



UNIVERZITET U NIŠU  
MAŠINSKI FAKULTET U NIŠU



**Marko G. Ignjatović**

**ENERGETSKE PERFORMANSE KLIMATIZOVANIH OBJEKATA  
NA BAZI KRATKOROČNE VREMENSKE PROGNOZE**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Niš, 2018.



UNIVERSITY OF NIŠ  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING IN NIŠ



**Marko G. Ignjatović**

**ENERGY PERFORMANCE OF AIR CONDITIONED BUILDINGS  
BASED ON SHORT-TERM WEATHER FORECAST**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2018.

*Zahvalnost,*

*Rad na doktorskoj disertaciji, pored toga što zahteva izuzetan angažman pojedinca, podrazumeva i ogromnu podršku porodice, prijatelja i kolega i zbog toga bih želeo da se svakom od njih pojedinačno zahvalim.*

*Zahvaljujem se svom profesoru i mentoru dr Bratislavu Blagojeviću na izuzetnoj podršci, koja je počela tokom studija, i koja nesmanjenim intenzitetom traje i danas, a posebno na pomoći, ohrabrenju i usmeravanju pri realizaciji istraživanja koje je rezultiralo i ovom disertacijom.*

*Zahvaljujem se profesorima dr Branislavu Stojanoviću i dr Dejanu Mitroviću, kao i dr Aleksandru Anđelkoviću na veoma korisnim savetima i pruženoj podršci prilikom izrade disertacije.*

*Izuzetnu zahvalnost dugujem dr Mirku Stojiljkoviću na nesebičnoj pomoći prilikom realizacije numeričkih istraživanja, posebno u domenu optimizacije.*

*Posebnu zahvalnost dugujem kompaniji „Feniks BB“ Niš i svim zaposlenim u njoj na strpljenju, pristupu i pomoći prilikom realizacije eksperimentalnih istraživanja, a naročito dr Bratislavu Blagojeviću, kolegama inženjerima Radanu Krstiću i Ljubinku Pavloviću, i Ivanu Ignjatoviću.*

*Posebnu zahvalnost dugujem i Republičkom hidrometeorološkom zavodu Srbije na dostavljanju neophodnih klimatskih podataka za realizaciju istraživanja, posebno Zoranu Vasiljeviću i Milanu Petrovu, obojici iz meteorološke opservatorije Niš.*

*Mojoj majci Slavici, ocu Gavrilu i bratu Filipu hvala za ljubav, veru i podršku tokom celog života.*

*Saška, Sofija i Petre, hvala vam za безусловnu ljubav, radost, razumevanje i motivaciju da završim započeto. Vi ste bili moj vetar u leđa.*

**Mentor:**

Dr Bratislav Blagojević, redovni profesor

Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet u Nišu

Uža naučna oblast: Termotehnika, termoenergetika i procesna tehnika

**Naslov:**

## **Energetske performanse klimatizovanih objekata na bazi kratkoročne vremenske prognoze**

**Rezime**

Danas su najsofisticiranije numeričke metode za izračunavanje potrošnje energije u objektima (zgradama) implementirane u simulacione alate za predikciju energetske performansi. Jedan od načina da se u postojećim zgradama napravi bolji balans potrošnje energije i toplotnog komfora jeste u simulacijom podržanom radu izvedenih sistema grejanja i klimatizacije. Simulacijom podržan rad podrazumeva da se poznavanjem budućih uslova kojima će zgrada biti izložena, definišu radni parametri sistema koji će rezultovati u zadovoljenu postavljenih, često kontradiktornih, ciljeva. Kao najuticajni uslovi koji utiču na potrošnju energije u zgradi su klimatski uslovi i očekivanja korisnika. Ostvarivanje postavljenih ciljeva se postiže primenom metoda optimizacije odnosno izradom optimalnih dnevnih strategija rada sistema grejanja i klimatizacije. U ovoj doktorskoj disertaciji je izložena metodologija izrade dnevnih operativnih strategija rada sistema grejanja i klimatizacije. Metodologija se zasniva na korišćenju detaljnog simulacionog alata EnergyPlus, podataka koji su dostupni u kratkoročnim vremenskim prognozama, globalne analize osetljivosti i za potrebe ovog istraživanja razvijenog softverskog rešenja. Softversko rešenje implementira metodu optimizacije rojevima čestica, u vidu pomerajućeg horizonta planiranja (optimizacije) kojim se mogu uključiti podaci sadržani u kratkoročnoj vremenskoj prognozi, pri čemu se izračunavanja vrše simulacionim alatom. Globalnom analizom osetljivosti sa simulacionim alatom predviđeno je smanjenje broja nezavisno promenljivih u postupku optimizacije. Metodologija je primenjena na realnoj poslovno-proizvodnoj zgradi u Nišu. Definisana je funkcija cilja u istraživanju: minimalna potrošnja energije u zgradi uz zadovoljenje ograničenja na strani toplotnog komfora u kancelarijskom delu zgrade. Horizont planiranja je usvojen u trajanju od dva dana, pri čemu se rezultati implementiraju u zgradi samo u prvom danu. Postupak se ponavlja za svaki naredni horizont planiranja. Rezultati metodologije su



eksperimentalno verifikovani u samoj zgradi. Rezultati pokazuju da se primenom metodologije značajno poboljšava toplotni komfor u većini prostorija, pri čemu se troši više energije, u poređenju sa uobičajenim radom sistema, pa je moguće određivati balans između potrošnje energije sa jedne i toplotnog komfora sa druge strane. Primena analize osetljivosti kao prvog koraka u izradi operativnih strategija je pokazala da se sa smanjenim brojem nezavisno promenljivih u postupku optimizacije dobijaju slične vrednosti toplotnog komfora i potrošnje energije. Kako se istraživanje odnosilo na postojeću zgradu izvršena je kalibrisana simulacija kako bi model zgrade dobro oponašao realnu zgradu.

**Ključne reči:** detaljne energetske simulacije zgrada; optimizacija radnih parametara; sistemi grejanja i klimatizacije; toplotni komfor; energetska efikasnost; EnergyPlus

**Naučna oblast:** Tehničko-tehnološke nauke

**Naučna disciplina:** Termotehnika, termoenergetika i procesna tehnika

**UDK:** 697:551.509.31:[004.94:728(043.3)]

**CERIF Klasifikacija:** T200

**Tip licence:** CC BY-NC-ND

**Doctoral supervisor:**

Dr Bratislav Blagojević, full professor

University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering in Niš

Scientific discipline: Thermal and process engineering

**Title of Doctoral Dissertation:**

# **Energy performance of air conditioned buildings based on short-term weather forecast**

## **Abstract**

Today, most sophisticated numerical methods for predicting building energy consumption are implemented in building energy performance simulation tools. One of the possible ways to improve balance between building energy consumption and occupant thermal comfort in existing buildings is to use simulation-assisted operation of HVAC systems. Simulation-assisted operation can be formulated as a type of operation that implements knowledge of future disturbance acting on the building and that enables operating the systems in such a way to fulfill given goals, which in nature can often be contradictory. The most important future conditions on building energy consumption are weather parameters and occupant behavior and expectations of thermal environment. In order to achieve this type of operation, optimization methods must be applied, i.e. optimal daily operation strategies must be defined for HVAC systems. Methodology to create HVAC system operation strategies on a daily basis is presented in this doctoral dissertation. Methodology is based on using building energy performance simulation software EnergyPlus, data available in short-term weather forecasts, global sensitivity analysis, and for the purpose of this research, developed software. The developed software includes particle swarm optimization method, applied over the moving horizon (planning horizon) thus enabling the use of short-term weather forecasts, with necessary calculations being performed by the chosen simulation tool. Global sensitivity analysis, also performed with the same tool, is used in order to reduce number of input variables for the optimization process. The methodology is applied to real combined-type building in Niš. Objective function of the research is to reduce building energy consumption while satisfying constraints set on thermal comfort in one part of the building. Planning horizon is set to two days, while the resulting strategies are being implemented only on the first day of this horizon. The process repeats for every new planning horizon. The results of the methodology are experimentally verified in real building.

The results show that applying this methodology leads to improvement in thermal comfort in most of the premises by using more energy, compared to usual building operation, so it offers a possibility to balance between building energy consumption and thermal comfort. Use of sensitivity analysis as a first step in determining daily building operation strategies, showed that the reduced number of input variables for the optimization would lead to similar thermal comfort and building energy consumption. Since the research was performed for the real building, building energy model calibration was performed in order to make model accurately reproduce the behavior of the real building.

**Keywords:** building energy performance simulation; operation optimization; heating and air conditioning systems; thermal comfort; energy efficiency; EnergyPlus

**Scientific field:** Engineering sciences and technology

**Scientific discipline:** Thermal and process engineering

**UDC:** 697:551.509.31:[004.94:728(043.3)]

**CERIF Classification:** T200

**Creative common licence:** CC BY-NC-ND

## Sadržaj

Rezime.....	i
Abstract.....	iii
Spisak slika.....	viii
Spisak tabela.....	xi
1. Uvod.....	1
2. Stanje problema.....	5
2.1. Simulacije energetske performansi novoprojektovanih i postojećih objekata.....	5
2.1.1. Kalibrisana simulacija .....	8
2.1.2. Analiza osetljivosti .....	12
2.2. Alati za simulaciju energetske performansi objekata .....	14
2.2.1. EnergyPlus.....	14
2.2.2. eQUEST.....	16
2.2.3. ESP-r.....	16
2.2.4. TRNSYS.....	16
2.2.5. IES <VE> .....	17
2.2.6. Pomoćni alati u simulaciji energetske performansi zgrada.....	17
2.3. Unapređenje energetske performansi postojećih objekata simulacijom podržanim radom KGH sistema .....	21
2.3.1. Upravljanje sistemima KGH i mogućnosti modeliranja detaljnim simulacionim alatima.. .....	25
2.4. Klimatski podaci za simulaciju energetske performansi.....	30
2.4.1. Kratkoročne vremenske prognoze .....	34
2.5. Pregled literature .....	36
2.5.1. Simulacije energetske performansi novoprojektovanih i postojećih objekata .....	36
2.5.2. Kalibrisana simulacija .....	38
2.5.3. Analiza osetljivosti .....	41

2.5.4. Unapređenje energetske performansi postojećih objekata simulacijom podržanim radom sistema KGH.....	43
2.5.5. Predikcija klimatskih promjenljivih i kratkoročne vremenske prognoze .....	52
2.6. Presek stanja problema .....	54
3. Simulacije energetske performansi objekata .....	56
3.1. Izbor detaljnog simulacionog alata i njegove osnovne karakteristike.....	58
3.1.1. Programski jezik Erl .....	62
3.1.2. Matematički modeli toplotnog komfora u simulacionom alatu.....	65
3.1.3. Ograničenja pri korišćenju EnergyPlus-a .....	70
3.2. Kalibracija detaljnog simulacionog modela .....	71
3.2.1. Postupak kreiranja aktuelne meteorološke godine .....	72
3.3. Globalna analiza osetljivosti .....	75
3.4. Određivanje dnevnih operativnih strategija na bazi kratkoročne vremenske prognoze.....	83
3.4.1. Kratkoročne vremenske prognoze za simulacije energetske performansi .....	85
3.4.2. Optimizacioni algoritam i funkcija cilja .....	86
3.4.3. Kratak opis razvijenog softverskog rešenja za određivanje operativnih strategija.....	89
3.5. Određivanje dnevnih operativnih strategija na osnovu rezultata analize osetljivosti .....	91
4. Primena metodologije na postojećoj zgradi .....	93
4.1. Opis zgrade i osnovne karakteristike izvedenih sistema grejanja i klimatizacije .....	93
4.2. Kalibracija simulacionog modela .....	102
4.2.1. Kreiranje inicijalnog modela realne zgrade .....	103
4.2.2. Termička istorija modela .....	112
4.2.3. Kalibracija modela razvijenim optimizacionim algoritmom.....	112
4.3. Izrada dnevnih operativnih strategija na osnovu kratkoročne vremenske prognoze.....	115
4.4. Izrada dnevnih operativnih strategija na osnovu rezultata analize osetljivosti .....	118
5. Analiza i diskusija rezultata primenjene metodologije .....	122
5.1. Rezultati kalibrisane simulacije.....	122

5.2. Rezultati implementacije dnevnih operativnih strategija na osnovu kratkoročne vremenske prognoze .....	125
5.3. Rezultati primene dnevnih operativnih strategija nakon primenjene analizi osetljivosti.....	131
6. Zaključci.....	152
Literatura .....	154
Biografija autora .....	166

## Spisak slika

<b>Slika 2.1.</b> Energetski tokovi u zgradi .....	5
<b>Slika 2.2.</b> Algoritam sprovođenja analize osetljivosti u sprezi sa dinamičkim simulacionim alatima .....	13
<b>Slika 2.3.</b> Modularna struktura EnergyPlus .....	15
<b>Slika 2.4.</b> Postupak kreiranja parametarske studije jEPlus-om .....	18
<b>Slika 2.5.</b> Povezivanje sa simulacionim alatom i postupak optimizacije sa GenOpt-om.....	19
<b>Slika 2.6.</b> Simulacijom podržan rad sistema u zgradi .....	23
<b>Slika 2.7.</b> Klasifikacija metoda upravljanja .....	26
<b>Slika 2.8.</b> MPC primena u zgradama .....	28
<b>Slika 2.9.</b> Uslovi komfora i mogući scenariji evolucije unutrašnje temperature .....	48
<b>Slika 3.1.</b> Šematski prikaz metodologije određivanja energetskih performansi postojećih objekata.....	57
<b>Slika 3.2.</b> Šematski prikaz EnergyPlus simulacionog alata .....	59
<b>Slika 3.3.</b> Toplotni bilans sa unutrašnje i spoljašnje strane konstrukcije .....	59
<b>Slika 3.4.</b> Sekvencijalna simulacija – odnos strane potreba i strane isporuka .....	60
<b>Slika 3.5.</b> Šema simultanog rešavanja.....	61
<b>Slika 3.6.</b> Alternativne vrednosti ulaznih promenljivih u EnergyPlus-u.....	61
<b>Slika 3.7.</b> Opšti tok simulacije i mesta za pozivanje u EMS.....	63
<b>Slika 3.8.</b> Sekvenca jednog vremenskog koraka sa mestima za pozivanje iz EMS .....	64
<b>Slika 3.9.</b> Kriva regulacije temperature napojne vode u f-ji temperature spoljašnjeg vazduha .....	65
<b>Slika 3.10.</b> Zavisnost PPD indeksa od PMV indeksa komfora .....	69
<b>Slika 3.11.</b> Isporučena energija za grejanje zgradi za različite dužine vremenskih koraka .....	70
<b>Slika 3.12.</b> Određivanje termičke istorije modela .....	71
<b>Slika 3.13.</b> Klimatski podaci koji se beleže u automatskoj meteorološkoj stanici - Opservatorija Niš .....	73
<b>Slika 3.14.</b> Klimatski podaci osrednjeni na satnom nivou i prevedeni u lokalno vreme .....	74
<b>Slika 3.15.</b> Ulazna datoteka za klimatski pretprocesor EnergyPlus-a .....	74
<b>Slika 3.16.</b> Klimatska datoteka u formatu podržanom za simulaciju u EnergyPlus .....	75
<b>Slika 3.17.</b> Monte Carlo analiza osetljivosti sa detaljnim simulacionim alatom .....	76
<b>Slika 3.18.</b> Uzorak generisan u Simlab-u .....	78
<b>Slika 3.19.</b> Uzorak oblika koji omogućava pokretanje parametarskog pretprocesora EnergyPlus-a.....	78

<b>Slika 3.20.</b> Ulazna datoteka za analizu osetljivosti .....	79
<b>Slika 3.21.</b> Pokretanje analize osetljivosti sa eksterno eveluiranim modelom u Simlab .....	79
<b>Slika 3.22.</b> Osetljivost potrošnje energije na promene u termofizičkim svojstvima omotača .....	82
<b>Slika 3.23.</b> Osetljivost potrošnje energije i funkcije TCF na promene u parametrima sistema KGH.....	82
<b>Slika 3.24.</b> Pomerajući horizont optimizacije .....	84
<b>Slika 3.25.</b> Proces optimizacije .....	85
<b>Slika 3.26.</b> Podela horizonta planiranja u blokove.....	85
<b>Slika 3.27.</b> Pomerajući horizont optimizacije sa analizom osetljivosti.....	92
<b>Slika 3.28.</b> Postupak optimizacije nakon sprovođenja analize osetljivosti .....	92
<b>Slika 4.1.</b> Satelitski snimak FBB zgrade i lokacija u odnosu na centar Niša .....	93
<b>Slika 4.2.</b> Izgled FBB zgrade .....	94
<b>Slika 4.3.</b> Osnova prizemlja FBB zgrade .....	96
<b>Slika 4.4.</b> Osnova sprata FBB zgrade.....	96
<b>Slika 4.5.</b> Dispozicija kanalske mreže u kancelarijskom delu FBB zgrade .....	97
<b>Slika 4.6.</b> Hidraulična šema snabdevanja toplotnom energijom FBB zgrade .....	99
<b>Slika 4.7.</b> Signali i statusi kontrolera u podstanici FBB zgrade.....	100
<b>Slika 4.8.</b> Merenja na klima komori.....	101
<b>Slika 4.9.</b> Dodatna merenja unutrašnjih temperatura za potrebe kalibracije modela .....	101
<b>Slika 4.10.</b> Izgled fasada u modelu .....	103
<b>Slika 4.11.</b> Zone modela u prizemlju i spratu .....	104
<b>Slika 4.12.</b> Šematski prikaz cirkulacije tople vode u sistemu grejanja .....	106
<b>Slika 4.13.</b> Šematski prikaz cirkulacije hladne vode u sistemu hlađenja.....	106
<b>Slika 4.14.</b> Šematski prikaz sistema klimatizacije .....	106
<b>Slika 4.15.</b> Šematski prikaz kalorifera i ventilator konvektora.....	107
<b>Slika 4.16.</b> Profil korišćenje sistema osvetljenja po pojedinim delovima objekta.....	111
<b>Slika 4.17.</b> Termička istorija modela FBB zgrade .....	112
<b>Slika 4.18.</b> Razlike u temperaturi spoljašnjeg vazduha iz tipične meteorološke godine i 2016. godine.....	113
<b>Slika 5.1.</b> Promena PMV indeksa komfora primenom optimalne dnevne strategije .....	126
<b>Slika 5.2.</b> Energija predata radijatorom 06.04.2017. u prostoriji Direktor.....	126



<b>Slika 5.3.</b> Upoređenje simulirane i izmerene temperature u Hodniku galerije .....	127
<b>Slika 5.4.</b> Upoređenje simulirane i izmerene relativne vlažnosti u Hodniku galerije .....	127
<b>Slika 5.5.</b> Upoređenje simulirane i izmerene temperature u Direktor.....	128
<b>Slika 5.6.</b> Upoređenje simulirane i izmerene relativne vlažnosti u Direktor .....	128
<b>Slika 5.7.</b> Upoređenje simulirane i izmerene temperature u kancelarija 4.....	129
<b>Slika 5.8.</b> Upoređenje simulirane i izmerene temperature u kancelarija 5.....	129
<b>Slika 5.9.</b> Upoređenje simulirane i izmerene potrošnje toplotne energije u klima komori.....	130
<b>Slika 5.10.</b> Deo projektnog protoka i temperatura pripremljenog vazduha ostvareni na klima komori .....	130
<b>Slika 5.11.</b> Upoređenje dnevne izmerene i simulirane potrošnje toplotne energije u FBB zgradi.....	132
<b>Slika 5.12.</b> Promena spoljne temperature u analiziranom periodu.....	132
<b>Slika 5.13.</b> Promena PMV indeksa, postojeće stanje, 06–10.02.2017. ....	133
<b>Slika 5.14.</b> Promena PMV indeksa, postojeće stanje, 13–17.02.2017. ....	133
<b>Slika 5.15.</b> Promena PMV indeksa sa punim brojem promenljivih, 06–10.02.2017, $\epsilon=0.5$ .....	134
<b>Slika 5.16.</b> Promena PMV indeksa sa punim brojem promenljivih, 13–17.02.2017, $\epsilon=0.5$ .....	135
<b>Slika 5.17.</b> Promena PMV indeksa sa punim brojem promenljivih, 06–10.02.2017, $\epsilon=0.7$ .....	135
<b>Slika 5.18.</b> Promena PMV indeksa sa punim brojem promenljivih, 13–17.02.2017, $\epsilon=0.7$ .....	136
<b>Slika 5.19.</b> Promena PMV indeksa nakon redukcije broja promenljivih, 06–10.02.2017, $\epsilon=0.5$ .....	141
<b>Slika 5.20.</b> Promena PMV indeksa nakon redukcije broja promenljivih, 13–17.02.2017, $\epsilon=0.5$ .....	141
<b>Slika 5.21.</b> Promena PMV indeksa u kancelariji 4, 06–17. 2. 2017, $\epsilon=0.5$ .....	142
<b>Slika 5.22.</b> Promena PMV indeksa u kancelariji direktora, 06–17.02.2017, $\epsilon=0.5$ .....	142
<b>Slika 5.23.</b> Upoređenje potrošnje toplotne energije zgrade i korekcije temperature napojne vode za $\epsilon=0.5$	143
<b>Slika 5.24.</b> Upoređenje potrošnje toplotne energije u klima komori i protoka vazduha za $\epsilon=0.5$ .....	143
<b>Slika 5.25.</b> Promena PMV indeksa nakon redukcije broja promenljivih, 06–10.02.2017, $\epsilon=0.7$ .....	144
<b>Slika 5.26.</b> Promena PMV indeksa nakon redukcije broja promenljivih, 13–17.02.2017, $\epsilon=0.7$ .....	144
<b>Slika 5.27.</b> Promena PMV indeksa u kancelariji 5, 06–17.02.2017, $\epsilon=0.7$ .....	145
<b>Slika 5.28.</b> Promena PMV indeksa u kancelariji direktora, 06–17.02.2017, $\epsilon=0.7$ .....	145
<b>Slika 5.29.</b> Upoređenje potrošnje toplotne energije zgrade i korekcije temperature napojne vode za $\epsilon=0.7$	146
<b>Slika 5.30.</b> Upoređenje potrošnje toplotne energije u klima komori i protoka vazduha za $\epsilon=0.7$ .....	146

## Spisak tabela

<b>Tabela 2.1.</b> Vrednosti kriterijuma kalibracije u različitim vremenskim rezolucijama .....	10
<b>Tabela 2.2.</b> Upoređenje tipova modela.....	25
<b>Tabela 2.3.</b> Težinski koeficijenti pojedinih dnevnih indeksa za TMY, TMY2 i TMY3 .....	32
<b>Tabela 2.4.</b> Postupak rangiranja pojedinih meseci za dobijanje TRY .....	33
<b>Tabela 2.5.</b> Upoređenje karakteristika prognostičkih modela .....	35
<b>Tabela 4.1.</b> Sastav i karakteristike spoljnog zida SZ1 .....	94
<b>Tabela 4.2.</b> Sastav i karakteristike spoljnog zida SZ2 .....	95
<b>Tabela 4.3.</b> Sastav i karakteristike spoljnog zida SZ3 .....	95
<b>Tabela 4.4.</b> Sastav i karakteristike kosog krova K1.....	95
<b>Tabela 4.5.</b> Sastav i karakteristike poda na tlu na bazi mirkoarmiranog betona PT1 .....	95
<b>Tabela 4.6.</b> Sastav i karakteristike poda na tlu na bazi ferobetona PT2 .....	95
<b>Tabela 4.7.</b> Karakteristike najzastupljenijih providnih pregrada spoljnog omotača objekta.....	95
<b>Tabela 4.8.</b> Unutrašnje projektne temperature u pojedinim prostorijama i karakteristike ugrađene opreme .	98
<b>Tabela 4.9.</b> Protoci vazduha po pojedinačnim zonama, broj i karakteristike distributivnih elemenata.....	98
<b>Tabela 4.10.</b> Instalisana snaga sistema osvetljenja po prostorijama FBB zgrade.....	102
<b>Tabela 4.11.</b> Broj izmena vazduha usled infiltracije $n_{inf}$ u inicijalnom modelu .....	105
<b>Tabela 4.12.</b> Karakteristike kalorifera i klima komore u inicijalnom modelu.....	107
<b>Tabela 4.13.</b> Karakteristike sistema osvetljenja u inicijalnom modelu .....	110
<b>Tabela 4.14.</b> Podaci inicijalnog modela koji se odnose na ljude .....	111
<b>Tabela 4.15.</b> Promene brzine strujanja u zoni boravka u funkciji protoka na distributivnom elementu .....	118
<b>Tabela 4.16.</b> Funkcije raspodele verovatnoće, opseg i inicijalne vrednosti ulaznih promenljivih .....	120
<b>Tabela 5.1.</b> Kriterijumi kalibracije u časovnoj rezoluciji .....	122
<b>Tabela 5.2.</b> Kriterijumi kalibracije u dnevnoj i nedeljnoj rezoluciji.....	123
<b>Tabela 5.3.</b> Optimalne vrednosti kalibrisanih veličina modela .....	123
<b>Tabela 5.4.</b> Optimalne vrednosti na bazi kratkoročne vremenske prognoze .....	125
<b>Tabela 5.5.</b> MBE i CV(RMSE) za vreme implementacije strategije.....	131
<b>Tabela 5.6.</b> Rezultati analize osetljivosti, 06–10.02.2017, $\varepsilon=0.5$ .....	137
<b>Tabela 5.7.</b> Rezultati analize osetljivosti, 13–17.02.2017, $\varepsilon=0.5$ .....	139

<b>Tabela 5.8.</b> Rezultati analize osetljivosti, 06–10.02.2017, $\varepsilon=0.7$ .....	147
<b>Tabela 5.9.</b> Rezultati analize osetljivosti, 13–17.02.2017, $\varepsilon=0.7$ .....	149

# 1. Uvod

Permanentno unapređenje energetske performansi građevinskih objekata (zgrada) predstavlja jedan od ključnih izazova XXI veka. Evropska unija (EU) je da bi ostvarila zacrtani cilj od 20% smanjenja potrošnje energije, 20% smanjenja emisija gasova sa efektom staklene bašte i 20% proizvodnje primarne energije iz obnovljivih izvora, što je u široj javnosti poznato kao 20-20-20 cilj, usvojila direktive kojima se deluje na ispunjavanje jednog ili više elemenata cilja. Sektor zgradarstva (koji uključuje sve tipove zgrada) je posebno važan jer podaci pokazuju da se skoro 40% finalne energije [1] na teritoriji EU koristi u ovom sektoru. Iz ovog razloga je sektoru zgradarstva posvećena posebna pažnja donošenjem čitavog niza direktiva [2-4] kojima se definišu minimalne energetske performanse zgrada, zahtevi prilikom izgradnje novih ili rekonstrukcije postojećih zgrada, ali i postupci izračunavanja energetske performansi. Slična situacija je u ostalim razvijenim delovima sveta, ali i u Republici Srbiji, u kojoj je usvojen niz zakonskih i podzakonskih akata kako bi se približila ostvarenju 20-20-20 cilja. Stvoren je zakonski okvir kojim se prepoznaje potreba da je neophodno izračunati potrebnu energiju za funkcionisanje zgrade pre izgradnje ili rekonstrukcije. Nažalost, sva izračunavanja koja su zakonski neophodna za dobijanje građevinskih i drugih dozvola, trenutno su zasnovana na vrlo jednostavnim metodama u kojima nije prepoznata dinamika energetske tokova u zgradi, koji su veoma kompleksni. Neophodna su tačna predviđanja energetske performansi, ali i brz način da se pouzdano evaluiraju moguća i alternativna projektna rešenja. Rešenje se nalazi u korišćenju detaljnih simulacionih alata energetske performansi zgrada (simulacioni alati), koji sadrže numeričke metode za predikciju ponašanja zgrade kada je ista izložena različitim poremećajima spolja (klimatski uslovi) i unutra (očekivanja korisnika, način korišćenja zgrade i sistema i njihov uticaj na samu zgradu). Ovim alatima se za različita geografska područja mogu i definisati i proveriti različiti arhitektonski koncepti, različite konstrukcije koje će biti korišćene pri izgradnji, različiti tipovi sistema klimatizacije, grejanja i hlađenja (KGH), a u poslednje vreme i različite operativne strategije korišćenja i rada isprojektovanih sistema, odnosno različiti načini upravljanja sistemima u zgradi.

Simulacioni alati se intenzivno koriste i za određivanje i unapređenje energetske performansi postojećih zgrada. Za razliku od novoprojektovanih, gde ne postoji mogućnost provere rezultata simulacije pre izgradnje i puštanja u rad, kod postojećih zgrada su uglavnom dostupni podaci o potrošnji energije na nivou godine, sezone, meseca (kod visokoefikasnih i pametnih zgrada i na svaki sat ili češće), pa je potrebno da se simulirane i realno izmerene energetske performanse dobro poklapaju. Ovo je problem kalibracije simulacije, i predstavlja prvi korak u korišćenju detaljnih

simulacionih alata u istraživanjima koja se tiču energetske performansi postojećih zgrada, ili drugih fenomena u zgradama koji indirektno utiču na potrošnju energije.

Postavljene ciljeve u sektoru zgradarstva treba sagledavati i kroz činjenicu da u savremenom dobu sve veći broj ljudi sve duže boravi u zatvorenom prostoru, pa je u zgradama potrebno obezbediti zadovoljavajuće uslove komfora (toplotnog, vizuelnog, akustičnog) i kvaliteta unutrašnje sredine za minimalni utrošak energije. Ovo su dva često kontradiktorna cilja, pa je neophodno u svakom trenutku imati mogućnost balansa između potrošnje energije sa jedne strane i toplotnog komfora sa druge. Simulacioni alati se koriste i u ovakvim istraživanjima, tačnije služe da se njima odrede operativne strategije rada i korišćenje sistema KGH kojima će biti zadovoljena oba cilja istovremeno, u najvećoj mogućoj meri. Značaj korišćenja simulacionih alata za predikciju energetske performansi je odavno prepoznat, o čemu svedoči veliki broj naučnih radova iz te oblasti, međutim zaostaje se u njihovoj intenzivnoj i široj primeni u redovnoj inženjerskoj praksi.

Pored klasičnih mera povećanja energetske efikasnosti (poboljšanje termofizičkih svojstava omotača, ugradnja efikasnijih sistema i komponenata sistema KGH itd.) i korišćenja obnovljivih izvora energije (OIE) koje je neophodno implementirati pri izgradnji novih odnosno rekonstrukciji postojećih zgrada, na povećanje energetske efikasnosti u postojećim zgradama se može uticati i optimalnim radom izvedenih sistema ukoliko postoje sistemi za merenje, centralnu regulaciju i upravljanje. Ovo se može postići dodavanjem simulacionog alata unutar kruga upravljanja u realnom vremenu, i eksternom optimizacijom i kreiranjem optimalnih dnevnih operativnih strategija. Da bi se iskoristio pun potencijal simulacionih alata, neophodno je poznavanje budućih vrednosti parametara od kojih zavisi potrošnja energije u zgradi među kojima su najznačajniji klimatski podaci, redovno sadržani u kratkoročnim vremenskim prognozama. Kako se kratkoročne vremenske prognoze izrađuju u diskretnim intervalima sa rezultatima za svega nekoliko dana unapred, potrebno je iznova rešavati definisani optimizacioni problem sa novim ulaznim podacima, što se postiže primenom pomerajućeg horizonta optimizacije, pri čemu se do tad nađena optimalna rešenja implementiraju ili u realnoj zgradi ili postaju deo termičke istorije modela, a čitav postupak se kontinualno ponavlja za svaki sledeći horizont. Kako postoji veliki broj nezavisno promenljivih u postupku optimizacije, a korišćenje simulacionih alata zahteva intenzivno korišćenje računarskih resursa, potrebno je izvršiti ili uprošćavanje modela zgrade prelaskom na prostije modele ili redukciju broja nezavisno promenljivih uz zadržavanje postojećeg modela. U literaturi dominira prvi pristup.

U ovoj doktorskoj disertaciji definisana je metodologija kojom je moguće na dnevnom nivou određivati energetske performanse postojećih zgrada na takav način da se troši najmanje moguće energije za željeni nivo toplotnog komfora, optimalnim radom raspoloživih sistema grejanja i

klimatizacije, a sve to na bazi kratkoročne vremenske prognoze. Prikazana je i mogućnost primene globalne analize osetljivosti kako bi se smanjio broj nezavisno promenljivih u postupku optimizacije. Za potrebe metodologije razvijeno je softversko rešenje oko modela realne zgrade kreiranog detaljnim simulacionim alatom, kojim je moguće na bazi prognoziranih klimatskih uslova optimizovati rad sistema tako da se troši najmanje energije za željeni nivo toplotnog komfora. Celokupna metodologija ne zahteva intervencije na već izvedenim sistemima grejanja i klimatizacije niti na postojećem centralnom sistemu automatskog upravljanja i regulacije. Adekvatnim izborom simulacionog alata i načinom modeliranja zgrade i sistema moguće je iskoristiti merenja koja su trenutno raspoloživa u zgradi ili koja bi naknadno bila realizovana.

Definisana metodologija je ilustrovana na primeru određivanja dnevnih operativnih strategija realne zgrade sa izvedenim sistemima grejanja i klimatizacije. Model realne zgrade je kreiran detaljnim simulacionim alatom EnergyPlus i prikazan je ceo postupak kalibracije merenjima realizovanim u zgradi i sistemima grejanja i klimatizacije. Usvojen je pristup sa pomerajućim periodom optimizacije koji je rešavan metodom optimizacije sa rojevima čestica (en. PSO, *Particle Swarm Optimization*). Dobijeni rezultati su pokazali da se ovakvom metodologijom može održavati toplotni komfor ljudi koji borave u prostorijama, uz povećanu potrošnju energije u odnosu na postojeće stanje koje ne daje zadovoljavajući nivo toplotnog komfora. Za redukciju broja nezavisno promenljivih korišćena je Monte Carlo analiza osetljivosti kao prvi korak u izradi operativnih strategija. Pristup sa redukcijom broja nezavisno promenljivih je dao slične rezultate u pogledu toplotnog komfora i potrošnje energije u odnosu na pristup sa punim brojem nezavisno promenljivih. Korišćeni klimatski podaci su sadržani u kratkoročnim vremenskim prognozama koje izdaje Republički Hidrometeorološki Zavod Srbije.

Ostatak ove disertacije je podeljen na sledeća poglavlja: stanje problema (poglavljje 2), simulacije energetske performansi objekata (poglavljje 3), primena metodologije na realnoj zgradi (poglavljje 4), analiza i diskusija rezultata primenjene metodologije (poglavljje 5) i zaključci (poglavljje 6).

U drugom poglavljju prikazana je podela metoda predikcije energetske performansi zgrada, pristupi modeliranju, potreba za kalibracijom postojećih zgrada. Opisana je analiza osetljivosti kojom se određuju ulazne promenljive na čije su promene rezultati simulacija najosetljiviji. Izvršena je analiza najčešće korišćenih simulacionih alata. Izvršena je i podela metoda upravljanja radom termotehničkih sistema sa posebnim osvrtom na metode u kojima se mogu koristiti detaljni simulacioni modeli zgrada i optimizacija sa pomerajućim horizontom. Pregled literature je fokusiran na naučne radove u kojima su u nekom delu istraživanja korišćeni detaljni simulacioni alati. Posebno mesto zauzima pregled radova sa unapređenjem energetske performansi postojećih objekata simulacijom podržanim radom sistema KGH.

U trećem poglavlju je predstavljena metodologija određivanja dnevnih operativnih strategija sa pomerajućim horizontom optimizacije na bazi kratkoročne vremenske prognoze kao i postupak redukcije broja nezavisno promenljivih analizom osetljivosti sa detaljnim simulacionim alatom. Kao simulacioni alat je izabran EnergyPlus i navedene su osnovne prednosti i ograničenja pri njegovom korišćenju. Detaljno je opisan postupak kreiranja aktuelne meteorološke godine klimatskim podacima iz najbliže meteorološke stanice ili podacima izmerenim na lokaciji objekta. Prikazan je matematički model globalne analize osetljivosti i optimizacije rojevima čestica i predstavljeno je razvijeno softversko rešenje za izradu dnevnih strategija.

U četvrtom poglavlju je definisan primer realne zgrada sa sistemima grejanja i klimatizacije na kome je demonstrirana primena razvijene metodologija. Prikazani su: postupak kreiranja inicijalnog modela zgrade, merenja koja se mogu koristiti u postupku kalibracije modela, postupak kalibracije, postupak dobijanja dnevnih operativnih strategija sa definisanom funkcijom cilja, i postupak sa redukcijom broja nezavisno promenljivih primenom analize osetljivosti sa detaljnim simulacionim alatom. Prikazani su najvažniji ulazni parametri, pristup modeliranju sa izabranim simulacionim alatom i mogućnosti za izbor funkcije cilja.

U petom poglavlju su prikazani rezultati primene metodologije na primeru realne zgrade. Prikazani su: rezultati kalibracije modela, rezultati implementacije dnevnih operativnih strategija sa kratkoročnom vremenskom prognozom, kao i rezultati primenjene analize osetljivosti kao prvog koraka u izradi operativnih strategija. Upoređenja su vršena sa uobičajenim radom sistema u realnoj zgradi.

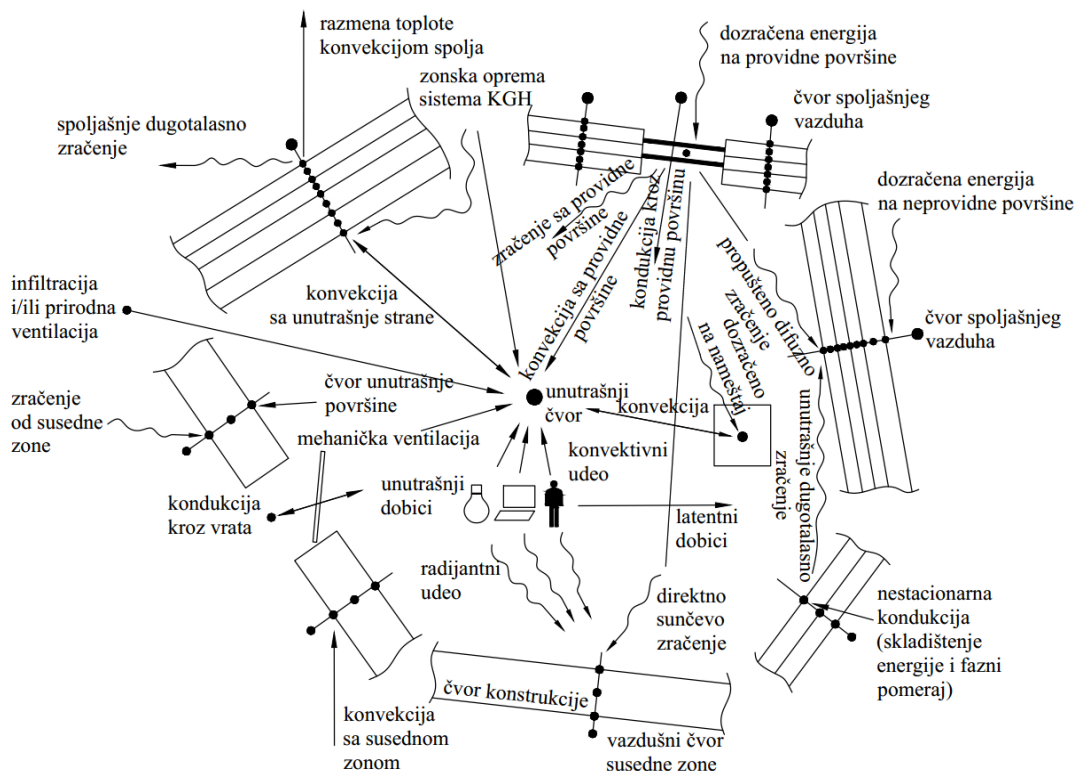
U poslednjem poglavlju su sumirani osnovni zaključci kao i potencijalni pravci budućih istraživanja.

## 2. Stanje problema

### 2.1. Simulacije energetske performansi novoprojektovanih i postojećih objekata

Energetske performanse građevinskih objekata (zgrada) predstavljaju izračunatu ili izmerenu energiju, potrebnu za zadovoljenje energetske potrebe zgrade povezanu sa njenim uobičajenim korišćenjem, a što uključuje energiju za potrebe grejanja, hlađenja, ventilacije, pripreme sanitarne tople vode i osvetljenja [2]. Minimalni zahtevi u pogledu energetske performansi se propisuju za: nove objekte koji se grade; postojeće objekte i delove objekata koji podležu rekonstrukciji; elemente omotača postojećih objekata prilikom njihove zamene ili rekonstrukcije, tehničke sisteme koji opslužuju objekat kao i njihove sastavne komponente.

Izračunavanje energije potrebne za zadovoljenje potreba zgrade je standardizovan postupak, posmatrano sa stanovišta pravne regulative jedne zemlje (uključujući i Republiku Srbiju [5]), kojim se dokazuje ispunjenost minimalnih zahteva u pogledu energetske performansi. Dobijeni rezultati, u većini slučajeva i važećih nacionalnih propisa, ne odslikavaju dovoljno detaljno dinamičku prirodu energetske tokova koji postoje u samoj zgradi. Na slici 2.1. su prikazane sve komponente koje treba uzeti u razmatranje prilikom toplotnog i masenog bilansiranja stanja vazduha u prostoriji, kako bi se odredila energija koja se razmenjuje sa okolinom.



Slika 2.1. Energetski tokovi u zgradi [6]



Počev od energetske krize 70-ih godina XX veka i ubrzanim razvojem računarskih tehnologija razvijale su se i metode za izračunavanje i predikciju energetske performansi objekata, počev od najjednostavnijih metoda kao npr. metoda stepen-dana, do veoma sofisticiranih numeričkih metoda implementiranih u najsavremenije simulacione alate za predikciju energetske performansi zgrada (en. *BEPS, building energy performance simulation software*). U osnovnoj literaturi [7-9], sve metode predikcije mogu biti:

- stacionarne,
- kvazi-stacionarne,
- dinamičke.

Pristup modeliranju može biti:

- modeliranje unapred ili
- modeliranje vođeno podacima.

Kod stacionarnih metoda se polazi od pretpostavke da ne postoji skladištenje energije u vremenskom periodu i temperaturnim uslovima koji se razmatraju. Ove metode su zasnovane na trenutnim ili vremenski osrednjenim razlikama temperatura između kondicioniranog objekta/zona/prostora i spoljašnje sredine, pa su samim tim validne kada se sva svojstva (termofizička svojstva omotača zgrade) mogu smatrati konstantnim za posmatrane granične uslove. Metode iz ove grupe nalaze primenu za predikciju sezonskih potreba za energijom (sve varijante metode stepen-dana- sa konstantnom ili promenljivom osnovom za izračunavanje potrebne energije za grejanje i potrebne energije za hlađenje; metoda toplotno opterećenje-temperaturna razlika; BIN metoda i modifikovana BIN metoda i dr.) i u današnje vreme [10].

Kvazi-stacionarnim metodama se pokušava opisati dinamika, tj. nestacionarno ponašanje objekta pretpostavljajući da u proračunskom koraku, koji najčešće iznosi jedan sat, zgrada i sistemi koji je opslužuju ostaju na srednjoj temperaturi izračunatoj za taj korak (različiti delovi i sistemi mogu imati različite temperature u konkretnom koraku/satu proračuna), dok u sledećem koraku mogu biti i na drugom temperaturnom nivou. U ovim metodama se opisuje i nestacionarnost uzrokovana klimatskim uslovima, prisustvom ljudi i njihovim ponašanjem, načinom rada sistema kao i skladištenjem i odavanjem energije, tj. postoji vremenska zavisnost u jednačinama razmene toplote.

Jedna od osnovnih prednosti dinamičkih metoda u odnosu na stacionarne je mogućnost tačnijeg predstavljanja vremenski promenljivog načina rada sistema kao i promene u kapacitetu i efikasnosti komponenata. Korak proračuna kod dinamičkih metoda je manji od jednog sata čime se valjano reprezentuje kontinualna promena u vremenu stanja u samog zgradi (u njenim pojedinačnim zonama), ali i sistema KGH.

Svaki matematički model predstavlja opis ponašanja sistema i sastoji se od:

- ulaznih promenljivih,
- jednačina i nejednačina kojima se opisuje sistem i njegovi parametri,
- izlaznih promenljivih kojima se definiše reakcija sistema na ulazne promenljive (potrebe za energijom, parametri unutrašnjeg vazduha, parametri nosioca energije itd.).

Kod modeliranja unapred je cilj da se predvide izlazne promenljive modela sistema poznate strukture i svojstava na osnovu definisanih ulaznih promenljivih. Osnovna prednost ovakvog pristupa je što nije potrebno napraviti sistem koji se modelira, pa je idealan za korišćenje u fazama preliminarnog projektovanja i u fazi analize. Prevedeno na modeliranje energetskih performansi zgrada, modeliranje unapred počinje fizičkim opisom objekta, sistema ili komponenata sumiranih u sledećim fazama:

- geometrija zgrade,
- lokacija zgrade, tačnije klimatski podaci lokacije,
- fizička svojstva konstrukcija (sastavni slojevi zidova, debljine slojeva, termofizička svojstva slojeva itd.),
- tip i osnovne karakteristike sistema KGH (centralni sistem radijatorskog grejanja ili dvokanalni sistem klimatizacije, kapacitet grejnih tela na referentnim uslovima, protok vazduha sistema klimatizacije, karakteristike pojedinih sekcija klima-komora i sl.),
- tip, kapacitet i raspored korišćenja unutrašnjih aparata i uređaja,
- broj ljudi po pojedinim zonama (profil korišćenja) i nivo fizičke aktivnosti,
- tip i osnovne karakteristike sistema za proizvodnju energije (vrsta i kapacitet kotla, efikasnost na različitim opterećenjima, kapacitet rashladne mašine, koeficijent hlađenja pri različitim uslovima i sl.).

Modeli najpoznatijih i najzastupljenijih alata (EnergyPlus [11], TRNSYS [12], ESP-r [13]) koji se koriste za simulaciju energetskih performansi zgrada su zasnovani na modeliranju unapred.

Kod modeliranja vođenog podacima su ulazne i izlazne promenljive poznate (podaci su dobijeni merenjem na samom objektu npr.), a cilj ovakvog postupka modeliranja je da se definiše matematički opis sistema i odrede parametri sistema. Ovim pristupom se identifikuju modeli koji su prostiji za korišćenje (u poređenju sa modelima dobijenih modeliranja unapred) i znatno brži za izračunavanje.

Modeliranje i simulacija energetskih performansi zgrada predstavlja značajnu tehniku za predikciju ponašanja kompleksnih sistema zasnovanu na nizu fizičkih zakona, tj. na zakonima konzervacije energije i mase, II zakonu termodinamike itd. Samim tim, simulacijama je omogućeno da se u

diskretnim vremenskim intervalima (od par minuta do 1h), za celu kalendarsku godinu rešavaju jednačine toplotnog bilansa na bazi fizičkih svojstava zgrade, mehaničkih sistema koji je opslužuju i ostalih dinamičkih ulaznih promenljivih kao što su klimatski podaci lokacije, rasporedi zauzetosti itd. kako bi se predvidela energija potrebna za održavanje željenih uslova u zgradi. Potencijal ovakvog pristupa se ogleda pre svega u činjenici da su zasnovani na realnim (merljivim) fizičkim karakteristikama i graničnim uslovima kojima je (će biti) izložena i sama zgrada. Zato se ovi modeli i koriste kao podrška i smernica projektantima još od najranijih faza projektnog ciklusa zgrade kao celine.

Iako inicijalno razvijeni da bi se omogućilo upoređenje različitih projektnih rešenja, simulacioni alati se danas koriste u svim fazama životnog ciklusa zgrade. Simulacioni alati se koriste za ispitivanje uticaja na energetske performanse različitih arhitektonskih rešenja (različiti oblici zgrade, postavljanje i položaj brisoleja i unutrašnjih zastora, korišćenje građevinskih materijala sa faznom promenom ili novih građevinskih materijala, dodavanje dvostruke fasade na delu objekta, instalacija Trombovog zida, provera različitih odnosa zastakljenosti fasade, implementacija zelenog krova ili zelene fasade itd.) i različitih energetske sistema u zgradi (sistemi grejanja i klimatizacije koje treba predvideti, komponente sistema koje treba dimenzionisati, izbor izvora toplote, mogućnost korišćenja OIE itd.). Takođe se mogu koristiti i za evaluaciju različitih sistema upravljanja (konvencionalni ili inteligentni, lokalni, centralni ili oba, da li postoji i koliko iznosi prednost korišćenja supervizorskog sistema upravljanja). Simulacioni alati se koriste i u fazi projektovanja nove zgrade i rekonstrukcije postojeće, ali i u fazi korišćenja zgrade (kontinualno puštanje u rad, detekcija i dijagnoza grešaka, nadogradnja sistema upravljanja, personalizovana regulacija). Takođe, usled uticaja koje zgrade imaju na kvalitet života i rada, životnu sredinu, privredne i ekonomske aktivnosti, energetske politiku itd., došlo se do integrisanja većine ovih ciljeva i u simulacione alate.

### **2.1.1. Kalibrisana simulacija**

Brojna istraživanja su naglasila da postoje razlike između simuliranih (predviđenih, očekivanih) i stvarno izmerenih energetske performansi zgrada [14-16], tačnije simulirane i stvarno izmerene potrošnje energije u njima. Tako je u istraživanju sprovedenom u SAD [14] navedeno da je stvarno izmerena specifična potrošnja energije poslovne zgrade u Nju Džersiju iznosila  $325 \text{ kWh/m}^2$ , u odnosu na predviđenih  $125 \text{ kWh/m}^2$  dobijenih simulacijom pomoću alata DOE-2, što je povećanje od 160%. Machio i Rabl [15] su pokazali da je za stambene zgrade u Francuskoj varijacija srednje kvadratne greške izmerene i predviđene potrošnje gasa za grejanje između 0.3 i 0.5. Branco i sar. [16] su za nisko-energetski stambeni kompleks u Švajcarskoj ustanovili da je potrošnja prirodnog gasa po grejanoj površini iznosila  $246 \text{ MJ/m}^2$  što je u odnosu na predviđenih  $160 \text{ MJ/m}^2$  povećanje

od skoro 54%. Scofield [17] je došao da zaključka da poslovne zgrade sertifikovane po LEED sistemu (en. *Leadership in Energy and Environmental Design*) nemaju bolje energetske performanse svedene na primarnu energiju u odnosu na zgrade bez navedenog sertifikata. Samim tim postavlja se pitanje „poverenja“ u detaljne simulacije zgrada i njihovu sposobnost da predvide ponašanje konkretnog objekta [18] u određenom vremenskom periodu, koji može da se poklopi i sa njegovim celim životnim vekom (npr. kada se alati za simulaciju koriste još u fazi projektovanja). Postoji potreba da kreirani model valjano opisuje ponašanje samog objekta koji je predmet izučavanja, a postupak kojim se smanjuju razlike između simuliranih i izmerenih performansi zgrade i/ili sistema se naziva kalibrisanom simulacijom. Opšte prihvaćena definicija kalibrisane simulacije glasi „*U pitanju je postupak korišćenja postojećeg simulacionog alata i podešavanja tj. kalibracije različitih ulaznih promenljivih na takav način da se izmerena potrošnje energije dobro poklapa sa potrošnjom energije dobijenom simulacionim alatom*“ [19]. Kalibrisana simulacija ne predstavlja standardizovan postupak, za sada, iako postoje standardizovani kriterijumi čijim se zadovoljenjem model smatra kalibrisanim [20-22]. Kriterijumima se dokazuje koliko dobro se simulacijom dobijeni izlazi iz modela (potrošnja različitih vidova energije ili parametri tehničkih sistema, promena temperature u kondicioniranim prostorijama itd.) poklapaju sa izmerenim vrednostima tih istih fizičkih veličina na realnoj zgradi za posmatrani vremenski period (u trajanju od nekoliko dana do jedne ili više godina). U zavisnosti od raspoloživosti podataka sa objekta i u zavisnosti od toga da li se istraživanje fokusira na neki konkretan tehnički sistem ili na ceo objekat postoji više kvalitativno različitih nivoa kalibrisane simulacije. Kalibrisana simulacija se može vršiti na satnom ili mesečnom nivou, za jedan ili više tehničkih sistema ili za čitav objekat [20-22]. Kako su simulacioni modeli izuzetno kompleksni i sastavljeni od velikog broja ulaznih parametara, kalibrisana simulacija predstavlja jako pod-dimenzionisan problem za koji ne postoji singularno rešenje [23, 24], tačnije postoji više rešenja koja zadovoljavaju postavljene kriterijume. Kriterijumi kojima se dokazuje da je model realne zgrade kalibrisan su:

- srednja relativna greška, MBE,
- koeficijent varijacije kvadratnog korena srednje kvadratne greške, CV(RMSE).

