, N., Lau, S. K., & Chong, A. (2022). Hybrid system controls of natural ventilation and HVAC in mixed-mode buildings: A comprehensive review. *Energy and Buildings*, 276, 112509.
148. Prince, S. J. (2023). *Understanding deep learning*. MIT press.
149. Raco, F., Balzani, M., Planu, F., & Cittadino, A. (2022). Inspire project: Integrated technologies for smart buildings and predictive maintenance. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48, 127-133.
150. Rahmani, A. M., Rezazadeh, B., Haghparsat, M., Chang, W. C., & Ting, S. G. (2023). Applications of artificial intelligence in the economy, including applications in stock trading, market analysis, and risk management. *IEEE Access*.
151. Richey Jr, R. G., Chowdhury, S., Davis-Sramek, B., Giannakis, M., & Dwivedi, Y. K. (2023). Artificial intelligence in logistics and supply chain management: A primer and roadmap for research. *Journal of Business Logistics*, 44(4), 532-549.
152. Robyns, B., Dobigny, L., Abbes, D., Durillon, B., Barry, H., & Saudemont, C. (2024). *Smart Grids and Buildings for Energy and Societal Transition*. John Wiley & Sons.
153. Rocha, P., Siddiqui, A., & Stadler, M. (2015). Improving energy efficiency via smart building energy management systems: A comparison with policy measures. *Energy and Buildings*, 88, 203-213.
154. Russell, S. J., & Norvig, P. (2010). *Artificial intelligence a modern approach*. London.
155. Saeed, F., Paul, A., Rehman, A., Hong, W. H., & Seo, H. (2018). IoT-based intelligent modeling of smart home environment for fire prevention and safety. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 7(1), 11.

156. Saleem, S., Ali, M. S., Kanwal, K., & Almas, A. (2024). A artificial intelligence-based energy management system for energy-efficient buildings. *Conference: International Conference of Mechanical Engineering, IMEC-2024*. NED UET Karachi
157. Satrio, P., Mahlia, T. M. I., Giannetti, N., & Saito, K. (2019). Optimization of HVAC system energy consumption in a building using artificial neural network and multi-objective genetic algorithm. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 35, 48-57.
158. Schmelas, M., Feldmann, T., Wellnitz, P., & Bollin, E. (2016). Adaptive predictive control of thermo-active building systems (TABS) based on a multiple regression algorithm: First practical test. *Energy and Buildings*, 129, 367-377.
159. Schmelas, M., Feldmann, T., & Bollin, E. (2017). Savings through the use of adaptive predictive control of thermo-active building systems (TABS): A case study. *Applied Energy*, 199, 294-309.
160. Secinaro, S., Calandra, D., Secinaro, A., Muthurangu, V., & Biancone, P. (2021). The role of artificial intelligence in healthcare: a structured literature review. *BMC medical informatics and decision making*, 21, 1-23.
161. Sejnowski, T. J. (2020). The unreasonable effectiveness of deep learning in artificial intelligence. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(48), 30033-30038.
162. Selvam, M. S., Kalaivanan, C., Jain, M. R., Puyalnithi, T., & Gothania, J. (2021). Artificial intelligence based cooling system for managing the energy efficiency. *The journal of contemporary issues in business and government*, 27(1), 1649-1659.
163. Serrano, W. (2022). iBuilding: artificial intelligence in intelligent buildings. *Neural Computing and Applications*, 34(2), 875-897.
164. Sleem, A., & Elhenawy, I. (2023). Survey of Artificial Intelligence of Things for Smart Buildings: A closer outlook. *Journal of Intelligent Systems & Internet of Things*, 8(2).
165. Serale, G., Fiorentini, M., Capozzoli, A., Bernardini, D., & Bemporad, A. (2018). Model predictive control (MPC) for enhancing building and HVAC system energy efficiency: Problem formulation, applications and opportunities. *Energies*, 11(3), 631
166. Shahsavar, M. M., Akrami, M., Gheibi, M., Kavianpour, B., Fathollahi-Fard, A. M., & Behzadian, K. (2021). Constructing a smart framework for supplying the biogas