Srednjom relativnom greškom se opisuje koliko se dobro rezultati simulacija poklapaju sa izmerenim vrednostima na objektu u određenom periodu (periodu kalibracije). Kako je srednja relativna greška osetljiva na promenu znaka, tj. pozitivne i negativne razlike se poništavaju, potreban je i dodatni kriterijum kojim se ovaj problem prevazilazi, a to je upravo koeficijent varijacije srednje kvadratne greške. Srednja relativna greška i koeficijent varijacije srednje kvadratne greške se izračuvaju kao:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{i=N_P} (M_i - S_i)}{\sum_{i=1}^{i=N_P} M_i} \quad (2.1)$$

$$CV(RMSE)_P = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N_P} (M_i - S_i)^2}{N_P}}}{\frac{\sum_{i=1}^{i=N_P} (M_i)}{N_P}} \quad (2.2)$$

gde su:  $M_i$  - izmerena vrednost u intervalu  $i$ ;  $S_i$  - simulirana vrednost u intervalu  $i$ ;  $P$  - interval kalibracije (mesečni, sedmični, dnevni ili časovni);  $N_P$  - broj tačaka kalibracije u intervalu  $P$  (za mesečni interval  $N_P=12$ , za satni interval  $N_P \leq 8760$ ). U tabeli 2.1. navedene su granične vrednosti kriterijuma koje model treba da ispuni da bi se smatrao kalibrisanim, prema [20-22].

**Tabela 2.1.** Vrednosti kriterijuma kalibracije u različitim vremenskim rezolucijama

	Kalibracija na mesečnom nivou		Kalibracija na časovnom nivou	
	MBE	CV(RMSE)	MBE	CV(RMSE)
ASHRAE 14 [20]	±5%	15%	±10%	30%
IPMVP [21]	±20%	-	±5%	20%
FEMP [22]	±5%	15%	±10%	30%

Istraživači su, u nedostatku standardizovanog postupka kalibrisane simulacije, uglavnom definisali svoje postupke koje su primenjivali na konkretnim studijama slučaja kako bi dokazali valjanost tih postupaka, ali se svi ti postupci, odnosno metode kalibrisane simulacije mogu grubo svrstati u [18, 19, 25]:

- manuelne metode kalibracije zasnovane na iterativnom postupku,
- grafičke metode kalibracije,
- metode kalibracije zasnovane na posebno razvijenim testovima i analitičkim procedurama,
- automatske metode kalibracije zasnovane na analitičkim i matematičkim modelima.

Coakley i sar. [18] su zaključili da pristup „podešavanja“ modela izmerenim vrednostima može biti ili manuelni ili automatski, pri čemu i manuelne i automatske metode mogu da sadrže analitičke alate i tehnike, dok se u automatskim metodama primenjuju matematičke i statističke tehnike. Analitičke alate su podelili u četiri podkategorije:

- tehnike karakterizacije zasnovane na fizičkim i operativnim karakteristikama objekta koji se modelira,

- napredne grafičke metode u kojima se grafički predstavljaju podaci o objektu ili odgovarajući statistički indeksi,
- tehnike redukcije modela u kojima se broj ulaznih podataka u simulacioni model redukuje po jasno definisanim pravilima,
- proceduralna proširenja u kojima se koriste standardne tehnike da bi se unapredio proces kalibracije (analiza osetljivosti, analiza neizvesnosti).

Matematičke i statističke metode koje se koriste u kalibrisanoj simulaciji podelili su na:

- tehnike optimizacije (razne metode optimizacije se mogu koristiti),
- alternativne tehnike modeliranja koje se prevashodno odnose na *black-box* i *grey-box* pristupe u kojima se po pravilu ne koriste simulacioni alati.

Tehnike karakterizacije su osnova svih metoda kalibrisane simulacije jer se njima dolazi do konkretnih saznanja o fizičkim karakteristikama zgrade koja se modelira, termotehničkih i drugih energetske sistema koji su izvedeni u njoj, a dobijaju se i informacije o načinu korišćenja zgrade i sistema od samih korisnika. Najznačajniji alati su svakako: energetske preglede (preliminarni i detaljni), trenutna i kratkotrajna merenja. Detaljni energetske preglede se uglavnom sprovode pre kreiranja modela kako bi se sagledale sledeće karakteristike: geometrija objekta, orijentacija, materijali koji su korišćeni u izgradnji, karakteristike sistema KGH i njihovih sastavnih komponenata, sistem osvetljenja u objektu, rasporedi korišćenja električnih aparata i uređaja, broj i raspored ljudi u objektu i njegovim pojedinim prostorijama, sistem automatskog upravljanja i regulacije ukoliko postoji. Za kalibraciju je od suštinske važnosti da se koriste stvarni meteorološki podaci umesto tipičnih sadržanih u tipičnim meteorološkim godinama. Kratkotrajna merenja se uglavnom odnose na merenja potrošnje energije krajnjih korisnika odnosno pojedinačnih komponenata koje mogu da budu i grupisane (npr. merenje potrošnje električne energije u celom sistemu unutrašnjeg osvetljenja, merenje potrošnje električne energije/električne snage unutrašnjih aparata i uređaja, merenje potrošnje toplotne energije u određenom delu objekta i sl.). Jedna od tehnika karakterizacije je i intenzivno testiranje, odnosno snimanje rada sistema po unapred napravljenom planu u trajanju od nekoliko dana, ili snimanje podataka tokom mirovanja sistema kako bi se odredila termička konstanta zgrade.

Napredne grafičke metode se uglavnom odnose na 3D uporedne grafike (3D prikaz razlika izmerenih i simuliranih vrednosti kako bi se odredili vremenski-zavisni šabloni) i tzv. analizu „potpisa“. Liu i Liu [26] su za razvoj svoje metode kalibracije koristili kalibracioni potpis i karakterističan potpis. Kalibracioni potpis je grafički prikaz normalizovane razlike između izmerenih i simuliranih vrednosti potrošnje energije prema temperaturi spoljašnjeg vazduha.

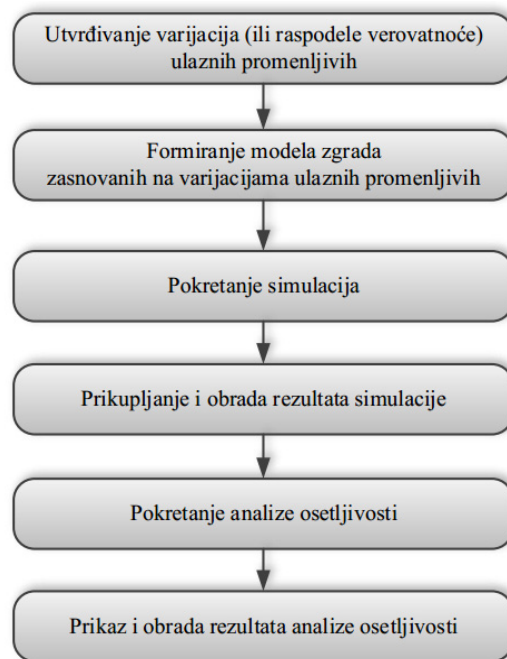
Karakterističan potpis se dobija tako što se model zgrade simulira sa inicijalnom vrednošću nekog parametra što predstavlja osnovni scenario. Promenom tog istog parametra u određenom opsegu i ponovnim simulacijama modela, mogu se odrediti razlike rezultata ovih simulacija i osnovnog scenarija. Normalizovanjem nastalih razlika i grafičkim prikazivanjem prema spoljnoj temperaturi dobija se karakterističan potpis.

### **2.1.2. Analiza osetljivosti**

Brojna istraživanja su pokazala da je analiza osetljivosti korisna tehnika u analizi energetske tokova u zgradi kojom se mogu identifikovati fizičke veličine koje najviše utiču na njene energetske performanse ili druge veličine od značaja za konkretno istraživanje. Analiza osetljivosti se koristi u širokom opsegu primena alata za dinamičku simulaciju kao što su: projektovanje (u svim fazama projektnog ciklusa), kalibrisana simulacija, rekonstrukcija objekata i brojnih drugih. Analiza osetljivosti je „*postupak kojim se neizvesnost u izlaznim promenljivim modela raspodeljuje različitim izvorima neizvesnosti u ulaznim promenljivim modela*“ [27].

Metodologija za sprovođenje analize osetljivosti u sprezi sa alatima za dinamičku simulaciju se svodi na 6 koraka ilustrovanih na slici 2.2: definisanje varijacija ulaznih promenljivih izborom opsega promenljive i funkcije raspodele verovatnoće; kreiranje energetskih modela na bazi varijacija ulaznih promenljivih; pokretanje simulacija tako dobijenih energetskih modela; prikupljanje i obrada rezultata simulacija; sprovođenje analize osetljivosti i prikazivanje rezultata analize osetljivosti.

U zavisnosti od svrhe istraživanja mogu da se razlikuju broj ulaznih promenljivih i način njihovog variranja (po kojoj funkciji raspodele verovatnoće će se svaka pojedinačna promenljiva varirati) i generisanja (koji način uzorkovanja promenljivih se primenjuje), alati koji će da se koriste za dinamičke simulacije, indikatori analize osetljivosti itd. Izbor tipa funkcije raspodele verovatnoće za pojedine promenljive zavisi od svrhe istraživanja, ali i od činjenice da li se istraživanje sprovodi u fazi projektovanja ili fazi korišćenja kada se neke promenljive mogu i eksperimentalno odrediti. Preporuka za izbor tipa funkcije raspodele verovatnoće je da se kod istraživanja u fazi projektovanja može koristiti uniformna raspodela određene ulazne promenljive (sve vrednosti iz opsega imaju jednaku verovatnoću da budu i realizovane), dok se kod postojećih objekata za većinu ulaznih promenljivih može usvojiti i normalna raspodela (najverovatnije će vrednost ulazne promenljive biti približna svojoj projektnoj vrednosti, a Gaus-ova kriva je najbolji početni izbor). Pored gore navedenih funkcija raspodele verovatnoće, u analizama energetskih performansi mogu da se koriste i trougaona raspodela, diskretna, log-normalna i druge. Korišćenjem savremenih simulacionih alata u analizi osetljivosti se fokus sa izbora funkcija raspodele verovatnoće pomera na adekvatan izbor načina uzorkovanja ulaznih promenljivih i izbor adekvatnog(ih) indikatora analize osetljivosti.



**Slika 2.2.** Algoritam sprovođenja analize osetljivosti u sprezi sa dinamičkim simulacionim alatima

Sve metode analize osetljivosti koje se koriste u analizi energetske performansi objekata se mogu svrstati u lokalne i globalne metode [28].

U lokalnim metodama analize osetljivosti se vrši varijacija jedne-po-jedne ulazne promenljive, dok su ostale ulazne promenljive konstante, pa je izbor vrednosti ulaznih promenljivih u inicijalnom modelu veoma važan. Osnovna prednost ovih metoda je što su lake za implementaciju i po pravilu je potrebno mnogo manje simulacija modela da bi se odredili indikatori osetljivosti. Kod lokalnih metoda se kao indikator osetljivosti najčešće koristi uticajni koeficijent koji predstavlja odnos relativne promene izlazne promenljive u odnosu na inicijalni model (osnovni scenario) i relativne promene ulazne promenljive u odnosu na inicijalnu vrednost.

Kod globalnih metoda se varijabilnost izlazne promenljive koja potiče od jedne ulazne promenljive evaluira simultanom varijacijom svih ulaznih promenljivih, uzimajući u obzir opsege promenljivih i tipove funkcija raspodele verovatnoće. Postoje brojne metode globalne analize osetljivosti kao što su: regresione metode (Monte Carlo), Sobol, Furijeov test (en. FAST, *Fourrier Amplitude Sensitivity Test*), Morris, Meta-modeli i dr. Kao indikatori osetljivosti se koriste SRC (standardizovani regresioni koeficijent), SRRC (standardizovani regresioni koeficijent ranga), PRC (parcijalni korelacioni koeficijent), PCC (parcijalni korelacioni koeficijent ranga), t-vrednost. i dr.



## 2.2. Alati za simulaciju energetske performansi objekata

U poslednjih nekoliko decenija razvijeno je na stotine alata za evaluaciju mera energetske efikasnosti, primene obnovljivih izvora energije kao i implementaciju koncepta održivosti u zgradama. Spisak tih alata se konstantno ažurira [29], pri čemu se može izvršiti gruba podela na sledeće kategorije:

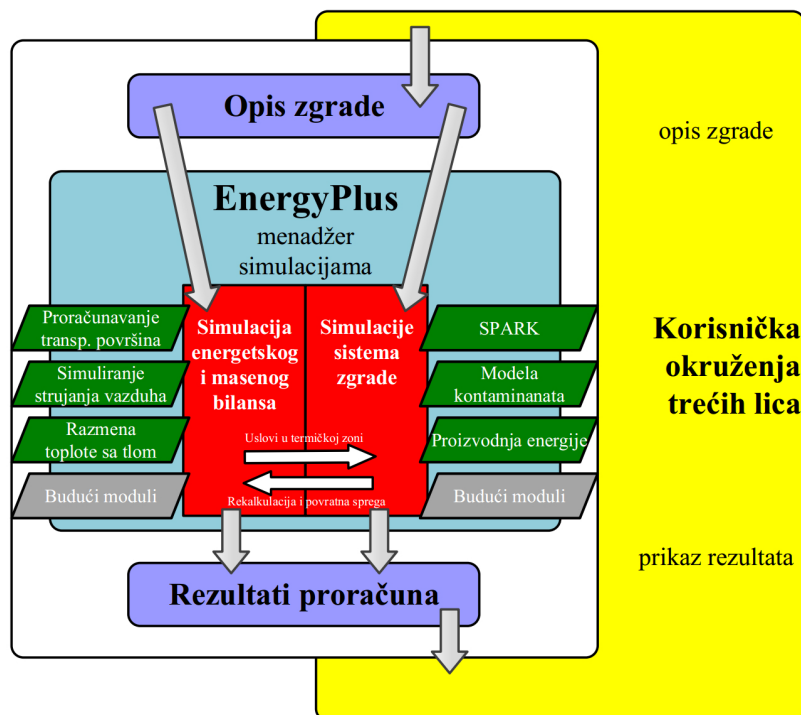
- alati za izračunavanje toplotnog opterećenja,
- alati za dokazivanje usaglašenosti sa pravnom regulativom,
- alati za izbor, dimenzionisanje i analizu komponenata i sistema KGH u zgradama,
- alati za detaljne simulacije energetske performansi zgrada.

Svakako je najznačajnija poslednja grupa alata koji pružaju korisniku uvid u ključne indikatore energetske performansi zgrada, kao što su potreba zgrade za energijom, potrošnja svih vidova energije, promene temperatura, relativne vlažnosti po pojedinim zonama zgrade, troškovi eksploatacije itd.

Najznačajniji (najzastupljeniji u istraživanjima) alati za simulaciju energetske performansi zgrada su: EnergyPlus [11], TRNSYS [12], ESP-r [13], eQUEST [30], i IES<VE> [31], a treba dodati i alate kao što su IDA-ICE [32], Modellica Buildings Library [33], DOE-2 [34], i dr. Pored navedenih alata u istraživanjima se često koriste i pomoćni alati za parametarske studije, za rešavanje različitih optimizacionih problema ili ko-simulaciju. Takođe u ovoj oblasti istraživanja se intenzivno koriste i opšti simulacioni alati kao što su MATLAB & Simulink [35] i Dymola [36], ali i brojni drugi.

### 2.2.1. EnergyPlus

EnergyPlus je modularni alat (slika 2.3) koji u osnovi predstavlja simulaciono jezgro, dok su ulaz i izlaz iz softvera tekstualne datoteke (\*.IDF). Izračunato opterećenje (pomoću modula za energetski bilans toplotne zone) u definisanom vremenskom intervalu (koje zadaje korisnik) se prosleđuje simulacionom modulu za sisteme. Ovim modulom, sa promenljivim vremenskim korakom (ukoliko je potrebno do 1 minut), izračunava se odziv sistema grejanja i klimatizacije koji opslužuju zgradu (primarnih i sekundarnih sistema), kao i odziv električnih sistema. Ovako integrisano, simultano, rešavanje niza jednačina obezbeđuje tačniju predikciju temperatura vazduha u prostoru, koja je od krucijalne važnosti za dimenzionisanje svih sistema kao i njihovih sastavnih komponenata, određivanje parametara toplotnog komfora itd. Integrisanom simulacijom, omogućeno je da se definišu realni sistemi regulacije i upravljanja, absorpcija i desorpcija vlage u konstrukciji, panelni sistemi grejanja i hlađenja kao i razmena vazduha između samih zona.



*Slika 2.3. Modularna struktura EnergyPlus*

EnergyPlus se sastoji od simulacionog modula za bilans toplote i mase, kao i od simulacionog modula za sisteme u zgradi. Simulacioni modul za sisteme omogućava povezivanje modula za toplotni bilans i različitih modela sistema KGH i njihovih cirkulacionih krugova, kao što su izmenjivači toplote različitih vrsta, kotlovi, rashladne mašine, pumpe, ventilatori, kao i druga oprema/komponente. KGH vazdušni i vodeni krugovi predstavljaju srž simulacionog modula za sisteme, jer opisuju mrežu cevovoda i vazdušnih kanala koje postoje zgradama. Vazdušnim krugom se simulira transport vazduha, pripreme i mešanje, i uključuje ventilatore pripremljenog i odsisnog vazduha, centralne grejače i hladnjake, rekuperatore toplote, kao i regulaciju temperature pripremljenog vazduha i rada rekuperatora toplote. Vazdušni krug se povezuje sa zonom preko zonske opreme, pri čemu unutar jedne zone može biti definisano više različitih tipova opreme.

Jednačine toplotnog i masenog bilansa su bazirane na ranije razvijenom softveru sa integrisanim simulacijama toplotnog opterećenja i sistema KGH. Modul toplotnog bilansa upravlja modulima toplotnog bilansa okolnih površina i vazduha u zoni, i služi kao interfejs između ovog modula i modula simulacija sistema. Modulom toplotnog bilansa površina rešavaju se toplotni bilansi sa unutrašnje i spoljašnje strane površina; veze između toplotnih bilansa i graničnih uslova; kao i efekti kondukcije, konvekcije, zračenja i transporta mase (vlage). Modulom masenog bilansa vazduha simuliraju se različiti tokovi vazduha (ventilacija, otpadni vazduh, infiltracija) uzimajući u obzir uticaj na masu vazduha u zoni i direktne konvektivne dobitke/gubitke toplote.

### **2.2.2. eQUEST**

eQUEST predstavlja alat za analizu energetske potrebe zgrade koji je vrlo jednostavan za korišćenje, pri čemu se dobijaju rezultati zadovoljavajuće tačnosti za prihvatljivo vreme kreiranja modela. Ovo je omogućeno kombinovanjem nekoliko modula i to: modula kreiranja zgrade, modula mera energetske efikasnosti i poboljšanog simulacionog jezgra na platformi DOE-2.2. Suština ovog alata je da se nakon kreiranja detaljnog modela zgrade vrši simulacija iste, kao i da se proceni koliko će energije zgrada (sa sistemima) koristiti. Procene su moguće jer u pozadini, DOE-2.2 vrši časovne simulacije za period od godinu dana. Za svaki sat u godini se izračunavaju potrebe za grejanjem i hlađenjem na bazi: upotrebljenih materijala u omotaču zgrade, broja ljudi, unutrašnjih izvora toplote, nepropusnosti zgrade. Takođe, simuliraju se i performanse svih komponenata sistema KGH: pumpi, ventilatora, rashladnih mašina, kotlova i drugih potrošača energije.

### **2.2.3. ESP-r**

ESP-r predstavlja simulaciono okruženje opšte namene koje se razvija više od 30 godina. Bazirano je na postulatu „simulacija prati opis“ gde se aktiviraju dodatni solveri kako opis zgrade i pripadajućih sistema evoluiraju. U programu je podržano eksplicitno energetske bilansiranje u svakoj zoni i na svakoj površini, pri čemu se dobijeni rezultati razmenjuju između solvera. Bez obzira što ima istraživačko poreklo, uglavnom se koristi kao konsultantski alat ili kao jezgro za druge simulacione sredine.

### **2.2.4. TRNSYS**

TRNSYS je nestacionarni simulacioni program sa modularnom strukturom koji je razvijen za rešavanje problema kompleksnih energetske sistema, razlažući ih u nizove manjih komponenata (podsistema). Komponente TRNSYS-a (koje se definišu kao „Tip“ mogu biti proste kao npr. pumpa ili cev, ili složene kao npr. višezonski model zgrade).

Konfiguracija i povezivanje komponenata se vrši u potpuno integrisanom vizuelnom okruženju poznatom kao TRNSYS Simulation Studio, dok se podaci o zgradi unose kroz odgovarajući modul TRNBuild. Simulaciono jezgro rešava sistem algebarskih i diferencijalnih jednačina kojim je opisan ceo objekat. Sve komponente sistema KGH se rešavaju simultano sa toplotnim bilansom omotača zgrade i pripadajućim parametrima vazduha u zoni u svakom vremenskom koraku. Vremenski korak je u rasponu od 0.1 s do 1h.

Biblioteka TRNSYS sadrži gotove sve najznačajnije komponente koje čine termotehničke i električne energetske sisteme: solarne sisteme, PV sisteme, niskoenergetske zgrade, sisteme KGH, sisteme za dobijanje energije iz OIE, sisteme kogeneracije itd.

Modularnost TRNSYS-a olakšava dodavanje novih matematičkih modela u sam program. Komponente se lako mogu deliti između korisnika. Prostije komponente, regulacione strategije ili operacije pretprocesiranja i postprocesiranja se lako mogu implementirati u ulaznu datoteku korišćenjem odgovarajućih jednačina. Pored mogućnosti razvijanja novih komponenti u bilo kom programskom jeziku, TRNSYS-om je omogućeno da se unesu i komponente definisane (opisane) drugim programom (npr. Matlab/Simulink, Excel/VBA i dr.).

### **2.2.5. IES <VE>**

IES <VE> je dominantno orijentisan ka fazi projektovanja, pri čemu je u središtu modela 3-D geometrijska reprezentacija zgrade na koju se nadovezuju prozori „projektni zadaci“ u zavisnosti od namene zgrade i konkretnog problema.

IES <VE> je baziran na *ApacheSim*, dinamičkom (termičkom) simulacionom alatu koji je zasnovan na matematičkom modeliranju procesa razmene toplote u zgradi. Program omogućava detaljnu evaluaciju projektnih rešenja samo zgrade ali i njenih sistema, pri čemu je omogućena optimizacija projektnog rešenja sa stanovišta toplotnog komfora i potrošnje energije. *ApacheSim* se može povezati sa modulom *MacroFlo* za potrebe analize prirodne ventilacije ili infiltracije, sa modulom *ApacheHVAC* za simulacije komponenta sistema, ili sa modulom *SunCast* za analize zasenčenosti objekta.

U okviru *ApacheSim*, procesi kondukcije, konvekcije i zračenja, za svaki element (kontrolnu zapreminu) materijala zgrade se individualno modeliraju i integrišu sa modelima za dobitke toplote u prostoriji, izmenom vazduha i modelima primarnog i sekundarnog sistema. Simulacijom se uzimaju u obzir realni vremenski uslovi (u časovnoj rezoluciji i rasponu od nekoliko dana do cele godine).

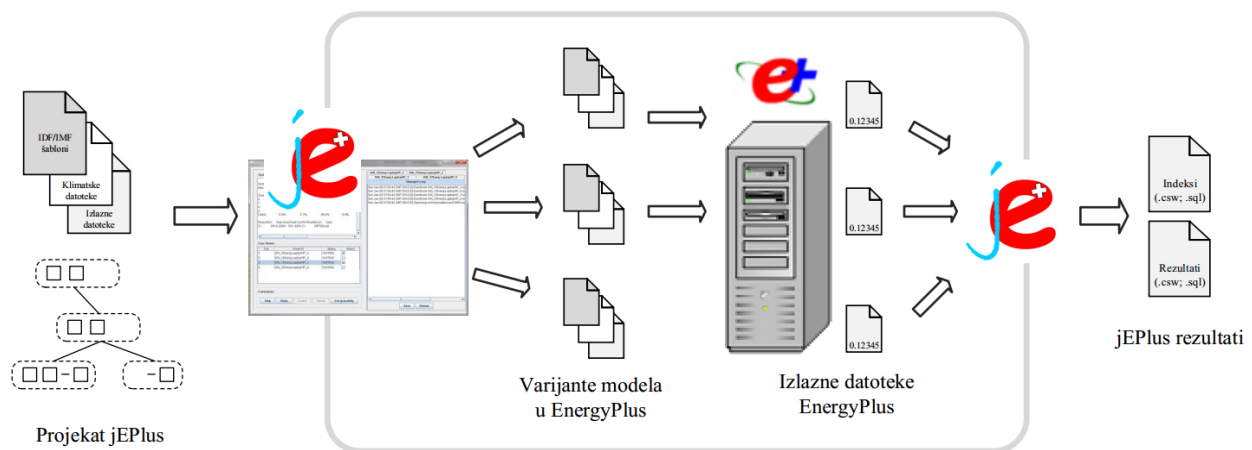
### **2.2.6. Pomoćni alati u simulaciji energetske performansi zgrada**

Detaljni simulacioni alati, iako pružaju velike mogućnosti za evaluaciju različitih projektnih rešenja, u većini istraživanja se ne koriste samostalno već se moraju koristiti i tzv. dopunski alati koji se povezuju po tačno definisanim procedurama. Dopunske alate je moguće podeliti u tri grupe:

- alati za parametarske studije (jEPlus [37], Params [38]),
- alati za optimizaciju (GenOpt [39], jEPlus+EA [40], BEopt [41]),
- alati za ko-simulaciju (BCVTB [42], MLE+ [43]).

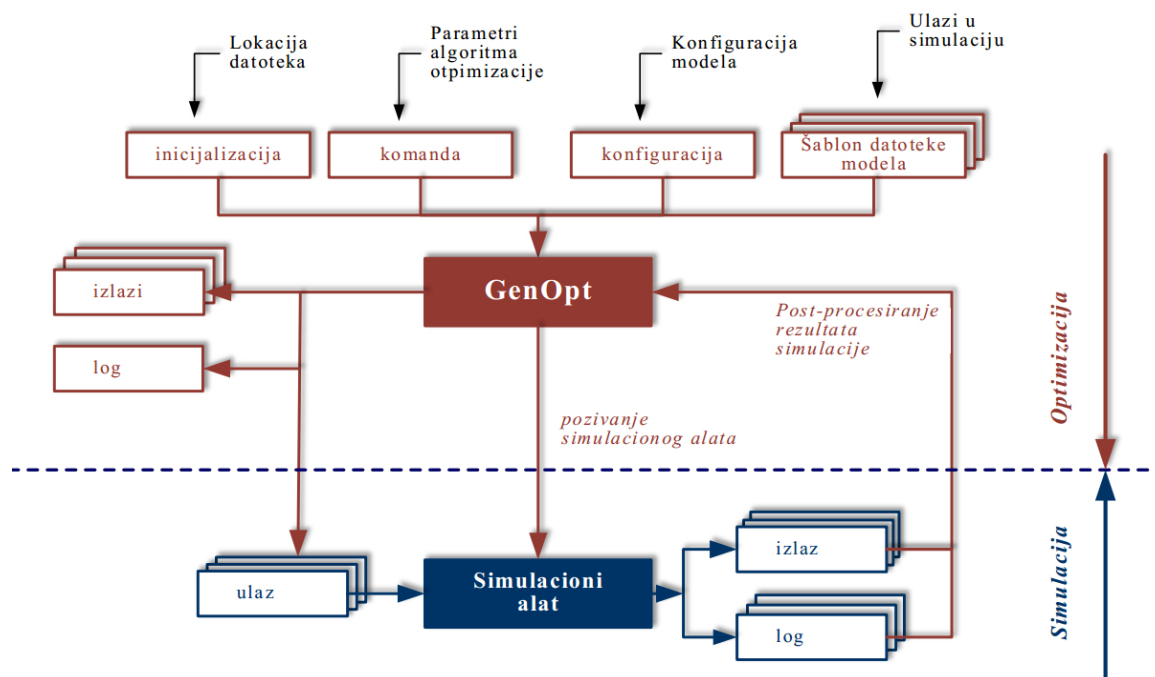
Parametarske studije (parametarska analiza) su često neophodne za ispitivanje različitih projektnih rešenja, naročito kada ne postoji odgovarajuća globalna optimizaciona metoda ili se sumnja u rezultate optimizacije. Parametarske studije se mogu primenjivati i nad svim ulaznim promenljivim

simultano što dovodi do pretrage po mreži svih mogućih rešenja, i u slučaju korišćenja malih koraka u opsezima promenljivih dovodi do nalaženja rešenje bliskog optimumu. Kako bi se sprovedile kompleksne parametarske studije sa mnoštvom ulaznih promenljivih neophodan je alat kojim bi se vršila manipulacija nad velikim brojem datoteka, pokretale simulacije i prikupljali rezultati istih. Jedan od najkorišćenijih alata za parametarske studije sa EnergyPlus-om kao detaljnim simulacionim alatom je i jEPlus. Zanimljivo je da sam EnergyPlus ima jednu čitavu klasu rutina za parametarske studije (*Class:Parametric*), ali je u njoj vrlo teško manipulirati većim brojem ulaznih promenljivih. U jEPlus je iskorišćena činjenica da su ulazne datoteke za EnergyPlus tekstualne pa se umetanjem odgovarajućih simbola definišu linije na kojima će biti unete odgovarajuće vrednosti promenljive. Definisane ulazne promenljive (opsega njihovih vrednosti) se vrši po principu grananja, tako da se identifikuje njihov hijerarhijski redosled. Definisanim rezultatima simulacije koji su od prioriteta za istraživanje završava se ceo postupak ilustrovan na slici 2.4.



**Slika 2.4.** Postupak kreiranja parametarske studije jEPlus-om [37]

Najčešće korišćen optimizacioni alat u kombinaciji sa detaljnim simulacionim alatima je GenOpt, razvijen na Lawrence Berkley-u. GenOpt-om se nalaze optimalne vrednosti nezavisno promenljivih veličina pri čemu se vrednost funkcije cilja određuje eksternim simulacionim alatom. Može se povezati sa bilo kojim simulacionim alatom kome su ulazne i izlazne datoteke tekstualne (EnergyPlus, TRNSYS). Nezavisno promenljive mogu biti kontinualne i diskretne, tačnije mogu se rešavati optimizacioni problemi koji sadrže samo kontinualne, samo diskretne ili i kontinualne i diskretne nezavisno promenljive. Ograničenja zavisno promenljivih se mogu implementirati korišćenjem kaznenih funkcija. GenOpt sadrži biblioteku sa lokalnim i globalnim optimizacionim algoritmima, kao i algoritmima za parametarske studije. Po sličnom principu kao i jEPlus se vrši upisivanje vrednosti nezavisno promenljivih u ulaznoj datoteci. Način povezivanja i ceo postupak optimizacije sa simulacionim alatima je prikazan na slici 2.5.



*Slika 2.5. Povezivanje sa simulacionim alatom i postupak optimizacije sa GenOpt-om [39]*

Pod ko-simulacijom se podrazumeva istovremena primena barem dva simulaciona alata, pri čemu svaki od alata radi u svom domenu, a između alata postoji razmena podataka. BCVTB (en. *Building Controls Virtual Test Bed*) je softversko okruženje namenjeno ko-simulaciji i simulacijama u realnom vremenu (ukoliko se simulacioni alat poveže sa sistemom automatskog upravljanja u zgradi i simulaciono vreme sinhronizuje sa realnim vremenom). BCVTB je modularna platforma koja omogućava istraživačima i inženjerima koji se bave energetsom efikasnošću i sistemima upravljanja u zgradama da iskoriste pojedinačne prednosti simulacionih alata iz oblasti istraživanja. U ovom okruženju se razmenjuju podaci, kako se simulacija odvija, kojima se npr. može napraviti povratna sprega ili da se rešavaju diferencijalne jednačine. Najčešće se primenjuje za razvoj novih algoritama upravljanja, testiranje upravljačkih uređaja u emuliranom okruženju, kao i za verifikaciju algoritama upravljanja pre njihove implementacije u realnim sistemima. Mogućnosti BCVTB, način sinhronizacije podataka između klijenata (simulacionih alata) su detaljno prikazane u radu [42].

Karakteristike najčešće korišćenih detaljnih simulacionih alata su prikazane u radu [44]. Analiza je obuhvatala 20 detaljnih simulacionih alata (uključujući i alate opisane u prethodnom delu teksta) pri čemu su analizirane sledeće karakteristike svakog od alata:

- opšta svojstva modeliranja (sekvencijalno ili simultano rešavanje jednačina na nivou toplotna zona/sekundarni sistemi/primarni sistemi, vremenski korak izračunavanja, mogućnost razmene podataka sa drugim alatima),

- izračunavanje toplotnog opterećenja (kako se jednačine konvekcije i kondukcije na nivou zone postavljaju i rešavaju, da li je integrisan neki od modela toplotnog komfora i sl.),
- karakteristike omotača i prirodno osvetljenje (kako se sunčevo zračenje integriše u jednačine toplotnog bilansa, kako se distribuira unutar zone i između zona, interakcije sa nebom i tlom i sl.),
- infiltracija, ventilacija i strujanje vazduha između zona modela (način modeliranja strujanja vazduha unutar jedne zone i između više zona),
- modeliranje OIE (kako se modeliraju pojedini sistemi, šta je izlaz iz simulacija i sl.),
- modeliranje električnih sistema i unutrašnje opreme (električna snaga, potrošnja električne energije i sl.),
- modeliranje sistema KGH i sastavnih komponenata (da li je moguće modelirati sisteme slobodno ili samo iz postojeće biblioteke sistema, nivo detaljnosti prilikom definisanja komponenata sistema u smislu efikasnosti pri parcijalnim opterećenjima i sl.),
- modeliranje emisija gasova sa efektom staklene bašte (GSESB) povezanih sa načinom potrošnje energije u zgradi (da li postoji podrška u vidu nacionalnih propisa),
- ekonomske analize (da li je implementirana analiza troškova, analiza životnog ciklusa); raspoloživost klimatskih podataka (podržavanje različitih formata datoteka, izvori klimatskih datoteka),
- prikaz rezultata odnosno indikatora performansi (nivo detaljnosti, mogućnost formiranja specifičnih indikatora),
- validacija alata (koji koraci su preduzeti da bi se ispitao softver, da li je validacija vršena standardnim testovima ili upoređenjem sa drugim alatima i sl.),
- korisnički interfejs, povezivanje sa drugim alatima i dostupnost.

Atia i sar. [45] su definisali kriterijume koji utiču na izbor simulacionih alata u inženjerskoj i arhitektonskoj praksi u SAD. Pregledom literature i anketiranjem eksperata iz ove oblasti došli su do zaključaka da na izbor simulacionog alata utiču:

- preglednost i manipulisanje podacima kroz odgovarajuće grafičko okruženje alata,
- integracija baze znanja inteligentnog projektovanja,
- tačnost alata i mogućnost simuliranja detaljnih i kompleksnih komponenata,
- interoperabilnost u procesu modeliranja,
- integracija alata u proces projektovanja.

Značaj korišćenja optimizacionih metoda prilikom projektovanja energetski efikasnih zgrada, kao i pregled optimizacionih alata koji se koriste je sumiran u radovima [46, 47].

### **2.3. Unapređenje energetske performansi postojećih objekata simulacijom podržanim radom KGH sistema**

Pored uobičajene prakse da se simulacioni alati koriste u fazi projektovanja ili rekonstrukcije objekata kako bi se procenile potencijalne uštede implementacijom odgovarajućih mera energetske efikasnosti, poslednjih godina simulacioni alati se sve više koriste i za unapređenje rada sistema KGH kroz poboljšanje efikasnosti sistema tj. smanjenje potrošnje energije u objektima, poboljšavanje toplotnog komfora ljudi koji borave itd., a sve to bez velikih „zahvata“ na objektu i u sistemima. Svi pristupi koji se mogu naći u literaturi na ovu temu se mogu svrstati u kategoriju simulacijom podržanog upravljanja radom i načinom korišćenja sistema KGH i zgrade, sa ciljem smanjenja potrošnje energije (ili npr. troškova eksploatacije), a uz uslov da se ne pogoršava toplotni komfor prisutnih. Zapravo u pitanju su postupci optimizacije korišćenja zgrade i rada sistema KGH u prvom redu (optimalne strategije korišćenja i rada sistema).

Kreiranje modela realne zgrade koji se koristi u simulacionim alatima, pored opisa geometrije, materijala, građevinskih konstrukcija, sistema KGH i unutrašnje opreme, mora da obuhvati i način korišćenja zgrade što se postiže kroz definisanje rasporeda zauzetosti i broja ljudi u odgovarajućim delovima objekta (toplotnim zonama modela), rasporeda korišćenja sistema osvetljenja i unutrašnje opreme, ali u prvom redu i adekvatnim opisivanjem sistema automatske regulacije i upravljanja ukoliko takav sistem postoji. Najsavremeniji simulacioni alati, EnergyPlus pre svih, dozvoljavaju realno predstavljanje uobičajenih načina regulacije i upravljanja sistema KGH definisanjem:

- postavnih (zadatih) vrednosti regulisanih parametara kroz odgovarajuće rasporede (rasporedi postavnih vrednosti temperatura unutrašnjeg vazduha ili relativnih vlažnosti po odgovarajućim zonama),
- raspoloživosti odgovarajućih sistema KGH i njihovih sastavnih komponenata (kada se koji sistem ili njegova komponenta koriste),
- redosleda uključivanja odgovarajućih komponenti (kaskada opreme),
- načina regulacije u jednom regulacionom krugu (za regulaciju temperature pripremljenog vazduha klima komore opisuju se redom načini regulacije pojedinačnih komponenti - položaj žaluzina spoljašnjeg vazduha, regulacija toplotnog kapaciteta grejača ili hladnjaka klima komore ukoliko postoje itd.).

Modeliranje sofisticiranih načina regulacije i upravljanja kao što su optimalna (skoro-optimalna) i supervizorska, koji se sve više sreću u novim zgradama (pre svega poslovnim objektima) trenutno nije moguće unutar samih simulacionih alata. Kako novi načini regulacije podrazumevaju postojanje neke vrste modela, u literaturi se nazivaju modelski-zasnovanom regulacijom (en. *model based control*). Modeli koji se koriste mogu da budu: *white-box* modeli, *black-box* modeli i *grey-*



*box* modeli, a u poslednje vreme se koriste i modeli kreirani detaljnim simulacionim alatima. Što se tiče građevinskih objekata i sistema KGH u njima, tipična primena modelski-zasnovane regulacije može da se posmatra kao:

- trenutna optimizacija (u slučajevima sa malom toplotnom inercijom i bez pasivnog i/ili aktivnog skladištenja energije),
- prediktivna optimizacija (za sve slučajeve sa nekom vrstom akumulacije energije).

U oba slučaja reč je o optimalnoj regulaciji i upravljanju, pri čemu se optimizacijom smanjuje potrošnja energije u sistemima za date granične uslove definisane klimatskim parametrima same lokacije objekta i željenog nivoa unutrašnjeg komfora. Modelski-zasnovana regulacija se može realizovati kao:

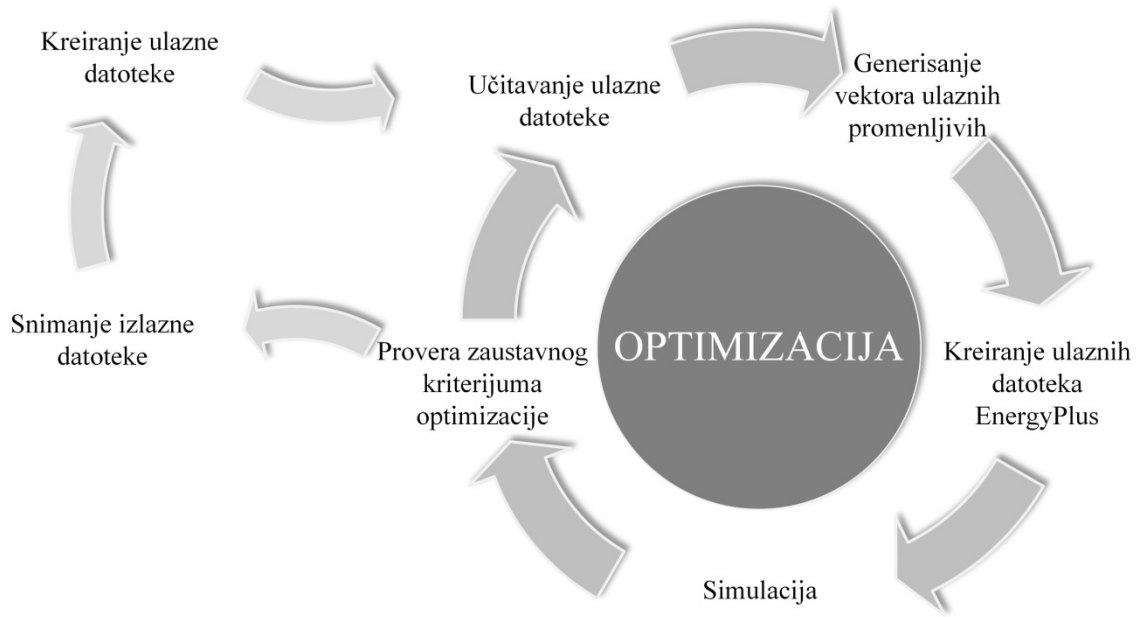
- *Offline* optimizacija - način rada se optimizuje eksterno, tj. objekat se simulira eksterno pod pretpostavkom odgovarajućih klimatskih parametara dobijenih iz kratkoročnih vremenskih prognoza,
- *Online* optimizacija - način rada se optimizuje u realnom vremenu uzimajući u obzir trenutne i buduće granične uslove (prediktivna komponenta modela) i zahteva povezivanje simulacionih alata direktno sa postojećim sistemom automatskog upravljanja i regulacije.

Razlika između *offline* i *online* optimizacije korišćenjem detaljnog simulacionog alata EnergyPlus je najbolje ilustrovana na slici 2.6.

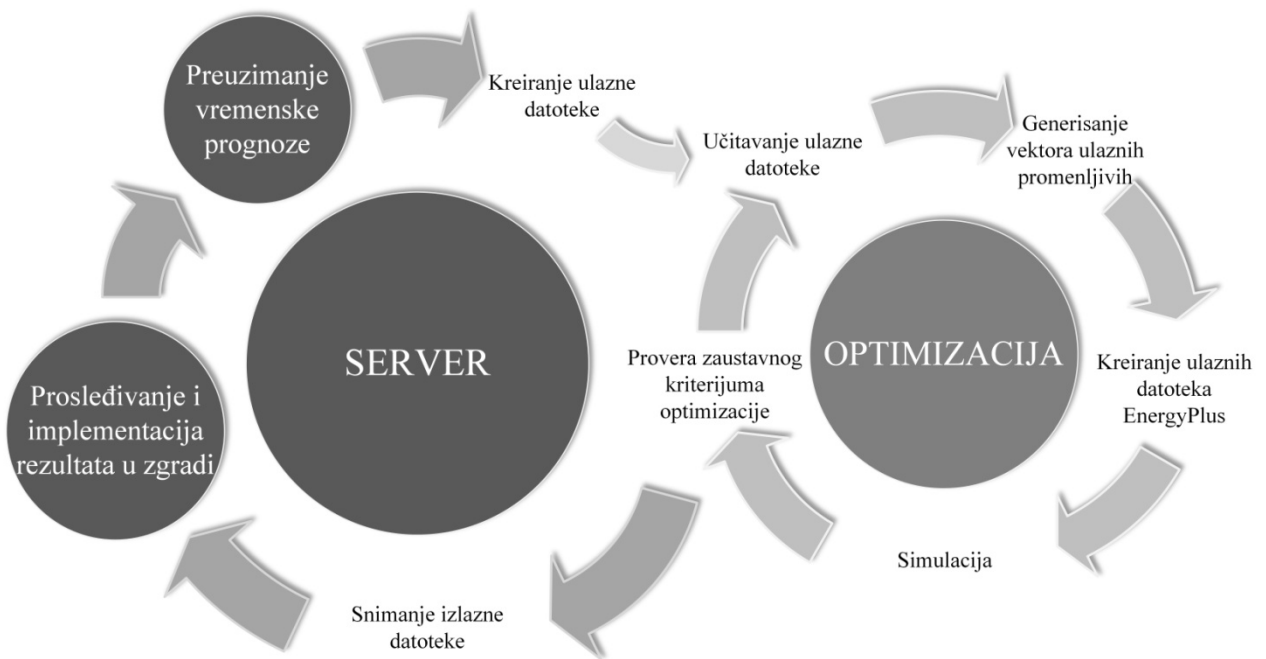
Modelima se predstavljaju odgovarajući sistemi, koji kada su adekvatno razvijeni, dozvoljavaju donošenje zaključaka o performansama sistema pod specificiranim graničnim uslovima. Da bi se dobio adekvatan (primenljiv) model, pokušava se smanjenje kompleksnosti modela što je moguće više, ali na takav način da se ne izostave bitni detalji i svojstva sistema koji se modelira, a koja su neophodna za opis sistema. Kompleksnost modela je potrebno redukovati na takav način da se pojednostavi razvoj i validacija modela, ali i da se postigne zadovoljavajuća tačnost i vreme simulacije/izračunavanja.

Osnovni elementi modela jesu matematička izračunavanja kojima se povezuju ulazni parametri modela sa izlaznim, ali i svi ostali parametri koji su deo strukture modela. Kao što je već naglašeno, u zavisnosti od fizičke relevantnosti parametara razlikuju se sledeći tipovi modela:

- *white-box* modeli: koriste se detaljni matematički opisi fizičkih procesa koji se modeliraju (modelira se unutrašnja struktura procesa koji se dešavaju),
- *black-box* modeli: ne-fizički modeli bez fizički relevantnih parametara (ne modelira se unutrašnja struktura procesa),
- *gray-box* modeli: kombinuju se svojstva prethodnih tipova modela.



a)



b)

**Slika 2.6.** Simulacijom podržan rad sistema u zgradi. a) offline optimizacija; b) online optimizacija [48]

### *White-box modeli*

Ovi modeli su zasnovani na fizičkom opisu sistema, tj. parametri u ovim modelima imaju fizičko značenje. U razvoju ovih modela koriste se univerzalni zakoni konzervacije (energije i mase). Odgovarajućim jednačinama se modeliraju komponente zgrada, sistemi koji je opslužuju sa svojim elementima, a sve sa ciljem predikcije ponašanja zgrade i sistema kao što su npr. potrošnja energije ili toplotni komfor [49].

Nivo detalja sadržan u ovim modelima može da varira u širokim granicama, pa ako se modeliraju svi fenomeni tipični za zgrade, broj parametara za adekvatno opisivanje može da poraste na nekoliko stotina. Povećanjem rezolucije modela, npr. prelaskom sa relativno prostog jednozonskog modela na višezonski model kojim bi se simuliralo i strujanje vazduha u pojedinačnim zonama, broj jednačina kojima se opisuje model može da poraste od svega nekoliko na nekoliko hiljada.

U zavisnosti od jednačina na kojim su razvijeni, *white box* modeli mogu da budu:

- stacionarni ili dinamički,
- linerani ili nelinearni,
- diferencijabilni, kontinualni ili diskontinualni.

U zavisnosti od postavljenog sistema jednačina, koriste se različite numeričke metode da bi se odredio izlaz iz modela, tačnije koriste se i numeričke i analitičke metode kako bi se poboljšale performanse modela.

Najčešće korišćen *white-box* model za potrebe modeliranja regulacije parametara unutrašnje sredine je model toplotne mreže [50], koji je potpuno analogan teoriji električnih kola. U ovom modelu, zidovi zgrade se modeliraju kao otpornici između termičkih zona koje imaju svoje termoakumulacione sposobnosti, dok se mase modeliraju kao kondenzatori.

### *Black-box modeli*

Ovi modeli se u literaturi često nazivaju i modeli vođeni podacima. Statističke metode se direktno primenjuju kako bi se uspostavila korelacija između ulaznih i izlaznih podataka. Za kreiranje ovih modela potrebna su merenja sa konkretnog objekta u odgovarajućem periodu vremena kako bi se model obučio, a sve sa ciljem predikcije ponašanja zgrade pod drugim uslovima. U zavisnosti od tipa modela (podela na tipove je ista kao i kod *white-box* modela) u literaturi se koriste: veštačke neuronske mreže, fazi logika, statističke metode (metod potpunih vektora SVM, razne regresione metode itd.). U poređenju sa fizički zasnovanim modelima imaju veću tačnost, a osnovni nedostatak im je smanjena sposobnost generalizacije.

## Gray-box modeli

Ovo su hibridni modeli koji sadrže i fizičke i ne-fizičke parametre, tačnije koriste uprošćene fizičke opise kako bi se simuliralo ponašanje zgrade i sistema, ali i modelirali napredni sistemi upravljanja kao što je modelsko-prediktivno upravljanje (en. MPC, *Model predictive control*). *Gray-box* modelima se obezbeđuje dovoljan nivo tačnosti za predikciju dinamičkog ponašanja zgrade, uz zadržavanje relativno proste i prikladne formulacije za izračunavanja. Parametri modela se mogu lako identifikovati na osnovu izmerenih vrednosti. Prednosti i nedostaci različitih tipova modela sumirani su u tabeli 2.2.

**Tabela 2.2.** Upoređenje tipova modela (viša ocena predstavlja bolje zadovoljenje kriterijuma)

Karakteristika	<i>White box</i>	<i>Gray box</i>	<i>Black box</i>
Prepoznavanje fizičkog procesa	5	3	1
Broj parametara	1	3	5
Rad na kreiranju modela	2	4	5
Brzina izračunavanja	4	4	5
Potreba za podacima za obuku	5	2	1
Kompleksnost kalibracije modela	1	2	4
Generalizacija i primenljivost na druge sisteme	5	4	1

## Modeli dobijeni dinamičkim simulacionim alatima

Pored gore opisanih modela, za simulacijom podržan rad sistema mogu da se koriste i modeli razvijeni detaljnim simulacionim alatima kao što su EnergyPlus, TRNSYS, ESP-r, DOE-2 i drugi. Iako su modeli u ovim alatima zasnovani na fizičkom opisivanju sistema, i predstavljaju sami po sebi *white-box* modele [49, 51-53], za potrebe ovog istraživanja su od posebne važnosti, pa će biti i posebno tretirani.

### 2.3.1. Upravljanje sistemima KGH i mogućnosti modeliranja detaljnim simulacionim alatima

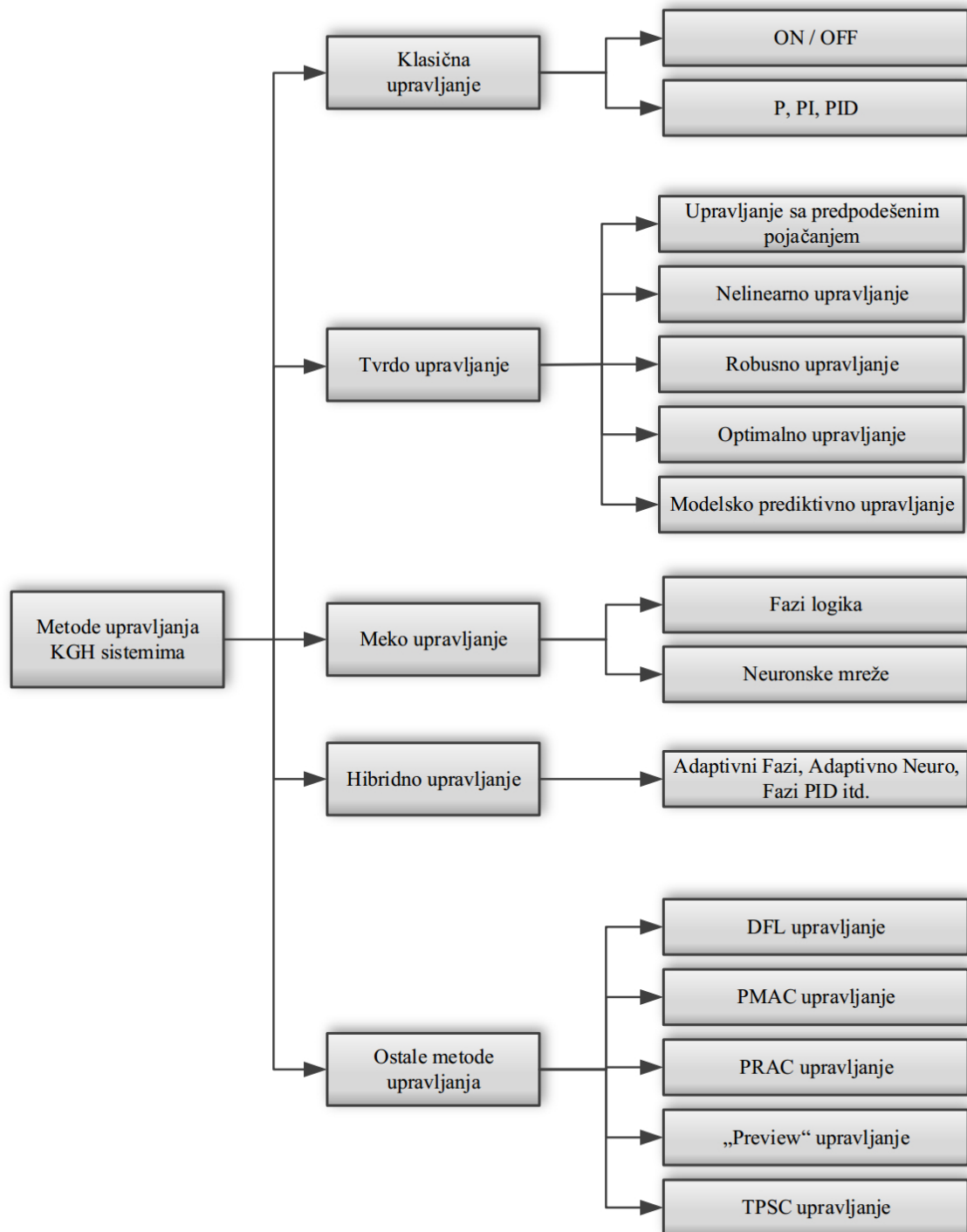
Uloga detaljnih simulacionih alata u teoriji upravljanja je dvostruka, tj. mogu da se koriste i kao emulatori i kao evaluatori. Emulatorima se menja realna zgrada sa sistemima i alatima se simulira odgovor sistema na eksterno zadate komande. Evaluatorima se testira efikasnost mogućih načina upravljanja razvijenih primenom drugih modela (*white-box*, *gray-box* ili *black-box*).

Metode upravljanja termotehničkim instalacijama se mogu grubo klasifikovati kao [51]:

- klasične metode upravljanja,
- metode tvrdog upravljanja,

- metode mekog upravljanja,
- metode hibridnog upravljanja,
- ostale metode upravljanja.

Slična podela je izvršena i u radu [53]. Dodatna podela ovih metoda prikazana je na slici 2.7.



**Slika 2.7.** Klasifikacija metoda upravljanja [51]

Klasični kontroleri su bazirani na nekim od najčešće korišćenih tehnika upravljanja kao što su: ON/OFF, P, PI, PID. ON/OFF kontroleri koriste donje i gornje granične vrednosti kako bi regulisali

parametre procesa unutar granica. P, PI i PID kontroleri koriste dinamiku greške i moduliraju regulacionu promenljivu kako bi postigli tačno upravljanje procesom. Klasični kontroleri se koriste za dinamičko upravljanje i regulaciju temperature unutrašnjeg vazduha, sekcijama hladnjaka i grejača u klima komorama, pritiska i temperature pripremljenog vazduha u vazдушnim sistemima, položaja žaluzina u mešačkim sekcijama klima komora itd.

Iako su ON/OFF kontroleri najintuitivniji i najlakši za implementaciju, njima je nemoguće upravljati procesima u kojima postoji vremensko kašnjenje. Usled velike termičke inercije u zgradama, procesi koji se upravljaju ovim kontrolerima imaju velika odstupanja i kolebanja u odnosu na postavne vrednosti. PID kontrolerima se uklanja većina nedostataka ON/OFF kontrolera, ali je potrebno dosta napora kako bi se podesili parametri kontrolera.

Metode tvrdog upravljanja obuhvataju: upravljanje sa predpodešenim pojačanjem (en. *gain scheduling control*), nelinearno upravljanje (en. *nonlinear control*), robusno upravljanje (en. *robust control*), optimalno upravljanje (en. *optimal control*) i MPC.

Kod upravljanja sa predpodešenim pojačanjem, nelinearni sistem se deli na linearne regione, i za svaki od linearnih regiona se definiše po jedan linearni PI ili PID kontroler sa različitim pojačanjima. Kod nelinearnog upravljanja, korišćenjem teoreme stabilnosti Ljapunova, linearizacijom povratne sprege i adaptivnim tehnikama upravljanja se definiše zakon upravljanja.

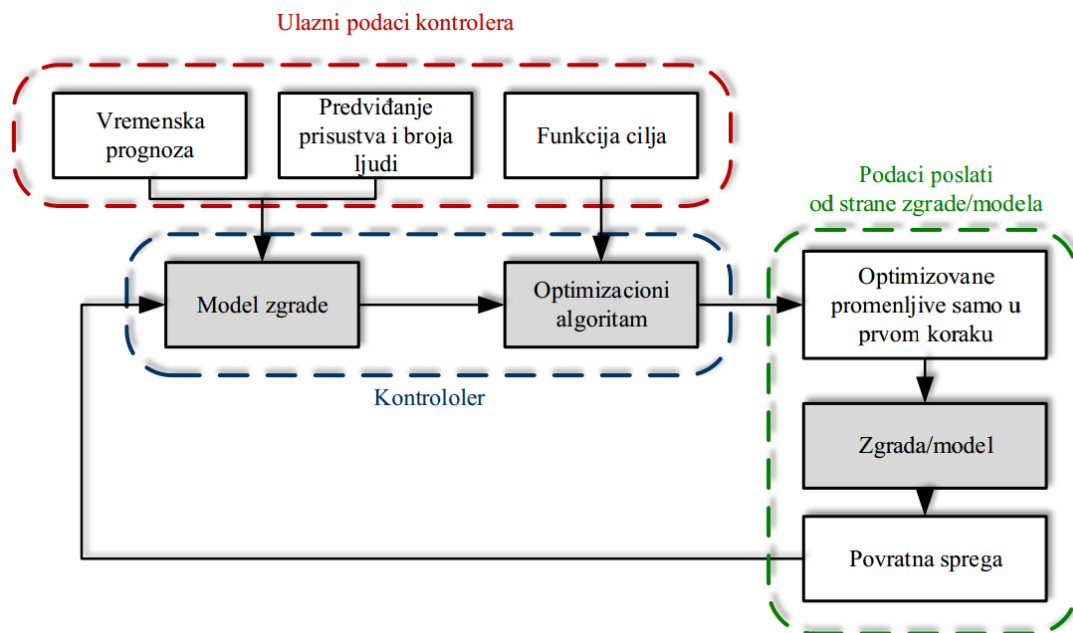
Robusno upravljanje se primenjuje za projektovanje kontrolera koji dobro radi u uslovima vremenski promenljivih promena u parametrima.

Kod optimalnog upravljanja se rešava optimizacioni problem i to najčešće minimizacijom odgovarajuće funkcije cilja. Ciljevi optimizacije rada sistema KGH su po pravilu minimizacija potrošnje energije i maksimizacija toplotnog komfora.

Od svih metoda tvrdog upravljanja, MPC je možda trenutno i najistraživanija tehnika u sektoru zgradarstva [54], zbog mogućnosti da se njime integrišu predikcije poremećaja, iskorišćenje termičke mase zgrade, ograničenja prilikom definisanja funkcija cilja optimizacionog algoritma, strategije za uštedu energije itd.

U MPC se optimizuju promenljive u sistemu kao funkcija budućih poremećaja u okviru unapred definisanog horizonta tokom kojeg je potrebno da budu zadovoljena definisana ograničenja. Osnovna ideja MPC je u korelaciji sa dinamičkom optimizacionom logikom i u literaturi se naziva i upravljanje sa pomerajućim horizontom (en. *receding horizon control* [55] ili en. *moving horizon control* [56]). MPC podrazumeva čitavu klasu metoda upravljanja koje koriste model odgovarajućeg procesa kako bi se predvideli budućí uslovi i poremećaji, a sve sa ciljem nalaženja najbolje trajektorije akcija kroz optimizaciju funkcije cilja sa definisanim ograničenjima. MPC je

zapravo optimizacioni problem primenjen na odgovarajući proces sa dinamičkom komponentom. Ova metoda upravljanja je inicijalno korišćena još 70-ih godina XX veka u hemijskoj i petrohemijskoj industriji, dok je u poslednjoj deceniji postala aktuelna i u sektoru zgradarstva usled evolucije dinamičkih simulacionih alata, optimizacionih alata kao i opšte evolucije računarskih alata i resursa. Opšti princip funkcionisanja MPC u sistemima KGH u zgradama ilustrovan je na slici 2.8.



*Slika 2.8. MPC primena u zgradama*

Osnovni pojmovi u teoriji MPC su:

- funkcija cilja: njome se definiše glavni cilj upravljanja. Može da bude vrlo prostog oblika kao npr. minimizacija potrošnje primarne energije u zgradi, ali i i višekriterijumska (minimizacija potrošnje energije uz održavanje toplotnog komfora u propisanim granicama npr.). Zasnovana je na željenom ponašanju sistema i služi njegovoj stabilizaciji ukoliko se optimum funkcije cilja može opisati funkcijom Ljapunova. Za sisteme sa sporim promenama, stabilnost se ne dovodi u pitanje i može se izabrati bilo koji oblik funkcije cilja;
- ograničenja: MPC poseduje sposobnost nalaženja rešenja koja zadovoljavaju ograničenja postavljena na ulaze, izlaze i aktuatore sistema. Ograničenja mogu biti definisana jednačinama i nejednačinama veze;
- optimizacioni problem: nakon definisanja modela sistema, poremećaja, ograničenja i funkcije cilja, MPC se rešava optimizacioni problem sa ograničenjima nad horizontom planiranja kako bi se dobio optimalni vektor upravljanja u trajanju horizonta;
- horizont planiranja (predikcije): vremenski interval za koji se optimizuje funkcija cilja odgovarajućeg oblika;

- horizont upravljanja: vremenski interval za koji se izračunava upravljački signal (po pravilu je kraći od horizonta predikcije) i koji se implementira u zgradi;
- vremenski korak: vremenski interval u kome je upravljački signal nepromenljiv.

Prateći usvojenu podelu metoda upravljanja na slici 2.7, u metode mekog upravljanja se ubrajaju metode zasnovane na fazi logici i veštačkim neuronskim mrežama. Fazi logika je razvijena kako bi se određivale neizvesnosti koje su prisutne u realnosti. Razlika sa klasičnom logikom je u tome da se u fazi logici omogućava da veličine imaju bilo koji nivo pripadnosti između 0 i 1 (u klasičnoj logici veličine imaju binarnu pripadnost 0 ili 1). Fazi logikom se imitira ljudska sposobnost prosuđivanja u situacijama sa nepreciznim podacima i neizvesnim rezultatima. Korišćenje fazi logike obuhvata; fazifikaciju (modifikuju se signali tako da mogu da budu pravilno protumačeni, ne-fazi se pretvara u fazi), zaključivanje na osnovu pravila (procenjuje se koja pravila su relevantna za trenutno stanje sistema i odlučuje se logičkim sklopom kakav će biti upravljački signal) i defazifikaciju (transformiše se fazi oblik signala u tzv. *crisp* oblik signala). Veštačke neuronske mreže su inspirisane centralnim nervnim sistemom čoveka. Neuronska mreža predstavlja paralelni distribuirani procesor koji skladišti znanje stečeno iskustvom i omogućava njegovu primenu. Kako pripadaju *black-box* modelima nije neophodno poznavanje strukture sistema jer neuronske mreže uče odnose izlaznih i ulaznih promenljivih procesa kroz prethodno dostupne podatke. Postoje brojne strategije obučavanja neuronskih mreža. Strukturu neuronske mreže čine ulazni sloj, skriveni slojevi i izlazni sloj. Zbog svojih prednosti, neuronske mreže se intenzivno koriste i za upravljanje sistemima KGH. Više o primeni metoda mekog upravljanja u sistemima KGH se može naći u radovima [57-60].

Kao što i ime nagoveštava, metode hibridnog upravljanja su razvijene spajanjem metoda tvrdog i metoda inteligentnog upravljanja ili nadogradnjom metoda klasičnog upravljanja. Uglavnom se metode inteligentnog upravljanja implementiraju u višim nivoima upravljanja dok se metode tvrdog upravljanja implementiraju u nižim nivoima upravljačke hijerarhije. Metode inteligentnog i tvrdog upravljanja nadopunjuju jedna drugu pa se njihovom kombinacijom mogu rešavati problemi koje je teško rešiti pojedinačnim metodama. Nedostatak ovih metoda se ogleda u činjenici da pored toga što spajanjem metoda tvrdog i inteligentnog upravljanja nasleđuju njihove dobre osobine, ove metode nasleđuju i njihove nedostatke tj. ograničenja. Tako npr. komponenta mekog upravljanja zahteva ekspertizu korisnika i veliki broj podataka za obučavanje, dok je komponentu tvrdog upravljanja teško razvijati i podešavati usled širokog opsega radnih parametara sistema KGH. Primer metoda hibridnog upravljanja je kombinacija neuronskih mreža i modelskog-prediktivnog upravljanja, i upotreba ovakvog tipa upravljanja je predstavljena u radu [61].



Dostupnost i mogućnosti detaljnih simulacionih alata, kao i alata za razvoj novih načina upravljanja su veoma značajni za brzu i laku implementaciju modelski-zasnovanih optimalnih strategija rada sistema, odnosno za razvoj i implementaciju simulacijom podržanog rada sistema KGH [62]. Poželjne karakteristike koje alati treba da ispune su:

- da budu besplatni,
- da imaju otvoren (dostupan) kod,
- da poseduju grafičko korisničko okruženje,
- da sadrže bogate biblioteke komponenti zgrada i KGH sistema uključujući i OIE,
- da sadrže module koji omogućavaju implementaciju modelski-zasnovanog upravljanja,
- da omogućavaju ko-simulaciju,
- da sadrže kvalitetnu dokumentaciju sa matematičkim modelima komponenata.

## **2.4. Klimatski podaci za simulaciju energetske performansi**

Klimatski podaci su, uz adekvatan energetski model zgrade, neizostavan deo za simulaciju energetske performansi. Za kompjuterske simulacione alate neophodno je korišćenje klimatskih datoteka u odgovarajućem obliku/formatu, uz preduslov da takvi klimatski podaci dobro reprezentuju klimu lokacije analiziranog modela. Kako su u pitanju dinamički simulacioni alati, potrebno je da su klimatski podaci u časovnoj rezoluciji i da postoje za svaki sat u godini, odnosno da sadrže 8760 (8784 u slučaju prestupne godine) časovnih vrednosti relevantnih klimatskih parametara. Meteorološke stanice mere mnoštvo klimatskih parametara, ali su određeni parametri važniji sa stanovišta simuliranja energetske performansi (temperatura vazduha, relativna vlažnost, Sunčevo zračenje, pravac i brzina vetra). U zavisnosti od namene istraživanja, tačnije da li se ono odnosi na novoprojektovane ili postojeće zgrade, potrebno je valjano i izabrati format klimatske datoteke. Treba napomenuti da su formati klimatskih datoteka koje se koriste u dinamičkim simulacionim alatima, definisani samim alatima, tačnije njihova struktura i organizacija, dok izvor podataka za klimatsku datoteku može da bude isti i za više različitih alata.

U slučaju da se istražuju energetske performanse novoprojektovanih objekata, potrebno je usvojiti tipične klimatske podatke jer se njima reprodukuje tipična godina na bazi koje se mogu dobiti energetske performanse objekta koje su bliske višegodišnjim prosecima. Postoji nekoliko vrsta baza klimatskih podataka za lokacije širom sveta, sa tipičnim klimatskim uslovima u časovnoj rezoluciji, a svakako su najznačajnije: tipična meteorološka godina (en. *TMY, typical meteorological year*) prve, druge i treće generacije (TMY, TMY2 i TMY3); meteorološka godina za proračune energetske potreba (en. *WYEC, weather year for energy calculations*); međunarodna klimatska godina za

proračune energetske potrebe (en. *IWEC, international weather for energy calculations*), referentna test godina (en. *TRY, test reference year*) i dr.

TMY formati su kreirani na osnovu dugogodišnjih časovnih merenja (15 do 30 godina) generisanjem tipičnog januara, tipičnog februara, itd., iz svih dostupnih godina na osnovu dodeljivanja težinskih koeficijenata izabranim klimatskim promenljivim, kako bi se dobila kontinualna sintetička godina. TMY prve generacije (TMY) su formirani za 229 lokacija širom SAD za koje su postojala merenja u periodu 1948 - 1980. godine. TMY druge generacije (TMY2) su formirani za više od 1000 lokacija u SAD na osnovu merenja u periodu 1961 - 1990. godina. TMY treće generacije (TMY3) su uvedeni 2005. godine i u njima je veći značaj dodeljen veličinama vezanim za Sunčevo zračenje, a korišćeni su podaci iz perioda 1991 - 2005 godina u sprezi sa dostupnim satelitskim snimcima. Trenutno postoje TMY3 datoteke za više od 2500 lokacija, uglavnom u SAD i Evropi. TMY3 sadrži časovne vrednosti za više od 20 klimatskih promenljivih, dok sama datoteka sadrži podatke za 68 veličina. TMY2 i TMY3 su kreirani na osnovu procedura razvijenih od strane Sandia nacionalne laboratorije (en. *Sandia National Laboratories*) (poznatiji kao Sandia metod) korišćenih za generisanje TMY prve generacije [63]. Sandia metod je empirijski zasnovan postupak kojim se usvajaju pojedinačni meseci iz čitavog seta raspoloživih merenja (u konkretnom slučaju 30-godišnja merenja) i koji se ponavlja dok se ne usvoji svih 12 tipičnih meseci koji će činiti tipičnu godinu. Zbog činjenice da meseci u tipičnoj godini ne moraju da potiču iz iste kalendarske godine, diskontinuiteti na početku i kraju svakog meseca moraju biti poravnati za prvih i poslednjih 6 sati u svakom mesecu. U Sandia metodu [64], tipični mesec se bira na osnovu devet dnevnih indeksa: maksimalna, minimalna i srednja dnevna temperatura vazduha po suvom termometru; maksimalna, minimalna i srednja dnevna temperatura tačke rose vazduha; maksimalna i srednja dnevna brzina vetra; i ukupno dnevno horizontalno zračenje. Sandia metod je iterativni postupak koji se odvija u sledećim fazama:

1. korak - za svaki mesec koji će formirati TMY, usvaja se po pet meseci (pet januara, pet februara itd. iz baze) čije su kumulativne funkcije distribucije za navedene dnevne indekse najbliže višegodišnjem proseku, izačunavajući za svaki mesec FS indeks (en. *Finkelstein-Schafer index*):

$$FS = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^{i=n} \delta_i \quad (2.3)$$

gde su:  $\delta_i$  - apsolutna razlika između višegodišnje kumulativne funkcije distribucije i izabranog meseca;  $n$  - broj dnevnih merenja u mesecu.

Pojedini indeksi su važniji od drugih, pa je težinska suma FS vrednosti merodavna za izbor pet meseci koji imaju najnižu vrednost težinske sume:

$$WS = \sum_i w_i FS_i \quad (2.4)$$

gde je:  $w_i$  - težinski koeficijent klimatskog indeksa (tabela 2.3).

2. korak - pet meseci izabranih u 1.koraku se rangiraju prema blizini mesečnoj srednjoj vrednosti i medijani višegodišnjih merenja u svakom konkretnom mesecu.

3. korak - Perzistencije srednje temperature po suvom termometru i dnevnog globalnog horizontalnog zračenja se evaluiraju određivanjem frekvence i kontinualnog trajanja dana sa vrednostima ispod ili iznad fiksiranih višegodišnjih percentila. Za srednju dnevnu temperaturu određen je broj uzastopnih dana sa vrednostima iznad 67-og percentila (uzastopni topli dani) i ispod 33-eg percentila (uzastopni hladni dani). Za globalno horizontalno zračenje određen je broj uzastopnih dana sa vrednostima ispod 33-eg percentila (uzastopni dani sa niskim zračenjem). Isključeni su meseci sa najvećim i najmanjim brojem iteracija kao i meseci bez iteracija. Ovako dobijeni podaci se koriste da bi se od potencijalnih pet meseci (kandidata) izabrao jedan mesec koji će ući u TMY. Najbolje rangirani mesec iz 2. koraka koji zadovoljava kriterijume perzistentnosti postaje deo tipične meteorološke godine.

4. korak - u poslednjem koraku se kompletira cela godina, diskontinuiteti na prelasku iz jednog meseca u drugi se poravnavaju za po 6 sati odgovarajućim metodama nadovezivanja podataka.

**Tabela 2.3.** Težinski koeficijenti pojedinih dnevnih indeksa za TMY, TMY2 i TMY3

Indeks	TMY	TMY2 i TMY3
maksimalna dnevna temperatura vazduha po suvom termometru	1/24	1/20
minimalna dnevna temperatura vazduha po suvom termometru	1/24	1/20
srednja dnevna temperatura vazduha po suvom termometru	2/24	2/20
maksimalna dnevna temperatura tačke rose vazduha	1/24	1/20
minimalna dnevna temperatura tačke rose vazduha	1/24	1/20
srednja dnevna temperatura tačke rose vazduha	2/24	2/20
maksimalna dnevna brzina vetra	2/24	1/20
srednja dnevna brzina vetra	2/24	1/20
ukupno zračenje	12/24	5/20
direktno zračenje	-	5/20

Za TMY druge i treće generacije usvojeni su drugi težinski koeficijenti pri čemu je dodat još jedan klimatski indeks - direktno zračenje (tabela 2.3). Razlog dodavanja još jednog indeksa je u smanjenju uočenih razlika između godišnjeg direktnog normalnog zračenja u TMY sa višegodišnjim prosecima, uz zanemarljiv efekat na preostale indekse.

IWEC format sadrži tipične klimatske uslove za više od 3000 lokacija van SAD i Kanade, pri čemu su datoteke kreirane na osnovu klimatskih podataka prikupljenih u nacionalnom klimatskom centru SAD (en. *National Climatic Data Center*). Za sve ove lokacije su u proseku postojala 4 podatka dnevno za brzinu i pravac vetra, oblačnost, vidljivost, visinu oblaka, temperaturu vazduha po suvom termometru, temperaturu tačke rose vazduha, atmosferski pritisak, količinu padavina za najmanje 12 godina (za pojedine lokacije su postojali podaci i za period od 25 godina). Kako se u bazi ne skladište podaci o Sunčevom zračenju, ukupno horizontalno zračenje se izračunava empirijskim modelom baziranim na geometriji Sunce-Zemlja, pokrivenosti neba oblacima, temperaturskoj razlici tri prethodna sata, relativnoj vlažnosti i brzini vetra. Direktna komponenta sunčevog zračenja se određuje iz posebnog empirijskog modela na osnovu solarnog ugla i odnosa između izračunatog ukupnog horizontalnog zračenja i ekstrateritorijalnog zračenja (solarne konstante).

Američko udruženje inženjera grejanja, hlađenja i klimatizacije (en. *ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) je ustanovilo relativno просту proceduru za dobijanje TRY koja je testirana podacima 60-ak gradova iz SAD. Razvijenom procedurom se eliminišu godine sa ekstremno visokim ili niskim srednjim temperaturama vazduha, sve dok ne preostane jedna godina. Meseci iz posmatranih godina se navode naizmenično po redosledu koji odgovara njihovom uticaju na energetske potrebe zgrada (najtopliji jul i najhladniji januar se smatraju najznačajnijim). Meseci se naizmenično navode tako da jedan mesec bude iz toplog dela godine (maj–oktobar), a sledeći iz hladnog dela godine (novembar–april). Postupak rangiranja meseci po uticaju je prikazan u tabeli 2.4.

**Tabela 2.4.** Postupak rangiranja pojedinih meseci za dobijanje TRY

R.br.	Karakteristika	R.Br.	Karakteristika
1	najtopliji jul	13	najhladniji jul
2	najhladniji januar	14	najtopliji januar
3	najtopliji avgust	15	najhladniji avgust
4	najhladniji februar	16	najtopliji februar
5	najtopliji jun	17	najhladniji jun
6	najhladniji decembar	18	najtopliji decembar
7	najtopliji septembar	19	najhladniji septembar
8	najhladniji mart	20	najtopliji mart
9	najtopliji maj	21	najhladniji maj
10	najhladniji novembar	22	najtopliji novembar
11	najtopliji oktobar	23	najhladniji oktobar
12	najhladniji april	24	najtopliji april

Nakon što se sprovede postupak rangiranja za sve podatke koji postoje, i ako preostane više od jedne godine sa nemarkiranim mesecima, postupak se nastavlja sa sledećim najtopliji julom, najhladnijim januarom itd. sve dok ne preostane jedna godina koja postaje TRY. Pored temperature po suvom termometru po ovoj analogiji mogu se uvesti i dodatni klimatski parametri kao što su temperatura po vlažnom termometru (relativna vlažnost vazduha ili temperatura tačke rose) i ukupno Sunčevo zračenje.

Jedan od najpoznatijih dinamičkih simulacionih alata, EnergyPlus, ima svoj format klimatske datoteke, \*.epw (en. *energyplus weather*), dok su sami podaci u datoteci preuzeti iz TMY2 i TMY3 baza podataka.

Kada se istražuju energetske performanse postojećih objekata i njihovo poboljšanje, tipični klimatski podaci ne moraju da budu (a često i nisu) merodavni, jer se u ovakvim situacijama kao minimum zahteva poklapanje rezultata dinamičkih simulacija i vrednosti koje su dostupne na samom objektu (i tu se kao minimum postavlja postojanje računa za energente u određenom vremenskom periodu). Tada se umesto tipičnih koriste stvarni klimatski podaci na posmatranoj lokaciji (ili podaci iz najbliže meteorološke stanice), pa se u literaturi često pojavljuje i termin stvarna meteorološka godina (en. *AMY, actual meteorological year*) [65]. Dinamički simulacioni alati ne prepoznaju razliku između TMY i AMY, bitna je samo struktura klimatske datoteke koja se koristi u simulaciji.

Kako se simulacioni alati sve češće koriste i za razvoj novih načina upravljanja termotehničkim instalacijama, pre svega primenom adaptivnih i modelski-orijentisanih postulata na osnovu vremenskih prognoza, u literaturi se koristi i termin buduće tipične meteorološke godine (en. *FTMY, future/forecasted typical meteorological year* [66]) (koji je usvojen da bi semantički bio blizak sa terminima TMY i AMY iako zapravo ne postoji način da se prognoziraju klimatski podaci toliko unapred, a pogotovo ne na časovnom nivou sa velikom pouzdanošću).

### **2.4.1. Kratkoročne vremenske prognoze**

Mnogi aspekti operativnih strategija sistema KGH, ali i ponašanja i očekivanja korisnika su povezani sa klimatskim promenljivim. Proizvodnja energije iz OIE (pre svih solarne i energije vetra), profili opterećenja i kapaciteta sistema KGH, pa u određenoj meri i navike korisnika ili npr. korišćenje sistema osvetljenja u zgradi dominantno zavise od temperature spoljašnjeg vazduha, relativne vlažnosti spoljašnjeg vazduha, Sunčevog zračenja, oblačnosti i karakteristika vetra (pravac i brzina). Da bi se simulacioni alati uopšte mogli koristiti za simulacijom-podržan rad sistema KGH i optimizaciju energetske performansi u fazi korišćenja zgrade, na dnevnom nivou, neophodne je

poznavati klimatske promjenljive na lokaciji objekta, za period od nekoliko sati do nekoliko dana unapred. Do potrebnih klimatskih podataka se može doći na dva načina:

- kreiranjem sopstvenih prognostičkih modela za klimatske promjenljive od interesa,
- preuzimanjem podataka iz kratkoročnih vremenskih prognoza koje izrađuju relevantne institucije.

Kao i svi modeli, tako i prognostički modeli klimatskih promjenljivih mogu da budu *white-box*, *black-box* ili *gray-box*. Kod *black-box* pristupa u literaturi se najčešće koriste statističke tehnike i metode mašinskog učenja (autoregresione metode, veštačke neuronske mreže različitih arhitektura i metod potpornih vektora). Kod *white-box* pristupa dominiraju tzv. numeričke prognoze vremena (en. *NWP, numerical weather prediction*). Numeričke metode su zasnovane na analizi evolucije promjenljivih u atmosferi u okviru višedimenzionog prostora, koje podležu fundamentalnim jednačinama termodinamike, dinamike fluida i hemijskih reakcija svih komponentata vazduha. Numeričke metode daju najbolje rezultate u horizontima od nekoliko sati do nekoliko dana unapred. Prednosti i nedostaci prognostičkih modela klimatskih promjenljivih su sumirani u tabeli 2.5 [67].

**Tabela 2.5.** Upoređenje karakteristika prognostičkih modela

Prognostički modeli	Metoda	Karakteristika	Nedostaci
Statistički	ARMA – autoregresioni modeli pokretnih sredina	Prosti za primenu, brza izračunavanja, relativno visoka tačnost, mogućnost uzimanja u obzir sezonskih karakteristika, za kratke horizonte prognoze;	Potrebni istorijski podaci, nemogućnost modeliranja nelinearnih promena
	ARIMA – autoregresioni integrisani model pokretnih sredina		
	ARX – Autoregresioni modeli sa egzogenim ulazima	kao ARMA sa poboljšanom sposobnošću da uzmu u razmatranje skorašnje egzogene promene;	kao i ARMA, neophodno i posmatranje egzogenih promjenljivih
	LR – Linearna regresija	prosti, brzi, zadovoljavajuće tačnosti	slabi u modeliranje nelinearnosti
Mašinsko učenje	ANN – Veštačke neuronske mreže	Tačni, nema potrebe za supervizijom, modeliranje nelinearnih karakteristika, izuzetna brzina izračunavanja	zavise od istorijskih podataka, kompleksni za izračunavanje
	SVM – Metod potpornih vektora	Tačni, kompaktnije arhitekture u odnosu na ANN, modeliranje nelinearnih karakteristika, manje podataka za obučavanje	zavise od istorijskih podataka, kompleksni za izračunavanje
Fizički i numerički	Inženjerske <i>white box</i> i <i>grey box</i> metode	Visoke tačnosti, ne zavise od istorijskih podataka, fizička interpretacija	neophodnost više ulaznih promjenljivih, mogu da budu kompleksni i spori
	Numerička prognoza vremena	Visoke tačnosti, ne zavise od istorijskih podataka, fizička interpretacija, dugački horizonti prognoze	prisustvo neizvesnosti, intenzivno korišćenje računarskih resursa

Numerička prognoza vremena je zapravo simulacija atmosferskih procesa koja se zasniva na činjenici da se poznajući trenutno stanje atmosfere razvoj daljih procesa u njoj može predstaviti odgovarajućim matematičkim opisom fizičkih zakona. Fizički zakoni se opisuju sistemom odgovarajućih nelinearnih parcijalnih diferencijalnih jednačina za koji ne postoji tačno analitičko rešenje, pa se linearizacijom svodi na sistem homogenih linearnih parcijalnih diferencijalnih jednačina koje se rešavaju ili spektralnom metodom implementiranom u globalnim modelima ili metodom konačnih razlika implementiranom u regionalnim modelima. Domen integracije predstavljen je 3D mrežom tačaka, pri čemu se za svaku tačku domena u odgovarajućem vremenskom koraku, počevši od trenutnog stanja dobijenog opservacijom, rešava sistem jednačina i određuju vrednosti klimatskih parametara. Globalnim modelima pokriva se čitava planeta Zemlja dok se regionalnim modelima pokriva odgovarajuća oblast. Danas se koriste dva globalna modela i to model Evropskog centra za srednjeročnu prognozu (en. *ECMWF, European Center for Medium-Range Weather Forecasts*) model globalnog sistema za prognoze (en. *GFS, Global Forecast System model*). Oba modela pripadaju modelima niske rezolucije. ECMWF predstavlja nezavisnu međuvladinu organizaciju koju podržavaju 34 države. Na podatke ovog centra imaju pravo nacionalne meteorološke službe iz država članica. Ovaj model se pokreće četiri puta dnevno praveći prognoze za 10 dana unapred.

Regionalni modeli (npr. WRF-NMM model koji se koristi u RHMZ) su modeli visoke rezolucije kojima je pokrivena manja oblast i sadrže specifičnosti datog regiona. Ovi modeli zavise od bočnih graničnih uslova kojima se obezbeđuje numerička veza između atmosfere unutar oblasti za koje se pokreće i atmosfere van ove oblasti.

## **2.5. Pregled literature**

### **2.5.1. Simulacije energetske performansi novoprojektovanih i postojećih objekata**

Simulacije energetske performansi zgrada predstavljaju važan alat koji je moguće koristiti prilikom donošenja odluka koje se tiču energetske efikasnosti zgrada.

U radu [68] je pokazano da integrisanje brisoleja u fasadu zgrade poboljšava njene energetske performanse tokom životnog veka. Bojić i sar. [69] su upoređivali energetske performanse zgrada sa i bez Trombovog zida i došli do zaključka da zgrade sa Trombovim zidom troše i do 20% manje energije za grejanje. U radu [70] je korišćen simulacioni alat kako bi se uporedila efikasnost različitih pasivnih strategija tj. termofizičkih karakteristika omotača zgrade, primene rešenja sa hladnim krovovima, različiti odnosi zastakljenosti fasade i izbor tipa zasenčenja, a sve sa ciljem definisanja kriterijuma za projektovanje zgrada nulte-neto potrošnje energije. Uticaj različitih tipova

zastakljenja i načina ventilacije dvostruke fasade na energiju za potrebe grejanja i hlađenja objekta je prikazan u radu [71]. Eksperimentalno istraživanje termičkih karakteristika prirodno ventilisane dvostruke fasade je prikazano u radu [72]. Potencijali za uštedu energije primenom materijala sa faznom promenom na omotače zgrada male mase su kvantifikovani u istraživanju [73] gde je pokazano da se odgovarajućim izborom materijala sa faznom promenom i primenom noćne ventilacije potrošnja energije za hlađenje može smanjiti za više od 9%. Variranjem lokacije zgrade, klimatskih uslova, tipa zastakljenja, debljine toplotne izolacije elemenata omotača, karakteristika zelenog krova (debljina i karakteristike sloja zemlje na krovu, vegetacione karakteristike biljaka) u detaljnom simulacionom alatu, u radu [74] je zaključeno da se zelenim krovovima može znatno smanjiti toplotne opterećenje u zgradama kod kojih nije predviđena klasična izolacija krova, a istovremeno je dobijen i pouzdan alat za brzu procenu ušteta usled implementacije zelenog krova.

Uticao izbor sistema grejanja i klimatizacije na potrošnju energije, eksploatacione troškove i uticaj na životnu sredinu dobijen simulacijom je prikazan u radu [75]. Mogućnost korišćenja nekonvencionalnih sistema grejanja sa OIE je ispitan detaljnim simulacionim alatom i u istraživanju [76]. Značajni istraživački naporu su uloženi u modeliranje i simulaciju integrisanih solarnih i fotonaponskih sistema [77] koji su pokazali potencijal za uštedom i do 30% energije za grejanje [78]. Kombinacijom EnergyPlus i GenOpt [79] izvršena je optimizacija parametara koji utiču na troškove energije i toplotni komfor, tj. pronađena su optimalna debljina izolacije omotača, temperatura napojne vode i površina radijatora kojima se troši najmanje energije uz zadovoljenje uslova toplotnog komfora. Izbor optimalnog oblika stambene zgrade, karakteristika omotača, sistema grejanja i klimatizacije sa njihovim karakteristikama u projektnom i radnom režimu je prikazan u radu [80].

Usled promocije OIE brojnim nacionalnim i međunarodnim propisima, pre svega u dostizanju ciljeva 20-20-20 u Evropi u mnogim simulacionim alatima je integrisano i modeliranje sistema zasnovanih na OIE. Mogućnost korišćenja fotonaponskih panela zarad postizanja neto-nulte potrošnje energije u jednopodružnoj kući u Srbiji je prikazana u radu [81]. Korišćenjem detaljnog simulacionog alata (EnergyPlus) određen je broj fotonaponskih panela kojima se može postići neto-nulta potrošnja energije u zgradi. Različite konfiguracije sistema koji koriste OIE su simulirane kako bi se optimizovao potencijal izmenjivača toplote tipa zemlja-vazduh [82].

Praksa je pokazala da ponašanje korisnika zgrade ima veliki uticaj na potrošnju energije, pa postoji potreba da se prilikom simulacija energetske performansi i ova činjenica uzme u razmatranje. Burak Gunay i sar. [83] su implementirali modele, nađene u literaturi, za predikciju prisustva i ponašanja korisnika u smislu njihovog uticaja na otvaranje prozora, manipulaciju sa zastorima, korišćenje sistema osvetljenja i nivoa odevenosti, i ispitivali uticaj na rezultate simulacija izvršenih



u EnergyPlus. Na osnovu 4 modela predikcije otvaranja prozora pokazali su da postoje sezonski trendovi u manipulaciji korisnika prozorima i da je potencijalno smanjenje u potrošnji energije za hlađenje skoro 3 puta veće od rezultujućeg povećanja potrošnje energije za grejanje.

Integracija teorije toplotnog komfora u simulacije energetske performansi zgrada se ogleda u činjenici da se sva projektna rešenja ili operativne strategije rada sprovode sa dvostrukim ciljem: najmanja moguća potrošnja energije za najbolji mogući komfor. Najzastupljeniji simulacioni alati imaju integrisane algoritme za predikciju odgovarajućih indeksa toplotnog komfora, a rezultati ovih algoritama se koriste za optimizaciju rada sistema u zgradi.

Značaj sektora zgradarstva u energetske bilansu jedne zemlje ili njegovom uticaju na životnu sredinu, ne ogleda se samo u potrošnji energije i emisiji GSESB u toku korišćenja zgrade, već i u energiji i emisijama „zarobljenim“ (en. *embodied*) u materijalima korišćenim za izgradnju i proizvodnju svih delova i sistema zgrade, energiji i emisijama „zarobljenim“ prilikom same izgradnje, ali i energiji i emisijama koja će se potrošiti prilikom rušenja zgrade. Iz ovog razloga, celokupan životni vek zgrada se mora uzimati u razmatranje, što je predmet teorije životnog ciklusa (en. *LCA, life cycle assessment*) [84, 85]. Poslednja aktivnost direktno je povezana i sa pametnim mrežama, zgradama i naseljima nulte potrošnje energije itd. što je domen energetske planiranja i energetske politike jedne države, a i u ovoj oblasti se intenzivno koriste simulacije energetske performansi [86].

### **2.5.2. Kalibrisana simulacija**

Kao što je već rečeno, merenja potrošnje energije u zgradama su pokazala da postoje značajna odstupanja u odnosu na rezultate dobijene simulacijama, pa je kod simulacije postojećih zgrada potrebno izvršiti kalibraciju modela. U nedostatku standardizovane procedure za sprovođenje kalibrisane simulacije koriste se modeli različitih nivoa detaljnosti, pri čemu su modeli kalibrisani u odgovarajućoj vremenskoj rezoluciji na osnovu dostupnih podataka sa samih objekata ili kratkotrajnih i dugotrajnih merenja koja su za tu priliku realizovana. Rezultati kalibrisanih simulacija su korišćeni za izbor mera povećanja energetske efikasnosti celih zgrada ili pojedinačnih tehničkih sistema.

Zajedničko za sva istraživanja, u kojima je u nekoj fazi bilo potrebno dobiti kalibrisane modele koji će se koristiti u simulacionim alatima jeste postupak kreiranja inicijalnog modela, pod uslovom da model nije kreiran u nekoj od prethodnih faza projektovanja ili rekonstrukcije. Kreiranje inicijalnog modela se vrši na osnovu raspoložive tehničke dokumentacije ili merenjima na samom objektu, odnosno podacima iz:

- arhitektonskog i građevinskog projekta, odnosno projekta građevinske fizike kako bi se definisala geometrija objekta, građevinske konstrukcije, položaj i karakteristike transparentnih delova omotača itd.,
- glavnog mašinskog projekta, kako bi se valjano modelirali svi sistemi KGH, kako oni na strani potrošača (sekundarni krug/strana potreba) tako i oni na strani izvora energije (primarni krug/strana isporuke), i njihovih sastavnih komponenata,
- glavnog projekta elektroinstalacija, pre svega sistema osvetljenja objekta,
- tehničke dokumentacije proizvođača komponenata koje su ugrađene u odgovarajuće sisteme/objekat,
- obilazak (više obilazaka) i energetske preglede objekta.

Soebarto [87] je predstavila proceduru kalibracije korišćenjem kratkotrajnih merenja i mesečnih računa za energente, koja je verifikovana na dve studije slučaja u Teksasu, SAD. Predstavljena procedura obuhvata: prikupljanje podataka o objektu, KGH sistemima i načinu njihovog rada, klimatskim podacima i mesečnoj potrošnji energije objekta, kratkotrajna merenja potrošnje električne energije u periodu 2-4 nedelje kako bi se dobili dnevni profili korišćenja sistema osvetljenja i rada ventilatora klima komore pri čemu se dobijeni podaci koriste i u kalibrisanoj simulaciji, kratkotrajna merenja temperatura unutrašnjeg vazduha nekoliko zona objekta kako bi se ovi podaci koristili kao ulazi za simulacioni alat, razdvajanje potrošnje energije na pojedinačne podsisteme, analiza rezultata simulacija i upoređenje sa izmerenim vrednostima pri čemu su kao indikatori kalibrisane simulacije korišćeni RMSE i CV(RMSE), promena ulaznih parametara simulacije do dobijanja rezultata prihvatljive tačnosti.

Pedriani i dr. [88] su razvili metodu kalibracije u 3 koraka: simulacija na osnovu raspoložive tehničke dokumentacije, obilazak objekta i energetske pregled uključujući trenutna i kratkotrajna merenja (nivo osvetljenosti u zoni, protok vazduha na elementima za distribuciju, temperaturu unutrašnjeg vazduha, angažovanu snagu sistema osvetljenja itd.), dugotrajna merenja potrošnje električne energije, prema kojoj je i vršena kalibracija modela. Predloženo je da se potrošnja električne energije meri i na nivou celog objekta, ali i na nivou pojedinih podsistema kao što su sistem osvetljenja, aparati i uređaji koji postoje u objektu i na nivou pojedinačnih sistema KGH. Dugotrajna merenja su korišćena za podešavanja rasporeda korišćenja i rada odgovarajućih podsistema. Metodologiju su proverili na sedam poslovnih objekata u Brazilu, a korišćen je simulacioni alat DOE-2.1E.

Tamburini i dr. [89] su prikazali proceduru kalibracije modela prema izmerenim temperaturama unutrašnjeg vazduha prilikom rekonstrukcije krova jednog industrijskog objekta, pri čemu su korišćena i merenja potrošnje električne i toplotne energije. Model je kreiran u ESP-r simulacionom

alatu. Treba napomenuti da su predložili korišćenje analize osetljivosti kako bi se izabrali najuticajniji parametri modela koje je potrebno meriti.

Pan i dr. [90] su razvili proceduru kalibrisane simulacije modela poslovnog objekta u Šangaju, kreiranog u simulacionom alatu DOE-2.1E, koja je slična procedurama u [76, 77], pri čemu je kalibracija vršena na mesečnom nivou za potrošnju električne energije i potrošnju prirodnog gasa, a kao indeksi kalibracije su korišćeni MBE i CV(RMSE). Rezultati su pokazali da kalibrisani model zadovoljava granične vrednosti indeksa što se tiče potrošnje električne energije, ali ne i indekse koji se tiču potrošnje prirodnog gasa.

Carrilo i dr. [91] su razvili proceduru kalibrisane simulacije kojom su uprostiti detaljni energetski model objekta pomoću metode analiza i renormalizacija primarnih i sekundarnih članova (en. PSTAR, *Primary and Secondary Terms Analysis and Renormalization*).

Reddy [92] je za potrebe ASHRAE, formirao metodologiju kalibrisane simulacije koja se sastojala iz sledećih faza: definisanje niza uticajnih ulaznih parametara modela (uključujući i profile/rasporede) sa njihovim inicijalnim vrednostima i opsezima u kojima se mogu menjati u zavisnosti od tipa objekta, gruba pretraga prostora rešenja problema kalibracije na bazi Monte Carlo analize osetljivosti kojom se identifikuje niz najuticajnijih parametara i definišu uže granice njihove varijabilnosti, fina pretraga prostora rešenja problema kalibracije kojom se bira nekoliko vektora potencijalnih rešenja kalibrisane simulacije, suženi broj potencijalnih rešenja se koristi u analizi neizvesnosti kako bi se ocenila neizvesnost predikcije čitavog postupka kalibrisane simulacije.

Sun i Reddy [93] su po metodologiji prikazanoj u [92] problem kalibrisane simulacije predstavili kao neograničen problem višekriterijumske optimizacije (pristup sa kaznenim funkcijama) kojim se minimizuje funkcija cilja koja obuhvata dva člana i to kvadriranu razliku izmerene i simulacijom dobijene energije objekta kao i član kojim se ulazni parametri optimizacije pokušavaju držati u granicama očekivanih vrednosti. Predložili su da se analizom osetljivosti broj ulaznih parametara optimizacije svede na najviše 25.

Kasnije su Tahmasebi i sar. [94] predložili dodatno unapređenje ove metodologije u delu nalaženja promenljivih koje je potrebno varirati. Na bazi sopstvenog znanja i iskustva usvojili su niz od 23 promenljive sa odgovarajućim opsezima i sproveli Monte Carlo analizu osetljivosti kojom su broj značajnih ulaznih promenljivih sveli na četiri koje su koristili u optimizaciji. Korišćena funkcija cilja je pored koeficijenta varijacije sadržala i koeficijent determinacije, sa odgovarajućim ponderacionim faktorima. Model poslovnog objekta unutar kampusa Univerziteta u Beču, kreiran u EnergyPlus, je kalibrisan na satnom nivou prema izmerenim i simuliranim temperaturama unutrašnjeg vazduha (osrednjene vrednosti iz svih termičkih zona modela).

Penna i sar. [95, 96] su koristili identičan pristup kao [94] pri kalibraciji modela škole u Vičenci, Italija, pri čemu su kalibraciju modela razvijenog u TRNSYS realizovali u nekoliko razdvojenih perioda pri čemu je svaki od perioda trajao dve nedelje. Usvajanjem odgovarajućih perioda, uspeh su da optimizuju različite ulazne promenljive modela u nekoliko etapa. Tako su u periodu kada se škola ne koristi i ne rade sistemi grejanja vršili optimizaciju termofizičkih svojstava i broja izmena vazduha na sat usled infiltracije. U sledećem periodu, kada je postojala potreba za grejanjem, ali nije bilo prisutnih u školi optimizovali su osnovne karakteristike radijatorskog sistema grejanja (nominalne kapacitete grejnih tela, maksimalni protok vode kroz radijatore i dr.). U trećem i četvrtom periodu koji karakterišu prisustvo ljudi u školi, optimizovali su ponašanje korisnika, tačnije odredili su njihov uticaj na nivoe zasenčenosti i broj izmena vazduha na sat usled otvaranja prozora, i to u periodu kada nema potreba za grejanjem i u periodu kada je sistem grejanja bio u pogonu. U svim periodima kalibracije dokazali su značajno smanjenje koeficijenta varijacije.

Lavigne [97] je razvila metodu kalibracije zasnovanu na optimizaciji koja je uspešno implementirana u simulacioni alat DOE2.1E. Model se kalibriše prema mesečnoj potrošnji električne energije i mesečnoj vršnoj snazi objekta, i to minimizovanjem sumiranih kvadrata razlike simulirane i izmerene potrošnje električne energije i vršne snage. Za indekse kalibracije usvojene su relativne greške simuliranih u odnosu na izmerene vrednosti. Razvijena metoda je primenjena na dva poslovna objekta koji kao primarni energent koriste električnu energiju. Opisanom metodom kalibracije su relativne greške modela smanjene sa maksimalnih 122% na 25.8%, koliko su iznosile za vršnu snagu jednog od prikazanih objekata.

### **2.5.3. Analiza osetljivosti**

De Wit i Augenbroe [98] su predstavili statističku „screening“ tehniku kojom su odredili dominantne izvore neizvesnosti na rezultate simulacije dobijene ESP-r simulacionim alatom. Dominantni izvori neizvesnosti su infiltracija spoljašnjeg vazduha koja potiče od neizvesnosti u koeficijentima pritiska vetra i neizvesnost u distribuciji temperature unutrašnjeg vazduha. Neizvesnost je kvantifikovana ekspertskom procenom jer su rezultate svog hipotetičkog eksperimenta predstavili grupi eksperata, koji su navodili svoju procenu neizvesnosti u realizaciji projekta.

Westphal i Lamberts [99] su koristili lokalnu analizu osetljivosti kao deo kalibracije energetskog modela poslovnog objekta u Brazilu kreiranog u EnergyPlus. Za svaku komponentu energetskog bilansa toplotne zone (prozori, zidovi, krov, pod, unutrašnju opremu, sistem osvetljenja, ljude i infiltraciju) su definisali odgovarajuće ulazne promenljive (odnos površine prozora prema spoljašnjoj fasadi, visinu od poda do poda, koeficijent prolaza toplote prozora, koeficijent osenčenosti itd.). Nakon kalibracije modela po potrošnji električne energije za osvetljenje i

unutrašnje aparate i uređaje zaključili su da je najveći uticaj prozora na energetske performanse, pa su sproveli analizu osetljivosti ulaznih parametara na toplotno opterećenje objekta. Od pet parametara najznačajniji je koeficijent osenčenosti prozora.