- energy in green buildings using an integration of response surface methodology, artificial intelligence and petri net modelling. *Energy Conversion and Management*, 248, 114794.
167. Sharma, U., Tomar, P., Bhardwaj, H., & Sakalle, A. (2021). Artificial intelligence and its implications in education. In *Impact of AI Technologies on Teaching, Learning, and Research in Higher Education* (pp. 222-235). IGI Global.
 168. Shukla, S., & Hait, S. (2022). Smart waste management practices in smart cities: Current trends and future perspectives. In *Advanced organic waste management* (pp. 407-424). Elsevier.
 169. Siikonen, M. L. (1997). *Elevator group control with artificial intelligence*. Helsinki University of Technology.
 170. Singh, T., Solanki, A., & Sharma, S. K. (2021). Role of smart buildings in smart city—components, technology, indicators, challenges, future research opportunities. *Digital cities roadmap: IoT-based architecture and sustainable buildings*, 449-476.
 171. Sinopoli, J. M. (2009). *Smart buildings systems for architects, owners and builders*. Butterworth-Heinemann.
 172. Sleem, A., & Elhenawy, I. (2023). Survey of Artificial Intelligence of Things for Smart Buildings: A closer outlook. *Journal of Intelligent Systems & Internet of Things*, 8(2).
 173. Stanfill, M. H., & Marc, D. T. (2019). Health information management: implications of artificial intelligence on healthcare data and information management. *Yearbook of medical informatics*, 28(01), 056-064.
 174. Sugarman, S. C. (2020). *HVAC fundamentals*. River Publishers.
 175. Szilagyi, I., & Wira, P. (2018). An intelligent system for smart buildings using machine learning and semantic technologies: A hybrid data-knowledge approach. In *2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)* (pp. 20-25). IEEE.
 176. Taddy, M. (2018). The technological elements of artificial intelligence. In *The economics of artificial intelligence: An agenda* (pp. 61-87). University of Chicago Press.
 177. Taheri, S., Hosseini, P., & Razban, A. (2022). Model predictive control of heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems: A state-of-the-art review. *Journal of Building Engineering*, 105067.

178. Thakur, N., Nagrath, P., Jain, R., Saini, D., Sharma, N., & Hemanth, D. J. (2021). Artificial intelligence techniques in smart cities surveillance using UAVs: A survey. *Machine Intelligence and Data Analytics for Sustainable Future Smart Cities*, 329-353.
179. Tushar, W., Wijerathne, N., Li, W. T., Yuen, C., Poor, H. V., Saha, T. K., & Wood, K. L. (2018). Internet of things for green building management: disruptive innovations through low-cost sensor technology and artificial intelligence. *IEEE Signal Processing Magazine*, 35(5), 100-110.
180. van Assen, M., Muscogiuri, E., Tessarin, G., & De Cecco, C. N. (2022). Artificial Intelligence: A Century-Old Story. In *Artificial Intelligence in Cardiothoracic Imaging* (pp. 3-13). Cham: Springer International Publishing.
181. Vasudevan, S. K., Pulari, S. R., & Vasudevan, S. (2021). *Deep learning: a comprehensive guide*. Chapman and Hall/CRC.
182. Vattano, S. (2014). Smart buildings for a sustainable development. *Journal of Economics World*, 2, 310-324.
183. Vijayan, D. S., Rose, A. L., Arvindan, S., Revathy, J., & Amuthadevi, C. (2020). Automation systems in smart buildings: a review. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 1-13.
184. Uddin, M. N., Lee, M., & Ni, M. (2023). The impact of socio-demographic factors on occupants' thermal comfort and sensation: An integrated approach using statistical analysis and agent-based modeling. *Building and Environment*, 246, 110974.
185. Qolomany, B., Al-Fuqaha, A., Gupta, A., Benhaddou, D., Alwajidi, S., Qadir, J., & Fong, A. C. (2019). Leveraging machine learning and big data for smart buildings: A comprehensive survey. *IEEE Access*, 7, 90316-90356.
186. Wang, Z., & Srinivasan, R. S. (2017). A review of artificial intelligence based building energy use prediction: Contrasting the capabilities of single and ensemble prediction models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 796-808.
187. Wang, H., Wang, S., & Tang, R. (2019). Development of grid-responsive buildings: Opportunities, challenges, capabilities and applications of HVAC systems in non-residential buildings in providing ancillary services by fast demand responses to smart grids. *Applied Energy*, 250, 697-712.
188. Wang, H., Xu, P., Sha, H., Gu, J., Xiao, T., Yang, Y., & Zhang, D. (2022). BIM-based automated design for HVAC system of office buildings—An experimental study. *Building Simulation*, 15(7), 1177-1192.