Lam i sar. [100] su sproveli lokalnu analizu osetljivosti u cilju identifikacije najuticajnijih projektnih parametara na smanjenje potrošnje električne energije u sistemima centralnog grejanja i klimatizacije 10 poslovnih zgrada u Hong Kongu. Modeli su formirani DOE-2.1E simulacionim alatom. Od preko 60 ulaznih promenljivih pokazali su da promena zadate unutrašnje temperature hlađenja sa 22°C na 25.5°C, smanjenje instalisane električne snage osvetljenja za 2 W/m<sup>2</sup> i prelazak sa vazduhom hlađenih na vodom hlađene rashladne mašine može da dovede do ušteda u potrošnji električne energije od 14%, 5.2% i 11% respektivno.

Corrado i Mechri [101] su koristili analizu neizvesnosti i globalnu analizu osetljivosti na energetske sertifikaciju stambenih zgrada u Italiji. Koristeći mesečni metod definisan u [10] su ispitali neizvesnost energetske klase usled varijacija u 129 ulaznih promenljivih sa odgovarajućim funkcijama raspodele verovatnoće. Uzorkovanje su sproveli metodom latinske hiperkocke (en. LHS *Latin hypercube sampling*). Nakon analize neizvesnosti sproveli su analizu osetljivosti po Morris-u za različite članove jednačine toplotnog bilansa kako bi našli najuticajnije ulazne promenljive na energetske razred. Zaključili su da manje od 10 ulaznih promenljivih ima uticaj na neizvesnost energetske klase. Slična metodologija je korišćena u radu [102]. Za šest arhitektonskih parametara (faktor oblika, orijentacija, procenat zastakljenosti fasada, stepen absorpcije materijala omotača, faktor zasenčenosti objekta i unutrašnji toplotni kapacitet) sprovedene su analize neizvesnosti i osetljivosti potreba za grejanjem i hlađenjem objekata u pet regiona Italije, dok su regresionom analizom ustanovili linearnu zavisnost ovih potreba od gore navedenih arhitektonskih parametara.

Yildiz i Arsan [103] su sproveli Monte Carlo analizu osetljivosti kojom su dobili najuticajnije parametre na energetske performanse poslovnog objekta u Izmiru, Turska. Poslovni objekat visoke spratnosti su redukovali modeliranjem u EnergyPlus-u prizemlja, tipičnog sprata i potkrovlja. Za uzorkovanje su koristili LHS, a kao indikator osetljivosti SRRC. Analiza osetljivosti je sprovedena u SimLab 2.2 [104] za specifičnu godišnju potrošnju energije za grejanje i hlađenje, simultanim variranjem 35 ulaznih promenljivih. Za svaki model su dobili po 10 najuticajnijih ulaznih promenljivih na specifičnu potrošnju energije za grejanje i specifičnu potrošnju energije za hlađenje. Sličan pristup problemu, za druge potrebe istraživanja i sa drugim indikatorima osetljivosti je prikazan i u [105-108].

Ioannou i Itard [109] su primenom Monte Carlo analize osetljivosti identifikovali ulazne promenljive koje najviše utiču kako na potrošnju energije za grejanje stambene zgrade u Holandiji,

tako i na PMV (en. *predicted mean vote*) indeks toplotnog komfora. Stambena zgrada je modelirana i kao objekat najvišeg energetskeg razreda, ali i kao objekat najnižeg energetskeg razreda, i to svaki sa tri različita sistema grejanja (idealno toplotno opterećenje, sistem radijatorskog grejanja sa kotlom na prirodni gas, sistem podnog grejanja sa toplotnom pumpom tipa voda-voda). Pored termičkih i radnih parametara sistema (zadata unutrašnja temperatura, infiltracija, orijentacija, koeficijenti provođenja toplote materijala, koeficijenti prolaza toplote prozora i dr.) uvedeni su u analizu i subjektivni parametri (nivo odevenosti i metaboličko odavanje toplote). Usvojili su nasumično uzorkovanje ulaznih promenljivih, koje su realizovali u SPSS [110] u kome je vršeno i izračunavanje indikatora osetljivosti, SRRC. Za potrebe simulacija na osnovu nasumično generisanih ulaznih promenljivih koristili su jEplus. Pokazali su da na potrošnju energije najviše utiču navike ljudi, tačnije promene zadatih temperatura i infiltracija, dok na PMV indeks očekivano najviše utiču subjektivni uslovi.

Kombinacija pristupa [103] i [109] je prikazana u [111], sa posebnim osvrtom na mogućnosti korišćenja analize osetljivosti u izradi optimalnih operativnih strategija rada sistema KGH, na dnevnom nivou.

#### **2.5.4. Unapređenje energetske performansi postojećih objekata simulacijom podržanim radom sistema KGH**

U brojnim naučnim i stručnim radovima prepoznat je značaj korišćenja simulacija u kasnijim fazama životnog ciklusa objekta, konkretno u fazi korišćenja i to, pre svega, u izradi dnevnih i sezonskih optimalnih strategija rada sistema KGH. U literaturi se koriste termini kao što su: optimizacija radnog režima, praktična optimizacija rada ili simulacijom podržan rad sistema KGH. Kako se pod simulacijom podržanim radom podrazumeva i korišćenje neke vrste modela zgrade i sistema, sa stanovišta ovog istraživanja od posebnog je značaja korišćenje detaljnih simulacionih alata.

Killian i Kozek [112] su u svom radu zaključili da je modelsko prediktivno upravljanje idealan vid upravljanja za zadovoljenje kontradiktornih ciljeva prilikom optimizacije radnog režima (maksimizacija toplotnog komfora i minimizacija potrošnje energije) sistema KGH u zgradama.

Hazyuk i sar. [113, 114] su došli do zaključka da je za osnovni zahtev u optimalnoj regulaciji unutrašnje temperature (zadovoljenje toplotnog komfora sa minimalnom potrošnjom energije) modelski-prediktivan pristup najbolji jer se njime mogu uključiti i vremenske prognoze i predikcije prisustva ljudi kao osnovni poremećaji modela. Glavna prepreka u implementaciji je neophodnost dinamičkog modela zgrade. Predlažu da se koriste prostiji dinamički modeli čiji bi se parametri dobili identifikacijom sistema korišćenjem detaljnih modela, a ne merenjima na realnim zgradama.

Mahdavi [115] je u svom radu predložio dopunu postojećih sistema automatskog upravljanja virtuelnim modelima zgrade koji bi radili paralelno sa sistemom, jer bi takav način rada omogućio ili vraćanje unazad kako bi se analiziralo prethodno dinamičko ponašanje zgrade i kalibrisao model zarad boljih predikcija, ili pomeranje unapred kako bi se upoređivali odzivi zgrade različitim alternativnim načinima rada sistema. Ovakav pristup problemu implemeniran je u sistem upravljanja sistemom osvetljenja u zgradi.

Clarke i sar. [116] su prepoznali mogućnost korišćenja detaljnog simulacionog alata za potrebe prediktivne regulacije i upravljanja sistemom centralnog grejanja u realnom vremenu. U eksperimentalnoj instalaciji niskotemperaturskog radijatorskog sistema grejanja optimizovali su start sistema korišćenjem detaljnog modela razvijenog u ESP-r kako bi bila postignuta željena temperatura unutrašnjeg vazduha u tačno definisanom trenutku vremena.

Cho i Zaheer-uddin [117] su za zgrade sa sistemom podnog grejanja, umesto kontinualnog rada sistema, predložili rad sistema sa prekidima, tj. dovođenje toplote u zonu optimizovanim brojem i trajanjem perioda grejanja u toku pojedinačnog dana. Upoređenje prediktivnog pristupa sa konvencionalnim su izvršili i simulacijama i merenjima na eksperimentalnim instalacijama. Toplotno opterećenje zgrade je aproksimizovano polinomom 5. reda, dok su koeficijenti polinoma identifikovani pomoću modela i simulacija u TRNSYS-u. Uvođenjem prognostičkog modela časovne promene temperature spoljašnjeg vazduha uspeali su da ostvare u proseku 20% manje dovedene toplote prediktivnom strategijom rada sistema u odnosu na konvencionalnu. Pored ušteta potvrđenih i simulacijama u TRNSYS-u i merenjima na realnim instalacijama, prediktivnim pristupom su ostvarene i znatno manje fluktuacije temperature unutrašnjeg vazduha. Karlsson i Hagentoft [118] su posmatrali identičan problem, pri čemu je kao ograničenje u optimizacionom problemu stavljeno da temperatura unutrašnjeg vazduha bude u granicama ugodnosti, dok je vršena optimizacija temperature napojne vode sistema na bazi predikcija energetske potrebe.

Paris i sar. [119] su razvili strategiju optimalnog korišćenja raspoloživih energetske izvora na lokaciji, sa ciljem smanjenja potrošnje energije iz fosilnih goriva i promovisanja OIE uz zadovoljenje uslova komfora. Postojeću PID regulaciju unutrašnje temperature su nadogradili blokovima modelskog prediktivnog upravljanja i blokom fazi-logičkog upravljanja. Za definisane uslove, strategija nadogradnje PID modelski prediktivnim blokom je dala najbolje rezultate.

Petersen i Svendsen [120] su razvili metod za simulaciju prediktivnog upravljanja radom sistema grejanja i klimatizacije u ranim fazama projektovanja zgrade. Korišćenjem detaljnog simulacionog modela i idealnih vremenskih prognoza (deterministički pristup, koristi se klimatska datoteka sa tipičnim vrednostima) predviđaju se potrebe za grejanjem i/ili hlađenjem, što omogućava proaktivno delovanje sistema upravljanja u smislu održavanja operativne temperature u granicama

ugodnosti sa minimalnim utroškom energije. Svaki dan u godini je podeljen na periode: period korišćenja (zauzetosti) i period nekorišćenja, kako bi se relaksirala ograničenja na strani komfora (operativnih temperatura) prilikom optimizacije. Koristeći sopstveni simulacioni alat, vršena je optimizacija aktiviranja odgovarajućih aktivnih i pasivnih sistema u letnjem periodu u predefinisanim redosledu (zaštita od Sunčevog zračenja, povećano provetravanje, povećana mehanička ventilacija, uključivanje mehaničkog hlađenja). Svaki sat u godini pripada ili periodu korišćenja (npr. od 8–16h radnim danima) za koji se definišu i granice operativnih temperatura primenjujući adaptivni model za nivo odevenosti, ili periodu nekorišćenja (svi ostali sati) tj. pripada periodu koji se smatra trenutnim periodom, dok period koji sledi postaje sledeći period. Dinamički horizont predikcije se uvek sastoji od preostalih sati trenutnog perioda i sati sledećeg perioda. Petersen i Bundgaard [121] su proširili razvijeni metod ispitivanjem uticaja neizvesnosti u vremenskoj prognozi na performanse modelski-prediktivnog upravljanja. Predikcija strategije upravljanja za sat „n“ kako bi se postigla zahtevana operativna temperatura na kraju perioda kojem „n“ pripada se sprovodi u sledećim koracima: temperatura na početku sledećeg perioda se dobija simulacijom sa prognozom za preostale sate trenutnog perioda pod uslovom da sistemi miruju; maksimalna temperatura u sledećem periodu se dobija na bazi prognoza uz mirovanje sistema i ona je osnov za određivanje zadate vrednosti temperature u satu „n“; optimalna strategija hlađenja se dobija aktiviranjem sistema po opisanom redosledu. Primenom na jednozonski model kancelarije u kojoj borave dve osobe, sprovedena je lokalna analiza osetljivosti potrošnje energije i broja sati sa prekoračenom operativnom temperaturom na promene u projektnim parametrima (orijentacija zgrade, masa konstrukcije, procenat zastakljenosti fasade i tip zastakljenja) i to za tri strategije upravljanja: konvencionalna, prikazana metoda sa prognozama, prikazana metoda sa realnim klimatskim podacima, a sve to za dve lokacije u Danskoj u trajanju od po jedne kalendarske godine. Upoređujući podatke iz prognoza i stvarno izmerenih temperatura spoljašnjeg vazduha i globalnog zračenja izračunate su srednje vrednosti i standardne devijacije ovih veličina. Analiza je pokazala da neizvesnosti u prognozi imaju velikog uticaja na izabrane projektne parametre, da se po pravilu strategijama upravljanja sa prognozama ostvaruje bolji komfor, ali da ne mora nužno da se ostvare i uštede u energiji.

Ma je sa koautorima [122, 123] uveo metodologiju ekonomskog modelskog prediktivnog upravljanja za smanjenje troškova rada sistema KGH koja je implementirana u realnoj zgradi. Za višezonski model poslovne zgrade kondicioniran vazдушnim sistemom sa promenljivim protokom vazduha (VAV sistem klimatizacije) izvršena je optimizacija rada sistema u realnom vremenu korišćenjem ko-simulacionog pristupa preko BCVTB. Za prediktivnu komponentu korišćen je uprošćen dinamički model dobijen tehnikama identifikacije sistema pomoću detaljnog modela razvijenog u EnergyPlus alatu. Ovom identifikacijom su uspostavljene veze između zadatih



vrednosti unutrašnjih temperatura i ostvarenih temperatura u zonama i potrošnje energije. Optimizovani su ukupni dnevni troškovi električne energije za rad sistema klimatizacije, bez narušavanja komfora korisnika (min-max optimizacioni problem) linearnim programiranjem uvođenjem odgovarajućih jednačina i nejednačina veze. Metodologija je proverena na realnoj poslovnoj zgradi. Profil opterećenja je pomeren i poravnat predhlađenjem zgrade do dolaska ljudi i to: održavanjem temperatura u jutarnjim satima koje odgovaraju donjoj granici komfora (skladištenje rashladne energije u termičkoj masi), podizanjem temperatura u popodnevnim satima koje odgovaraju gornjoj granici komfora, a u periodima kada nema ljudi u objektu i zaustavljanjem sistema klimatizacije. Hijerarhijski koncept ekonomskog modelskog upravljanja je razvijen u radu [124]. U okviru istog horizonta planiranja implementirana su dva horizonta upravljanja različite dužine kojim se obezbeđuju optimalan rad izvora energije i istovremeno održavanje toplotnog komfora u definisanim granicama (kraći horizont upravljanja).

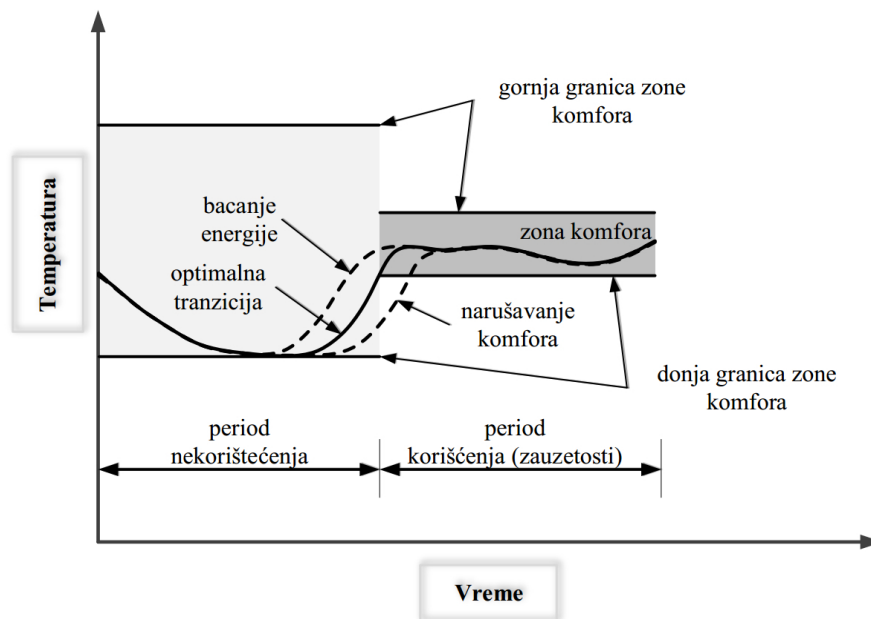
Ko-simulacioni pristup u radu sistema sa BCVTB je korišćen i u radu [125]. Upravljanje položajem žaluzina klima komora, po entalpiji pripremljenog vazduha, je realizovano podacima iz zgrade sakupljenim u realnom vremenu. Kalibrisani detaljni model poslovne zgrade je u središtu metodologije koja se sprovodi u 4 koraka. U prvom koraku se preuzimaju relevantni podaci iz sistema za daljinski nadzor i upravljanje, pre svih klimatski podaci na lokaciji, postavne i izmerene vrednosti parametara sistema, isporučena energija itd. U sledećem koraku se preuzeti podaci koriste za reviziju inicijalnog modela zgrade, odnosno koriste kao termička istorija modela do trenutka u realnom vremenu kada počinje poslednji korak metodologije, a to je predikcija potrošnje i prediktivno upravljanje radom sistema. Simulacijom detaljnog modela za narednih nekoliko vremenskih koraka simulacije (vremenski korak u simulaciji je iznosio 15 minuta) dobija se očekivana potrošnja energije sistemima. Prediktivno upravljanje se realizuje premošćavanjem postojećeg sistema upravljanja na bazi trenutnih vrednosti. Naime, zamenom trenutnih vrednosti, vrednostima dobijenih simulacijom za naredni korak, smanjuje se vremensko kašnjenje prilikom podešavanja zadatih vrednosti temperatura i omogućava održavanje komfora. Ovakvim radom klima komora postignute su uštede u energiji za hlađenje.

Oldewurtel i sar. [55] su fokusirali istraživanje na integrisanu automatizaciju prostora (en. IRA, *Integrated Room Automation*) favorizovanjem aktuatora niskih energetske troškova (upravljanje zastorima, evaporativni hladnjaci) u odnosu na aktuatore visokih energetske troškova (rashladne mašine, kotlovi itd.) korišćenjem termičke mase zgrade. Uporedili su konvencionalne strategije upravljanja sa dve varijante modelskog prediktivnog upravljanja: determinističkog (vremenske prognoze se smatraju idealno tačnim) i stohastičkog (uzima se u obzir neizvesnost u vremenskim prognozama). Kao izvor, poslužile su vremenske prognoze zvanične meteorološke službe u

Švajcarskoj izdavane na svakih 12 sati sa prognozom za narednih 72 sata. Toplotna zona je modelirana kao termička mreža, dok je za identifikaciju parametara modela korišćen TRNSYS. Na primeru pet različitih kombinacija sistema KGH pokazano je da obe varijante modelskog prediktivnog upravljanja ostvaruju uštede energije i poboljšanje toplotnog komfora u odnosu na konvencionalno upravljanje, pri čemu stohastička varijanta ostvaruje bolje performanse.

Grupa autora sa Tehničkog univerziteta u Pragu [54, 126-129] je pored izbora najadekvatnijih modela za modelsko prediktivno upravljanje, načina dobijanja uprošćenih modela, raznih detaljnih simulacionih alata koji su korišćeni u fazama razvoja i implementacije ovakvog načina rada, uvela u optimizacioni problem i PMV indeks toplotnog komfora umesto do tada najčešće korišćene operativne temperature. Tako je u [54] TRNSYS-om evaluirana optimalna strategija rada dvozonskog modela sa zasebnim termo-aktivnim sistemom grejanja i hlađenja (en. TABS, *thermally activated building system*) konstantnog protoka. Prostiji, linearni model je identifikovan *grey-box* tehnikom na detaljnom modelu (pseudo-binarnim nasumičnim signalima je vršena pobuda modela). Kao poremećaji koji deluju na model u horizontu predikcije usvojeni su i klimatski podaci i prisustvo ljudi. Predložena optimalna strategija rada sa PMV indeksom u optimizacionom problemu je upoređena i sa konvencionalnom strategijom rada i sa optimalnom strategijom rada sa unutrašnjom temperaturom u optimizacionom problemu. Za usvojeni horizont predikcije od 24h dokazano je da predložena PMV optimalna strategija rada u zbiru troši najmanje energije, iako u pojedinim delovima godine nije i najefikasnija. Ograničenja na strani komfora su uvek zadovoljena.

Hazyuk i sar. [130] su polazeći od činjenice da su testovi u emuliranom okruženju ponovljivi, dokazali da modelsko prediktivno upravljanje ima daleko bolje performanse od sistema energetske menadžmenta zasnovanog na PID upravljanju, odnosno PID upravljanja sa definisanim startom, u smislu daleko boljih uslova komfora, manje potrošnje energije i broja ciklusa uključenja/isključenja toplotne pumpe kao primarnog izvora energije modela referentne zgrade u Francuskoj. Korišćen je *white-box* model nižeg reda (termička mreža) čiji su parametri identifikovani simulacijama detaljnog modela u MATLAB-u. Iskorišćena je mogućnost akumulacije energije u masi objekta (slika 2.9) kako bi se izbeglo nepotrebno trošenje energije i narušavanje komfora, tj. da se zahtevani uslovi komfora postignu tačno u trenutku početka zauzetosti zgrade (zone). Na osnovu podataka iz vremenske prognoze, profila zauzetosti i definisanja funkcije cilja u problemu optimizacije kojom se uzimaju u obzir ograničenja na strani komfora, ograničenja u pogledu kapaciteta raspoloživih sistema, ali i ograničenja u smislu zaštite izvora energije i produženja njihovog životnog veka (u funkciji cilja se penalizuje i veliki broj promena u statusu rada toplotne pumpe), postignut je i optimalni start raspoloživih sistema.



**Slika 2.9.** Uslovi komfora i mogući scenariji evolucije unutrašnje temperature [130]

U istraživanju prikazanom u radu [131] je razvijeno okruženje oko detaljnog simulacionog alata i MATLAB-a u cilju nalaženja optimalne sekvence za upravljanje položajem prozora poslovne zgrade sa mešovitim sistemom ventilacije (kombinacija prirodne i mehaničke) kojom se minimizira potrošnja energije, troškovi za energiju ili emisije GSESB koji potiču od sistema ventilacije. Istovremeno se vrši penalizacija rešenja koja dovode do smanjenja toplotnog komfora ili učestale promene u statusu otvorenosti prozora. Za horizont planiranja od 24h i smatrajući vremensku prognozu idealnom (korišćena je TMY), dan-po-dan se vrši optimizacija rojem čestica položaja prozora po proceduri: učitani detaljni model se modifikuje na bazi optimizacionog algoritma (promena ulaznih promenljivih - status položaja prozora u blokovima od 2h), vrši se simulacija svih dobijenih modela, rezultati simulacije se čitaju u MATLAB-u i izračunava funkcija cilja, na osnovu izračunate funkcije se generiše novi vektor ulaznih promenljivih odgovarajućih dimenzija, postupak se ponavlja do zadovoljenja zaustavnog kriterijuma optimizacije. Nakon nalaženja skoro optimalnog rešenja vrši se pomeranje za jedan dan unapred i procedura se ponovo ponavlja. Pronađena skoro optimalna rešenja zadržavaju se u termičkoj istoriji modela. Ovo je tipičan primer *offline* optimizacije kojim se dobijaju heuristička pravila rada posmatranog sistema u zgradi. Prediktivne strategije upravljanja zgradama sa mešovitim sistemima ventilacije su prikazane i u [132] takođe PSO algoritmom iz GenOpt-a, pri čemu su zgrada i sistemi modelirani u MATLAB-u. Razvijeni su modeli zgrade i sistema za *offline* optimizaciju (detaljan model termičke mreže) determinističkim pristupom, tj. korišćeni su podaci tipične meteorološke godine. U radu [48] je uočena prednost korišćenja kompleksnih modela razvijenih detaljnim simulacionim alatima kako u *offline* tako i u *online* optimizaciji operativnih strategija rada sistema KGH, koja se ogleda u mogućnosti izučavanja fenomena koje je vrlo teško opisati prostijim modelima. Prednost korišćenja

detaljnih simulacionih alata je u njihovoj mogućnosti uključivanja indeksa toplotnog komfora u optimizacionim problemima. Postupak *offline* optimizacije je isti kao u [131], dok je postupak *online* optimizacije modifikovan dodavanjem servera koji manipuliše svim ulazima uključujući i vremensku prognozu, skladišti rezultate optimizacije, i šalje upravljačke signale sistemu u zgradi u realnom vremenu. Ključna razlika između ova dva pristupa je u horizontima planiranja i horizontima upravljanja. Horizont planiranja može da bude u opsegu od 24h do nekoliko dana (u zavisnosti od vremenskog perioda za koji se izdaje prognoza) i meseci (u slučaju da se koristi TMY ili AMY), dok horizont upravljanja može da bude ili 1h (za *online* optimizaciju) ili 24h (za *offline* optimizaciju). Kod *online* optimizacije, vreme optimizacije je ograničeno na 1h, i ukoliko se do tad ne nađe optimalno rešenje, najbolje nađeno rešenje se šalje sistemima u zgradi. Korišćeni su PSO algoritmi sa diskretnim, kontinualnim i binarnim promenljivim. U funkciji cilja je uključen i PMV indeks komfora koji je rezultat detaljnih simulacija. Mogućnost i efekte ovakvih pristupa su demonstrirali na tri studije slučaja.

Prednosti implementacije prediktivnih strategija na bazi prognoza za iskorišćenje potencijala slobodnog hlađenja prikazane su u radu [133]. Korišćenjem detaljnog simulacionog alata (TRNSYS) simuliran je dinamički odziv za naredna 24h, pri čemu je postavljeno ograničenje sa donje strane operativne temperature prilikom početka perioda zauzetosti narednog dana. Koncept je potvrđen na eksperimentalnoj instalaciji. Prognozirane vrednosti temperature i globalnog zračenja za predmetnu lokaciju su dodatno poboljšane primenom Kalmanovog filtera, što je unapredilo tačnost rezultata simulacija.

Coffey je u radu [134] na osnovu svog ranijeg istraživanja [135] u okviru kojeg je primenom optimizacionih algoritama iz GenOpt-a napravljeno okruženje za modelsko prediktivno upravljanje sa detaljnim simulacionim alatom, kao osnovne probleme u većem tržišnom prodoru modelskog prediktivnog upravljanja sa detaljnim simulacionim alatima naveo: tešku implementaciju *online* optimizacije u okviru postojećih sistema upravljanja u zgradi, dužine trajanja simulacija i nemogućnost eksplicitne inicijalizacije stanja na početku horizonta planiranja (karakteristika većine [122] alata za detaljnu simulaciju). Predložena je *offline* aproksimacija modelskog prediktivnog upravljanja sa detaljnim simulacionim alatom, pretraživanjem optimalnih rešenja preko mreže diskretnih nizova poremećaja (za svaki niz su nađene optimalne vrednosti ulaznih promenljivih). Upoređenjem sa konvencionalnom strategijom rada i *online* optimizacijom, dokazana je opravdanost ovakvog pristupa jer se ovakvom aproksimacijom ostvaruje 87% ušteda koje bi bile ostvarene *online* optimizacijom.

U istraživanju Žakule i saradnika [136] je predstavljeno čitavo okruženje za simulaciju zgrada sa implementiranim modelski prediktivnim upravljanjem. U okruženju se kombinuju optimizacioni

algoritmi MATLAB-a sa dva modela zgrade različitih nivoa kompleksnosti: inverzni model zgrade (zasnovan na transfer funkcijama) koji se koristi unutar optimizacione rutine i detaljni model zgrade kreiran u odgovarajućem simulacionom alatu kojim se vrši evaluacija optimalnih strategija rada i dobijaju početna stanja svakog novog horizonta planiranja. Funkcija cilja je pored potrošnje energije sadržala i član za penalizaciju prekoračenja operativne temperature koja je bila regulisana promenljiva.

Cole i sar. [137] su redukcijom parametara detaljnog simulacionog modela dobili prostiji model koji je korišćen za modelsko prediktivno upravljanje sistemom klimatizacije sa ciljem minimizacije troškova električne energije u periodu hlađenja objekta. Optimizacijom zadatih vrednosti temperature unutrašnjeg vazduha u toku horizonta planiranja, troškovi su smanjeni u proseku 60–70% odgovorajućim predhlađenjem zgrade (akumulacija energije u termičkoj masi zgrade) u jutarnjim satima i isključenjem sistema klimatizacije u popodnevnim satima kada je cena električne energije i najveća. Rackes i Waring [138] su polazeći od hipoteze istraživanja da simultana optimizacija potrošnje energije i kvaliteta unutrašnjeg vazduha (en. IAQ, *Indoor Air Quality*) daje bolje rezultate u smislu zadovoljenja ciljeva nego postojeće preporuke za obezbeđenjem svežeg vazduha (prvenstveno preporuka u ASHRAE 62.1 standardu), razvili okruženje za višekriterijumsku optimizaciju sa pomerajućim horizontom oko GenOpt. Optimizacijom protoka svežeg vazduha i zadatih vrednosti unutrašnje temperature po pojedinačnim zonama u periodu zauzetosti, dobijena je familija Pareto krivih za tri karakteristična dana (hladan zimski dan, topao letnji dan, dan u prelaznoj sezoni) i rezultati su upoređeni sa dva bazna scenarija (dovođenje minimalne porcije svežeg vazduha i personalizovana ventilacija). Za hladan zimski dan je moguće ostvariti uštede energije u opsegu 20–45% u zavisnosti od težinskog koeficijenta u višekriterijumskoj funkciji cilja, dok se u letnjem periodu ne ostvaruju uštede energije u odnosu na personalizovanu ventilaciju.

Regulacija PMV indeksa primenom neuronske mreže u okviru modelski-zasnovanog upravljanja je bila predmet istraživanja u radu [139]. Neuronskom mrežom je opisana funkcionalna zavisnost PMV indeksa od sunčevog zračenja, spoljne temperature i unutrašnjih izvora toplote. Za obučavanje neuronske mreže korišćen je detaljni simulacioni model u kome su nasumično isključivani sistemi grejanja 2–6 sati pre zauzetosti zgrade i sa nasumičnim vrednostima zadate temperature u toku jednog dana. Optimizacijom raspoloživosti sistema grejanja u MATLAB-u je regulisan PMV indeks u svakoj od zona modela sa pomerajućim horizontom. Sličan pristup je korišćen u radu [140] pri čemu je za optimizaciju korišćena metoda grananja i ograničavanja. Neuronske mreže su korišćene i u radu [141] za minimizaciju potrošnje energije uz zadovoljenje ograničenja na strani toplotnog komfora u zgradi sa neizvesnom prisutnošću i brojem ljudi, pri čemu je korišćena optimizaciona

metoda unutrašnje tačke. Kombinacija fazi logike i genetskih algoritama u MATLAB-u je prikazana u radu [142], pri čemu se detaljni simulacioni alat koristio i u ko-simulacionom okruženju za izračunavanje parametara toplotnog komfora na osnovu primljenih podataka o zadatim vrednostima temperature, ali i u fazi evaluacije ovakvog pristupa i upoređenja sa PMV regulacijom koja je implementirana u samom simulacionom alatu. Funkcijom cilja se smanjuje potrošnja energije, ali i ne narušava zadati PMV indeks u zoni..

Višekriterijumska optimizacija korišćenja termičke mase zgrade u letnjem periodu je predstavljena i u [143]. Korišćen je optimizacioni algoritam iz GenOpt-a (Hooke-Jeeves PSO) koji je povezan sa detaljnim simulacionim alatom (EnergyPlus), pri čemu je broj optimizacionih promenljivih sa nekoliko stotina sveden na 36 (optimizacijom promenljivih samo u periodu zauzetosti objekta za svakih 30 minuta). Uzimajući u obzir promenljivu cenu energenata na dnevnom nivou, redukovani su troškovi za energiju. Promenom težinskog koeficijenta toplotnog komfora u funkciji cilja dobijena je familija Pareto krivih za dva modela referentnih zgrada na tri lokacije u SAD. Kao i u [54] za određene vrednosti težinskog koeficijenta, potrebno je utrošiti više energije za zadovoljenje toplotnog komfora u odnosu na osnovni scenario, samo je profil potrošnje pomeren u periode dana kada je energija najjeftinija.

Pored klimatskih podataka koji su glavni izvor poremećaja u zgradama i sistemima, dodatni poremećaj predstavljaju i korisnici, tačnije broj ljudi u zgradi i njihovo ponašanje. Dobbs i Hency [144] su razvili algoritam upravljanja radom sistema KGH na osnovu predikcije prisustva i broja ljudi, kao i njihovog očekivanog ponašanja (u smislu poremećaja koji unose u toplotnu zonu). Oko uprošćenog modela termičke mreže, čiji su parametri identifikovani pomoću detaljnog simulacionog alata, formiran je stohastički model predikcije zauzetosti toplotne zone.

Pregledom literature se može jasno zaključiti da je simulacijom-podržan rad sistema implementiran ili nakon godina korišćenja objekta ili prilikom rekonstrukcije nekog od sistema grejanja, hlađenja i klimatizacije. Jedna od retkih referenci gde je simulacijom-podržan rad sistema KGH razmatran još u fazi projektovanja, a kasnije i izveden, jeste i Tehnološki centar Festo u Eslingen Berkhajmu u Nemačkoj [145].

Načini (svrha) korišćenja detaljnih simulacionih modela za simulacijom podržan optimalni rad sistema KGH mogu se grubo svrstati u sledeće kategorije:

- razvoj i evaluaciju novih načina upravljanja (prvenstveno modelski-zasnovanih) razvijenih drugim alatima i tehnikama [54, 55, 122-124, 126-129],
- razvoj opštih okruženja i metodologija oko detaljnog simulacionog alata za potrebe *online* [48] ili *offline* [48, 123, 134, 135] optimizacije rada i korišćenja sistema KGH.

U većini slučajeva je ovakav koncept implementiran u supervizorskom nivou upravljanja sa ciljem optimizacije potrošnje energije čitave zgrade, ali ima primera i implementacije koncepta na lokalnom nivou upravljanja [127] sa ciljem minimizacije greške upravljanja. U slučaju implementacije u supervizorskom nivou, funkcija cilja (funkcija upravljanja) je jedna ili kombinacija više veličina:

- minimizacija potrošnje energije [48, 124, 131, 136, 140, 141],
- održavanje toplotnog komfora [48, 140, 141],
- minimizacija eksploatacionih troškova [122-124],
- minimizacija vremena kada nisu zadovoljeni uslovi komfora [143].

Posmatrano sa stanovišta toplotnog komfora, u veći istraživanja je u funkciji cilja usvajana operativna temperatura [120, 121, 132, 136], temperatura vazduha [117-119], ali i PMV [54, 126-129, 141] i PPD [54, 142] indeksi komfora.

Od simulacionih alata najčešće su korišćeni EnergyPlus [48, 122-124, 138] i TRNSYS [54, 55, 117, 133, 136] dok su u delu optimizacije korišćeni MATLAB [130, 131, 136] i GenOpt [132, 134-138].

Najčešće korišćene optimizacione metode su:

- optimizacija rojevima čestica [48, 131, 132, 136, 143],
- genetski algoritmi [114, 135, 139, 142],
- druge metode optimizacije [56, 140, 141].

Simulacijom podržan optimalan rad je primenjen u sistemima:

- centralnog radijatorskog sistema grejanja [55, 114, 116, 130],
- centralnim sistemima klimatizacije sa promenljivim protokom vazduha [123, 125, 136],
- centralnim sistemima klimatizacije sa konstantnim protokom vazduha [132, 138],
- podnog grejanja [117, 118, 145],
- sa termički aktivnim građevinskim konstrukcijama [48, 54, 126-129] i dr.

### **2.5.5. Predikcija klimatskih promenljivih i kratkoročne vremenske prognoze**

Za simulaciju energetske performansi zgrada, ali i primenu simulacionih alata u izradi optimalnih strategija rada kroz simulacijom podržan rad sistema, neophodno je korišćenje klimatskih podataka. Može se zaključiti da se za *online* optimizaciju rada sistema koristi neki od modela predikcije klimatskih promenljivih pri čemu se rezultati predikcije mogu smatrati idealnim (deterministički pristup) [54, 55, 118] ili se može uzeti u obzir i neizvesnost u predikciji (stohastički pristup) [55, 135]. Takođe, za *offline* optimizaciju se po pravilu koriste realne, izmerene, vrednosti klimatskih promenljivih, koje služe da bi se analizirali različiti koncepti simulacijom-podržanog rada sistema i

vršila upoređenja sa konvencionalnim radom sistema, tačnije da bi se kvantifikovale koristi koje je bilo moguće ostvariti da su ti koncepti stvarno i bili implementirani [48, 121, 122, 136].

Tako je u istraživanju [108] za potrebe realizacije prediktivnog upravljanja sistemom podnog grejanja, definisan model predikcije temperature spoljašnjeg vazduha na satnom nivou, na osnovu eksterno dostavljenih podataka o očekivanim maksimalnim i minimalnim temperaturama narednog dana, kao i vremenima njihovih pojavljivanja (model zasnovan na Furijerovim redovima). Ren i Wright [146] su dekompozicijom ARMA modela na stohastički i deterministički deo prediktovali temperaturu spoljašnjeg vazduha. U odnosu na stohastički ARMA model, tačnost je povećana za 10%. Henze i sar. [147] su ispitivali uticaj različitih prognostičkih modela (metode zasnovane na referentnom danu, sezonski integrisani ARMA model) na prediktivno optimalno upravljanje aktivnim i pasivnim sistemima skladištenja energije. Upoređenjem sa izmerenim vrednostima za dve lokacije u SAD su rangirali ispitivane modele u smislu srednje relativne greške i koeficijenta varijacije srednje kvadratne greške za svaki sat u godini. Svi predloženi prognostički modeli su imali zadovoljavajuću tačnost. Florita i Henze [148] su primenjivali različite regresione modele i neuronske mreže za predikciju temperature spoljašnjeg vazduha, relativne vlažnosti i globalnog horizontalnog zračenja. Dong i Lam [149] su pored prognostičkih modela za temperaturu, relativnu vlažnost i globalno horizontalno zračenje uveli i prognostičke modele za brzinu vetra. Linearna kombinacija meteoroloških osmatranja i prognoza dostupnih iz nekoliko izvora na internetu je iskorišćena u [150] kako bi se prognozirale promene spoljašnje temperature i globalnog horizontalnog zračenja.

Za primenu sopstvenih prognostičkih modela potrebno je alocirati i dosta računarskih resursa, pa se u istraživanjima često koriste i dostupne vremenske prognoze zvaničnih meteoroloških institucija. Tako su Kwak i sar. [151] u svom istraživanju koristili zvaničnu prognozu koju izdaje meteorološka služba Južne Koreje. Kako se prognoza izdaje za svaki treći sat, primenom Lagranževe interpolacije trećeg reda su dobili satne vrednosti klimatskih promenljivih. Postojeću prognozu su dopunili numeričkim modelom predikcije intenziteta globalnog zračenja na osnovu prognoziranih vrednosti pokrivenosti neba oblacima. U ko-simulacionom okruženju BCVTB preko koga su povezani podaci dobijeni prognozom i EnergyPlus, ostvarili su predikciju energetske potrebe poslovne zgrade u realnom vremenu. Podatke iz prognoza vremena koje izdaju relevantne institucije koristili su i radovima [48, 55, 121, 133, 152].

Očigledno je da prognoziranje klimatskih parametara, temperature spoljašnjeg vazduha pre svih, jedan od osnovnih postulata za simulacijom-podržan rad sistema. Usled limitiranog broja podataka, ograničenih kapaciteta računarskih resursa, prognozirane vrednosti klimatskih parametara se uglavnom dobijaju od strane trećih lica (nacionalne meteorološke službe, izvori na internetu [153]),



iako su istraživanja pokazala da postoje značajne prednosti prilikom korišćenja sopstvenih prognostičkih modela koje se prvenstveno ogledaju u boljem opisivanju mikroklima lokacije posmatrane zgrade, mogućnosti njihove direktne inkorporacije u okruženja za simulacijom podržan rad sistema, mogućnosti korišćenja kraćih vremenskih koraka u izradi prognoze itd.

## **2.6. Presek stanja problema**

Modeliranje i simulacije energetske performansi zgrada su veoma korisne u svim fazama projektovanja. Omogućavaju da se uporede različita projektna rešenja, tj. različiti arhitektonski koncepti, materijali koji bi se koristili u izgradnji, sistemi grejanja i klimatizacije, raspoloživi izvori energije (konvencionalni ili obnovljivi), mogu da služe i kao podrška u kreiranju energetske politike u sektoru zgradarstva itd. Iako su dostupni dugi niz godina i njihovo korišćenje pruža izuzetne prednosti, simulacioni alati se u vrlo malom obimu koriste u redovnoj inženjerskoj praksi (iako su zamišljeni kao podrška inženjerima). Ovo je posebno izraženo u Republici Srbiji, gde se tek od skora zahteva i proračun energetske performansi prilikom izgradnje novih i rekonstrukcije postojećih zgrada.

Bez obzira na sve prednosti koje pružaju simulacioni alati u fazi projektovanja, merenja na realnim zgradama u čijem projektovanju su korišćeni simulacioni alati, su pokazala velika odstupanja izmerenih od simuliranih energetske performansi. Da bi se otklonile sumnje u pođanost dobijenih rezultata, posebno kod postojećih zgrada u kojima postoje merenja potrošnje energije i drugih veličina od značaja, potrebno je model zgrade kalibrisati, odnosno podesiti njegove ulazne promenljive tako da simulacijom dobijene vrednosti budu u propisanim odstupanjima od izmerenih. Kako modeli mogu da sadrže i nekoliko hiljada ulaznih promenljivih, jasno je da se do kalibrisanog modela ne može doći manuelnim metodama, već je potrebno koristiti odgovarajuće analitičke i statističke metode. Jednom kalibrisan, model se može koristiti za različita istraživanja.

Poslednjih godina je prepoznata mogućnost poboljšanja energetske performansi zgrada kroz unapređenje u radu izvedenih sistema KGH implementacijom odgovarajućih operativnih strategija rada i korišćenja sistema. Kada se u izradi operativnih strategija koristi detaljni simulacioni alat govori se o simulacijom podržanom radu sistema. Simulacijom podržan rad se svodi na optimizaciju radnih parametara izvedenih sistema. Definisane strategije rada sistema se dobija odgovarajućom metodom upravljanja. Kada se koristi model zgrade kreiran u simulacionom alatu, reč je modelski-zasnovanoj metodi upravljanja. Jedna od tehnika koja se poslednjih godina intenzivno razvija u sektoru zgradarstva je modelsko prediktivno upravljanje, kojim se na osnovu budućih poremećaja u sistemu, određuju optimalne vrednosti promenljivih u posmatranom trenutku vremena tako da se troši najmanje energije bez narušavanja toplotnog komfora (problem ograničene

optimizacije). Određivanje optimalnih vrednosti se vrši sa pomerajućim horizontom optimizacije, pri čemu se vrednosti implementiraju samo u prvom narednom horizontu izvršavanja. Neke od osnovnih prednosti pristupa sa pomerajućim horizontom su:

- inkorporiranje u funkciji cilja više, a vrlo često i međusobno suprotstavljenih ciljeva,
- iskorišćenje poznavanja budućih poremećaja (spoljne temperature, zračenja itd.), poznavanje dinamike zgrade i mogućnost optimalnog balansa između potrošnje energije i toplotnog komfora,
- mogu da se koriste *white-box*, *black-box* i *grey-box* modeli zgrade,
- mogu da se koriste različite metode optimizacije,
- u većini zgrada (poslovnih pre svega) postoje sistemi za merenje i nadzor tako da su podaci za kreiranje i kalibraciju modela uglavnom dostupni,
- može da se iskoristi potencijal OIE, ili promena cene energenata ukoliko se u funkciji cilja uključe finansijski indikatori.

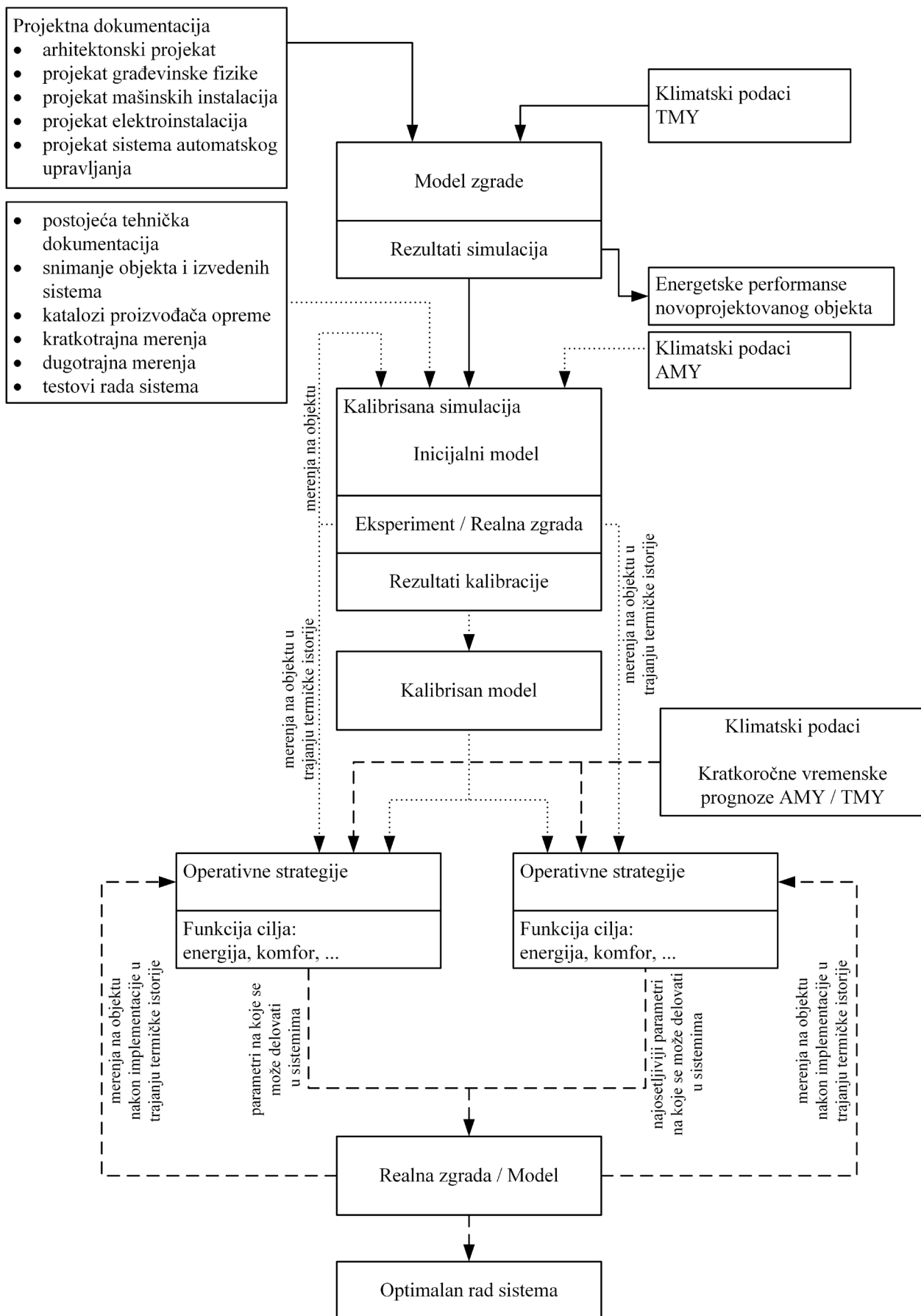
Od svih budućih poremećaja koji mogu da deluju na zgradu, najznačajnije su promene u klimatskim promenljivim tj. promene temperature, relativne vlažnosti, Sunčevog zračenja, karakteristika vetra. Sve ove promene su sadržane u kratkoročnim vremenskim prognozama koje izdaju relevantne institucije.

Osnovni nedostatak se ogleda u činjenici da je za dobijanje odgovarajućeg modela zgrade sa svim njenim specifičnostima potrebno dosta vremena i rada, kao i da se svaki od tih modela formira za svaku pojedinačnu zgradu, pa je ekspertsko znanje u oblasti modeliranja energetske performansi zgrada i naprednih sistema upravljanja nužno. Takođe, broj nezavisno promenljivih u postupku optimizacije i za najelementarnije sisteme iznosi više desetina i stotina promenljivih što može da oteža primenu detaljnih simulacionih alata. Analizom osetljivosti sprovedenoj na modelu kreiranom detaljnim simulacionim alatom tj. korišćenjem simulacionog alata u analizi osetljivosti, može da se redukuje broj nezavisno promenljivih u postupku optimizacije, odnosno da se optimizuju samo promenljive na čiju promenu su jedan ili svi elementi izabrane funkcije cilja najosetljiviji.

### 3. Simulacije energetske performansi objekata

Simulacije energetske performansi objekata pružaju uvid u sve energetske tokove koji postoje u objektima i mogu se koristiti kako prilikom projektovanja tako i u fazi njihovog korišćenja. Osnovni granični uslovi koji se koriste u simulacijama jesu klimatske karakteristike lokacije objekta, pa je opšta procedura modeliranja prikazana na slici 3.1. kvalitativno podeljena prema tipovima klimatskih podataka koji se koriste. Za objekte koje tek treba izgraditi, simulacioni alati se koriste kako bi se kvantifikovale energetske performanse različitih projektnih rešenja i suzio izbor potencijalnih rešenja. Klimatski podaci koji se koriste u ovom delu procedure su sadržani u tipičnoj meteorološkoj godini lokacije na kojoj će objekat biti izgrađen. Za postojeće objekte je potrebno kreirati najpre inicijalni model na osnovu raspoložive projektne i tehničke dokumentacije, raspoloživih ili za tu svrhu realizovanih merenja, a sve sa ciljem da se rezultati simulacija dobro poklapaju sa izmerenim vrednostima na samom objektu. U pitanju je postupak kalibrirane simulacije u kome se moraju koristiti realne vrednosti klimatskih parametara (aktuelna meteorološka godina) izmerene na samoj lokaciji ili u obližnjoj meteorološkoj stanici. Po sprovedenom postupku kalibracije, dobija se kalibrirani model, koji dovoljno dobro reprodukuje ponašanje realnog objekta izloženog različitim poremećajima. Kalibrirani model se može koristiti kao osnovni scenario za simulaciju energetske performansi u slučaju bilo kakve rekonstrukcije objekta, nekog njegovog dela ili pojedinih sistema. Jedna od mogućnosti je da se kalibrirani model koristi u izradi operativnih strategija rada sistema KGH, tj. za optimizaciju radnog režima raspoloživih sistema KGH. U optimizaciji mogu da se koriste ili klimatski podaci sadržani u vremenskim prognozama koje izdaju relevantne insitucije ili podaci dobijeni sopstvenim prognostičkim modelima pojedinih klimatskih veličina, pa čak i podaci sadržani u tipičnoj/aktuelnoj meteorološkoj godini u slučaju da se želi formiranje heurističkih pravila rada sistema.

U nastavku će biti opisana osnovne prednosti i ograničenja izabranog simulacionog alata imajući u vidu proceduru modeliranja prikazanu na slici 3.1. kao i mogućnosti da se izabrani indeks toplotnog komfora izračunava u simulaciji i da se koristi u izradi dnevnih operativnih strategija rada sistema KGH. Uvođenjem indeksa toplotnog komfora kao rezultata simulacije se može proveriti i kako se postojećim sistemima KGH, projektovanim na tradicionalan način, ovaj indeks može održavati u željenim granicama, kao i koliko energije je potrebno u tom slučaju trošiti u objektu.

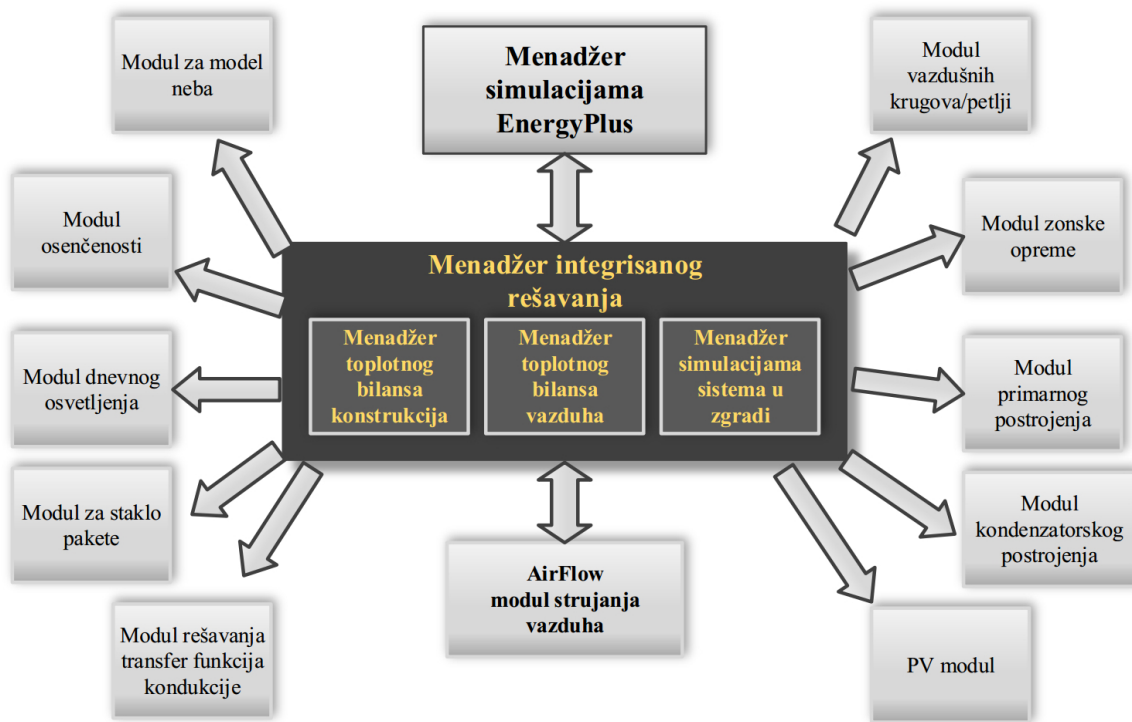


**Slika 3.1.** Šematski prikaz metodologije određivanja energetske performansi postojećih objekata

### **3.1. Izbor detaljnog simulacionog alata i njegove osnovne karakteristike**

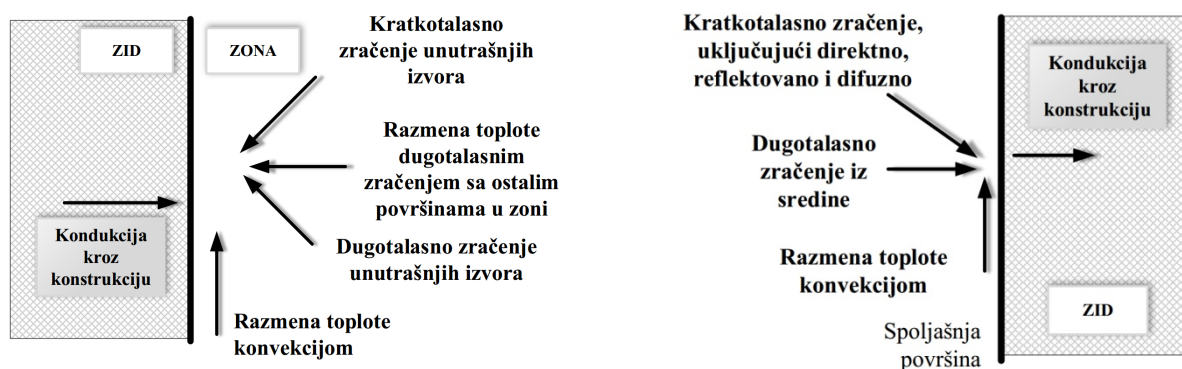
Na osnovu svega prethodno navedenog, imajući u vidu intenzivno proveravanje i testiranje u smislu tačnosti rezultata simulacija, mogućnosti alata za izračunavanja brojnih veličina, ali i mogućnosti njegovog korišćenja pri kalibraciji i izradi optimalnih dnevnih operativnih strategija, za ovo istraživanje izabran je alat EnergyPlus, verzija 8.4. U nastavku će biti opisane osnovne karakteristike ovog alata, klase i rutine koje omogućavaju parametarske studije (pogodne za korišćenje u analizi osetljivosti), kao i programski jezik Erl (en. *EnergyPlus Runtime Language*) kojim je moguće definisati način upravljanja sistemima, premošćavanjem vrednosti koje su unete u samom modelu formiranjem odgovarajuće sintakse. Jedna od prednosti EnergyPlus-a je i što sadrži sopstveni pretprocesor klimatskih podataka koji omogućava kreiranje klimatske datoteke sa izmerenim vrednostima (kreiranje aktuelne meteorološke godine za potrebe kalibracije modela), ali i sa podacima sadržanim u kratkoročnoj vremenskoj prognozi koja je neophodna za izradu optimalnih dnevnih strategija rada sistema KGH. Unutar klimatskog pretprocesora je implementiran i Perezov model za razdvajanje komponenata zračenja, tj. razdvajanje globalnog horizontalnog zračenja na direktnu i difuznu komponentu koje se koriste u simulacijama sa EnergyPlus-om i drugim detaljnim simulacionim alatima. Takođe, biće navedena i ključna ograničenja u korišćenju ovog simulacionog alata za predmetno istraživanje.

EnergyPlus predstavlja kolekciju više programskih modula (slika 3.2) koji sinhronizovanim radom omogućavaju izračunavanje energije (i drugih relevantnih fizičkih veličina) u zoni ili celoj zgradi koja se potroši za grejanje i hlađenje na bazi definisanih sistema koji opslužuju zgradu (sistemi KGH, sistemi osvetljenja, električni aparati i uređaji i sl.) i raspoloživih izvora energije. To je realizovano simulacijom zgrade i odgovarajućih sistema kada su zgrada i sistemi izloženi različitim ambijentalnim i radnim uslovima. U središtu simulacije se nalazi model zgrade opisane nizom jednačina konzervacije energije i mase koje se iterativnim procedurama rešavaju u svakom vremenskom koraku simulacije. Pored modela zgrade, implementirano je mnoštvo rutina za organizaciju podataka i upravljanje procesom simulacije koji su neophodni za simulaciju velikog broja mogućih kombinacija tipova sistema koji postoje, primarnih postrojenja za proizvodnju energije, rasporeda i raznih okruženja simulacije (projektni dani, simulacija na godišnjem nivou sa podacima iz klimatske datoteke i sl.).



*Slika 3.2. Šematski prikaz EnergyPlus simulacionog alata*

EnergyPlus je alat za integrisanu simulaciju što znači da se tri glavna dela (zgrada, sistem i postrojenje) rešavaju simultano. Integrisani menadžer simulacija upravlja modulima za toplotni bilans površina (slika 3.3), toplotni bilans vazduha u zoni i simulacionim menadžerom sistema zgrade. Modulom toplotnog bilansa površina se simulira razmena toplote na spoljašnjoj i unutrašnjoj površini svake konstrukcije koja okružuje toplotnu zonu uključujući njihovu međusobnu zavisnost, kao i sve načine razmene toplote (kondukciju, konvekciju i zračenje).

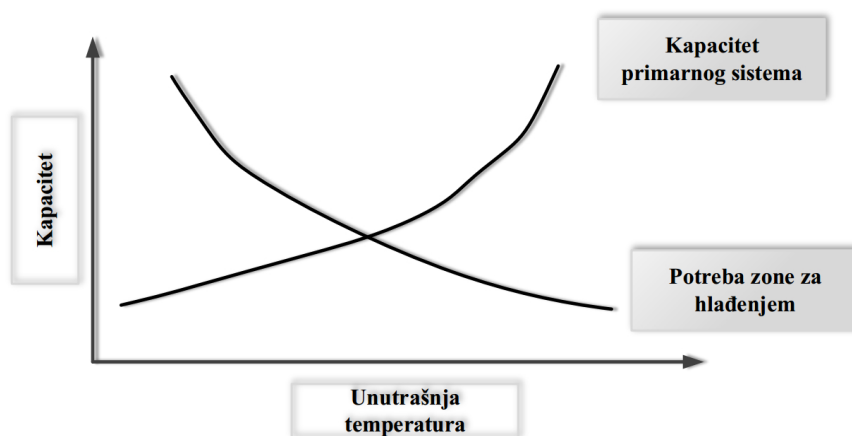


*Slika 3.3. Toplotni bilans sa unutrašnje (levo) i spoljašnje (desno) strane konstrukcije*

Modul toplotnog bilansa vazduha uzima u obzir razmenu toplote konvekcijom i zračenjem sa okolnih površina, ali uzima u obzir i razmenu mase kroz infiltraciju spoljašnjeg vazduha u zonu, vazduha koji se mehaničkim putem dovodi u zonu, izbacivanje vazduha iz zone i eventualno razmenu vazduha sa susednim zonama. Nakon završetka simulacije u konkretnom vremenskom koraku modulima toplotnih bilansa površina i vazduha u zoni, poziva se menadžer simulacija

systema u zgradi kojima se dobija odziv sistema KGH, sistema osvetljenje i drugih električnih sistema i ažuriraju se unutrašnji uslovi zone (temperatura unutrašnjeg vazduha, relativna vlažnost, temperatura okružujućih površina i sl.).

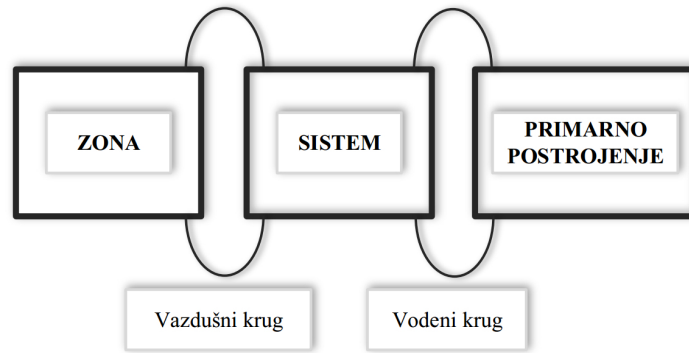
U programima sa sekvencijalnom simulacijom (npr. DOE-2) toplotni bilans zone (unutrašnjeg vazduha), sekundarni sistemi i centralno postrojenje za proizvodnju energije (primarni sistem) se simuliraju posebno, jedan za drugim, bez povratnih informacija. Sekvencijalno rešavanje počinje sa toplotnim bilansom zone kojim se definišu uslovi u zoni i toplotno opterećenje za grejanje/hlađenje u svakom vremenskom koraku. Ove vrednosti se prosleđuju modulu za sekundarne sisteme kako bi se odredio „odziv“ (potreban kapacitet) konkretnog sistema, ali taj odziv ne utiče na uslove u zoni. Slično, informacije o sekundaru se prenose modulu kojim se simulira primar. Ovakva tehnika simulacije daje dobre rezultate kada je odziv sistema jasno definisana funkcija unutrašnje temperature kondicionirane zone. U slučaju potrebe za hlađenjem, tipične krive snabdevanja i potreba su prikazane na slici 3.4. Radna tačka se nalazi u preseku ovih krivih.



*Slika 3.4. Sekvencijalna simulacija – odnos strane potreba i strane isporuka*

U većini situacija kapacitet sistema zavisi od spoljašnjih uslova i/ili drugih parametara kondicioniranog prostora. Prosta situacija sa gornje slike postaje kompleksnija. Rešenje bi trebalo da se pomera duž krive potreba. Nedostatak povratnih podataka kod sekvencijalnih simulacija može dovesti do nerealnih rezultata.

Da bi se dobila simulacija koja je fizički realna (moguća), svi elementi bi trebalo da budu povezani u šemu simultanog rešavanja. Ceo integrisani program se može predstaviti nizom funkcionalnih elemenata povezanih odgovarajućim cirkulacionim krugovima (veza između toplotne zone i sekundarnog sistema se ostvaruje vazduhom u zoni, veza između sekundarnih i primarnih sistema se ostvaruje vodom kao nosiocem energije), kao na slici 3.5. U EnergyPlus-u korišćenje modula je regulisano od strane integrisanog menadžera simulacija.



Slika 3.5. Šema simultanog rešavanja

Svi matematički modeli pojedinačnih komponenata, numeričke procedure za simultano rešavanje rezultujućih diferencijalnih i algebarskih jednačina su prikazane u pratećoj dokumentaciji simulacionog alata [154].

Da bi se ispitaio uticaj grupe alternativnih vrednosti pojedinih veličina u modelu koriste se parametarske studije. Realizacija parametarskih studija u EnergyPlus je olakšana zato što, pored grupe predviđene u samom alatu (slika 3.6), postoje i pomoćni alati za parametarske studije (poglavlje 2.2.6). Korišćenjem grupe objekata za parametarske studije u samom EnergyPlus-u je omogućeno da se unutar jedne ulazne datoteke za simulaciju čuvaju sve alternativne vrednosti odgovarajućih parametara, koje pozivanjem parametarskog pretprocesora EnergyPlus-a kreiraju grupu ulaznih datoteka od kojih će svaka imati samo po jednu od navedenih alternativnih vrednosti. Ova činjenica je od posebne važnosti ukoliko se alternativne vrednosti ulaznih promenljivih generišu za npr. globalnu analizu osetljivosti, jer se time obezbeđuje da se sve vrednosti ulaznih promenljivih simultano upišu i njihov uticaj zajedno evaluira.

The screenshot shows the EnergyPlus software interface. On the left, a 'Class List' is visible with various object types. The main window displays 'Comments from IDF' and an 'Explanation of Object and Current Field'. Below this, a table lists alternative input values for six different runs (Run 1 to Run 6). The table has columns for 'Field Name', 'Units', and 15 object IDs (Obj1 to Obj15). Each row represents a run, and the cells contain specific values for each object ID, such as 'SET', 'SupplyFanFlow = MAXExhaustFlow/0.7674343', etc.

Field Name	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9	Obj10	Obj11	Obj12	Obj13	Obj14	Obj15
Value for Run 1		SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET
Value for Run 2		SET	ReturnFanFlow = MAXExhaustFlow/0.986576	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET
Value for Run 3		SET	ReturnFanFlow = MAXExhaustFlow/0.6889174	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET
Value for Run 4		SET	ReturnFanFlow = MAXExhaustFlow/0.778603399999999	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET
Value for Run 5		SET	ReturnFanFlow = MAXExhaustFlow/0.533291599999999	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET
Value for Run 6		SET	ReturnFanFlow = MAXExhaustFlow/0.777433	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET	SET

Slika 3.6. Alternativne vrednosti ulaznih promenljivih u EnergyPlus-u



### 3.1.1. Programski jezik Erl

U EnergyPlus-u je inkorporirana čitava jedna klasa, popularno nazvana Sistem energetskeg menadžmenta (en. *EMS, Energy Management System*) kojom se omogućava supervizorsko upravljanje nad modelom, odnosno njome se premošćuju izabrani aspekti modela. Algoritmi upravljanja se opisuju preko programskog jezika Erl [155].

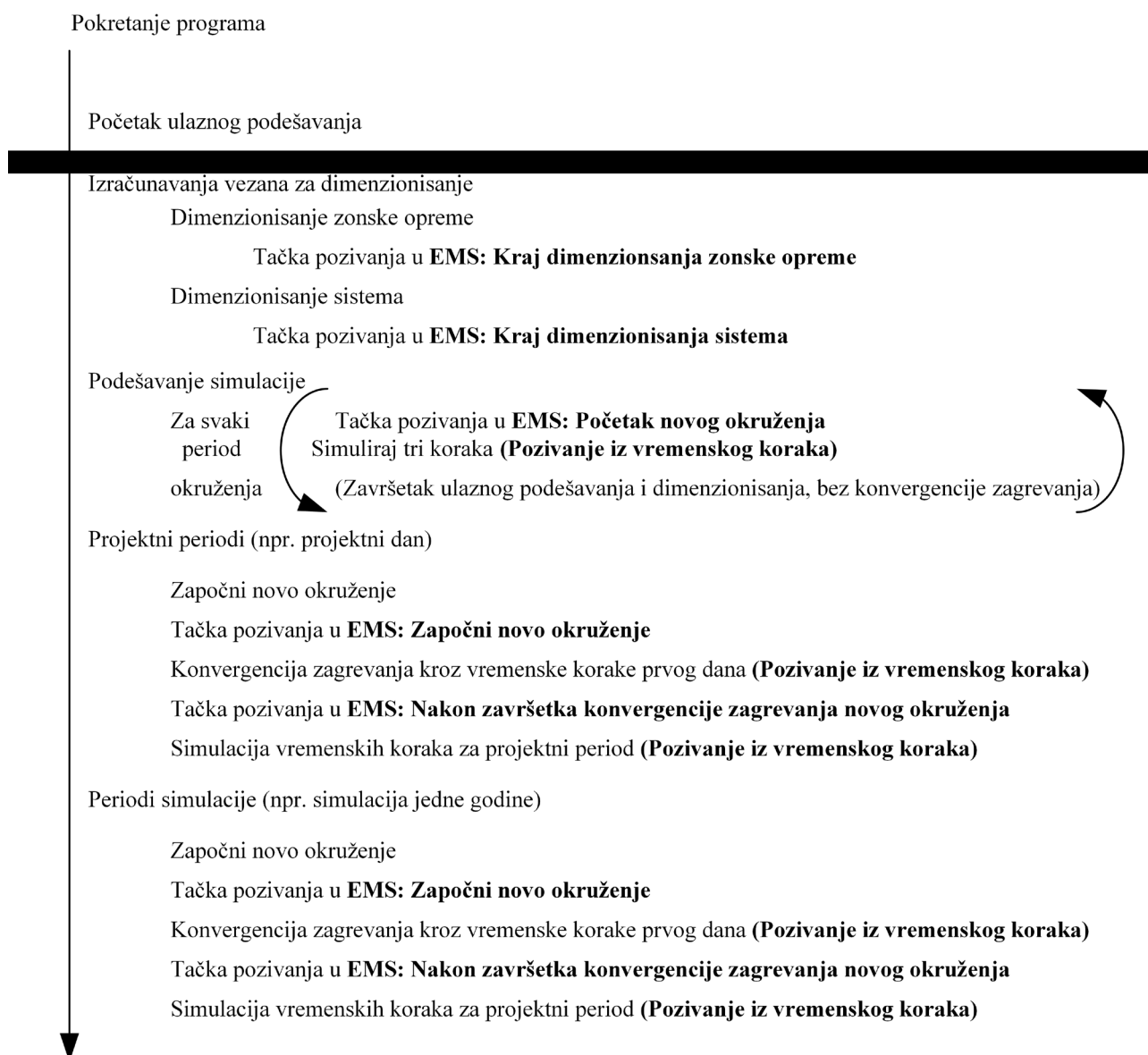
Programi napisani Erl jezikom se unose u ulaznu datoteku EnergyPlus-a preko definisanih klasa (*EnergyManagementSystem:Program* i *EnergyManagementSystem:Subroutine*).

U svakom programskom jeziku promenljive su neizostavne. Na raspolaganju je 8 tipova promenljivih, od kojih su najznačajnije:

- „senzor“ (*EnergyManagementSystem:Sensor*): ovom promenljivom se mapira željena promenljiva definisana na drugom mestu u modelu (to su uglavnom izlazne promenljive iz simulacije) i koriste se za dobijanje vremenski-promenljivih podataka (temperatura spoljašnjeg vazduha, temperatura unutrašnjeg vazduha u konkretnoj termičkoj zoni modela itd.),
- „aktuator“ (*EnergyManagementSystem:Actuator*): ovom promenljivom se mapira promenljiva definisana na drugom mestu u modelu kojoj se zadaju rezultati izvršavanja Erl programa (zadata temperatura unutrašnjeg vazduha, zadati protok),
- „lokalna“ (*EnergyManagementSystem:Local*): ove promenljive su lokalnog karaktera i ne moraju da se deklariraju eksplicitno, već služe za privremeno čuvanje međurezultata proračuna,
- „globalna“ (*EnergyManagementSystem:Global*): ovo su promenljive globalnog karaktera koje se koriste za čuvanje međurezultata proračuna Erl programa,
- „ugrađene“ (*EnergyManagementSystem:Built-in*): ove promenljive se automatski deklariraju sa unapred definisanim imenima, imaju globalni karakter (neke od promenljivih ovog tipa su: dan u mesecu, dan u godini, trenutno vreme, itd.),
- „unutrašnje“ (*EnergyManagementSystem:InternalVariable*): svaka od ovako definisanih promenljivih se mapira sa promenljivom definisanom na drugom mestu u modelu i koriste se za dobijanje statičkih podataka sa drugog mesta u modelu (npr. površina ili zapremina određene zone, maksimalni protok vazduha koji se ubacuje preko određenog distributivnog elementa i sl.).

Po pokretanju modela, pozivaju se procedure za dimenzionisanje i podešavanje simulacije, nakon čega simulacija prolazi kroz okruženja od značaja (projektni dani, jedan ili više perioda simulacije i sl.). Ugrađenom promenljivom *CurrentEnvironment* se u svakom trenutku zna koje od navedenih

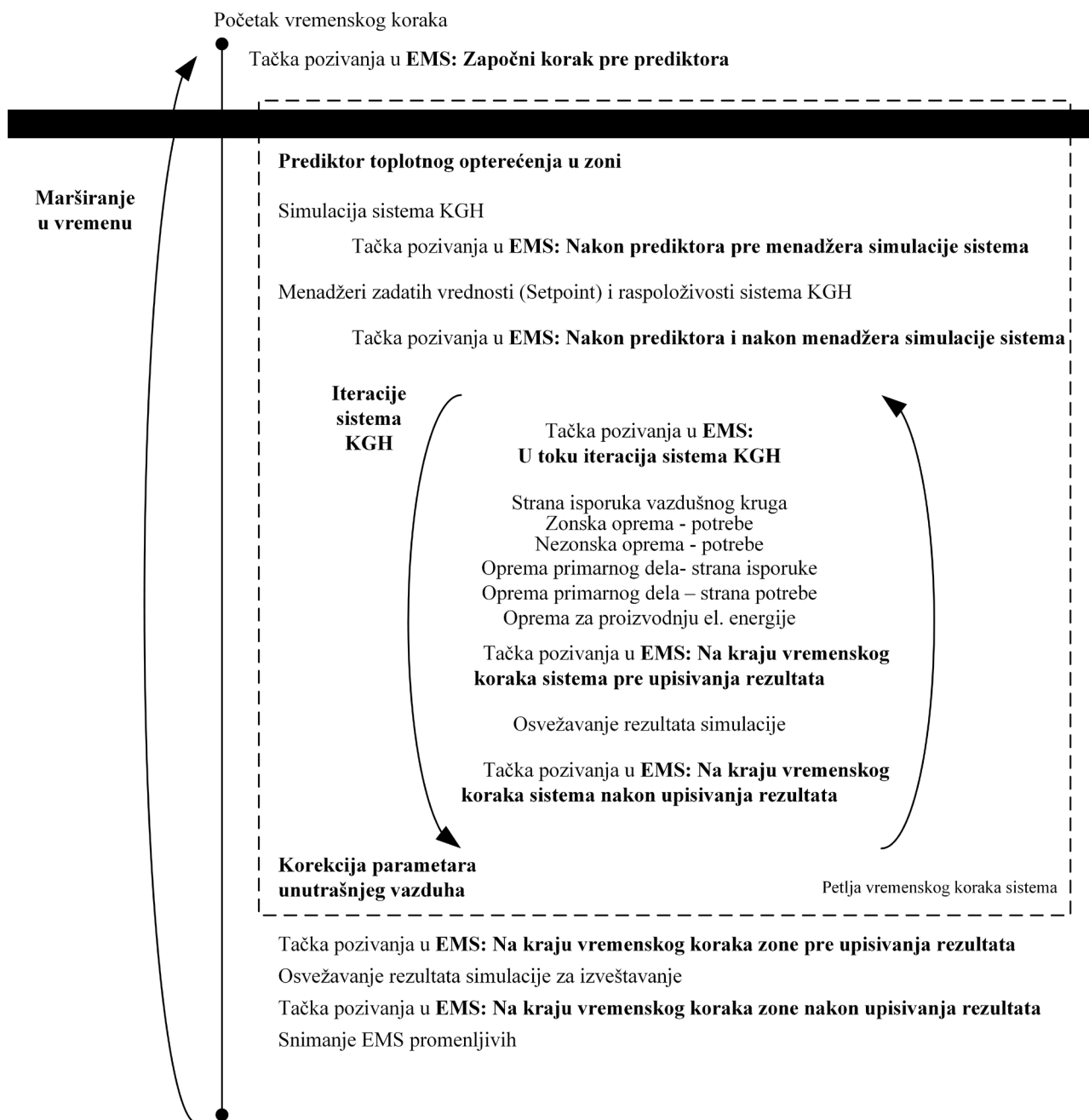
okruženja se simulira. Na slici 3.7. je prikazan opšti tok simulacije u EnergyPlus-u sa ključnim koracima.



*Slika 3.7. Opšti tok simulacije i mesta za pozivanje u EMS*

Modeli uopšteno sadrže mnogo ulaznih podataka pa je potrebno vreme za njihovo procesiranje. Pre nego što se počne sa krajnjim izračunavanjima u modelu (rezultati simulacija) neopodno je da se dimenzionišu komponente (ukoliko njihov kapacitet i ostale karakteristike nisu navedene u modelu), pri čemu se ova inicijalna faza završava neposredno pre početka simulacija projektnih dana. U simulaciji su predviđena samo dva mesta koja mogu da se pozovu u EMS u toku ove inicijalne faze (*EndOfZoneSizing* i *EndOfSystemSizing*) kojima mogu da se promene rezultati algoritama koji se koriste za izračunavanje toplotnog opterećenja zone i karakteristika sistema na projektnim uslovima. Ova dva mesta nisu od koristi za upravljanje sistemima. Za vreme faze

simulacije koja predstavlja podešavanje simulacija, postoje brojna mesta pozivanja u EMS koja su zasnovana na jednom vremenskom koraku simulacije (slika 3.8).

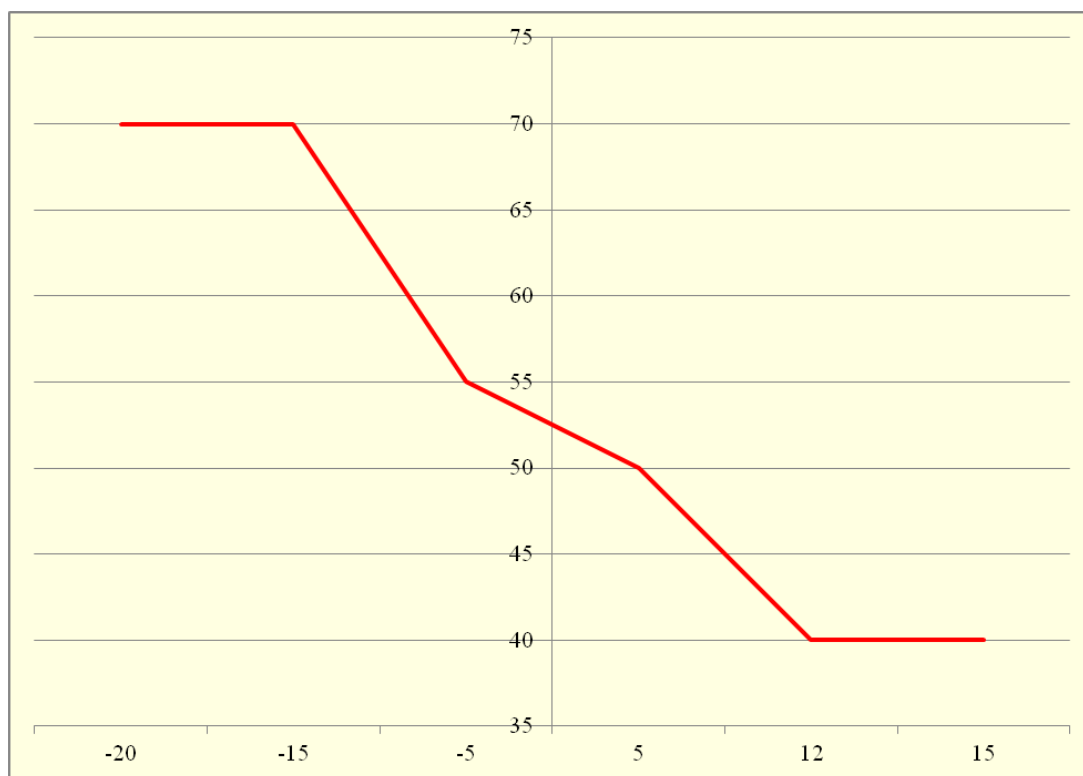


**Slika 3.8.** Sekvenca jednog vremenskog koraka sa mestima za pozivanje iz EMS

Da bi se dobili rezultati simulacije, model „prolazi“ kroz razna okruženja (granične uslove) preko niza vremenskih koraka. Vremenski korak simulacije sistema može biti kraći od vremenskog koraka simulacije zone. Kao što je prikazano na slici 3.8. postoje brojna mesta prilikom simulacije u jednom vremenskom koraku koja se mogu pozivati u EMS.

Tako se pozivanjem sa mesta *Započni korak pre prediktora* (en. *BeginTimestepBeforePredictor*) mogu menjati zadate vrednosti unutrašnje temperature koje sistemi treba da postignu, da se

određena komponenta sistema uključi ili isključi ili da se npr. modelira zavisnost temperature napojne vode od temperature spoljašnjeg vazduha (slika 3.9).



*Slika 3.9. Kriva regulacije temperature napojne vode u f-ji temperature spoljašnjeg vazduha*

### 3.1.2. Matematički modeli toplotnog komfora u simulacionom alatu

Osnovna svrha sistema KGH je da obezbede takve uslove u zatvorenom prostoru, da se ljudi koji se nalaze u tim prostorima osećaju komforno. Toplotni komfor je „stanje svesti kojim se iskazuje zadovoljstvo okruženjem, u termičkom smislu“ [156]. Samom definicijom se jasno stavlja do znanja da procena zadovoljstva toplotnim komforom jeste baš i to - procena, tačnije da osećaj komfora predstavlja jedan kognitivni proces na koji utiču brojni fizički, fiziološki i psihički procesi.

Brojni eksperimenti su pokazali da svest, tačnije um, zaključuje da li se oseća komforno ili ne na osnovu temperaturskih i drugih nadražaja kože, telesne temperature i napora potrebnih za regulaciju telesne temperature. Uopšteno, komfor se postiže kada se telesna temperatura održava u uskim granicama, kada je vlažnost kože niska i kada su fiziološki naponi za termoregulacijom minimizirani.

#### *Energetski bilans čoveka*

Ukupna metabolička toplota  $M$  je zbir metaboličke toplote potrebne za obavljanje određenje aktivnosti i metaboličke toplote neophodne za podrhtavanje/drhtavicu (ukoliko do nje dolazi). Deo unutrašnje energije čoveka može da se utroši na rad  $W$ ; neto proizvodnja unutrašnje toplote  $M - W$  se

predaje okolini preko kože,  $q_{sk}$ , i preko respiratornog sistema,  $q_{res}$ , pri čemu se sav višak energije,  $S$ , skladišti ili dodatno predaje okolini i dovodi do porasta ili sniženja telesne temperature. Osnovna jednačina energetskeg bilansa čoveka je [9]:

$$M - W = q_{sk} + q_{res} + S = (C + R + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res}) + (S_{sk} + S_{cr}) \quad (3.1)$$

gde su:

$M$  [ $W/m^2$ ] - metabolički odata toplota po jedinici površine,

$W$  [ $W/m^2$ ] - intenzitet mehaničkog rada,

$q_{sk}$  [ $W/m^2$ ] - toplota odata sa površine kože,

$q_{res}$  [ $W/m^2$ ] - toplota odata preko respiratornog sistema,

$C+R$  [ $W/m^2$ ] - gubitak osetne toplote sa kože,

$E_{sk}$  [ $W/m^2$ ] - ukupan gubitak toplote evaporacijom sa kože,

$C_{res}$  [ $W/m^2$ ] - konvektivni deo gubitka toplote respiracijom,

$E_{res}$  [ $W/m^2$ ] - evaporativni deo gubitka toplote respiracijom,

$S_{sk}$  [ $W/m^2$ ] - intenzitet skladištenja energije u koži,

$S_{cr}$  [ $W/m^2$ ] - intenzitet skladištenja energije u telu,

#### *Modeli toplotnog komfora u dinamičkim simulacionim alatima*

Integracija modela toplotnog komfora u detaljne simulacione alate omogućila je da se pored simulacija energetske performansi jedne ili više zona zgrade simultano odredi i da li je u istim zonama zadovoljen, i u kojoj meri toplotni komfor prisutnih, izračunavanjem odgovarajućih indeksa komfora.

Poslednjih decenija vršena su detaljna istraživanja termičkih, fizioloških i psiholoških reakcija velikog broja ispitanika na promene brojnih parametara okruženja kako bi se razvili matematički modeli za predikciju takvih reakcija. Empirijski su istraživani uticaji personalnih, termičkih i fizioloških promenljivih na percepciju termičkog komfora.

Zaključeno je da dve lične promenljive utiču na nivo toplotnog komfora: otpor prolazu toplote odeće ( $I_{cl}$ ) i stepen fizičke aktivnosti/metaboličko odavanja toplote/ ( $H/A_{Du}$ ). Otpor prolazu toplote odeće se iskazuje u jedinicama  $clo$ , dok se stepen fizičke aktivnosti iskazuje u jedinicama  $met$ , pri čemu je  $1met = 58.2 W/m^2$ .

Metaboličko odavanje toplote  $H/A_{Du}$  je mera unutrašnjeg odavanja toplote osobe (H) u W/h po jedinici Dubois površine ljudskog tela iskazane u  $m^2$ . Dubois površina tela je definisana jednačinom:

$$A_{Du} = 0.202(\text{telesna masa})^{0.425}(\text{telesna visina})^{0.725} \quad (3.2)$$

Primenom ove jednačine, za prosečnu osobe visine 1.73 m i mase 70 kg, dobija se površina od 1.8  $m^2$ .

Termičke promenljive koje utiču na toplotni komfor ljudi su:

- temperatura vazduha po suvom termometru,
- srednja temperatura zračenja okolnih površina,
- brzina strujanja vazduha,
- relativna vlažnost vazduha.

Srednja temperatura zračenja okolnih površina se definiše kao uniformna temperatura crnog tela koja bi rezultovala u identičnoj razmenjenoj toploti zračenjem sa okolinom kao i u konkretnoj situaciji.

Fiziološke promenljive koje utiču na toplotni komfor ljudi su:

- temperatura kože ( $T_{sk}$ ),
- (unutrašnja) telesna temperatura ( $T_{cr}$ ),
- stepen znojenja,
- pokrivenost kože znojem ( $w$ ) koja se definiše kao odnos između trenutnog stepena znojenja prema maksimalnom stepenu znojenja koje bi se desilo da je celokupna površina kože mokra,
- toplotna provodljivost između unutrašnjosti tela i kože ( $K$ ).

Na bazi sprovedenih istraživanja formirani su matematički modeli kojima se može simulirati termička reakcija ljudi na uslove sredine u kojoj se trenutno nalaze. Najveći broj modela za predikciju toplotnog komfora koriste skale sa skupovima od 7 ili 9 diskretnih vrednosti PMV indeksa, pri čemu svaki broj na skali odgovara osećaju toplotnog komfora ispitanika (osećaj ugodnosti može biti npr. -3 ledeno; -2 hladno; -1 prohladno; 0 neutralno; +1 blago toplo; +2 toplo; +3 vruće). Najpoznatiji modeli koji su implementirani u EnergyPlus su razvili Fanger (tzv. Fangerov model toplotnog komfora), *J.B. Pierce Foundation* (Pirsov dualni model) i istraživači sa Univerziteta u Kansasu (KSU model).

Sličnost sva tri modela se ogleda u činjenici da primenjuju energetske bilans osobe i koriste mehanizme razmene toplote sa okolinom u sprezi za eksperimentalno utvrđenim fiziološkim

parametrima kako bi predvideli termički osećaj i fiziološki odziv osobe na sredinu u kojoj se nalazi. Modeli se međusobno razlikuju u fiziološkim modelima koji predstavljaju humani pasivni sistem (razmena toplote kroz telo i razmena toplote između ljudskog tela i okoline) kao i u neurološkoj kontroli organizma (neurološka kontrola drhtavice, znojenja i cirkulacije krvi kroz kožu).

Fangerov model toplotnog komfora je prvi razvijeni, i ujedno najpoznatiji model. Fanger je koristio skalu sa skupom od 7 tačaka u sklopu brojnih eksperimenata preko koje je korelirao uticaj brojnih promenljivih na osećaj termičke ugodnosti. Model je zasnovan na energetsom bilansu osobe, uzimajući u obzir sve mehanizme razmene toplote između čoveka i sredine u kojoj se nalazi kao npr. gubitak toplote konvekcijom i zračenjem sa spoljašnje površine odeće, gubitak toplote difuzijom vodene pare kroz kožu, gubitak toplote isparavanjem znoja sa površine kože, latentnu i osetno razmenjenu toplotu disanjem kao i razmenu toplote sa kože ka spoljašnjoj površini odeće. Osnovna pretpostavka u modelu je da je osoba u stanju termodinamičke ravnoteže sa okolinom. Matematički model je definisan sledećim nizom jednačina [154]:

$$M = L \quad (3.3)$$

$$L = Q_{res} + Q_{dry} + E_{sk} + W \quad (3.4)$$

$$Q_{res} = E_{res} + C_{res} = 0.000017M(5867 - P_a) + 0.0014M(34 - T_a) \quad (3.5)$$

$$Q_{res,lat} = 0.000017M(5867 - P_a) \quad (3.6)$$

$$Q_{res,sens} = 0.0014M(34 - T_a) \quad (3.7)$$

$$Q_c = h_c \times f_{cl} \times (T_{cl} - T_a) \quad (3.8)$$

$$Q_r = 3.96 \times f_l \times [(0.01 \times T_{cla})^4 - (0.01 \times T_{ra})^4] \quad (3.9)$$

$$\text{za } H > 58.2 \quad E_{rsw} = 0.42(H - 58.2) \quad (3.10)$$

$$\text{za } H \leq 58.2 \quad E_{rsw} = 0 \quad (3.11)$$

$$E_f = 0.00305(5733 - 6.99H - P_a) \quad (3.12)$$

$$E_{sk} = E_{rsw} + E_{diff} \quad (3.13)$$

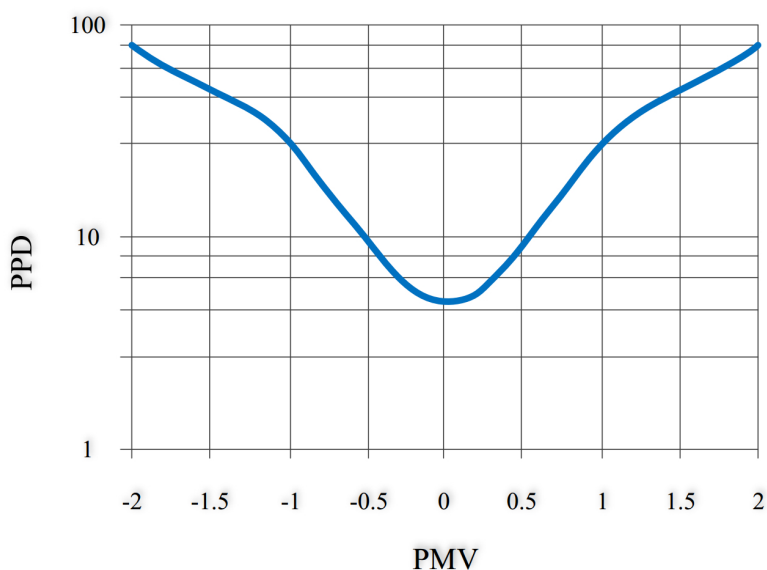
Indeks toplotnog komfora PMV, koji se nalazi na skali ugodnosti je zasnovan na odstupanju gubitka energije sa osobe ( $L$ ) prema mataboličkoj toploti ( $M$ ) i definisan je jednačinom:

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028)(H - L) \quad (3.14)$$

Dodatni indeks komfora, tzv. predviđeni procenat nezadovoljnih (en. PPD, *Predicted Percent of Dissatisfied*) za svaki PMV indeks se izračunava jednačinom:

$$PPD = 100.0 - 95e^{(-0.03353PMV^4 - 0.2179PMV^2)} \quad (3.15)$$

Korelacija između PMV i PPD indeksa je prikazana na slici 3.10. i jasno se uočava da i kada je PMV jednak nuli, postoji određeni procenat ljudi (nezadovoljnih) koji se ne osećaju komforno.



**Slika 3.10.** Zavisnost PPD indeksa od PMV indeksa komfora

U EnergyPlus se modeli komfora pokreću unosom odgovarajućih „okidača“ u objektima koji služe za opisivanje broja i aktivnosti ljudi pri čemu je potrebno definisati brzinu vazduha u zoni (u većini istraživanja se ona postavlja na konstatni nivo), nivo fizičke aktivnosti prisutnih i stepen odevenosti. Sve ove veličine mogu da se fiksiraju u toku trajanja jedne simulacije ili da se eksterno definišu odgovarajućim rasporedima, koje je moguće premostiti u EMS. U slučaju definisanja „okidača“, PMV i PPD indeksi komfora se mogu izračunavati i upisivati u izlaznu datoteku simulacije na satnom nivou ili češće.

U standardu [156], svi prostori u kojima borave ljudi su grupisani u tri kategorije uslova ugodnosti sredine i definisane su granice PMV i PPD indeksa (ali i lokalnog indeksa komfora) koje bi trebalo uzeti u razmatranje još u fazi projektovanja zgrade i sistema KGH:

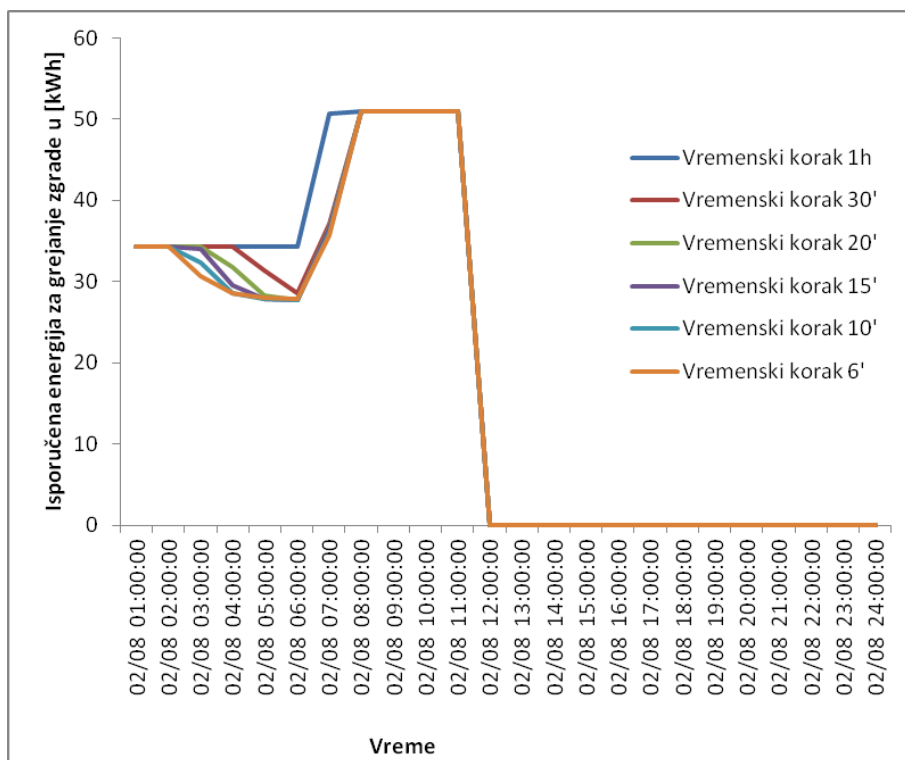
- kategorija A, sa PMV indeksom u opsegu  $-0.2$  do  $0.2$ ,
- kategorija B, sa PMV indeksom u opsegu  $-0.5$  do  $0.5$ ,
- kategorija C, sa PMV indeksom u opsegu  $-0.7$  do  $0.7$ .



### 3.1.3. Ograničenja pri korišćenju EnergyPlus-a

Osnovna ograničenja koja se nameću prilikom korišćenja EnergyPlus-a jesu brzina simulacija i inicijalizacija početnih stanja.

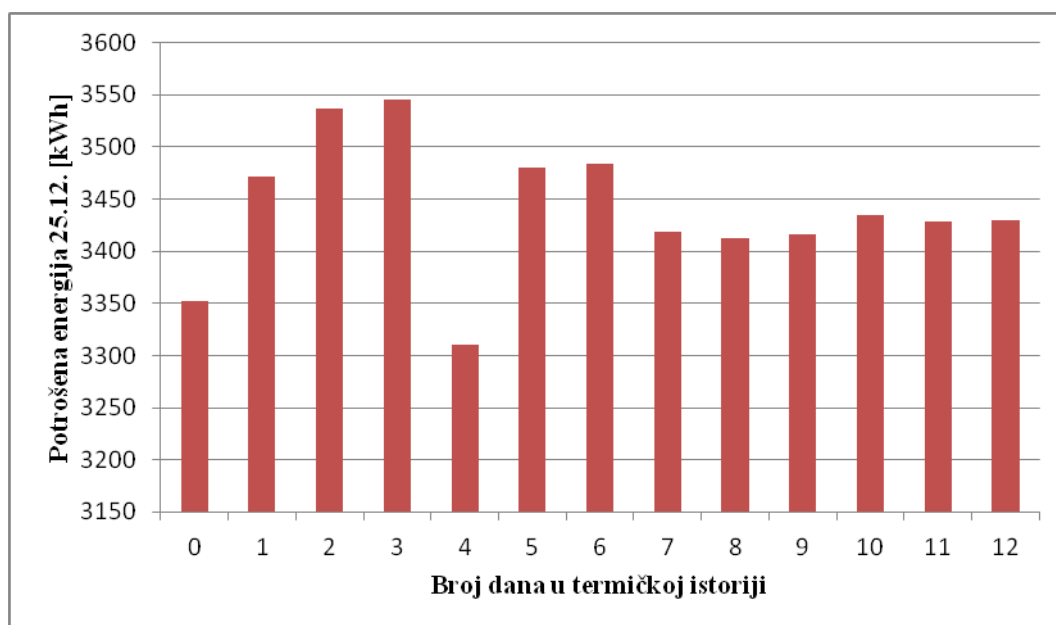
Brzina simulacija predstavlja ključno ograničenje korišćenju EnergyPlus-a za simulacijom-podržan rad sistema, pre svega u realnom vremenu (*online* optimizacija). U poređenju sa drugim alatima EnergyPlus je donekle sporiji u simulacijama. Brojna istraživanja su pokazala da broj vremenskih koraka i broj izlaznih promenljivih iz simulacije imaju velikog uticaja na trajanje simulacija. Kako je broj vremenskih koraka direktno povezan sa tačnošću predikcija na časovnom nivou, mora postojati balans između brzine simulacija i tačnosti (slika 3.11). Opšta preporuka je da se vremenski korak simulacije usvoji u trajanju 15 ili 10 minuta (četiri ili šest po satu) jer se dužim korakom dovodi u pitanje tačnost simulacije, a kraćim koracima se povećava vreme trajanja simulacija uz minimalno unapređenje tačnosti.



*Slika 3.11. Isporučena energija za grejanje zgrade za različite dužine vremenskih koraka*

Termička istorija modela je posledica činjenice da sve simulacije u EnergyPlus-u počinju periodom zagrevanja čija je osnovna namena da se uspostavi konvergencija temperatura i toplotnih flukseva pre početka simulacije za željeni vremenski period. Konvergencija zagrevanja se postiže ponavljanjem simuliranja prvog dana definisanog perioda simulacije dok se ne ispune uslovi konvergencije. Ovim procesom gradi se termička istorija modela zgrade kao da je zgrada svakog dana izlagana istim uslovima i to nekoliko dana uzastopno. Iako je ovaj postupak neophodan sa numeričke tačke gledišta, u realnosti je malo verovatno da će se ovakva situacija desiti. Za razliku

od drugih simulacionih alata koji omogućavaju eksplicitnu inicijalizaciju početnih stanja, u EnergyPlus-u ovo nije moguće, pa se dolazi do situacije da će različita početna stanja imati efekta i na rezultate simulacije nekoliko dana nakon početnog dana perioda simulacije. Da bi se utvrdila dužina potrebne termičke istorije konkretnog modela, neophodno je sprovoditi numerički eksperiment za svaki model, i za svaku sezonu (režim grejanja, režim hlađenja, prelazni period) prateći veoma jednostavnu proceduru. Identičan model zgrade (sa identičnim radnim parametrima sistema) se simulira sa različitim periodima simulacije koje sve završavaju istog dana (na slici 3.12. to je dan 25.12), a počinju tog dana (termička istorija modela iznosi 0 dana), jedan dan ranije (termička istorija iznosi 1 dan), i tako redom do 12 dana pre dana koji se razmatra (na primeru na slici 3.12. to je 13.12). Jedini izlaz iz simulacije jeste potrošena energija za grejanje zgrade na dan 25.12.



*Slika 3.12. Određivanje termičke istorije modela*

Sa slike je jasno uočljivo da bez obzira na identične modele i uslove konvergencije, simulacije daju vidljivo drugačije rezultate kako se povećava broj dana u termičkoj istoriji modela, da bi se rezultat stabilizovao posle nekoliko dana u termičkoj istoriji (u ovom konkretnom slučaju to je posle 7. dana termičke istorije).

### **3.2. Kalibracija detaljnog simulacionog modela**

Za kreiranje inicijalnog modela zgrade koji je potrebno kalibrisati, prikupljaju se podaci iz raspoložive tehničke dokumentacije (arhitektonski projekat i projekti mašinskih i elektroinstalacija, katalozi proizvođača opreme), zgrade, višestrukim posetama lokaciji, podacima iz sistema za daljinski nadzor i upravljanje (ukoliko postoji), ali i dodatnim merenjima neophodnih parametara za kalibraciju. Takođe, u nedostatku mogućnosti merenja pojedinih energetskih tokova u zgradi, profili

korišćenja sistema osvetljenja i unutrašnjih aparata i uređaja se mogu dobiti i razgovorom sa korisnicima zgrade. Za kalibraciju je potrebno prikupiti i klimatske podatke lokacije.

Postupak kalibracije se najčešće definiše kao optimizacioni problem čiji je cilj smanjivanje kriterijuma definisanih u poglavlju 2.1.1. do postizanja željenih vrednosti. Nezavisno promenljive postupka optimizacije je potrebno razdvojiti na grupe, pri čemu bi jednu grupu trebalo da čine termofizička svojstva omotača zgrade, karakteristike sistema grejanja i klimatizacije, karakteristike sistema upravljanja itd. Za razliku od pristupa koji se koristi u literaturi da se kalibracija vrši samo za izmerenu energiju (nezavisno da li je u pitanju potrošnja električne energije, toplotne energije za grejanje i hlađenje), potrebno je koristiti i međukorak, tačnije kalibrisati u najvećem mogućem broju zona i promene unutrašnjih parametara (temperature pre svih). Kako je u pozadini svega detaljni simulacioni alat neophodno je objasniti postupak kreiranja aktuelne meteorološke godine koja se koristi u kalibraciji.

### **3.2.1. Postupak kreiranja aktuelne meteorološke godine**

Da bi model bio „izložen“ istim spoljnim uticajima kojima je bila izložena i realna zgrada u posmatranom vremenskom periodu, klimatski podaci se moraju prikupljati ili na samom objektu ili da se koriste zvanični podaci dobijeni iz najbliže meteorološke stanice.