189. Wendzel, S., Tonejc, J., Kaur, J., & Kobekova, A. (2017). Cyber security of smart buildings. *Security and Privacy in Cyber-Physical Systems: Foundations, Principles and Applications*, 327-351.
190. Wenya, W. A. N. G. (2020). Research on the Application of BIM Technology in HVAC Design. *智能建筑与工程机械*, 2(12), 32-33.
191. Xie, X., Ramakrishna, S., & Manganelli, M. (2022). Smart Building Technologies in Response to COVID-19. *Energies*, 15(15), 5488.
192. Xu, Z., Guan, X., Jia, Q. S., Wu, J., Wang, D., & Chen, S. (2012). Performance analysis and comparison on energy storage devices for smart building energy management. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4), 2136-2147.
193. Yaïci, W., Krishnamurthy, K., Entchev, E., & Longo, M. (2020). Internet of things for power and energy systems applications in buildings: An overview. In *2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)* (pp. 1-6). IEEE.
194. Yang, T., Clements-Croome, D., & Marson, M. (2017). Building energy management systems. *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, 36, 291-309.
195. Yao, Y., & Shekhar, D. K. (2021). State of the art review on model predictive control (MPC) in Heating Ventilation and Air-conditioning (HVAC) field. *Building and Environment*, 200, 107952.
196. Yayla, A., Świerczewska, K. S., Kaya, M., Karaca, B., Arayici, Y., Ayözen, Y. E., & Tokdemir, O. B. (2022). Artificial intelligence (AI)-based occupant-centric heating ventilation and air conditioning (HVAC) control system for multi-zone commercial buildings. *Sustainability*, 14(23), 16107.
197. Yu, D., Abhari, A., Fung, A. S., Raahemifar, K., & Mohammadi, F. (2018). Predicting indoor temperature from smart thermostat and weather forecast data. In *Proceedings of the Communications and Networking Symposium* (pp. 1-12).
198. Yu, L., Qin, S., Zhang, M., Shen, C., Jiang, T., & Guan, X. (2021). A review of deep reinforcement learning for smart building energy management. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(15), 12046-12063.
199. Yu, L., Sun, Y., Xu, Z., Shen, C., Yue, D., Jiang, T., & Guan, X. (2020). Multi-agent deep reinforcement learning for HVAC control in commercial buildings. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(1), 407-419.

200. Yussuf, R. O., & Asfour, O. S. (2024). Applications of artificial intelligence for energy efficiency throughout the building lifecycle: An overview. *Energy and Buildings*, 113903.
201. Zhai, Z. J. (2022). *Energy Efficient Buildings: Fundamentals of Building Science and Thermal Systems*. John Wiley & Sons.
202. Zhang, A., Lipton, Z. C., Li, M., & Smola, A. J. (2023). *Dive into deep learning*. Cambridge University Press.
203. Zhang, D., Shah, N., & Papageorgiou, L. G. (2013). Efficient energy consumption and operation management in a smart building with microgrid. *Energy Conversion and management*, 74, 209-222.
204. Zhang, S., Ocioń, P., Klemeš, J. J., Michorczyk, P., Pielichowska, K., & Pielichowski, K. (2022). Renewable energy systems for building heating, cooling and electricity production with thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 165, 112560.
205. Zhao, Y., Li, T., Zhang, X., & Zhang, C. (2019). Artificial intelligence-based fault detection and diagnosis methods for building energy systems: Advantages, challenges and the future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 85-101.
206. Zhao, T., Qu, Z., Liu, C., & Li, K. (2021). BIM-based analysis of energy efficiency design of building thermal system and HVAC system based on GB50189-2015 in China. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 16(4), 1277-1289.
207. Zhou, S. L., Shah, A. A., Leung, P. K., Zhu, X., & Liao, Q. (2023). A Comprehensive Review of the Applications of Machine Learning for HVAC. *DeCarbon*, 100023.
208. Zhuang, D., Gan, V. J., Tekler, Z. D., Chong, A., Tian, S., & Shi, X. (2023a). Data-driven predictive control for smart HVAC system in IoT-integrated buildings with time-series forecasting and reinforcement learning. *Applied Energy*, 338, 120936.
209. Zhuang, D., Gan, V. J., Tekler, Z. D., Chong, A., Tian, S., & Shi, X. (2023b). Data-driven predictive control for smart HVAC system in IoT-integrated buildings with time-series forecasting and reinforcement learning. *Applied Energy*, 338, 120936.