Postupak generisanja realne klimatske datoteke u formatu koji podržava alat EnergyPlus se sprovodi po sledećim, jasno izdvojenim koracima:

1. Dostavljanje podataka iz najbliže meteorološke stanice ili preuzimanje podataka iz sistema za daljinski nadzor i upravljanja objekta ukoliko postoji ili sa sopstvene meteorološke stanice ukoliko je postavljena; podaci se uglavnom skladište ili u tekstualne datoteke (\*.txt) ili u datoteke razdvojene zarezom (\*.csv). Potrebno je znati u kojoj vremenskoj rezoluciji se podaci sakupljaju: npr. podaci koje dostavlja RHMZ su najčešće u rezoluciji od jednog minuta, podaci koji se sakupljaju preko sistema za daljinski nadzor i upravljanje su uglavnom u rezoluciji od jednog sata, dok podaci sa automatskih meteoroloških stanica koje su komercijalno dostupne se sakupljaju u rezoluciji od jednog minuta do jednog sata sa celobrojnim vrednostima intervala merenja u jednom satu (na svakih 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12, 30 ili 60 minuta). U ovom koraku je potrebno odrediti i o kom vremenu se radi, tj. da li je u pitanju koordinisano univerzalno vreme, UTC, što je uobičajeno za zvanične meteorološke organizacije, ili je u pitanju lokalno vreme karakteristično za merenja na samom objektu i komercijalno dostupne automatske meteorološke stanice.

2. Prebacivanje podataka u odgovarajući format i izbor klimatskih veličina; podaci koje dostavlja RHMZ sadrže: datum i vreme u UTC formatu [DD.MM.GGGG S:MM], 10-minutni prosek pravca vetra [°], 10-minutni prosek brzine vetra [m/s], atmosferski pritisak na lokaciji stanice [hPa],

temperaturu vazduha po suvom termometru [°C], temperaturu tačke rose [°C], relativnu vlažnost vazduha [%], količinu padavina [mm], indikaciju padavina [0 ili 1], temperaturu tla [°C], trajanja sijanja Sunca [s], globalno horizontalno zračenje [W/m<sup>2</sup>] (slika 3.13). Uobičajeno je da se, u nedostatku merenja na lokaciji objekta, izaberu temperatura vazduha po suvom termometru, relativna vlažnost vazduha ili temperatura tačke rose vazduha, pravac vetra, brzina vetra, globalno horizontalno zračenje, atmosferski pritisak i da se tako izabrani podaci sačuvaju u odgovarajućem formatu (po mogućstvu \*.csv)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	IMS Weather Station data export from MET.											
2	Station NIS - RHMZ											
3	Exported from Integrated Meteorological System of MicroStep-MIS spol. s r.o.											
4	Exported time interval: 01.09.2015 00:00:00 - 30.09.2015 23:59:00 UTC.											
5	Exported at 01.10.2015 08:25:36 UTC.											
6	Time (UTC)	WindDir 10min [deg]	WindSpeed 10min [m/s]	QFE MET [hPa]	T [degC]	DP [degC]	RH [%]	Prec [mm]	Prec. Indicator [0/1]	Tgnd [degC]	SunDur [s]	GlobalRad [W/m2]
7	01.09.2015 0:00	82	3	992.9	26.7	13.4	44	0	0	24.8	0	0
8	01.09.2015 0:01	82	2.9	992.9	26.7	13.4	44	0	0	24.8	0	0
9	01.09.2015 0:02	82	3	992.9	26.6	13.4	44	0	0	24.8	0	0
10	01.09.2015 0:03	84	2.9	992.9	26.6	13.4	44	0	0	24.8	0	0
11	01.09.2015 0:04	82	2.7	992.9	26.6	13.4	44	0	0	24.7	0	0
12	01.09.2015 0:05	85	2.6	992.9	26.5	13.3	44	0	0	24.6	0	0
13	01.09.2015 0:06	87	2.5	992.8	26.6	13.4	44	0	0	24.6	0	0
14	01.09.2015 0:07	87	2.6	992.8	26.6	13.4	44	0	0	24.6	0	0
15	01.09.2015 0:08	84	2.6	992.8	26.6	13.4	44	0	0	24.7	0	0
16	01.09.2015 0:09	83	2.6	992.8	26.7	13.4	44	0	0	24.8	0	0
17	01.09.2015 0:10	82	2.7	992.8	26.6	13.4	44	0	0	24.8	0	0
18	01.09.2015 0:11	79	2.7	992.8	26.6	13.4	44	0	0	24.9	0	0
19	01.09.2015 0:12	78	2.6	992.8	26.5	13.4	44.2	0	0	24.9	0	0
20	01.09.2015 0:13	77	2.7	992.8	26.4	13.5	45	0	0	24.8	0	0
21	01.09.2015 0:14	76	2.8	992.8	26.4	13.6	45	0	0	24.8	0	0
22	01.09.2015 0:15	77	2.9	992.8	26.6	13.3	44	0	0	25	0	0
23	01.09.2015 0:16	79	3.1	992.8	26.6	13.4	44	0	0	25	0	0
24	01.09.2015 0:17	80	3	992.8	26.6	13.4	44	0	0	25.1	0	0
25	01.09.2015 0:18	84	3	992.8	26.6	13.4	44	0	0	25	0	0
26	01.09.2015 0:19	84	3	992.9	26.6	13.4	44	0	0	25	0	0
27	01.09.2015 0:20	86	2.9	992.9	26.5	13.4	44.3	0	0	24.9	0	0
28	01.09.2015 0:21	85	2.8	992.9	26.3	13.5	45	0	0	24.8	0	0
29	01.09.2015 0:22	87	2.9	992.8	26.3	13.5	45	0	0	24.6	0	0
30	01.09.2015 0:23	86	2.9	992.9	26.6	13.4	44	0	0	24.7	0	0
31	01.09.2015 0:24	86	2.7	992.8	26.5	13.3	44	0	0	24.8	0	0
32	01.09.2015 0:25	85	2.7	992.8	26.4	13.4	44.5	0	0	24.8	0	0

*Slika 3.13. Klimatski podaci koji se beleže u automatskoj meteorološkoj stanici Republičkog Hidrometeorološkog Zavoda Srbije - Opservatorija Niš*

3. U zavisnosti od vremenske rezolucije raspoloživih podataka, može se vršiti ili osrednjavanje podataka u svakom konkretnom satu (npr. ako postoje podaci o temperaturi vazduha u svakom minutu počev od 05:01 do 6:00, temperatura vazduha u 06:00 predstavlja njihovu srednju vrednost) ili da se usvoje vrednosti na kraju konkretnog sata (npr. ako postoje podaci o temperaturi vazduha u svakom minutu počev od 05:01 do 06:00, temperatura vazduha u 06:00 se usvaja za formiranje klimatske datoteke). Prvi pristup daje preciznije podatke kojima se može donekle opisati i dinamička priroda klimatskih uslova kojima je realan objekat bio izložen, dok je drugi pristup daleko jednostavniji i brži, ali je osetljiv na nepotpunost podataka. Rezultat ovog koraka su klimatski podaci u satnoj rezoluciji po UTC ili po lokalnom vremenu.

4. Vremensko pomeranje; ovo je veoma važan korak naročito ukoliko su podaci beleženi u UTC vremenu (npr. podaci dobijeni za Niš se pomeraju jedan sat unapred za vreme zimskog računanja vremena UTC+1, odnosno za dva sata unapred u slučaju letnjeg računanja vremena UTC+2; u

konkretnom slučaju to znači da ako je temperatura spoljašnjeg vazduha 07.02.2017. u 18:00 po UTC iznosila 3.65°C, u klimatskoj datoteci je temperatura u 19:00 po lokalnom vremenu; ako je temperatura spoljašnjeg vazduha 08.04.2017. u 15:00 po UTC iznosila 9.45°C, u klimatskoj datoteci je u 17:00 po lokalnom vremenu). Rezultat ovog koraka su klimatski podaci u satnoj rezoluciji po lokalnom vremenu (slika 3.14).

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Date	Month	Year	HH:MM	Dry Bulb Temperature [C]	Relative Humidity [%]	Atmospheric Pressure [Pa]	Global Horizontal Radiation [Wh/m2]	Wind Direction [deg]	Wind Speed [m/s]	Dir
37142	29	3	2017	14:00	19.89	32.07	99806	774.14	284.93	2.84
37143	29	3	2017	15:00	20.64	29.32	99708	708.32	288.47	3.19
37144	29	3	2017	16:00	21.15	28.3	99627	574.49	289.45	3.06
37145	29	3	2017	17:00	20.9	27.64	99560	403.25	301.68	3.56
37146	29	3	2017	18:00	20.01	27.05	99521	209.42	302.87	4.3
37147	29	3	2017	19:00	18.56	28.3	99514	24.87	309.83	3.62
37148	29	3	2017	20:00	16.89	32.36	99544	0.01	313.97	2.79
37149	29	3	2017	21:00	15.25	37.45	99607	0	311.33	2.62
37150	29	3	2017	22:00	14.11	40.43	99656	0	174.45	1.03
37151	29	3	2017	23:00	12	48.34	99698	0	77.3	0.92
37152	29	3	2017	0:00	10.41	54.31	99725	0	74	1.52
37153	30	3	2017	1:00	9.06	59.28	99740	0	83.02	1.33
37154	30	3	2017	2:00	7.94	63.46	99758	0	72.13	1.37
37155	30	3	2017	3:00	7.33	65.85	99756	0	75.1	1.64
37156	30	3	2017	4:00	6.35	69.42	99762	0	63.07	0.95
37157	30	3	2017	5:00	5.9	71.01	99772	0	72.43	1.09
37158	30	3	2017	6:00	4.78	74.97	99805	0	58.47	0.69
37159	30	3	2017	7:00	4.56	76.29	99852	10.27	68.9	1.07
37160	30	3	2017	8:00	5.68	72.97	99876	123.84	69.95	1.13
37161	30	3	2017	9:00	9.14	61.46	99898	375.55	58.05	0.14

**Slika 3.14.** Klimatski podaci osrednjeni na satnom nivou i prevedeni u lokalno vreme

5. Pokretanje pretprocesora klimatskih datoteka (*EnergyPlus Weather Preprocessor*); pored podataka dobijenih u koraku 3 i 4 potrebno je posebno struktuiranom datotekom (slika 3.15) pripremiti pretprocesor, tj. definisati koje fizičke veličine se nalaze u kojim kolonama, u koje jedinice se prevode, za koju lokaciju se podaci odnose, da li i koliko redova treba preskočiti, koliko linija treba procesuirati itd. Rezultat ovog koraka, a ujedno i celog postupka je klimatska datoteka u formatu koji podržava simulacioni alat EnergyPlus (slika 3.16).

```

&location
City='Nis'
Country='SRB'
InLat=43.31
InLong=21.89
InTime=1
InElev=202
/

&miscdata
Comments1='This data was prepared by Marko Ignjatovic, based on data provided by Official Meteorological Observatory'
Sourcedata='global horizontal radiation measured in the period 15.10.2013-30.04.2017.'
/

&wthdata
InputFileType='Custom'
InFormat='Delimited'
NumInHour=1
DataElements=Day,Month,Year,HH:MM,drybulb,relhum,atmos_pressure,glohorrad,winddir,windspeed,ignore,ignore
DataUnits='x','x','x','hh:mm','oC','%','Pa','Wh/m2','deg','m/s','x','x'
DataConversionFactors=1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1
DelimiterChar=', '
DecimalSymbolChar='.'
/

&datacontrol
NumRecordsToSkip=29160
MaxNumRecordsToRead=8760
/

```

**Slika 3.15.** Ulazna datoteka za klimatski pretprocesor EnergyPlus-a

```

LOCATION,Nis,-,SRB,global horizont,-,43.31,21.89,1.0,202.0
DESIGN CONDITIONS,0
TYPICAL/EXTREME PERIODS,6,Summer - Week Nearest Max Temperature For Period,Extreme,10/20,10/26,Summer - Week Nearest Average Temperature For Period,Typical,11/10,11/16
GROUND TEMPERATURES,3,,.5,,,,.0.48,-0.64,1.35,4.46,12.61,18.90,23.14,24.43,22.23,17.35,10.83,4.77,2,,,,,4.61,2.61,3.02,4.67,10.13,15.06,19.00,21.11,20.66,17.90,13.40,8.63
HOLIDAYS/DAYLIGHT SAVINGS,No,0,0,0
COMMENTS 1,Custom/User Format -- WMO#-: This data was prepared by Marko Ignjatovic_ based on data provided by Official Meteorological Observatory of Nis for global horizon
COMMENTS 2, -- Ground temps produced with a standard soil diffusivity of 2.3225760E-03 (m**2/day)
DATA PERIODS,1,1,Data,Sunday, 5/ 1, 4/30
2016,5,1,1,0,79797979E0797979*9*979*97979797979*9*9*9*9*9,6.8,5.4,91,99393,9999,9999,296,0,0,0,999900,999900,999900,99990,43,0,1,5,5,999.0,999,9,999999999,0,0,0.C
2016,5,1,2,0,79797979E0797979*9*979*97979797979*9*9*9*9*9,6.2,5.0,92,99374,9999,9999,293,0,0,0,999900,999900,999900,99990,0,0,0,5,5,999.0,999,9,999999999,0,0,0.00C
2016,5,1,3,0,79797979E0797979*9*979*97979797979*9*9*9*9*9,5.8,4.7,93,99353,9999,9999,291,0,0,0,999900,999900,999900,99990,106,0,2,5,5,999.0,999,9,999999999,0,0,0.C
2016,5,1,4,0,79797979E0797979*9*979*97979797979*9*9*9*9*9,6.0,5.1,94,99355,9999,9999,292,0,0,0,999900,999900,999900,99990,0,0,0,5,5,999.0,999,9,999999999,0,0,0.00C
2016,5,1,5,0,79797979E0797979*9*979*97979797979*9*9*9*9*9,5.8,5.0,94,99324,9999,9999,291,9,0,9,999900,999900,999900,99990,34,0,4,5,5,999.0,999,9,999999999,0,0,0.C
2016,5,1,6,0,79797979E0797979*9*979*97979797979*9*9*9*9*9,6.6,5.8,95,99330,9999,9999,295,104,27,97,999900,999900,999900,99990,195,0,5,5,5,999.0,999,9,999999999,0,0,0.00C
2016,5,1,7,0,79797979E0797979*9*979*97979797979*9*9*9*9*9,8.0,7.1,94,99312,9999,9999,303,316,290,187,999900,999900,999900,99990,287,1,1,5,5,999.0,999,9,999999999,0,0,0.00C
2016,5,1,8,0,79797979E0797979*9*979*97979797979*9*9*9*9*9,10.4,7.9,85,99299,9999,9999,314,348,124,273,999900,999900,999900,99990,266,1,4,5,5,999.0,999,9,999999999,0,0,0.00C
2016,5,1,9,0,79797979E0797979*9*979*97979797979*9*9*9*9*9,12.9,8.5,75,99289,9999,9999,326,443,129,348,999900,999900,999900,99990,260,0,9,5,5,999.0,999,9,999999999,0,0,0.00C
2016,5,1,10,0,79797979E0797979*9*979*97979797979*9*9*9*9*9,18.4,9.7,57,99218,9999,9999,353,741,522,310,999900,999900,999900,99990,126,2,1,5,5,999.0,999,9,999999999,0,0,0.00C
2016,5,1,11,0,79797979E0797979*9*979*97979797979*9*9*9*9*9,19.6,9.5,52,99163,9999,9999,359,540,136,421,999900,999900,999900,99990,82,2,9,5,5,999.0,999,9,999999999,0,0,0.00C
2016,5,1,12,0,79797979E0797979*9*979*97979797979*9*9*9*9*9,20.0,9.6,51,99108,9999,9999,361,455,49,412,999900,999900,999900,99990,90,2,7,5,5,999.0,999,9,999999999,0,0,0.00C
2016,5,1,13,0,79797979E0797979*9*979*97979797979*9*9*9*9*9,20.9,9.8,49,99048,9999,9999,365,519,168,381,999900,999900,999900,99990,81,2,5,5,5,999.0,999,9,999999999,0,0,0.00C
2016,5,1,14,0,79797979E0797979*9*979*97979797979*9*9*9*9*9,19.9,10.1,53,98984,9999,9999,361,201,12,192,999900,999900,999900,99990,54,2,0,5,5,999.0,999,9,999999999,0,0,0.00C
2016,5,1,15,0,79797979E0797979*9*979*97979797979*9*9*9*9*9,15.4,12.0,80,98973,9999,9999,355,95,0,95,999900,999900,999900,99990,42,1,8,5,5,999.0,999,9,999999999,0,0,0.00C
2016,5,1,16,0,79797979E0797979*9*979*97979797979*9*9*9*9*9,16.7,11.2,70,98962,9999,9999,347,73,0,73,999900,999900,999900,99990,63,1,8,5,5,999.0,999,9,999999999,0,0,0.00C
2016,5,1,17,0,79797979E0797979*9*979*97979797979*9*9*9*9*9,15.4,12.0,80,98973,9999,9999,341,41,0,41,999900,999900,999900,99990,70,1,6,5,5,999.0,999,9,999999999,0,0,0.00C
2016,5,1,18,0,79797979E0797979*9*979*97979797979*9*9*9*9*9,14.9,12.0,83,98982,9999,9999,339,13,0,13,999900,999900,999900,99990,97,1,8,5,5,999.0,999,9,999999999,0,0,0.00C
2016,5,1,19,0,79797979E0797979*9*979*97979797979*9*9*9*9*9,14.0,11.7,86,99040,9999,9999,334,1,0,1,999900,999900,999900,99990,99,1,4,5,5,999.0,999,9,999999999,0,0,0.00C
2016,5,1,20,0,79797979E0797979*9*979*97979797979*9*9*9*9*9,13.4,11.6,89,99104,9999,9999,332,0,0,0,999900,999900,999900,99990,83,0,6,5,5,999.0,999,9,999999999,0,0,0.00C
2016,5,1,21,0,79797979E0797979*9*979*97979797979*9*9*9*9*9,13.2,12.0,93,99162,9999,9999,331,0,0,0,999900,999900,999900,99990,78,1,2,5,5,999.0,999,9,999999999,0,0,0.00C
2016,5,1,22,0,79797979E0797979*9*979*97979797979*9*9*9*9*9,13.2,12.2,94,99116,9999,9999,331,0,0,0,999900,999900,999900,99990,88,1,5,5,5,999.0,999,9,999999999,0,0,0.00C
2016,5,1,23,0,79797979E0797979*9*979*97979797979*9*9*9*9*9,13.0,11.9,93,99102,9999,9999,330,0,0,0,999900,999900,999900,99990,82,1,3,5,5,999.0,999,9,999999999,0,0,0.00C
2016,5,1,24,0,79797979E0797979*9*979*97979797979*9*9*9*9*9,12.6,11.2,91,99067,9999,9999,327,0,0,0,999900,999900,999900,99990,72,1,6,5,5,999.0,999,9,999999999,0,0,0.00C

```

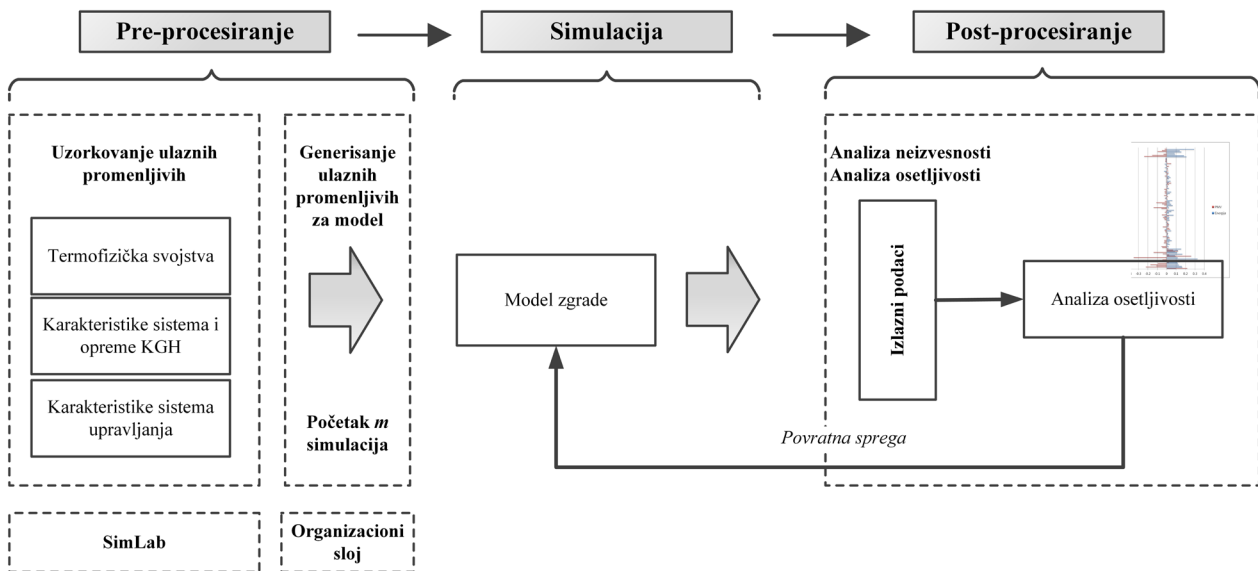
*Slika 3.16. Klimatska datoteka u formatu podržanom za simulaciju u EnergyPlus*

### 3.3. Globalna analiza osetljivosti

U poglavlju 2.1.2. je opisana podela metoda analize osetljivosti, i predstavljen opšti postupak sprovođenja analize osetljivosti. Od svih metoda, Monte Carlo analiza osetljivosti, je najčešće korišćenja u sprezi sa detaljnim simulacionim alatima.

Monte Carlo pripada grupi tzv. eksternih globalnih metoda analize osetljivosti, jer se zavisne promenljive dobijaju eksterno (detaljnim simulacionim alatom), i njome se analizira približna distribucija mogućih rezultata na bazi probablističkih vrednosti ulaznih promenljivih. Svakoju ulaznoj promenljivoj, u definisanom opsegu vrednosti, se dodeljuje odgovarajuća funkcija raspodele verovatnoće. U svakoj simulaciji, svakoj ulaznoj promenljivoj se dodeljuje po jedna vrednost na osnovu njene verovatnoće odgovarajućom tehnikom uzorkovanja. Rezultati simulacije modela sa ovako definisanim vrednostima ulaznih promenljivih se arhiviraju, i proces se ponavlja dovoljan broj puta koristeći uvek različiti i jedinstveni niz vrednosti svih ulaznih promenljivih. Kada se postupak završi, vrednosti izlaznih promenljivih iz svih simulacija kao i vrednosti ulaznih promenljivih za koje su izračunate se arhiviraju. Ceo postupak sprovođenja Monte Carlo analize osetljivosti pomoću Simlab-a i EnergyPlus-a je prikazan na slici 3.17. i može se podeliti u tri faze, pri čemu se u svakoj od faza koriste odgovarajući alati:

- faza pretprocesiranja, sprovedena u alatu Simlab,
- faza simulacija sprovedena u EnergyPlus,
- faza postprocesiranja sprovedena u Simlab.



*Slika 3.17. Monte Carlo analiza osetljivosti sa detaljnim simulacionim alatom*

Simlab je softver namenjen za sprovođenje Monte Carlo analize osetljivosti (i neizvesnosti). U Monte Carlo analizi se koristi za pseudonasumično generisanje brojnih vrednosti sa naglaskom na simultano uzorkovanje niza vrednosti na osnovu definisanih funkcija raspodele verovatnoće.

U fazi pretprocesiranja se usvajaju parametri modela (ulazne promenljive) čiji se uticaj na rezultate simulacije ispituje. Za svaku od ulaznih promenljivih se definiše opseg vrednosti i funkcija raspodele verovatnoće. Na raspolaganju su sledeće funkcije raspodele verovatnoće:

- normalna raspodela,
- lognormalna raspodela,
- uniformna raspodela,
- loguniformna raspodela,
- Weibull-ova raspodela,
- eksponencijalna raspodela,
- gama raspodela,
- beta raspodela,
- trougaona raspodela,
- diskretna raspodela.

Nakon definisanja funkcija raspodele verovatnoće za svaku od ulaznih promenljivih, prelazi se na uzorkovanje, kako bi se dobile odgovarajuće vrednosti svake ulazne promenljive. U literaturi se uglavnom koriste: nasumično uzorkovanje, stratifikovano uzorkovanje i LHS uzorkovanje. Nasumično uzorkovanje predstavlja osnovnu tehniku uzorkovanja kojom se nasumično generisani broj skalira do vrednosti ulazne promenljive preko njene definisane funkcije raspodele verovatnoće. Stratifikovano uzorkovanje predstavlja unapređenje nasumičnog uzorkovanja kojim se uzorku (nizu

vrednosti ulaznih promenljivih) „nameće“ da pokrije čitav spektar vrednosti ulaznih promenljivih koje se analiziraju. Kako bi se postiglo pokrivanje čitavog spektra ulaznih promenljivih, funkcija raspodele verovatnoće ulazne promenljive se deli u nekoliko slojeva jednake verovatnoće i na kraju se po jedna vrednost iz svakog od slojeva bira nasumično. Kod LHS uzorkovanja ospeg svake ulazne promenljive  $x_j, j=1, \dots, k$ , se deli u  $N$  (broj uzoraka) intervala jednake verovatnoće,  $1/N$ , pri čemu se nasumično usvaja vrednost svake ulazne promenljive iz svakog intervala. Dakle postoji  $N$  nepreklapajućih vrednosti za svaku od  $k$  ulaznih promenljivih. Jedna od vrednosti ulazne promenljive 1,  $x_1$ , se nasumično bira i uparuje sa nasumično izabranom vrednosti ulazne promenljive 2,  $x_2$ , i tako redom dok se ne izabere vrednost poslednje ulazne promenljive  $k$ ,  $x_k$ . Ovako usvojene vrednosti svih ulaznih promenljivih predstavljaju prvi uzorak  $\mathbf{x}_1$ . Neka od preostalih vrednosti ulazne promenljive 1,  $x_1$ , se ponovo nasumično bira i uparuje sa nasumično izabranom nekom od preostalih vrednosti ulazne promenljive 2,  $x_2$ , i tako redom dok se ne dobije drugi uzorak  $\mathbf{x}_2$ . Postupak se ponavlja dok se ne dobiju svi preostali uzorci  $\mathbf{x}_3, \dots, \mathbf{x}_N$ , tj. dok se ne izaberu sve vrednosti svih ulaznih promenljivih.

Broj vektora ulaznih promenljivih (veličina uzorka) više zavisi od načina uzorkovanja, nego li od broja ulaznih promenljivih [109], ali je opšteprihvaćeno da uzorak bude bar 50% [103] veći od broja ulaznih promenljivih, a po potrebi može da bude i 10 puta veći od broja ulaznih promenljivih.

Rezultat faze pretprocesiranja u Simlab-u je uzorak odgovarajuće veličine (matrica vrednosti) čije je pojedinačne vektore potrebno evaluirati simulacionim alatom u fazi simulacija.

Perturbacija velikog broja parametara (ulaznih promenljivih u analizi osetljivosti) direktno u EnergyPlus je nepraktična. Simulacija uzorka dobijenog u fazi pretprocesiranja (gde se  $n$  ulaznih promenljivih simulira  $m$  puta), gde se identične simulacije pokreću  $m$  puta, može da se posmatra (u suštini i jeste) kao parametarska studija i koristi se parametarski pretprocesor EnergyPlus-a, koji omogućava da se na unapred obeleženom mestu u modelu svaki put unese različita vrednost. Da bi se olakšalo korišćenje parametarskog pretprocesora, generisani uzorak je potrebno prilagoditi za korišćenje simulacionog alata. Generisani uzorak iz Simlab-a je tekstualna datoteka sa vrednostima ulaznih promenljivih po kolonama (slika 3.18), pa je dodavanjem odgovarajućih sintaksi za pokretanje parametarskog pretprocesora omogućena simulacija celog uzorka (slika 3.19).

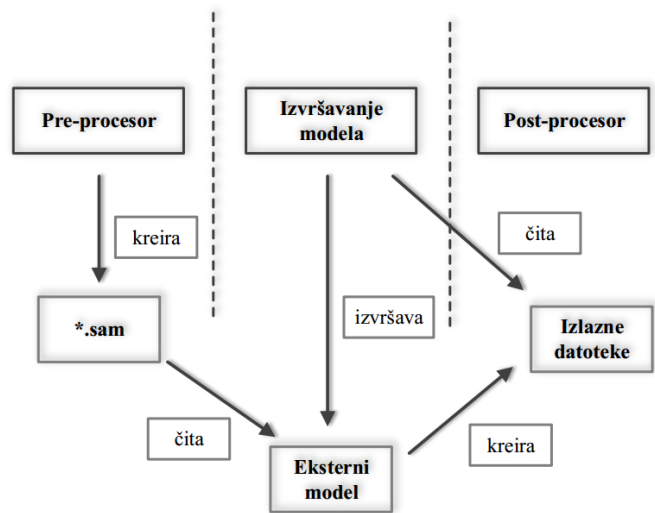




```

RMVWeighted
Energy
time=no
1500
1.290064769 703.0006806
1.301297664 757.4666928
1.287237316 480.6461095
1.559020126 814.8077568
1.210258519 663.5121447
1.416247781 776.4785985
1.269383721 718.0415169
1.239457651 892.3348823
1.335108486 772.9676676
1.385441576 765.9345745
1.308668761 667.3152066
1.449966869 864.9261669
1.183097502 728.7007601
1.135966355 773.231147
1.234953223 739.821708
1.207662564 774.0641919
1.39278798 640.2232778
1.274731974 676.6586275
1.135207867 734.0193285
1.582871742 733.7627693
1.301565029 718.7914554
1.414155587 894.2385948
1.250499774 765.3283008
1.373653158 587.2116515
1.258749779 794.2974748
1.078668574 840.045278
1.263722325 763.4711625
1.445732529 642.4338648
1.525275159 731.6814095
1.116009955 751.7324724

```



*Slika 3.20. Ulazna datoteka za analizu osetljivosti*

*Slika 3.21. Pokretanje analize osetljivosti sa eksterno eveluiranim modelom u Simlab*

Pokretanjem Monte Carlo analize u Simlab-u, propuštanjem uzorka kroz model omogućava se mapiranje od ulaznih promenljivih ka izlaznim promenljivim u obliku:

$$[y_i, x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}], i = 1, \dots, m \quad (3.16)$$

gde je  $n$  broj ulaznih promenljivih, a  $m$  veličina uzorka. Kada se ovo mapiranje generiše i sačuva, koristi se za kvantifikaciju osetljivosti izlaznih promenljivih na pojedinačne ulazne promenljive. Postoje brojne tehnike analize osetljivosti kojima se dobijaju odgovarajući indikatori osetljivosti, a najznačajnije za ovo istraživanje su tehnike zasnovane na regresionoj analizi (indikatori SRC i SRRC).

Multivarijantni uzorak vrednosti ulaznih promenljivih  $\mathbf{x}$ , dobijen odgovarajućom metodom uzorkovanja (dimenzija  $m \times k$ ), i odgovarajući niz od  $m$  rezultata simulacija se rešavaju regresionim modelom. Ukoliko je u pitanju linearna regresija, model dobija oblik

$$y_i = b_0 + \sum_j b_j x_{ij} + \varepsilon_i \quad (3.17)$$

gde su  $y_i, i=1, \dots, p$  zavisno promenljive modela,  $b_j, j=1, \dots, k$  ( $k$  je broj ulaznih promenljivih) su regresioni koeficijenti koje je potrebno odrediti, a  $\varepsilon_i$  je greška aproksimacije. Jedan od uobičajenih načina određivanja koeficijenata  $b_j$  je da se koristi metod najmanjih kvadrata, pri čemu se koeficijenti određuju na taj način da funkcija

$$F(b) = \sum_i \varepsilon_i^2 \quad (3.18)$$

bude na minimumu. Kada se izračunaju svi koeficijenti  $b_j$ , mogu da se koriste da pokažu značaj individualne ulazne promenljive  $x_j$  na osnovu neizvesnosti izlazne promenljive  $y$ . Kada se  $\mathbf{b}$  (vektor regresionih koeficijenata) izračuna, regresioni model može da se napiše u obliku:

$$\frac{y - \bar{y}}{\hat{s}} = \sum_j \frac{b_j \hat{s}_j}{\hat{s}} (x_j - \bar{x}_j) \quad (3.19)$$

gde su:

$$\bar{y} = \frac{\sum_i y_i}{m} \quad (3.20)$$

$$\bar{x}_j = \frac{\sum_i x_{ij}}{m} \quad (3.21)$$

$$\hat{s} = \sqrt{\frac{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}{m - 1}} \quad (3.22)$$

$$\hat{s}_j = \sqrt{\frac{\sum_i (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{m - 1}} \quad (3.23)$$

Koeficijenti  $\frac{b_j \hat{s}_j}{\hat{s}}$  se nazivaju standardizovani regresioni koeficijenti (SRC) i koriste se kao indikatori osetljivosti (kada su ulazne promenljive međusobno nezavisne) jer se njima kvantifikuje efekat variranja svake ulazne promenljive od svoje srednje vrednosti fiksnim delom njene varijanse pri čemu su sve ostale promenljive na njihovim očekivanim vrednostima. Pri korišćenju SRC neophodno je razmatrati i koeficijent determinacije modela:

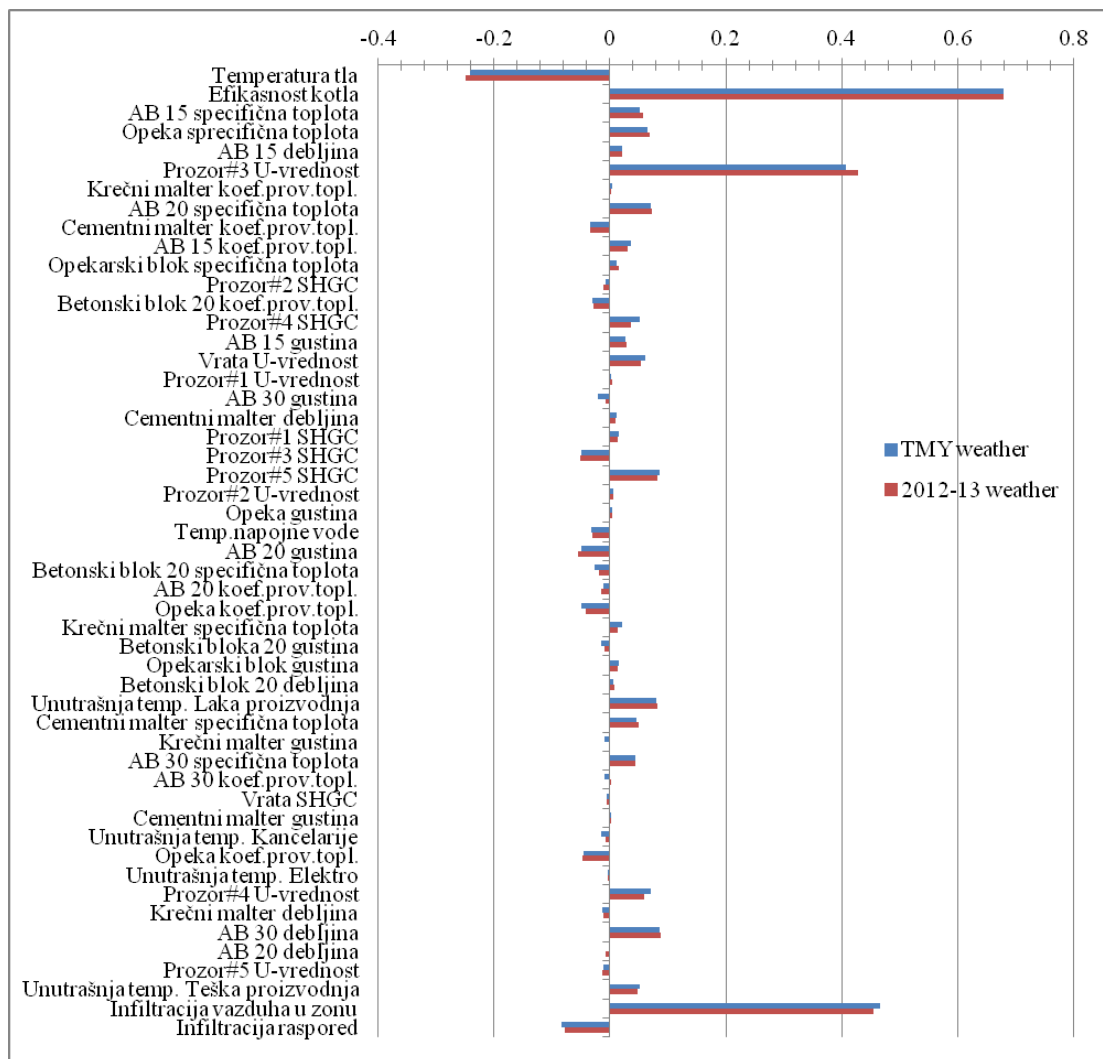
$$R_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.24)$$

gde  $\hat{y}_i$  predstavlja procenu  $y_i$  dobijenu iz regresije modela. Koeficijent determinacije definisan u (3.24) pokazuje koliko tačno linearni regresioni model zasnovan na SRC koeficijentima može da ponovi stvarni izlaz  $y$ . Što je bliži vrednosti 1 to model ima bolje performanse.

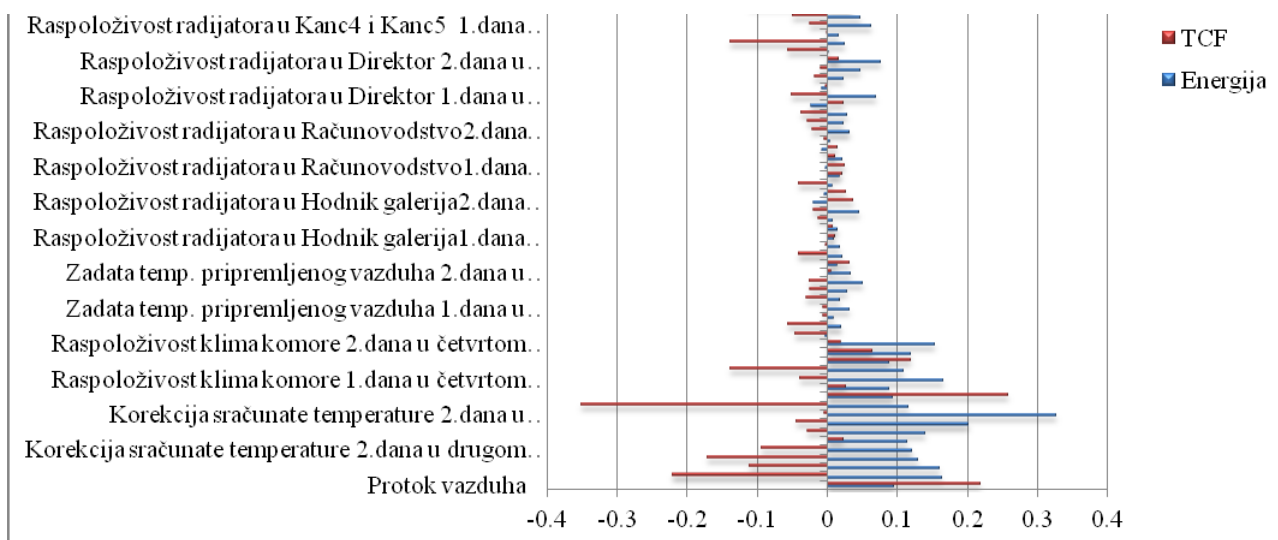
Kako ulazne promenljive imaju različite redove veličina, umesto sirovih podataka može da se koristi i transformacija ranga, pa da se nad transformisanim podacima sprovede regresiona analiza. Transformacija ranga je procedura koja uključuje zamenu podataka sa njihovim odgovarajućim rangom (dodeljuje se rang 1 za najmanju vrednosti do ranga  $N$  za najveću vrednost). Postupak opisan jednačinama (3.20–3.24) se sprovodi nad ovako transformisanim podacima, pa se kao indikatori osetljivosti dobijaju standardizovani koeficijenti regresije nad rangom (SRRC).

Što je viša vrednost indikatora osetljivosti to je rezultat simulacije osetljiviji na promene ulazne promenljive. Pozitivan koeficijent znači da porast varijacije ulazne promenljive rezultuje porastom varijacije izlazne promenljive. Negativna vrednost indikatora osetljivosti znači da se smanjenjem varijacije ulazne promenljive povećava varijacija izlazne promenljive. Bez obzira koji se od gornja dva indikatora osetljivosti usvoji, mora da se odredi statistički relevantna granica uticaja, tj. mora da se definiše apsolutna vrednost indikatora iznad koje će se smatrati da je izlazna promenljiva osetljiva na promene u ulaznoj promenljivoj.

Ceo postupak analize osetljivosti se sprovodi sa ciljem nalaženja najuticajnijih ulaznih promenljivih na jednu ili više veličina koje se određuju simulacionim alatom. Rangiranje uticajnih koeficijenata je prikazano na slici 3.22. Ukoliko se kao rezultat simulacije dobijaju, npr. i potrošena energija i toplotni komfor (PMV indeks) prisutnih može se desiti da svaka od ovih veličina bude osetljiva na različite ulazne promenljive (ne moraju nužno da budu iste ulazne promenljive). U zavisnosti od svrhe istraživanja mogu se izabrati ulazne promenljive na koje su osetljive obe veličine (presek) ili eventualno da se sve ulazne promenljive na koje su osetljive sve izlazne promenljive uzmu u razmatranje (ovo je posebno važno kada se optimizuje rad sistema na dnevnom nivou na taj način da se troši najmanje energije uz zadovoljenje termičkog komfora, slika 3.23).



Slika 3.22. Osetljivost potrošnje energije na promene u termofizičkim svojstvima omotača [157]



Slika 3.23. Osetljivost potrošnje energije i funkcije komfora TCF na promene u parametrima sistema KGH

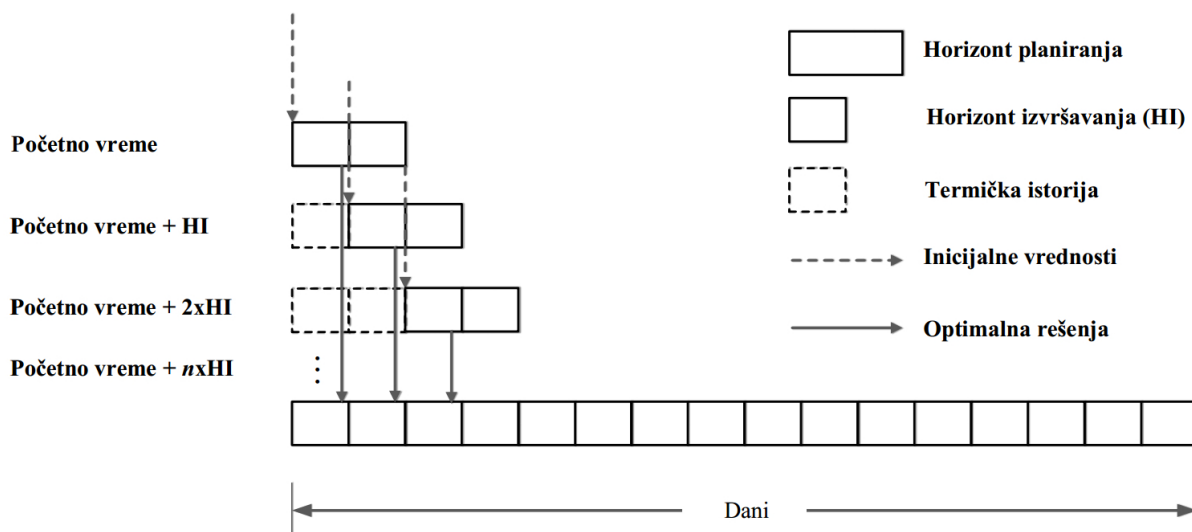
### 3.4. Određivanje dnevnih operativnih strategija na bazi kratkoročne vremenske prognoze

Optimalnim dnevnim operativnim strategijama se poboljšavaju energetske performanse zgrade uz zadovoljenje neophodnih uslova. U kontekstu ovog istraživanja cilj je da se minimizuje potrošnja energije u zgradi takvim radom sistema da u trenutku boravka ljudi u pojedinim prostorijama budu zadovoljeni propisani uslovi toplotnog komfora, odnosno da se rad sistema KGH optimizuje na takav način da se troši najmanje moguće energije za unapred definisani nivo komfora. Ovim postupkom se mogu dobijati dnevne strategije i za drugačije formulisane funkcije cilja. Kao optimizacioni algoritam usvojena je optimizacija rojem čestica, koja iako ne garantuje nalaženje globalnog minimuma, pažljivim podešavanjem može da mu se približi.

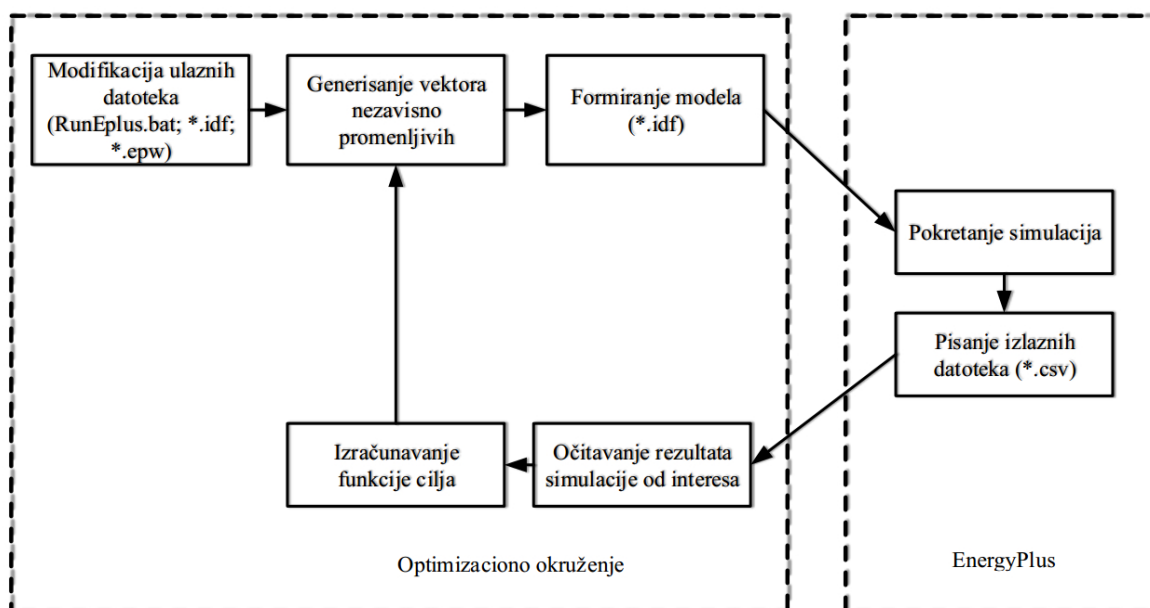
Proces određivanja optimalnih dnevnih strategija korišćenja sistema KGH u zgradi je ilustrovan na slikama 3.24. i 3.25. Postupak je izveden u formi *offline* optimizacije. Sastoji se od optimizacionog algoritma, simulacionog alata i same zgrade u kojoj se implemetiraju rezultati optimizacije i koja služi kao povratna sprega u narednom horizontu planiranja. Umesto zgrade povratnu spregu mogu da čine i rezultati simulacije.

Nezavisno promenljive u optimizaciji su sve fizičke veličine na koje se može delovati u zgradi, nezavisno da li se regulišu lokalno (promena unutrašnje temperature promenom položaja termostatskog ventila, postavne vrednost unutrašnjeg termostata i sl.) ili centralno (funkcionalna zavisnost temperature napojne vode od spoljašnje temeprature, vreme početka i kraja rada pojedinih sistema, protoci nosioca energije, raspoloživost pojedinih komponenata i sl.). Horizont planiranja je promenljivog trajanja i može da se kreće u opsegu od 1h do tri dana koliko iznosi i period koji je pokriven kratkoročnom vremenskom prognozom. Horizont izvršavanja je po pravilu kraći od horizonta planiranja i njegovo trajanje može da bude u opsegu od 1h do 24h. Svaki dan horizonta planiranja je podeljen u nekoliko blokova (slika 3.26) pri čemu u svakom od blokova, svaka od usvojenih nezavisno promenljivih može da ima samo po jednu vrednost. Predviđena je podela dana na najmanje dva bloka i to: period korišćenja prostorija (deo dana kada su ljudi prisutni u prostorijama i kada je potrebno održavati toplotni komfor u definisanim granicama) i period nekorisćenja prostorija (deo dana pre dolaska ljudi na posao i deo dana nakon odlaska ljudi sa posla), a po potrebi se može definisati i više ovakvih blokova koji ne moraju biti jednake dužine. Nakon dostavljanja kratkoročne vremenske prognoze od strane RHMZ, ili preuzimanjem podataka iz dostupnih baza na internetu, kreira se klimatska datoteka formata koji zahteva simulacioni alat (poglavlje 3.4.1). Pored klimatske datoteke, neophodna je i datoteka (ili više njih u slučaju da se iskoristi mogućnost modeliranja tj. unošenja rasporeda i ostalih vrednosti u vidu \*.csv datoteke) u

kojoj je sadržan model. Kako je u pitanju tekstualna datoteka (\*.IDF) čiji se broj redova ne menja, prateći konvekciju za unos polja u EnergyPlus-u (svaki red mora da se završava „ , “ osim poslednjeg reda klase objekta koja se završava „ ; “), izabrane nezavisno promenljive za optimizaciju se nalaze u tačno određenim redovima ulazne datoteke (jedna izabrana promenljiva optimizacije može, a najčešće je i tako, da se pojavljuje na više mesta). Optimizacionim algoritmom se generiše vektor nezavisno promenljivih procesa optimizacije pri čemu se svaka nezavisna promenljiva upisuje u tačno specificirane linije datoteke modela (najčešće u okviru EMS rutina). Za tako dobijen model zgrade (kandidat) se pokreće simulacija sa klimatskom datotekom. Po završetku simulacije dobijaju se rezultati simulacije iz koje optimizacioni algoritam ekstraktuje podatke koji su neophodni za izračunavanje definisane funkcije cilja. Na osnovu izračunate vrednosti funkcije cilja, optimizacionim algoritmom se generiše novi vektor nezavisno promenljivih optimizacije i ceo postupak se ponavlja, sve dok se ne ispuni jedan od zaustavnih kriterijuma. Zaustavni kriterijum se takođe može prilagođavati od situacije do situacije. Nakon zadovoljenja zaustavnog kriterijuma, dobijene vrednosti u toku horizonta izvršavanja se implementiraju u realnoj zgradi, i ceo postupak se pomera jedan horizont izvršavanja unapred i proces optimizacije počinje za novi horizont planiranja, sa novom klimatskom datotekom i novim ulaznim podacima modela. Izmerene vrednosti u realnoj zgradi nakon implementacije dnevne strategije ili simulacijom dobijene vrednosti prelaze u termičku istoriju modela, tačnije služe da se odrede početni uslovi na početku svakog novog horizonta planiranja.



*Slika 3.24. Pomerajući horizont optimizacije*



Slika 3.25. Proces optimizacije



Slika 3.26. Podela horizonta planiranja u blokove: crnom bojom su predstavljeni prethodni horizonti izvršavanja čiji rezultati postaju deo termičke istorije modela; sivom bojom je trenutni horizont planiranja

### 3.4.1. Kratkoročne vremenske prognoze za simulacije energetske performansi

Prognostički modeli koji se koriste u RHMZ za generisanje kratkoročne vremenske prognoze su prikazani u poglavlju 2.4.1. Sa stanovišta korišćenja kratkoročnih vremenskih prognoza za izradu dnevnih strategija rada sistema KGH simulacionim alatima je mnogo važniji vremenski okvir dobijanja kratkoročne prognoze, naročito za *online* optimizacije. Podaci sadržani u kratkoročnoj vremenskoj prognozi su prikazani na satnom nivou i odnose se za period od tri uzastopna dana (ukupno 72 sata) od trenutka važenja prognoze.

Vremenski okvir dobijanja kratkoročne vremenske prognoze sa početkom u 00:00UTC tekućeg dana bi se mogao opisati sledećim koracima:

- dobijanje bočnih graničnih uslova iz *ECMWF*:
  - u 00:00UTC se globalno skupljaju osmatranja,
  - vrši se asimilacija podataka i priprema početnih uslova oko 05:40UTC,
  - podaci za prvi dan prognoze se dobijaju u 05:52UTC,
  - podaci za drugi dan prognoze se dobijaju u 05:59UTC,
  - podaci za treći dan prognoze se dobijaju u 06:06UTC,



- podaci se šalju u RHMZ,
- pokretanje WRF-NMM regionalnog modela i dobijanje kratkoročne vremenske prognoze za Srbiju nešto posle 07:00UTC,
- prosleđivanje kratkoročne vremenske prognoze.

Sličan je vremenski okvir i za generisanje prognoze u 12:00 UTC. Ono što je uočljivo jeste da prvih 7 sati prognoze nedostaje (u realnom vremenu to je prvih 8 ili 9 sati prognoze u zavisnosti da li se prvi dan prognoze pada u letnjem ili zimskom računanju vremena). Nedostajući sati prognoze se dopunjuju podacima iz poslednje raspoložive prognoze. Ovako generisana kratkoročna vremenska prognoza sadrži sledeće klimatske podatke:

- temperaturu spoljnog vazduha po suvom termometru u [°C],
- relativnu vlažnost spoljnog vazduha u [%],
- atmosferski pritisak u [mbar],
- brzinu vetra u [m/s],
- pravac vetra u [°] (Sever 0°, Istok 90°, Jug 180° i Zapad 270°)
- pokrivenost neba oblacima u [1/8].

Dobijanje klimatske datoteke za simulacije u kojoj su sadržani podaci kratkoročne vremenske prognoze se sprovodi po proceduri opisanoj u poglavlju 3.2.1, izborom jednog (najčešće temperature) ili svih klimatskih podataka iz prognoze. I u ovom delu treba voditi računa o usklađivanju vremena klimatske datoteke i vremena kratkoročne vremenske prognoze. Struktura svih datoteka za korišćenje u klimatskom pretprocesoru EnergyPlus-a je vrlo slična (slike 3.14. – 3.16).

### 3.4.2. Optimizacioni algoritam i funkcija cilja

Prethodnih nekoliko decenija razvijene su metode optimizacije koje se konceptualno razlikuju od tradicionalnih tehnika matematičkog programiranja. Ove metode se nazivaju metaheurističkim metodama optimizacije. Većina ovih metoda je zasnovana na karakteristikama i ponašanju bioloških, molekularnih ili neurolobioloških sistema. Tako postoje sledeće netradicionalne metode optimizacije:

- genetski algoritmi,
- optimizacija rojevima čestica,
- optimizacija kolonijom mrava,
- simulirano kaljenje itd.

Genetski algoritmi su zasnovani na principima genetike i prirodne selekcije. Optimizacija rojem čestica je zasnovana na ponašanju kolonija živih bića kao što su rojevi insekata, jata ptica ili riba.

Optimizacija kolonije mrava je zasnovana na zajedničkom ponašanju kolonija mrava koje su sposobne da nađu najkraći put od svojih gnezda do izvora hrane. Simulirano kaljenje je bazirano na simulaciji procesa kaljenja zagrejanih čvrstih tela do kritične temperature.

### Optimizacija rojevima čestica

Optimizacija rojevima čestica [158] je zasnovana na ponašanju kolonije/roja insekata kao što su mravi, termiti, pčele i ose, jata ptica ili jata riba. Metod PSO preslikava socijalno ponašanje ovih živih bića. Termin čestica se odnosi na npr. pčelu u roju ili pticu u jatu. Svaka jedinka, tj. čestica u roju, se ponaša koristeći i sopstvenu intelegenciju ali i kolektivnu inteligenciju roja/jata. To znači da ako jedna jedinka nađe dobar put do izvora hrane, ostatak roja/jata će takođe moći trenutno da prati dobar put do izvora hrane, čak iako je njihova lokacija daleko od roja/jata.

U kontekstu višeparametarske optimizacije, pretpostavlja se da je roj konstantne veličine, pri čemu je svaka čestica inicijalno locirana na nasumičnoj lokaciji unutar višedimenzionog prostora promenljivih. Svaka čestica ima dve osnovne karakteristike: poziciju i brzinu. Svaka čestica se kreće u višedimenzionom prostoru promenljivih pamteći najbolju poziciju (u smislu vrednosti funkcije cilja) koju je dotad našla. Čestice razmenjuju informacije o dobrim pozicijama u prostoru i prilagođavaju svoje pojedinačne pozicije i brzine na osnovu tih informacija.

PSO je razvijen na bazi sledećeg modela:

- kada jedan član roja nađe rešenja sa do tada najboljom vrednošću funkcije cilja trenutno prenosi informacije svim ostali članovima roja,
- svi ostali članovi roja gravitiraju cilju, ali ne direktno,
- postoji i komponenta nezavisnog razmišljanja svakog člana roja, kao i njegova memorija.

Inicijalna verzija PSO algoritma je kreirana za potrebe optimizacionih problema sa kontinualnim promenljivim.

Neka  $k \in \mathbb{N}$  označava generaciju (iteraciju), neka  $n_p \in \mathbb{N}$  označava broj čestica u svakoj generaciji, neka  $\mathbf{x}_i(k) \in \mathbb{R}^{n_c}$ ,  $i \in \{1, \dots, n_p\}$  označava  $i$ -tu česticu  $k$ -te iteracije, neka  $\mathbf{v}_i(k) \in \mathbb{R}^{n_c}$  označava brzinu čestice, neka  $c_1, c_2 \in \mathbb{R}_+$  i neka  $\rho_1(k), \rho_2(k) \sim U(0,1)$  budu uniformno nasumično izabrani brojevi između 0 i 1. Tada, vektor položaja i vektor brzine, za svako  $i \in \{1, \dots, n_p\}$  i svako  $k \in \mathbb{N}$ , se određuju kao:

$$\mathbf{v}_i(k+1) = \mathbf{v}_i(k) + c_1 \rho_1(k) (\mathbf{p}_{l,i}(k) - \mathbf{x}_i(k)) + c_2(k) \rho_2(k) (\mathbf{p}_{g,i}(k) - \mathbf{x}_i(k)) \quad (3.25)$$

$$\mathbf{x}_i(k+1) = \mathbf{x}_i(k) + \mathbf{v}_i(k+1) \quad (3.26)$$

pri čemu je  $\mathbf{v}_i(0) = 0$  i

$$\mathbf{p}_{l,i}(k) \triangleq \underset{\mathbf{x} \in \{\mathbf{x}_i(j)\}_{j=0}^k}{\operatorname{argmin}} f(\mathbf{x}) \quad (3.27)$$

$$\mathbf{p}_{g,i}(k) \triangleq \underset{\mathbf{x} \in \{\{\mathbf{x}_i(j)\}_{j=0}^k\}_{i=1}^{n_P}}{\operatorname{argmin}} f(\mathbf{x}) \quad (3.28)$$

$\mathbf{p}_{l,i}(k)$  je pozicija za koju  $i$ -ta čestica je imala najbolju funkciju cilja u iteracijama od 0 do  $k - 1$ , dok je  $\mathbf{p}_{g,i}(k)$  pozicija najbolje funkcije cilja svih čestica u iteracijama od 0 do  $k - 1$ . Drugi član jednačine (3.25) se vezuje za kognitivno svojstvo jer uzima u obzir dotadašnje iskustvo same čestice, dok se treći član iste jednačine povezuje sa socijalnom interakcijom čestica. Zato se u literaturi član  $c_1$  naziva konstantom kognitivnog ubrzanja, dok se član  $c_2$  naziva konstantom socijalnog ubrzanja.

Eberhard i Shi [159] su uveli inercionu promenljivu  $\omega(k)$  pomoću koje se unapređuju performanse originalnog PSO algoritma. U ovom slučaju se vektor položaja i vektor brzine čestice određuju po jednačinama:

$$\hat{\mathbf{v}}_i(k+1) = \omega(k)\mathbf{v}_i(k) + c_1\rho_1(k) \left( \mathbf{p}_{l,i}(k) - \mathbf{x}_i(k) \right) + c_2\rho_2(k) \left( \mathbf{p}_{g,i}(k) - \mathbf{x}_i(k) \right) \quad (3.29)$$

$$\mathbf{v}_i^j(k+1) = \operatorname{sign} \left( \hat{\mathbf{v}}_i^j(k+1) \right) \min \left\{ \left| \hat{\mathbf{v}}_i^j(k+1) \right|, \mathbf{v}_{max}^j \right\}, j \in \{1, \dots, n_c\} \quad (3.30)$$

$$\mathbf{v}_{max}^j \triangleq \lambda(\mathbf{u}^j - \mathbf{l}^j) \quad (3.31)$$

$$\mathbf{x}_i(k+1) = \mathbf{x}_i(k) + \mathbf{v}_i(k+1) \quad (3.32)$$

i to za svako  $i \in \{1, \dots, n_p\}$ ,  $k \in \mathbb{N}$ ,  $\mathbf{x}_i(k) \in \mathbb{R}^{n_c}$  i  $\mathbf{v}_i(0) = 0$ , pri čemu su  $\lambda \in \mathbb{R}_+$ , za  $\forall j \in \{1, \dots, n_c\}$ , dok su  $\mathbf{l}, \mathbf{u} \in \mathbb{R}^{n_c}$  donja i gornja granica nezavisno promenljive respektivno. Uobičajena vrednost je  $\lambda = \frac{1}{2}$ . Ukoliko je  $\lambda \leq 0 \Rightarrow \mathbf{v}_i^j(k+1) = \hat{\mathbf{v}}_i^j(k+1)$ , za  $\forall k \in \mathbb{N}, i \in \{1, \dots, n_p\}, j \in \{1, \dots, n_c\}$ . Inerciona promenljiva se izračunava kao:

$$\omega(k) = \omega_0 - \frac{k}{K}(\omega_0 - \omega_1) \quad (3.33)$$

pri čemu su  $\omega_0 \in \mathbb{R}$  inicijalna inerciona promenljiva,  $\omega_1 \in \mathbb{R}$  inerciona promenljiva poslednje generacije,  $K \in \mathbb{N}$  ukupni broj generacija. Potrebno je da bude zadovoljen uslov  $0 \leq \omega_1 \leq \omega_0$ . Uobičajeno vrednosti su  $\omega_0 = 1,2$  i  $\omega_1 = 0$ .

Za optimizacione probleme sa diskretnim nezavisnim promenljivim razvijen je tzv. binarni PSO algoritam u kome se diskretne nezavisno promenljive kodiraju odgovarajućim binarnim nizom i za optimizaciju se koristi taj binarni niz. Neka za  $i \in \{1, \dots, n_d\}$ ,  $x_i \in \mathbb{N}$  bude deo (komponenta) diskretne nezavisno promenljive, i neka  $\Psi_i \in \{0,1\}^{m_i}$  bude njen binarni prikaz (sa  $m_i \in \mathbb{N}_+$  delova), i neka  $\pi_{l,i}(k)$  i  $\pi_{g,i}(k)$  budu binarni prikazi  $\mathbf{p}_{l,i}(k)$  i  $\mathbf{p}_{g,i}(k)$  respektivno. Tada za  $i \in \{1, \dots, n_d\}$  i  $j \in \{1, \dots, m_i\}$  se nasumično inicijalizuje  $\Psi_i^j(0) \in \{0, 1\}$  i izračunava za  $k \in \mathbb{N}$ ,

$$\hat{\mathbf{v}}_i^j(k+1) = \mathbf{v}_i^j(k) + c_1 \rho_1(k) (\pi_{l,i}^j(k) - \Psi_i^j(k)) + c_2 \rho_2(k) (\pi_{g,i}^j(k) - \Psi_i^j(k)) \quad (3.34)$$

$$\mathbf{v}_i^j(k+1) = \text{sign}(\hat{\mathbf{v}}_i^j(k+1)) \min \{|\hat{\mathbf{v}}_i^j(k+1)|, v_{max}\} \quad (3.35)$$

$$\Psi_i^j(k+1) = \begin{cases} 0, & \rho_{i,j}(k) \geq s(\mathbf{v}_i^j(k+1)) \\ 1, & \rho_{i,j}(k) < s(\mathbf{v}_i^j(k+1)) \end{cases} \quad (3.36)$$

gde su:

$$s(v) \triangleq \frac{1}{1 + e^{-v}} \quad (3.37)$$

sigmoidna funkcija, a  $\rho_{i,j}(k) \sim U(0, 1)$  za  $\forall i \in \{1, \dots, n_d\}$  i  $\forall j \in \{1, \dots, m_i\}$ . U jednačini (3.35) uobičajeno je da se usvoji  $v_{max} \in \mathbb{R}_+$ ,  $v_{max} = 4$  kako bi se sprečilo zasićenje sigmoidne funkcije dok se  $c_1, c_2 \in \mathbb{R}_+$  usvajaju tako da važi relacija  $c_1 + c_2 = 4$ . Uočljivo je iz jednačine (3.37) da kada  $\mathbf{v} \rightarrow 0$ , tada  $s(\mathbf{v}) \rightarrow 0.5$ , što praktično znači da mala vrednost  $v_{max}$  rezultuje u velikom prostoru rešenja koji se pretražuje, za razliku od PSO za kontinualne promenljive gde je situacija obrnuta.

### 3.4.3. Kratak opis razvijenog softverskog rešenja za određivanje operativnih strategija

Rešavanje problema optimizacije se zasniva na korišćenju približnih metaheurističkih metoda koje su pogodne za mešovite celobrojne nelinearne probleme i koje omogućavaju određivanje funkcije cilja i drugih zavisnih veličina korišćenjem numeričkih procedura, a pre svega detaljnim simulacionim alatima. Kao što je već rečeno, postoji više ovakvih metoda i one najčešće funkcionišu tako što se ponavlja izračunavanje vrednosti funkcije cilja za različite vrednosti nezavisno-promenljivih veličina (često pseudo-nasumično izabranih), vodeći pri tome računa da se obezbedi dovoljno kvalitetno istraživanje prostora potencijalnih rešenja (diverzifikacija) i zadovoljavajuće brza konvergencija ka najboljim rešenjima (intenzifikacija). Osnovne prednosti

ovih metoda jesu mogućnost sprežanja sa detaljnim simulacionim alatima i globalni karakter, a glavni nedostatak je odsustvo garancije da je dobijeno rešenje zaista optimalno ili bar blisko optimalnom u nekom opsegu tolerancije. U literaturi su ovakve metode često korišćene u kombinaciji sa simulacionim alatima i dale su dobre rezultate.

Za potrebe ovog istraživanja, izabrana je metoda PSO kao jedna od najzastupljenijih u naučnoj literaturi. Ovo je relativno efikasna metoda, pogodna za probleme koji imaju i kontinualne i diskretne, tačnije binarne nezavisno-promenljive veličine. Takođe, reč je o metodi zasnovanoj na ispitivanju populacije potencijalnih rešenja (kao i genetski algoritmi, a za razliku od npr. simuliranog kaljenja), što omogućava relativno jednostavnu paralelizaciju, tj. mogućnost boljeg iskorišćenja dostupnih računarskih resursa u smislu skraćivanja vremena potrebnog za optimizaciju.

Softversko rešenje za izradu dnevnih operativnih strategija je razvijeno u programskom jeziku *C#* i radi na platformama *.NET*, *.NET Core* i *Mono*. To znači da njegovo korišćenje ne zahteva dodatne troškove niti određeni operativni sistem.

Osnovna komponenta ovog rešenja je program za paralelnu optimizaciju rojevima čestica. Uz to, razvijene su i komponente za: paralelno generisanje pseudo-nasumičnih brojeva, manipulaciju ulaznim datotekama i čitanje izlaznih datoteka, a modifikovan je i program za pokretanje *EnergyPlus*.

Na početku rada, program za optimizaciju formira posebnu fasciklu za svaku česticu u koju kopira ulazne podatke koji se odnose na model zgrade. Prilikom određivanja funkcije cilja za određeno potencijalno rešenje (česticu), program modifikuje ulaznu tekstualnu datoteku simulacije u skladu sa vrednostima konkretnog rešenja i pokreće simulaciju za tako definisane ulaze. Nakon dobijanja informacije da je simulacija završena, program čita potrebne vrednosti iz izlazne datoteke i na osnovu njih izračunava funkciju cilja i druge važne veličine kojima se proverava zadovoljenje postavljenih ograničenja.

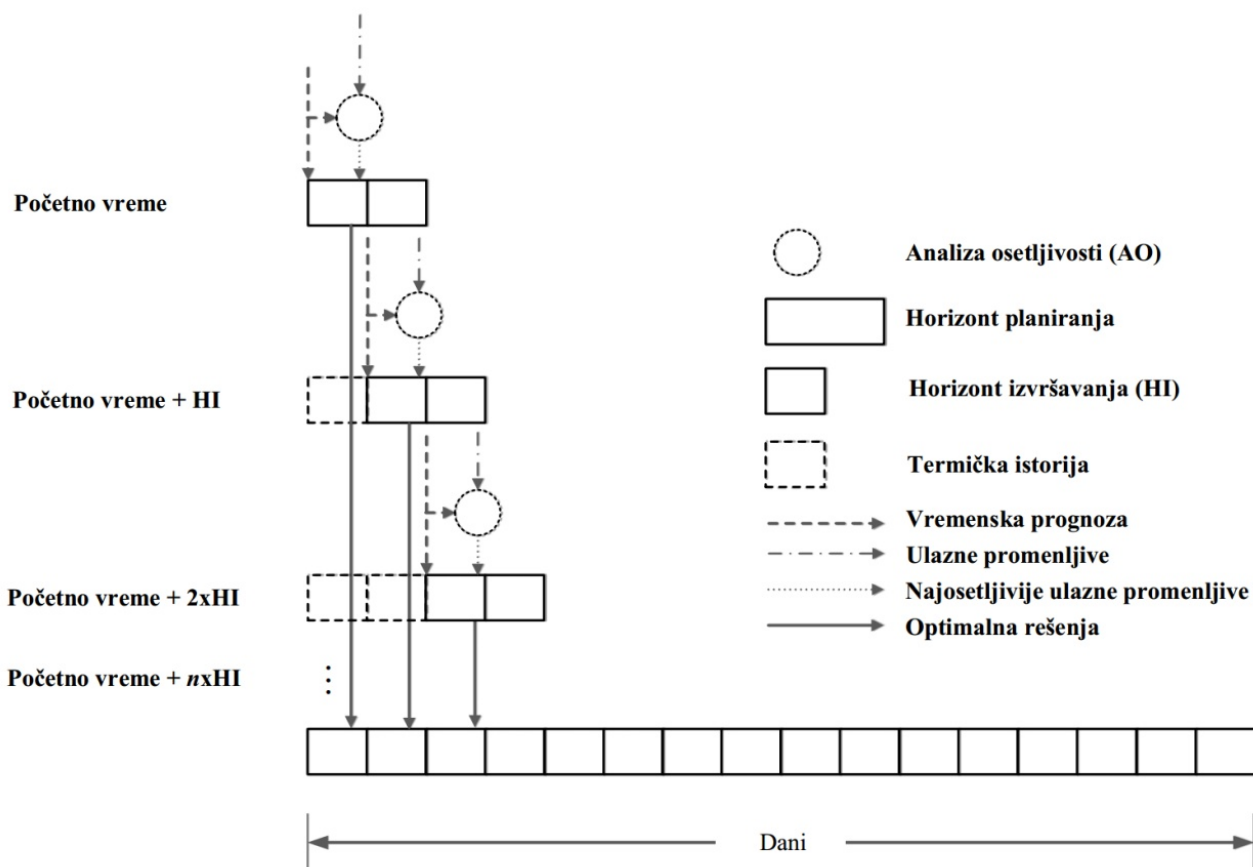
Program ima mogućnost paralelnog izvršavanja više simulacija. Tačnije, sve simulacije koje odgovaraju rešenjima ispitivanim u jednoj iteraciji (celoj populaciji čestica) bi se mogu raditi paralelno ukoliko su dostupni adekvatni računarski resursi. Time se postiže značajno skraćivanje vremena potrebnog za proces optimizacije.

Ovakvo softversko rešenje bi moglo da implementira i druge metaheurističke metode pogodne za paralelizaciju i rad sa kontinualnim i binarnim nezavisno promenljivim veličinama, kao što su evolutivne tehnike (npr. genetski algoritam). Rešenje bi takođe moglo da koristi i druge simulacione alate koji omogućavaju definisanje ulaznih i dobijanje izlaznih podataka u formi tekstualne datoteke (TXT, CSV i dr.), npr. TRNSYS.

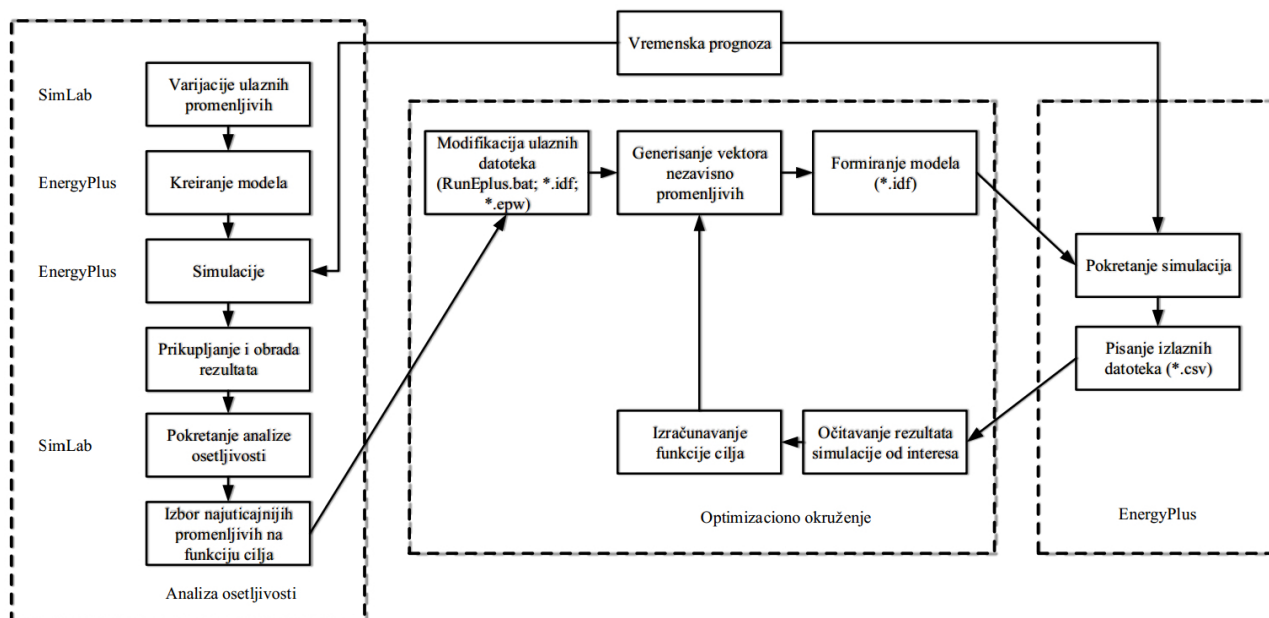
### 3.5. Određivanje dnevnih operativnih strategija na osnovu rezultata analize osetljivosti

Ukoliko se horizonti planiranja i izvršavanja u postupku optimizacije podele na veliki broj blokova (teoretski do 1h ili najkraće do dužine trajanja jednog vremenskog koraka simulacije) dobija se ogroman broj (više stotina čak i za najelementarnije sisteme KGH) nezavisno promenljivih koje je potrebno optimizovati, pa trajanje postupka optimizacije može da se značajno produži. Jedan od načina koji je potvrđen i u literaturi za postupke optimizacije u realnom vremenu, jeste da se pored zaustavnog kriterijuma definiše i maksimalno vreme trajanja optimizacije (da se ono ograniči), tačnije da se neposredno pre završetka prvog horizonta izvršavanja implementira do tada nađeno najbolje rešenje. Optimizacija rada sistema u realnom vremenu detaljnim simulacionim alatom kao što je EnergyPlus zahteva izuzetne računarske kapacitete pa se pojavljuju i problemi sa distribuiranim računarskim resursima tj. da se postupak optimizacije sprovodi na mnoštvu računara istovremeno. Sa druge strane, kod postupaka *offline* optimizacije vreme trajanja postupka nije toliko značajno jer se rezultati ne implementiraju u realnom sistemu, ali korišćenje ogromnih računarskih resursa može da bude nesvršishodno (naročito prilikom razvoja kontrolera), pa se istraživači opredeljuju ili za prostije *white-box* modele ili za *black-box* modele, a simulacioni alat služi samo za evaluaciju razvijenog kontrolera.

Analizom osetljivosti sa detaljnim simulacionim alatom može se značajno smanjiti broj nezavisno promenljivih za optimizaciju, odnosno, moguće je za svaki novi horizont planiranja odrediti najuticajnije promenljive na definisanu funkciju cilja. Postupak izrade dnevnih operativnih strategija uz pomoć rezultata analize osetljivosti predstavlja sintezu postupaka opisanih u poglavljima 3.3. i 3.4. i ilustrovan je na slikama 3.27. i 3.28. Osnovna ideja ovakve metodologije je da se pre početka postupka optimizacije broj nezavisno promenljivih na sistematičan način redukuje, tačnije da se za svaki novi horizont planiranja sprovede globalna analiza osetljivosti. Ulazne promenljive za analizu osetljivosti su sve definisane nezavisno promenljive nakon podele horizonta planiranja na blokove, dok su izlazne promenljive zavisno promenljive postupka optimizacije (sve veličine koje figurišu u funkciji cilja). Za ulazne promenljive za koje se pokaže da ne utiču ni na jednu od izlaznih promenljivih ostaju na inicijalnim vrednosti. Postupak optimizacije se sprovodi po ranije opisanoj proceduri čime se može značajno skratiti vreme optimizacije bez velikih uticaja na krajnji rezultat. Nađene optimalne vrednosti postaju deo termičke istorije modela, kada se postupak pokreće za sledeći horizont planiranja.



Slika 3.27. Pomerajući horizont optimizacije sa analizom osetljivosti



Slika 3.28. Postupak optimizacije nakon sprovođenja analize osetljivosti

## 4. Primena metodologije na postojećoj zgradi

Postupci određivanja operativnih strategija rada sistema grejanja i klimatizacije na bazi kratkoročne vremenske prognoze i sa analizom osetljivosti kao prvim korakom u izradi operativnih strategija, primenjeni su na poslovno-proizvodnoj zgradi preduzeća „Feniks BB“ d.o.o. iz Niša. Razmatrana je mogućnost rada raspoloživih sistema kojim bi se u jednom delu zgrade održavao toplotni komfor u unapred definisanim granicama, sa minimalnom potrošnjom energije.

### 4.1. Opis zgrade i osnovne karakteristike izvedenih sistema grejanja i klimatizacije

Poslovno-proizvodna zgrada preduzeća „Feniks BB“ d.o.o. iz Niša (u nastavku teksta FBB zgrada), nalazi se na periferiji Grada Niša (slika 4.1a.), locirana severozapadno i udaljena oko 9km vazдушnom linijom od centra Grada (Niške Tvrđave) (slika 4.1b.). FBB zgrada je izgrađena tokom 2010. godine, a počela je sa radom 2011. godine, pa spada u red novijih zgrada sa termofizičkim karakteristikama omotača koje su zadovoljavajućeg nivoa.



a)



b)

**Slika 4.1.** Satelitski snimak FBB zgrade (a) i lokacija u odnosu na centar Niša (b)

Osnove svih fasada čini demit konstrukcija na kojoj su jednim delom dodate polustrukturalna fasada i obloga od aluminijumskih sendvič panela.

Oko 35% fasade FBB zgrade čine prozori, pri čemu je na severoistočnoj i jugoistočnoj strani zgrade jednim delom izvedena i polustrukturalna fasada, što objektu daje veoma prijatan spoljašnji izgled (slika 4.2). Spoljašnji prozori i polja polustrukturalne fasade su izvedeni sa niskoemisionim slojem.



Ostatak fasada na jugoistočnoj i severoistočnoj strani, kao i cela jugozapadna fasada su obložene aluminijumskim sendvič panelima. Sastavi svih konstrukcija spoljnog omotača sa termofizičkim svojstvima slojeva su prikazani u tabelama 4.1.–4.6, a karakteristike prozora su prikazane u tabeli 4.7. Sastavi unutrašnjih neprovidnih i providnih pregrada neće biti prikazani zbog preglednosti, ali se koriste pri kreiranju modela.



(a) Jugoistočna fasada FBB zgrade



(b) Severoistočna fasada FBB zgrade



(c) Jugozapadna fasada FBB zgrade



(d) Severozapadna fasada FBB zgrade

*Slika 4.2. Izgled FBB zgrade*

**Tabela 4.1.** Sastav i karakteristike spoljnog zida SZ1

R.b.	d, cm	Opis	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	cp, J/kgK	$\lambda$ , W/mK
		unutra			
1	1.5	produžni krečni malter	1900	1050	0.99
2	25	saćasta i šuplja opeka	1400	920	0.61
3	6	polistirenske ploče	20	1260	0.041
4	0.5	lepljivi malter	1300	1000	0.87
5	0.3	mineralni malter	1500	1050	0.87
		spolja			

**Tabela 4.2.** Sastav i karakteristike spoljnog zida SZ2

R.b.	d, cm	Opis	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	cp, J/kgK	$\lambda$ , W/mK
		unutra			
1	1.5	produžni krečni malter	1900	1050	0.99
2	20	sačasta i šuplja opeka	1400	920	0.61
3	6	polistirenske ploče	20	1260	0.041
4	0.5	lepljivi malter	1300	1000	0.87
5	0.3	mineralni malter	1500	1050	0.87
		spolja			

**Tabela 4.3.** Sastav i karakteristike spoljnog zida SZ3

R.b.	d, cm	Opis	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	cp, J/kgK	$\lambda$ , W/mK
		unutra			
1	1.5	produžni krečni malter	1900	1050	0.99
2	25	sačasta i šuplja opeka	1400	920	0.61
3	6	mineralna vuna	50	840	0.041
4	0.013	TYEVEK folija	450	960	0.19
		spolja			

**Tabela 4.4.** Sastav i karakteristike kosog krova K1

R.b.	d, cm	Opis	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	cp, J/kgK	$\lambda$ , W/mK
		unutra			
1	4	beton od kam. agregata	2400	960	2.04
2	15	mineralna vuna	50	840	0.041
3	0.2	bitumenski papir	1100	1460	0.19
		spolja			

**Tabela 4.5.** Sastav i karakteristike poda na tlu na bazi mirkoarmiranog betona PT1

R.b.	d, cm	Opis	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	cp, J/kgK	$\lambda$ , W/mK
		unutra			
1	1	granitna keramika	2700	920	3.5
2	2	cementni malter	2100	1050	1.4
3	12	mikroarmirani beton	2400	960	1.51
4	0.04	PVC folija	1200	960	0.19
5	4	Ekstrudirani polistiren	35	1260	0.033
6	1.3	Bitumenska hidroizol. nabijeni šljunak	1100	1460	0.19

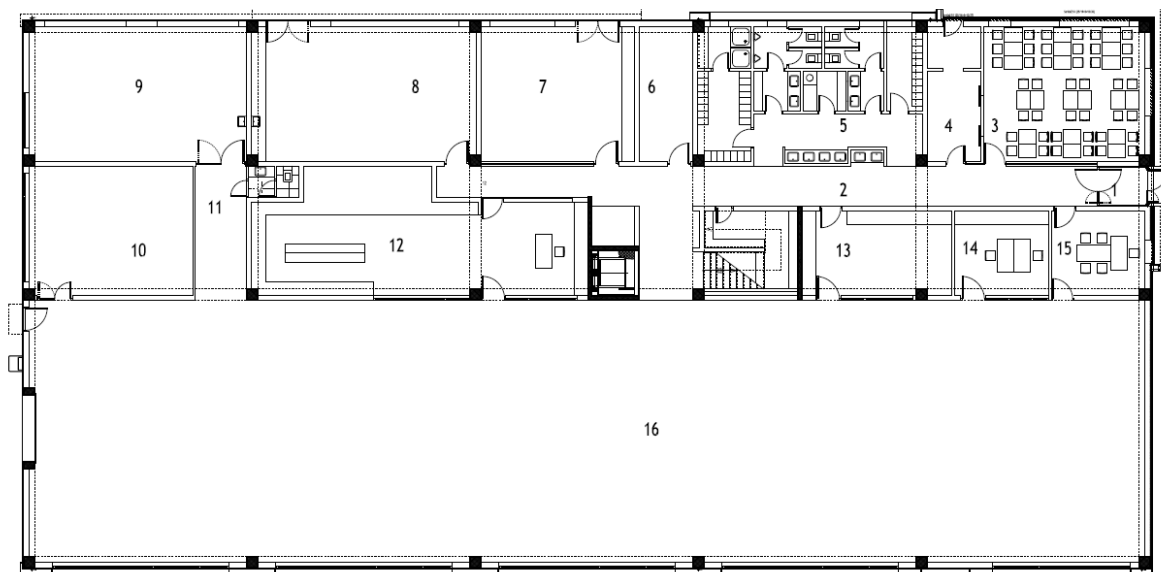
**Tabela 4.6.** Sastav i karakteristike poda na tlu na bazi ferobetona PT2

R.b.	d, cm	Opis	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	cp, J/kgK	$\lambda$ , W/mK
		unutra			
1	15	ferobeton	2400	960	1.51
2	0.04	PVC folija	1200	960	0.19
3	4	Ekstrudirani polistiren	35	1260	0.033
4	1.3	Bitumenska hidroizol. nabijeni šljunak	1100	1460	0.19

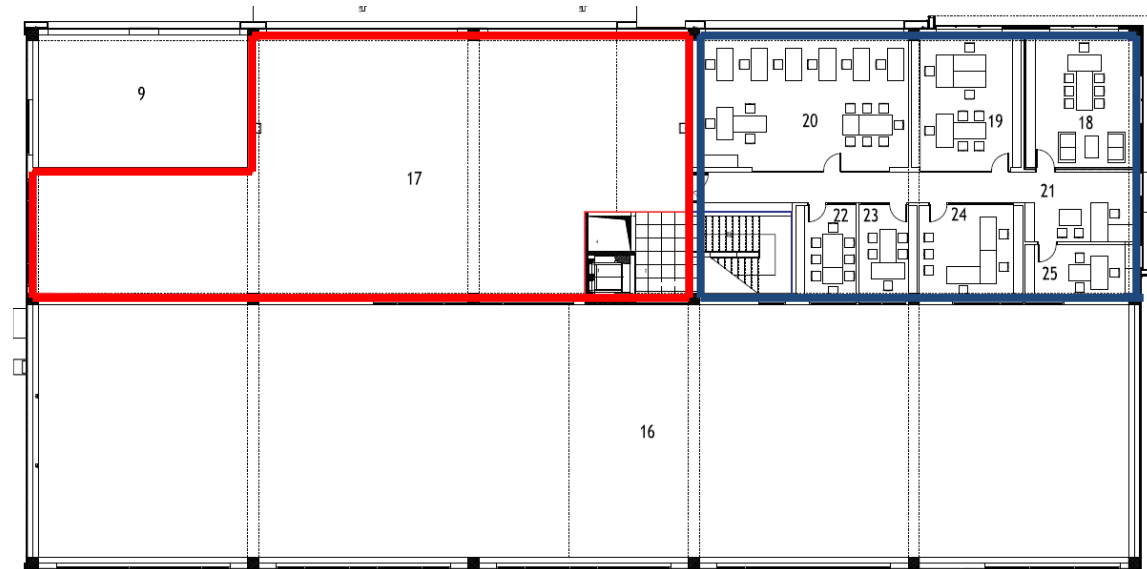
**Tabela 4.7.** Karakteristike najzastupljenijih providnih pregrada spoljnog omotača objekta

Oznaka	Opis	U, W/m <sup>2</sup> K	SHGC
TP1	strukturalna fasada	2	0.75
TP2	Low-E prozori	2	0.20
TP3	ostali prozori	4	0.55

Zgrada je kompaktna, ukupne korisne površine oko 1630 m<sup>2</sup>. Po dužoj osi, zgrada je u vertikalnom preseku konstruktivno i funkcionalno podeljena na dva dela (slika 4.3. i 4.4), dok je po visini u jednom delu podeljena na dve etaže. Veći deo objekta (otprilike polovina zapremine) čini proizvodna hala u kojoj se odvija proizvodni proces (mašinska obrada, sklapanje, ispitivanje). Na spratu dela zgrade se nalaze proizvodni pogon elektronike (crvena linija na slici 4.4) i kancelarije (plava linija na slici 4.4). U prizemlju objekta se nalaze ostale proizvodne (prostorija za mašinsku obradu odlivaka, prostorija montaže izmenjivača toplote, prostorija montaže elektroormana, laboratorija), magacinske (magacin repromaterijala i magacin gotovih proizvoda) i zajedničke prostorije (trpezarija, kuhinja, garderobe, toaleti).



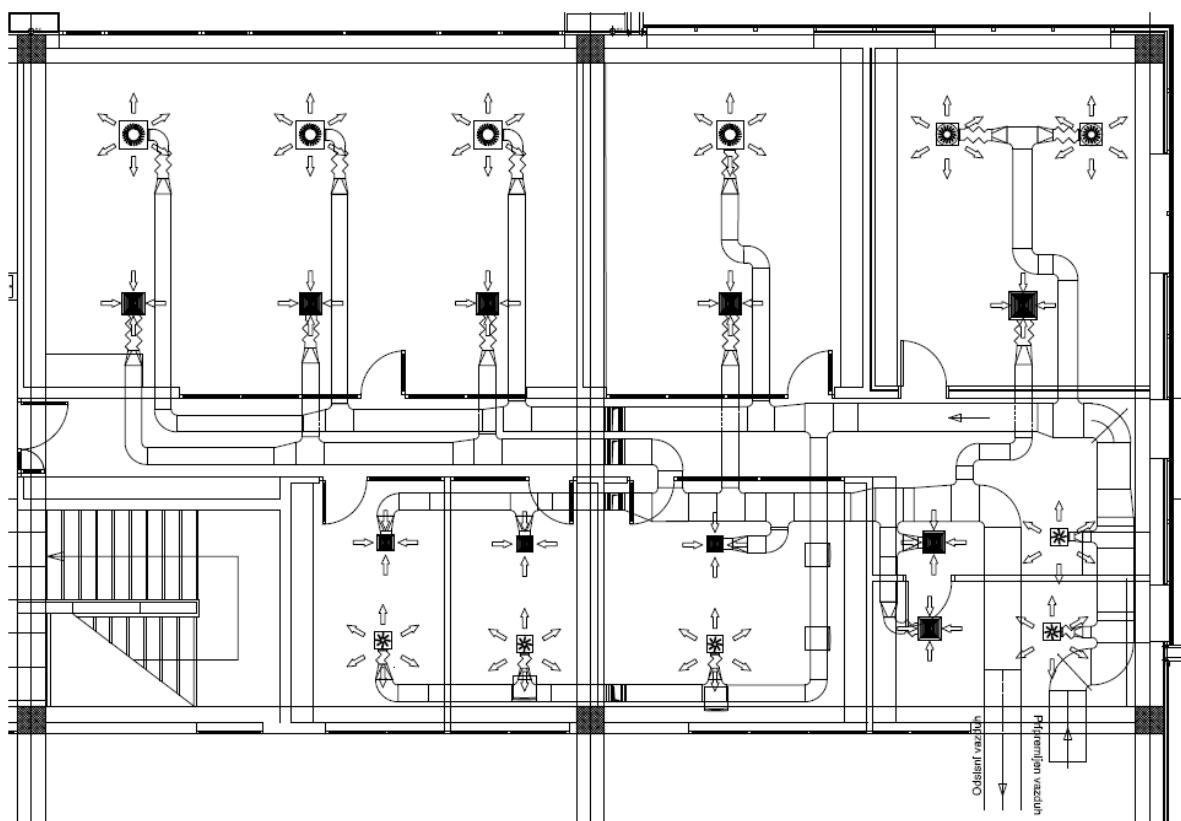
**Slika 4.3.** Osnova prizemlja FBB zgrade (1-Vetrobran, 2-Hodnik prizemlja, 3-Trpezarija, 4-Čajna kuhinja, 5-Garderobe i toaleti, 6-Mašinska sala, 7-Montaža elektroormana, 8-Montaža izmenjivača toplote, 9-Radionica, 10-Laboratorija, 11-Hodnik proizvodnje, 12-Magacin repromaterijala, 13-Magacin gotovih proizvoda, 14-Kancelarija poslovođe, 15-Servis, 16-Proizvodna hala)



**Slika 4.4.** Osnova sprata FBB zgrade (17-Pogon elektronike, 18-Kancelarija direktora, 19-Kancelarija 4, 20-Kancelarija 5, 21-Hodnik galerije/prijem stranaka, 22-Kancelarija 1, 23-Kancelarija 2, 24-Kancelarija 3, 25-Računovodstvo)

Većina prostorija u FBB zgradi se greje preko toplovodnog sistema centralnog grejanja nominalnog temperaturnog režima 65/45°C. Grejanje proizvodne hale i radionice u prizemlju objekta se vrši toplovodnim kaloriferima, dok se ostale prostorije greju panelnim, člankastim i cevnim grejnim telima opremljenim termoregulacionim ventilima čime je omogućena lokalna regulacija. Unutrašnje projektne temperature, kao i osnovne karakteristike ugrađenih kalorifera i grejnih tela navedene su u tabeli 4.8.

Pored sistema centralnog grejanja, u delu kancelarijskog prostora FBB zgrade isprojektovan je i izveden centralni jednokanalni sistem klimatizacije sa konstantnim protokom (slika 4.5), koji je osnovni sistem hlađenja kancelarijskog prostora, ali se može koristiti i za zagrevanje istog. Protoci vazduha koji se dovode u odgovarajuće prostorije, kao i broj i karakteristike distributivnih elemenata dat je u tabeli 4.9. Klima komora se sastoji od filtera, pločastog rekuperatora toplote, sekcije izmenjivača toplote (grejač/hladnjak), ventilatora ubacivanja i prigušivača buke na strani ubacivanja vazduha, odnosno od filterske sekcije, prigušivača buke i ventilatora odsisavanja na strani odsisnog vazduha. Klima komora je nazivnog protoka 3500 m<sup>3</sup>/h, kapacitet rekuperatora toplote i grejača na nominalnim uslovima iznose 29kW (kapacitet rekuperacije u režimu hlađenja je oko 14 kW) i 25 kW respektivno. Ventilatori klima komore su opremljeni frekventnim regulatorima, tako da se po potrebi može menjati protok vazduha u sistemu klimatizacije.



*Slika 4.5. Dispozicija kanalske mreže u kancelarijskom delu FBB zgrade*

**Tabela 4.8.** Unutrašnje projektne temperature u pojedinim prostorijama i karakteristike ugrađene opreme

Naziv prostorije	$t_U$ °C	Tip grejanja	Oznaka	Broj	$Q_{nom}$ (90/70/20°C) W	$Q_{65/45°C}$ W
Proizvodna hala	18	kalorifer	TLHK40	5	11600	–
Servis	20	panelni radijator	T22-300/1000	1	1244	606
Poslovođa	20	panelni radijator	T22-600/600	1	1328	647
Hodnik prizemlja	18	člankasti radijator	O 5x1600/60	2	1249	655
Vetrobran	18	člankasti radijator	O 5x1600/60	1	1249	655
Magacin repromaterijala	16	panelni radijator	T22-600/1000	1	2214	1247
Laboratorija	20	panelni radijator	T22-600/1800	1	3985	1942
Radionica	18	kalorifer	TLHK25	1	9660	–
Montaža IT	18	panelni radijator	T22-600/1600	2	3542	1860
Montaža EO	20	panelni radijator	T22-600/1000	1	2214	1079
Garderobe i toaleti	22	panelni radijator	T22-600/1400	1	3100	1511
		cevni registar	CLC-1315/800	1	950	463
		cevni registar	CLC-1315/500	1	650	293
Trpezarija	20	panelni radijator	T22-600/600	2	1328	623
		ventilator-konvektor	FC/FWD-06	1	7320	
Pogon elektronike	20	panelni radijator	T22-600/1200	4	2657	1295
		panelni radijator	T22-600/1400	2	3100	1511
Hodnik galerije	22	panelni radijator	T33-600/800	1	2242	1010
Računovdstvo	22	panelni radijator	T22-600/600	1	1328	599
Direktor	22	panelni radijator	T22-600/1400	2	3100	1397
Kancelarija4	22	panelni radijator	T22-600/1200	1	2657	1197
Kancelarija5	22	panelni radijator	T22-600/1200	2	2657	1197

**Tabela 4.9.** Protoci vazduha po pojedinačnim zonama, broj i karakteristike distributivnih elemenata

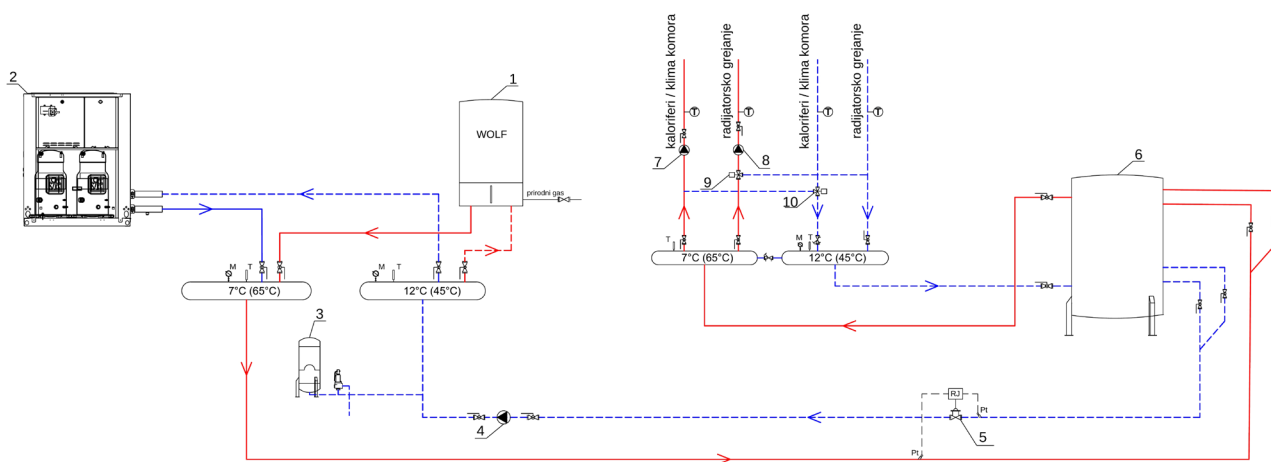
Naziv prostorije	Tip distributivnog elementa	Broj	Projektni protok vazduha po elementu m <sup>3</sup> /h
Hodnik galerije	vertložni difuzor	1	200
Računovdstvo	vertložni difuzor	1	250
Direktor	vertložni difuzor	2	350
Kancelarija1	kvadratni anemostat	1	250
Kancelarija2	kvadratni anemostat	1	250
Kancelarija3	kvadratni anemostat	1	250
Kancelarija4	vertložni difuzor	1	400
Kancelarija5	vertložni difuzor	3	400

Energija potrebna za zagrevanje FBB zgrade se dobija iz visokoefikasnog gasnog kondenzacionog kotla nominalnog kapaciteta 98 kW za usvojeni temperaturski režim sistema grejanja, smeštenog u pomoćnoj zgradi.

Energija potrebna za hlađenje se dobija iz rashladne mašine tipa vazduh-voda, temperaturskog režima 7/12°C, pri čemu se hladnom vodom pored klima komore snabdevaju i kaloriferi instalirani u proizvodnoj hali i radionici za mašinsku obradu. Rashladna mašina je smeštena pored pomoćne zgrade.

Razvod tople i hladne vode vrši se u toplotnoj podstanici, pri čemu se predaja toplote između primarnog i sekundarnog kruga vrši preko hidraulične spojnice. Hidraulična šema snabdevanja objekta toplotnom energijom prikazana je na slici 4.6.

Isporučena energija se meri ultrazvučnim merilom utroška toplotne energije. Pored centralnog merila isporučene energije, ugrađeno je i dodatno merilo utroška toplotne energije za klima komoru. Oba merila mogu da registruju pored isporučene energije za grejanje i isporučenu energiju za hlađenje.

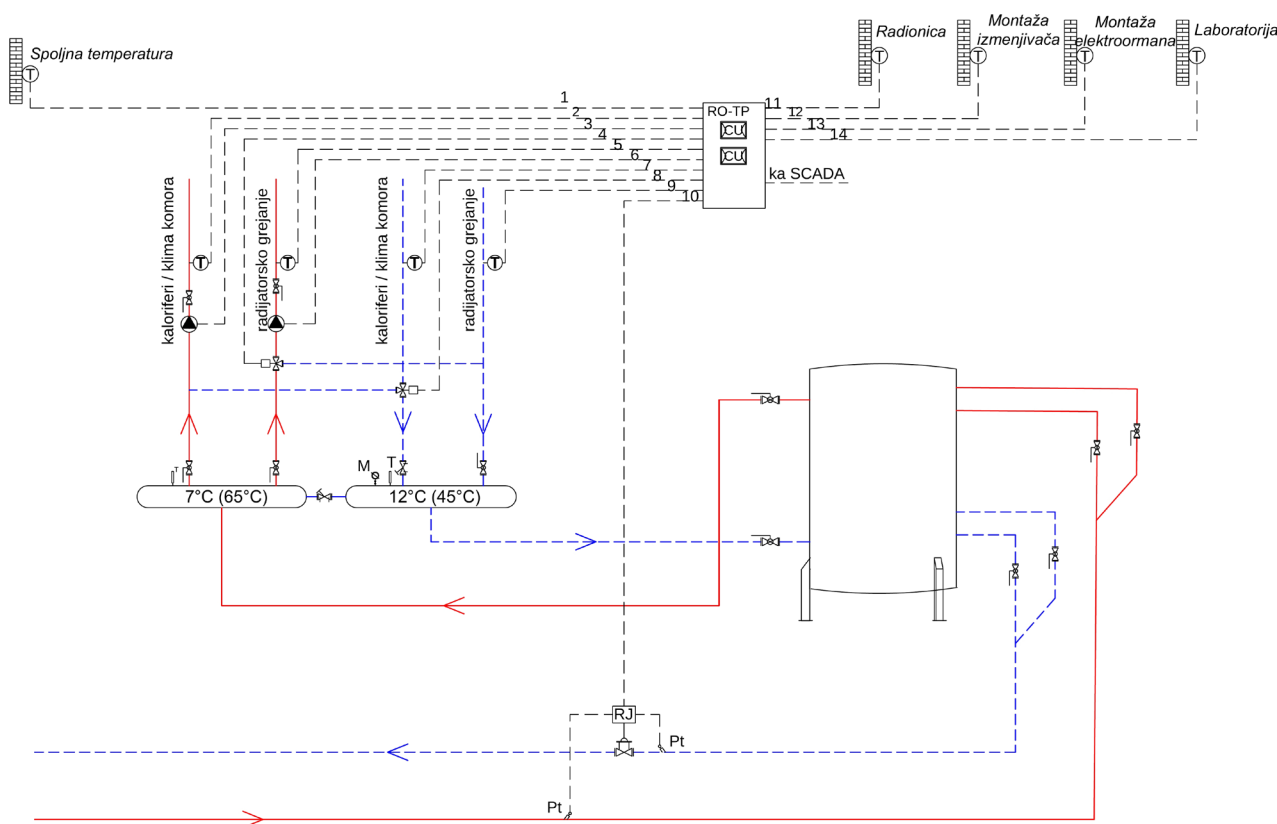


**Slika 4.6.** Hidraulična šema snabdevanja toplotnom energijom FBB zgrade (1-Gasni kondenzacioni kotao, 2-Rashladna mašina, 3-Ekspanziona posuda, 4-Cirkulaciona pumpa primarnog kruga, 5-Ultrazvučno merilo utroška toplotne energije, 6-Hidraulična spojnica, 7-Cirkulaciona pumpa kaloriferskog sistema, 8-Cirkulaciona pumpa radijatorskog grejanja, 9-Trokraki regulacioni ventil, 10-Trokraki regulacioni ventil)

U FBB zgradi je implementiran centralni sistem daljinskog nadzora i upravljanja radom opisanih termotehničkih sistema (SCADA sopstvene proizvodnje). SCADA sistem upravlja nizom lokalnih kontrolera koji upravljaju radom pojedinačnih sistema, pri čemu su pojedini kontroleri prošireni da mogu da prihvate još nekoliko merenja, pre svega unutrašnje temperature i relativne vlažnosti iz prostorija za potrebe kalibracije modela. Kontroler koji se nalazi u toplotnoj podstanici reguliše temperaturu napojne vode u f-ji spoljne temperature (regulacija u 4 tačke) upravljajući radom trokrakih regulacionog ventila, pri čemu postoji mogućnost korekcije sračunatih vrednosti u

zavisnosti od doba dana (redukcija ili intenziviranje isporuke toplotne energije). Sa ovog kontrolera se SCADA sistemu prosleđuju sledeći parametri (slika 4.7):

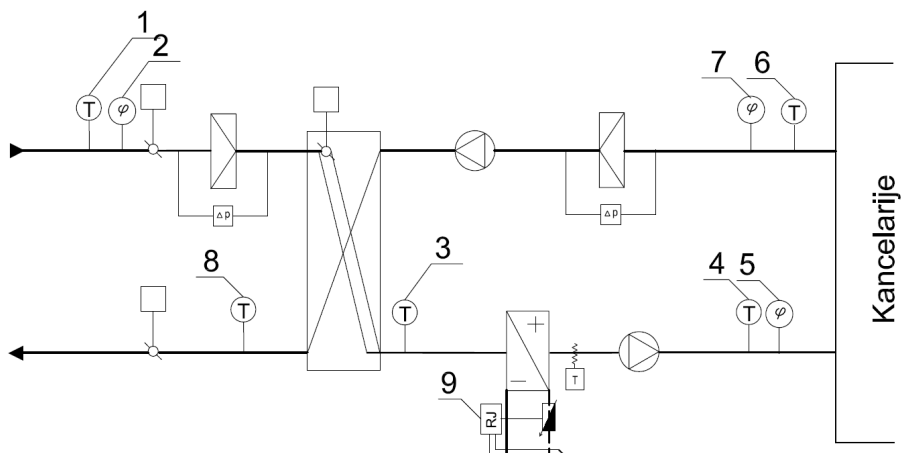
- temperatura spoljašnjeg vazduha (signal 1),
- temperature napojne vode kaloriferskog i radijatorskog kruga (signali 2 i 5),
- temperatura povratne vode kaloriferskog i radijatorskog kruga (signali 7 i 9),
- temperature vazduha u prostorijama: *Radionica, Montaža elektroormana, Montaža izmenjivača, Laboratorija* (signali 11-14),
- podaci sa ultrazvučnog merila utroška toplotne energije (trenutno angažovana toplotna snaga, protok i kumulativno utrošena energija) (signal 10),
- statusi cirkulacionih pumpi (signali 3 i 6), regulacionih ventila (signali 4 i 8).



**Slika 4.7.** Signali i statusi kontrolera u podstanici FBB zgrade

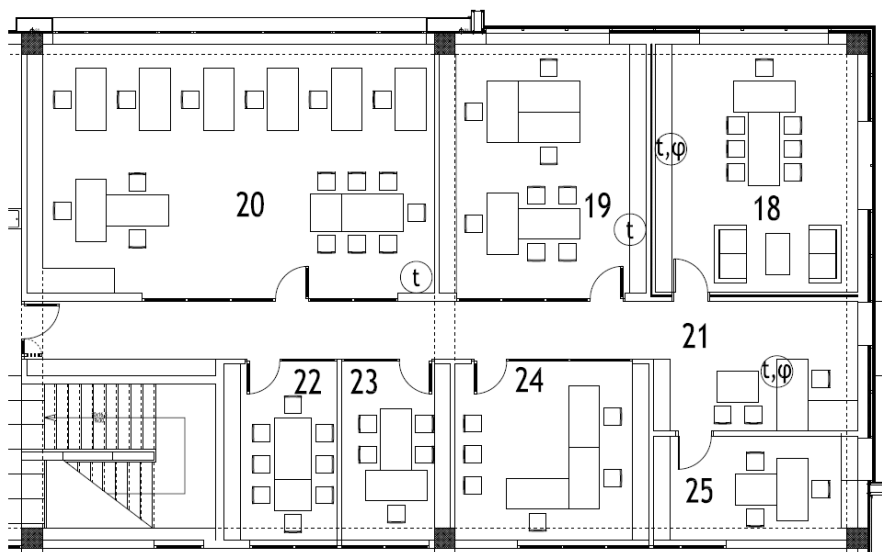
Posebним kontrolerom se upravlja i radom klima komore odnosno vrši se regulacija temperature pripremljenog vazduha promenom protoka kroz izmenjivač klima komore, na osnovu izmerene temperature odsisnog vazduha iz prostorije. Ovim kontrolerom omogućeno je da se podese vreme startovanja i zaustavljanja sistema u karakterističnim danima, da se vrši promena broja obrtaja ventilatora klima komore u cilju promene protoka, da se menja zadata temperatura pripremljenog vazduha itd. Pored veličina bitnih za regulaciju (spoljna temperatura i relativna vlažnost vazduha, temperature i relativne vlažnosti na ubacivanju odnosno odsisavanju), na ovom kontroleru se mere i vrednosti koje se ne koriste u regulaciji, ali su od koristi za kalibraciju simulacionog modela:

temperatura iza rekuperatora na putanji svežeg vazduha i temperatura vazduha na izbacivanju (nakon rekuperacije toplote iz odsisnog vazduha, trenutna toplotna snaga grejača i kumulativno isporučena energija grejaču klima komore), što je prikazano na slici 4.9.



**Slika 4.8.** Merenja na klima komori (1-temperatura svežeg vazduha, 2-relativna vlažnost svežeg vazduha, 3-temperatura svežeg vazduha nakon rekuperacije, 4-temperatura pripremljenog vazduha, 5-relativna vlažnost pripremljenog vazduha, 6-temperatura vazduha na odsisavanju iz prostorija, 7-relativna vlažnost vazduha na odsisavanju iz prostorija, 8-temperatura otpadnog vazduha, 9-temperature napojne i povratne vode izmenjivačke sekcije, trenutni protok vode, angažovana snaga i kumulativno potrošena energija)

Za potrebe kalibracije modela u FBB zgradi je instaliran još jedan kontroler na kome su akvizirane temperatura i relativna vlažnost spoljašnjeg vazduha kao i unutrašnje temperature u prostoriji: pogon elektronike (dva senzora). Merenja temperature i relativne vlažnosti u pojedinim prostorijama administrativnog dela zgrade (slika 4.9) su vršena odgovarajućim logerima temperature i relativne vlažnosti.



**Slika 4.9.** Dodatna merenja unutrašnjih temperatura za potrebe kalibracije modela



Pored sistema KGH bitan uticaj na energetske performanse zgrade imaju i unutrašnji izvori toplote: od ljudi, od sistema osvetljenja i od unutrašnjih aparata i uređaja. Karakteristike sistema osvetljenje su navedene u tabeli 4.10.

**Tabela 4.10.** Instalirana snaga sistema osvetljenja po prostorijama FBB zgrade

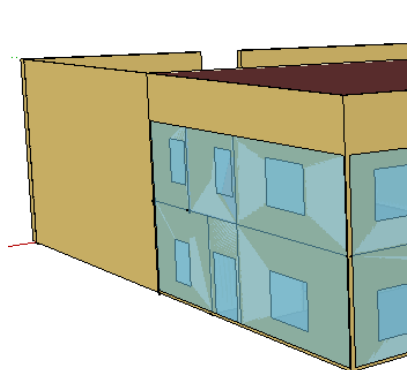
Naziv prostorije	Tip svetiljke	Instalirana snaga [W]
Proizvodna hala	Fuorescentna cev	11600
Servis	Fuorescentna cev	144
Poslovođa	Fuorescentna cev	144
Magacin gotove robe	Fuorescentna cev	144
Hodnik prizemlje	Fuorescentna cev/ Kompaktna CFL	216/504
Magacin repromaterijala	Fuorescentna cev	360
WC u proizvodnji	Kompaktna CFL	26
Hodnik proizvodnje	Kompaktna CFL	52
Laboratorija	Fuorescentna cev	432
Radionica	Fuorescentna cev	696
Montaža izmenjivača	Fuorescentna cev	576
Montaža elektroormana	Fuorescentna cev	432
Garderoba i toaleti	Fuorescentna cev/ Kompaktna CFL	318/ 780
Čajna kuhinja	Kompaktna CFL	260
Trpezarija	Fuorescentna cev	216
Pogon elektronike	Fuorescentna cev	1508
Hodnik galerije	Fuorescentna cev	324
Kancelarija 1	Fuorescentna cev	144
Kancelarija 2	Fuorescentna cev	144
Kancelarija 3	Fuorescentna cev	288
Računovodstvo	Fuorescentna cev	144
Direktor	Fuorescentna cev	144
Kancelarija 4	Fuorescentna cev	288
Kancelarija 5	Fuorescentna cev	576

## 4.2. Kalibracija simulacionog modela

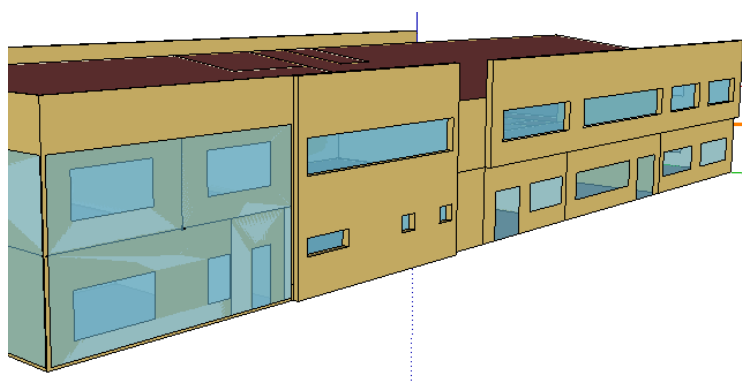
Kako je u pitanju postojeća zgrada, simulacije sa podacima koji se nalaze u tehničkoj dokumentaciji i tipičnom meteorološkom godinom ne garantuju tačnost predikcija, pa je izvršena kalibracija modela zgrade. Primenjen je postupak opisan u poglavlju 3.2, pri čemu su navedeni samo osnovni koraci u postupku dobijanja kalibrisanog modela koje se može koristiti za dalje analize. Kalibracija modela je izvršena za period od 19.12.2016. godine do 20.03.2017. godine.

### 4.2.1. Kreiranje inicijalnog modela realne zgrade

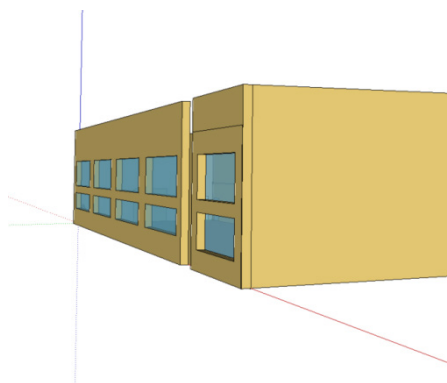
Na osnovu raspoložive tehničke dokumentacije (tabele 4.1. do 4.10) i višestrukim snimanjima postojećeg stana kreiran je inicijalni model FBB zgrade. Geometrijsko modeliranje je realizovano u Google SketchUp-u korišćenjem OpenStudio Plugin-a koji omogućava prevođenje nacrtanih geometrijskih oblika u odgovarajuće toplotne zone modela, i definisanje graničnih uslova na omotaču modela (za spoljne zidove). Kreirani geometrijski model FBB zgrade prikazan je na slici 4.10. Prilikom kreiranja geometrije modela zoniranje je izvršeno tako da svaki jedinstven prostor u FBB zgradi predstavlja posebnu zonu modela (slika 4.11). Korišćena je preporuka pri modeliranju zgrada da se spoljni zidovi zone modeliraju na spoljne dimenzije, dok se unutrašnje pregrade modeliraju na polovini debljine pregrade. Na ovaj način uzeta je u obzir i razmena toplote između susednih zona. Unos svih ostalih prikupljenih podataka je vršen direktno u ulaznoj datoteci EnergyPlus-a.



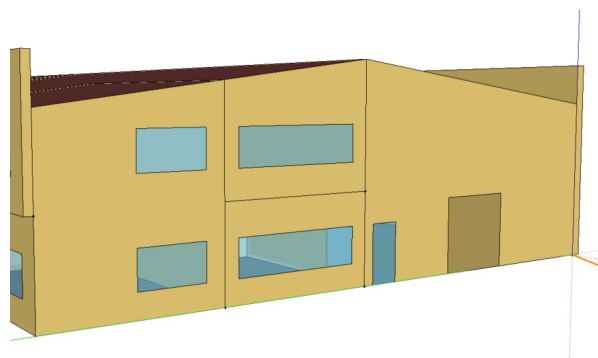
(a) Jugoistočna fasada modela



(b) Severoistočna fasada modela

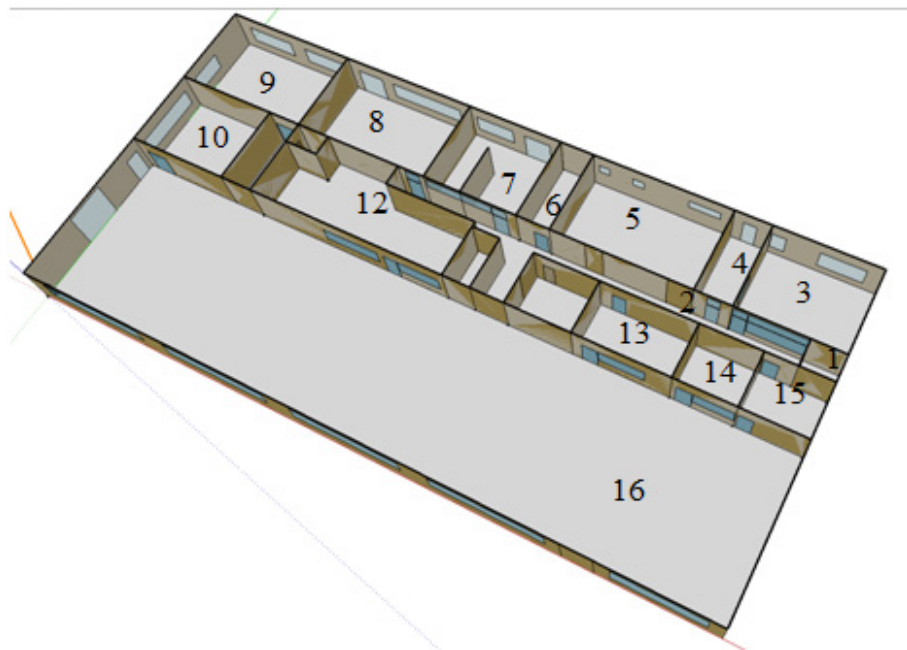


(c) Jugozapadna fasada modela

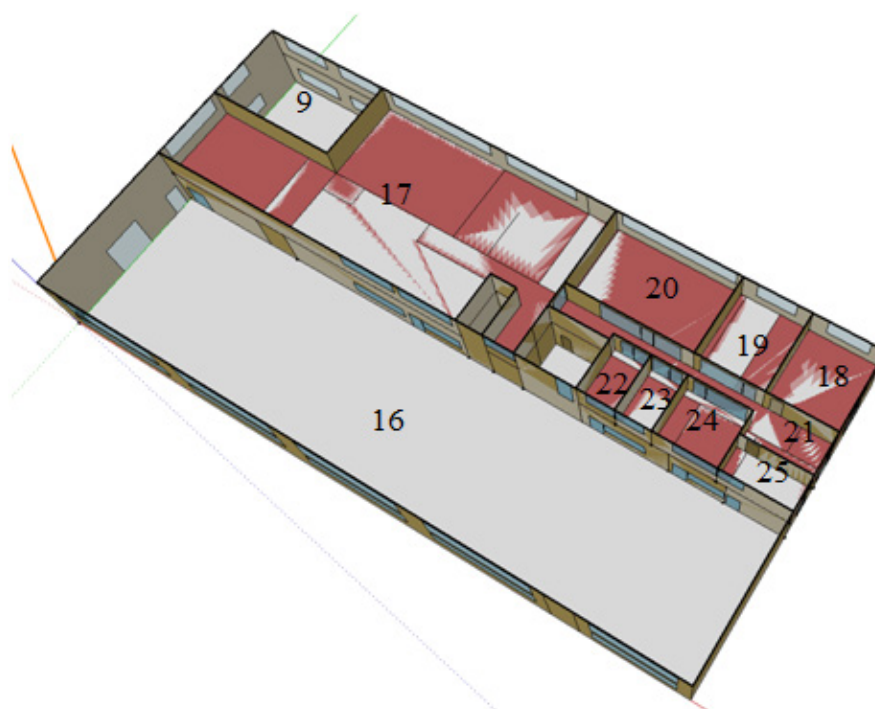


(d) Severozapadna fasada modela

**Slika 4.10.** Izgled fasada u modelu



(a)



(b)

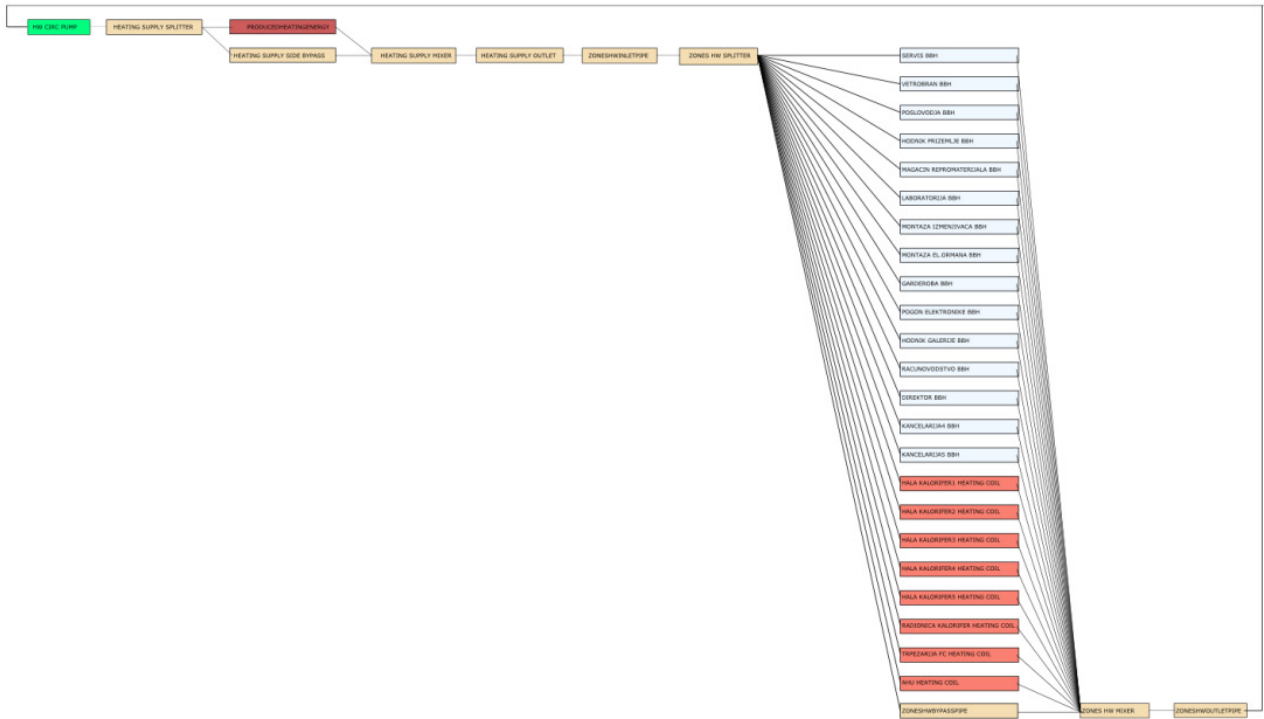
**Slika 4.11.** Zone modela u prizemlju (a) i spratu (b)- numeracija prostorija kao na sl. 4.3 i 4.4

Pored razmene toplote transmisijom, toplotni bilans zone obuhvata i infiltraciju spoljašnjeg vazduha. Kako na zgradi nisu vršena merenja nepropusnosti omotača, u inicijalnom modelu je pretpostavljeno da je infiltracija vazduha u zonu konstantna (tabela 4.11), pri čemu su uzete u obzir tehničke karakteristike zaptivenosti ugrađenih transparentnih delova omotača.

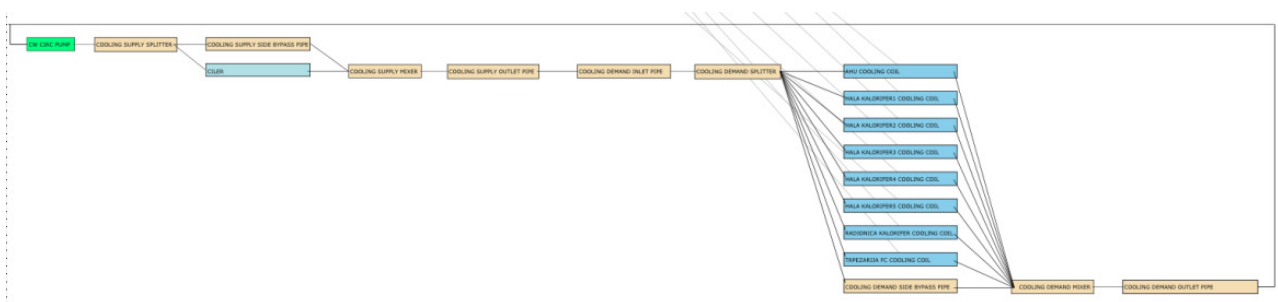
**Tabela 4.11.** Broj izmena vazduha usled infiltracije  $n_{inf}$  u inicijalnom modelu

Naziv prostorije/termičke zone	$n_{inf}$ [1/h]
Proizvodna hala	0.2
Servis	0.2
Vetrobran	0.3
Laboratorija	0.2
Radionica	0.2
Montaža izmenjivača toplote	0.2
Montaža elektroormana	0.2
Garderoba	0.1
Trpezarija	0.1
Pogon elektronike	0.1
Hodnik galerije	0.1
Kancelarija4	0.1
Kancelarija5	0.1
Računovodstvo	0.1
Direktor	0.3

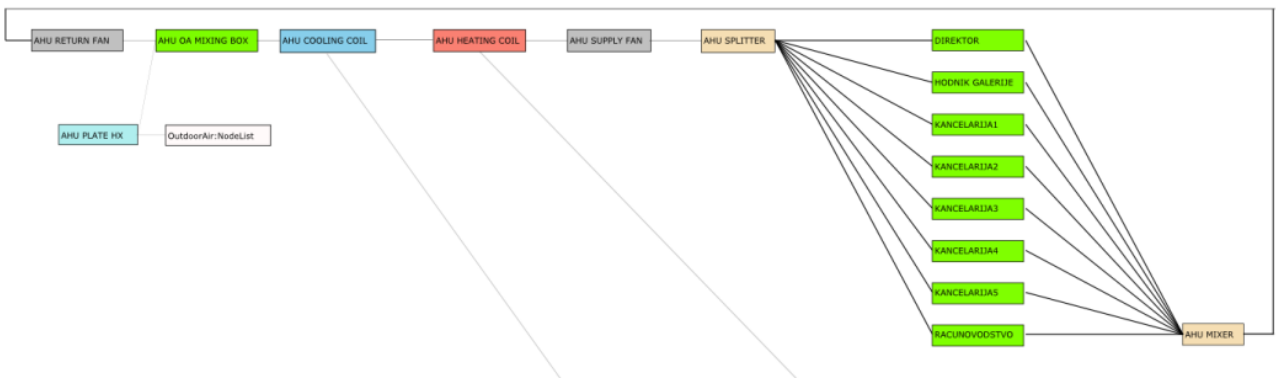
Opisani sistemi grejanja i klimatizacije koji su izvedeni u zgradi, sa svim neophodnim komponentama sistema (cirkulacione pumpe, ventilatori, ventili sa termostatom regulacijom) modelirani su poštujući ograničenja i mogućnosti EnergyPlus-a, a koja se prevashodno odnose na broj komponentata istog tipa u zoni (može se u zoni modelirati jedan radijator, jedan distributivni element, jedna cirkulaciona pumpa po grani, jedan razdelnik i jedan sabirnik u cirkulacionom krugu sistema grejanja, nepostojanje gotovih komponentata kao što su ventilator-konvektor i kalorifer i sl.). Ograničenja alata u pogledu broja elementa zonske opreme istog tipa su prevaziđena tako što su u zonama koje imaju više grejnih tela (tabela 4.8) ili više distributivnih elemenata (tabela 4.9) modelirani po jedna superponirana komponenta istog tipa (kapacitet jednog radijatora u modelu odgovara zbiru kapaciteta svih radijatora, protok vazduha u modelu odgovara zbiru protoka pojedinačnih distributivnih elemenata u zoni). Kaloriferi, ventilator konvektori i klima komora su modelirani nadovezujući pojedinačne komponente u smeru strujanja vazduha, po komponenti. Šematski prikaz svih sistema u modelu prikazan je na slikama 4.12–4.15. Osnovne karakteristike elemenata kalorifera i klima komore su prikazane u tabeli 4.12.



*Slika 4.12. Šematski prikaz cirkulacije tople vode u sistemu grejanja*



*Slika 4.13. Šematski prikaz cirkulacije hladne vode u sistemu hlađenja*



*Slika 4.14. Šematski prikaz sistema klimatizacije*



*Slika 4.15. Šematski prikaz kalorifera i ventilator konvektora*

**Tabela 4.12.** Karakteristike kalorifera i klima komore u inicijalnom modelu

Termička zona/komponenta	Karakteristike izmenjivača (nominalni kapacitet i referentni uslovi)	Protok vazduha (maksimalni/minimalni)	Element3/rekuperator	Raspoloživost
Radionica/kalorifer	8100W voda 60/40°C vazduh 20/38°C	1350 / 1050	–	07:00 - 22:00
Proizvodna hala				07:00 - 22:00
kalorifer1	12900W voda 60/40°C vazduh 20/39°C	2150/1600	–	07:00 - 22:00
kalorifer2	12900W voda 60/40°C vazduh 20/39°C	2150/1600	–	07:00 - 22:00
kalorifer3	12900W voda 60/40°C vazduh 20/39°C	2150/1600	–	07:00 - 22:00
kalorifer4	12900W voda 60/40°C vazduh 20/39°C	2150/1600	–	07:00 - 22:00
kalorifer5	12900W voda 60/40°C vazduh 20/39°C	2150/1600	–	07:00 - 22:00
Klima komora	25000W voda 65/45°C vazduh 16.6/32.2°C	4300/1750	4300 <sup>1</sup> /0.8 <sup>2</sup> /0.5 <sup>3</sup>	08:00 - 16:00

<sup>1</sup> maksimalni protok vazduha kroz pločasti rekuperator u m<sup>3</sup>/h

<sup>2</sup> efikasnost razmene osetne toplote pri 100% protoka

<sup>3</sup> efikasnost razmene latentne toplote pri 100% protoka

Sistem centralne regulacije sistema grejanja je modeliran pomoću Erl programskog jezika koji se poziva pre početka svakog vremenskog koraka (*Begin Timestep Before Predictor*):

```

EnergyManagementSystem:Subroutine,
WeekdaySupplyTempControl,!- Name
SET F1 = 1,
SET F2 = 1,
SET F3 = 1,
SET F4 = 1,
IF CurrentTime<=5.00 || CurrentTime>=22.50,
  IF Tout <= (0-15.0),
    SET ControlValve_1 = 70*F1,
  ELSEIF Tout <= (0-5.0),
    SET ControlValve_1 = ((0-1.5)*Tout+47.5)*F1,
  ELSEIF Tout <= 5.0,
    SET ControlValve_1 = ((0-0.5)*Tout + 52.5)*F1,
  ELSEIF Tout <= 12,
    SET ControlValve_1 = ((0-(5/7))*Tout + 53+(4/7))*F1,
  ELSE,
    SET ControlValve_1 = 45*F1,
  ENDIF,
ELSEIF CurrentTime<=16.00,
  IF Tout <= (0-15.0),
    SET ControlValve_1 = 70*F2
  ELSEIF Tout <= (0-5.0),
    SET ControlValve_1 = ((0-1.5)*Tout+47.5)*F2,
  ELSEIF Tout <= 5.0,
    SET ControlValve_1 = ((0-0.5)*Tout + 52.5)*F2,
  ELSEIF Tout <= 12,
    SET ControlValve_1 = ((0-(5/7))*Tout + 53+(4/7))*F2,
  ELSE,
    SET ControlValve_1 = 45*F2,
  ENDIF,
ELSEIF CurrentTime<20.50,
  IF Tout <= (0-15.0),
    SET ControlValve_1 = 70*F3,
  ELSEIF Tout <= (0-5.0),
    SET ControlValve_1 = ((0-1.5)*Tout+47.5)*F3,
  ELSEIF Tout <= 5.0,
    SET ControlValve_1 = ((0-0.5)*Tout + 52.5)*F3,
  ELSEIF Tout <= 12,
    SET ControlValve_1 = ((0-(5/7))*Tout + 53+(4/7))*F3,
  ELSE,
    SET ControlValve_1 = 45*F3,
  ENDIF,
ELSE,
  IF Tout <= (0-15.0),
    SET ControlValve_1 = 70*F4,
  ELSEIF Tout <= (0-5.0),
    SET ControlValve_1 = ((0-1.5)*Tout+47.5)*F4,
  ELSEIF Tout <= 5.0,
    SET ControlValve_1 = ((0-0.5)*Tout + 52.5)*F4,
  ELSEIF Tout <= 12,
    SET ControlValve_1 = ((0-(5/7))*Tout + 53+(4/7))*F4,
  ELSE,
    SET ControlValve_1 = 45*F4,
  ENDIF,
ENDIF;

```

gde su:  $F1$ ,  $F2$ ,  $F3$ ,  $F4$  faktori korekcije sračunate temperature polazne vode u određenim periodima radnog dana;  $ControlValve\_1$  - temperatura napojne vode;  $Tout$  - temperatura spoljašnjeg vazduha.

Na sličan način je modeliran i rad klima komore kao i dovođenje i odsisavanje vazduha iz termičkih zona modela:

```

EnergyManagementSystem:Program,
  AirFlowControl,
  IF FFFHist>0,
    SET SupplyFanFlow = FFFHist * MAXSupplyFlow,
    SET ReturnFanFlow = FFFHist * MAXExhaustFlow,
    SET DirCurrentAirSupply = FFFHist * DirektorMaxAir,
    SET RacCurrentAirSupply = FFFHist * RacunMaxAir,
    SET HodCurrentAirSupply = FFFHist * HodnikMaxAir,
    SET Kanc1CurrentAirSupply = FFFHist * Kanc1MaxAir,
    SET Kanc2CurrentAirSupply = FFFHist * Kanc2MaxAir,
    SET Kanc3CurrentAirSupply = FFFHist * Kanc3MaxAir,
    SET Kanc4CurrentAirSupply = FFFHist * Kanc4MaxAir,
    SET Kanc5CurrentAirSupply = FFFHist * Kanc5MaxAir,
  ELSE,
    SET SupplyFanFlow = 0,
    SET ReturnFanFlow = 0,
    SET DirCurrentAirSupply = 0,
    SET RacCurrentAirSupply = 0,
    SET HodCurrentAirSupply = 0,
    SET Kanc1CurrentAirSupply = 0,
    SET Kanc2CurrentAirSupply = 0,
    SET Kanc3CurrentAirSupply = 0,
    SET Kanc4CurrentAirSupply = 0,
    SET Kanc5CurrentAirSupply = 0,
  ENDIF;

```

gde su: *FFFHist* - odnos trenutnog i projektnog protoka klima komore (eksterno se zadaje u vidu rasporeda); *MAXSupplyFlow* - projektni protok vazduha ventilatora ubacivanja; *MAXExhaustFlow* - projektni protok vazduha ventilatora odsisavanja; *SupplyFanFlow*, *ReturnFanFlow* - trenutni protoci ventilatora ubacivanja i odsisavanja; *DirektorMaxAir*, *RacunMaxAir*, *HodnikMaxAir*, *Kanc1MaxAir*, *Kanc2MaxAir*, *Kanc3MaxAir*, *Kanc4MaxAir*, *Kanc5MaxAir* - projektni protoci vazduha na ubacivanju u pojedine zone (tabela 4.9), *DirCurrentAirSupply*, *RacCurrentAirSupply*, *HodCurrentAirSupply*, *Kanc1CurrentAirSupply*, *Kanc2CurrentAirSupply*, *Kanc3CurrentAirSupply*, *Kanc4CurrentAirSupply*, *Kanc5CurrentAirSupply* - trenutni protoci vazduha ka pojedinim termičkim zonama. Kao što se vidi, pretpostavljeno je da se protok vazduha ka pojedinim zonama linearno menja sa promenom protoka vazduha kroz klima komoru.

Pored podataka o instalisanoj snazi unutrašnjeg osvetljenja po pojedinačnim prostorijama (tabela 4.10), za postavljanje toplotnog bilansa vazduha u zoni neophodno je odrediti koji deo instalisane snage se emituje kao vidljiva svetlost (FV), koji deo se konvektivnim putem prenese na vazduh (FC) u zoni, koji deo se zračenjem prenese u prostoriju (FR), a koji deo se eventualno elimiše odsisavanjem vazduha preko svetiljke (RAF). U EnergyPlus-u se konvektivno predata toplota sa svetiljke izračunava na osnovu unetih vrednosti FV, FR i RAF po jednačini:

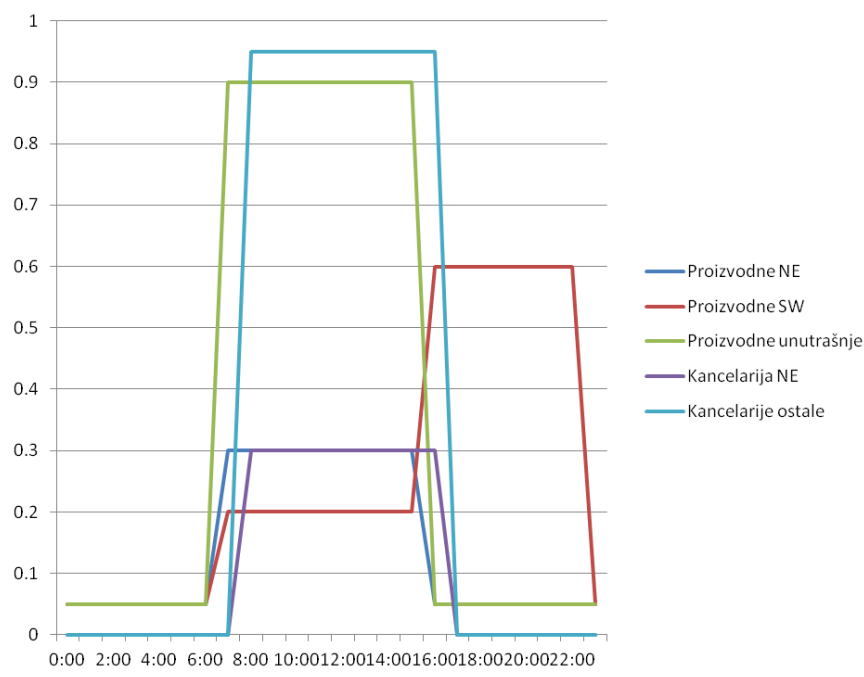
$$FC = 1 - (FV + FR + RAF) \quad (4.1)$$



Pojedinačni udeli gore navedenih elemenata energetskog bilansa svetiljke zavise od toga da li je svetiljka: slobodno-viseća (S), ugrađena na plafonu (SM) ili ukopana (R), pa su u inicijalnom modelu unete karakteristike sistema osvetljenja navedene u tabeli 4.13, uz odgovarajuće rasporede korišćenja prikazane na slici 4.16. pri čemu je izvršeno grupisanje prostorija po vrsti i nameni, kao i prema orijentaciji prostorija (uticaj dnevnog osvetljenja).

**Tabela 4.13.** Karakteristike sistema osvetljenja u inicijalnom modelu

Prostorija/termička zona u modelu	Tip svetiljke	Instalisana snaga [W]	Način ugradnje	RAF	FR	FV
Proizvodna hala	Fuorescentna cev	11600	S	0	0.42	0.18
Servis	Fuorescentna cev	144	SM	0	0.72	0.18
Poslovođa	Fuorescentna cev	144	SM	0	0.72	0.18
Magacin gotove robe	Fuorescentna cev	144	SM	0	0.72	0.18
Hodnik prizemlje	Fuorescentna cev/ Kompaktna CFL	216/ 504	R	0	0.37	0.18
Magacin repromaterijala	Fuorescentna cev	360	SM	0	0.72	0.18
WC u proizvodnji	Kompaktna CFL	26	R	0	0.37	0.18
Hodnik proizvodnje	Kompaktna CFL	52	R	0	0.37	0.18
Laboratorija	Fuorescentna cev	432	SM	0	0.72	0.18
Radionica	Fuorescentna cev	696	S	0	0.42	0.18
Montaža izmenjivača	Fuorescentna cev	576	SM	0	0.72	0.18
Montaža elektroormana	Fuorescentna cev	432	SM	0	0.72	0.18
Garderoba i toaleti	Fuorescentna cev/ Kompaktna CFL	318/ 780	R	0	0.37	0.18
Čajna kuhinja	Kompaktna CFL	260	R	0	0.37	0.18
Trpezarija	Fuorescentna cev	216	SM	0	0.72	0.18
Pogon elektronike	Fuorescentna cev	1508	S	0	0.42	0.18
Hodnik galerije	Fuorescentna cev	324	R	0	0.37	0.18
Kancelarija 1	Fuorescentna cev	144	R	0	0.37	0.18
Kancelarija 2	Fuorescentna cev	144	R	0	0.37	0.18
Kancelarija 3	Fuorescentna cev	288	R	0	0.37	0.18
Računovodstvo	Fuorescentna cev	144	R	0	0.37	0.18
Direktor	Fuorescentna cev	144	R	0	0.37	0.18
Kancelarija 4	Fuorescentna cev	288	R	0	0.37	0.18
Kancelarija 5	Fuorescentna cev	576	R	0	0.37	0.18



**Slika 4.16.** Profil korišćenje sistema osvetljenja po pojedinim delovima objekta

Sličan pristup je primenjen i za određivanje kapaciteta i profila korišćenja unutrašnjih aparata i uređaja u kancelarijskom prostoru (merenjem je utvrđen broj i kapacitet pojedinih uređaja po zonama, a profili korišćenja su definisani u razgovorima sa prisutnima).

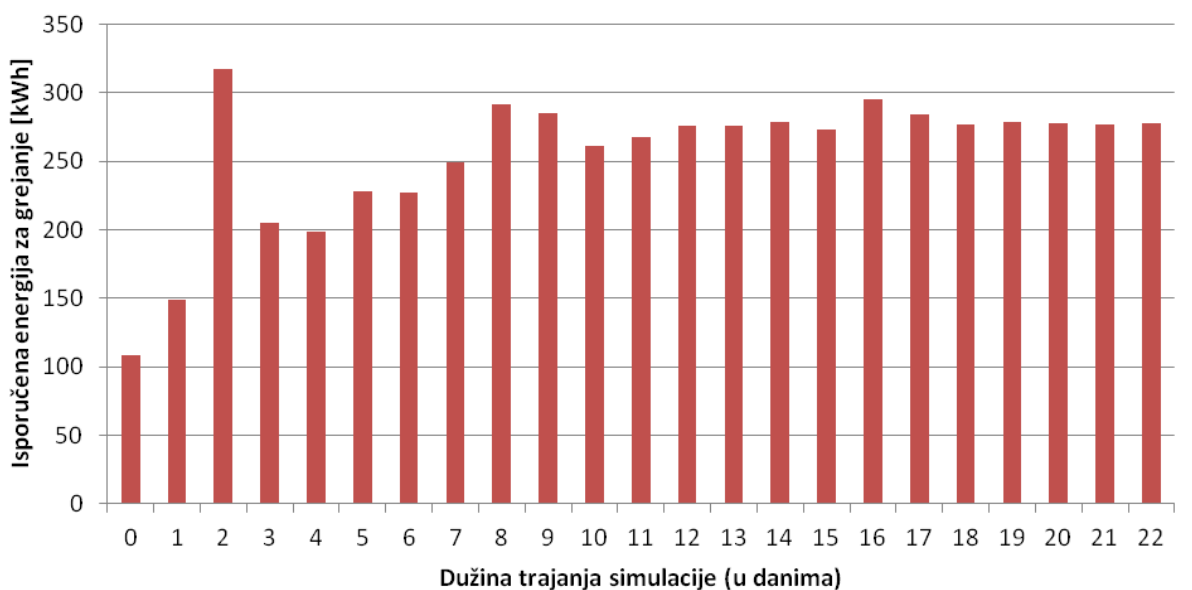
Broj ljudi po pojedinim prostorijama, odata toplota po čoveku i stepen odevenosti su prikazane u tabeli 4.14. Radnim danima su proizvodne prostorije zauzete u periodu 07:30–22:30, dok su kancelarije na spratu i pogon elektronike zauzete u periodu 08:00–16:00. Vikendom po pravilu nema ljudi u zgradi. Profili zauzetosti, iako delimično grubi, dobro odslikavaju realnost.

**Tabela 4.14.** Podaci inicijalnog modela koji se odnose na ljude

Naziv prostorije/termičke zone	Broj ljudi	Odata toplota [W/č]	Stepen odevenosti zima/leto [clo]
Proizvodna hala	9	130	1/0.5
Servis	1	130	–
Poslovođa	1	130	–
Laboratorija	2	130	–
Radionica	3	130	–
Montaža izmenjivača	2	130	–
Montaža elektroromana	2	130	–
Pogon elektronike	4	70	–
Hodnik galerije	2	70	1/0.5
Kancelarija 3	2	70	1/0.5
Kancelarija 4	4	70	1/0.5
Kancelarija 5	3	70	1/0.5
Direktor	1	70	1/0.5
Računovodstvo	2	70	1/0.5

## 4.2.2. Termička istorija modela

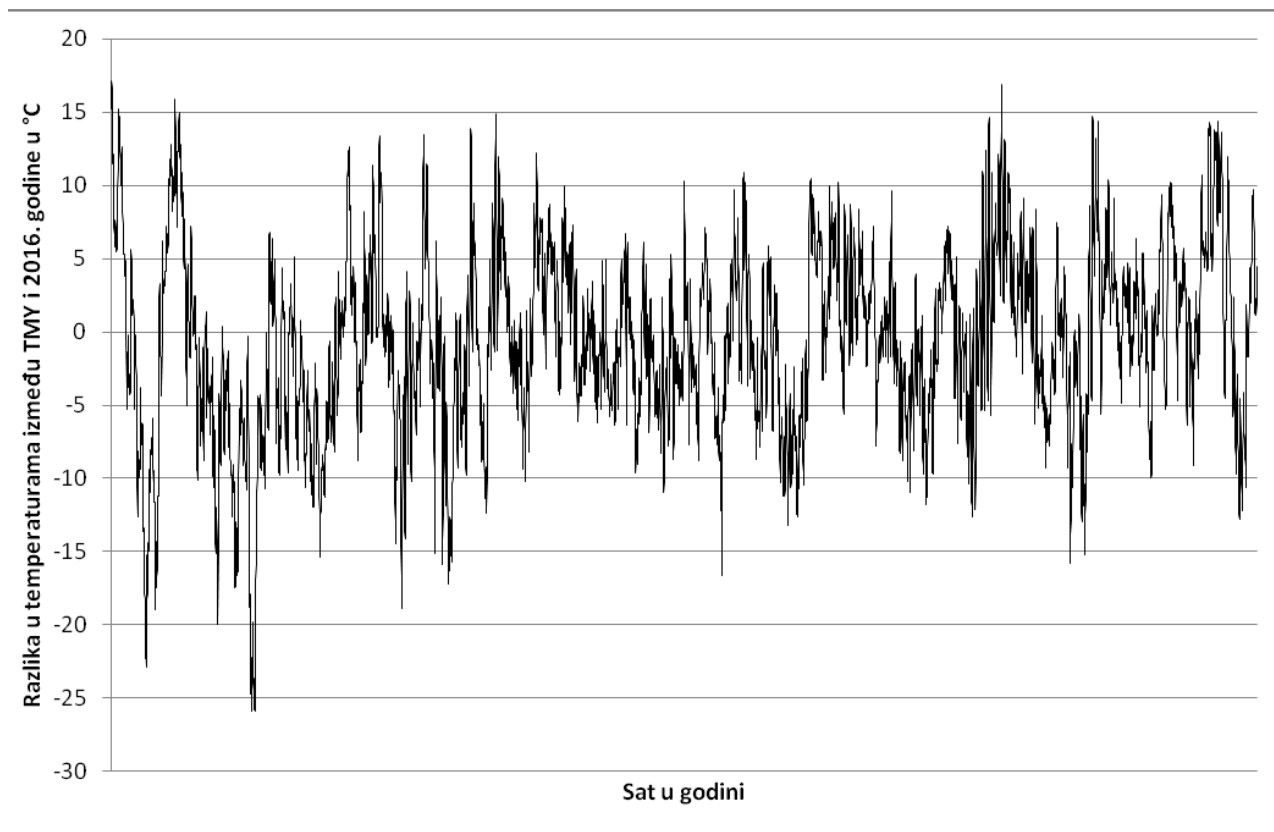
Termička istorija modela zgrade je određena kreiranjem numeričkog eksperimenta definisanog u poglavlju 3.1.3. za 06. februar. Identičan model zgrade (sa svim radnim parametrima sistema identičnim) se simulira sa različitim periodima simulacije koje sve završavaju 06. februara, a počinju od tog dana (termička istorija modela iznosi 0 dana), do 22 dana ranije (na slici 4.17. to je 15. januar). Sa slike je uočljivo da termička istorija ne bi trebalo da bude kraća od 18 dana, pa je za ovo istraživanje usvojena termička istorija u trajanju od 21 dan.



*Slika 4.17. Termička istorija modela FBB zgrade*

## 4.2.3. Kalibracija modela razvijenim optimizacionim algoritmom

Za kalibraciju modela kreirana je aktuelna meteorološka godina (poglavlje 3.2.1) podacima dostavljenim od strane RHMZ, na osnovu preporuka da se mogu koristiti podaci iz zvaničnih meteoroloških stanica koje su vazdušnom linijom udaljene do 10km od lokacije zgrade bez izrazitih razlika u nadmorskoj visini. Oba ova uslova su zadovoljena za posmatranu zgradu (vazдушna udaljenost od meteorološke opservatorije Niš je manja od 9km). Neophodnost kreiranja aktuelne meteorološke godine je ilustrovana na slici 4.18. na kojoj su predstavljene razlike temperatura spoljašnjeg vazduha iz tipične meteorološke godine za Niš i podataka dostavljenim od strane RHMZ u 2016. godini.



**Slika 4.18.** Razlike u temperaturi spoljašnjeg vazduha iz tipične meteorološke godine i 2016. godine

Svi podaci koji se akviziraju kroz SCADA sistem, uz dodatna merenja temperature i relativne vlažnosti u pojedinim prostorijama (*kancelarija 4, kancelarija 5, hodnik galerije i direktor*) su iskorišćeni u postupku kalibracije. Kako ručni pokušaji kalibracije ovako definisanog detaljnog modela nisu dali zadovoljavajuće rezultate, imajući u vidu raspoloživost velikog broja podataka sa samog objekta usvojen je postupak kalibracije razvijenim softverskim rešenjem za izradu operativnih strategija, pri čemu su za ulazne promenljive u postupku kalibracije usvojene sve veličine koje nisu mogle biti direktno izmerene, dok je funkcija cilja u optimizaciji linearna kombinacija minimalne srednje relativne greške (MBE) i minimalnog koeficijenta varijacije srednje kvadratne greške (CV(RMSE)) svih temperatura, relativnih vlažnosti, toplotne energije za grejanje zgrade i pripremu vazduha u sistemu klimatizacije.

#### *Nezavisno promenljive u optimizaciji*

Nezavisno promenljive su grupisane u zavisnosti od toga da li se odnose na termofizičke karakteristike omotača, karakteristike sistema grejanja ili karakteristike sistema klimatizacije. Ukupno je identifikovano 98 promenljivih imajući u vidu mogućnosti simulacionog alata. To se pre svega odnosi na modeliranje infiltracije vazduha u zonu korigovanjem definisanih konstantnih vrednosti iz tabele 4.11,  $n_{inf}$ , pomoću jednačine:

$$n = n_{inf}[A + B|t_u - t_s| + C \times w + D \times w^2] \quad (4.2)$$

gde su:  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ -konstante (1, 0, 0, 0 u inicijalnom modelu);  $t_u$  i  $t_s$  - unutrašnja i spoljašnja temperatura u proračunskom koraku simulacije;  $w$  - brzina vetra u proračunskom koraku simulacije.

Koeficijenti iz j-ne (4.2) su optimizovani za sledeće termičke zone: *proizvodna hala, laboratorija, radionica, montaža izmenjivača toplote, montaža elektroormana, pogon elektronike, hodnik galerije, kancelarija 4, kancelarija 5, direktor i računovodstvo* što rezultuje u 55 kontinualnih nezavisno promenljivih. Infiltracija iz tabele 4.11,  $n_{inf}$ , je varirana u opsegu 0.1–2.0, dok su koeficijenti  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  varirani u opsegu od 0 do 1.

Koeficijenti toplotne provodljivosti opekarskih blokova, armirano-betonskih elemenata, ferobetona i mikrobetona su varirani u opsegu  $\pm 20\%$  vrednosti navedenih u tabelama 4.1–4.6.

Varirana su i dva svojstva za 5 ugrađenih transparentnih površina (tabela 4.7): koeficijent toplotne provodljivosti ( $\pm 20\%$  nominalne vrednosti) i koeficijent dobitaka toplote od sunčevog zračenja (SHGC) u opsegu  $\pm 0.05$  u odnosu na incijalnu vrednost.

Nominalni kapacitet grejnih tela (tabela 4.8) je variran u granicama  $\pm 100$  W za grejna tela kapaciteta do 2000 W,  $\pm 200$  W za grejna tela kapaciteta do 3500 W,  $\pm 300$  W za ostala grejna tela, izuzev grejnog tela u pogon elektronike čiji je kapacitet variran  $\pm 500$  W.

Ostale nezavisno promenljive su se odnosile na karakteristike cirkulacione pumpe (protok i napor), protok vazduha u sistemu klimatizacije, efikasnost pločastog rekuperatora i distribuciju vazduha u prostorijama koje opslužuje klima komora ( $\pm 10\%$  u odnosu na odnose projektnih protoka pojedinačnih prostorija prema ukupnom protoku).

U softverskom rešenju za izradu operativnih strategija koje je korišćeno za kalibraciju, sve nezavisno promenljive se upisuju u odgovarajuće linije ulazne tekstualne datoteke modela.

#### *Funkcija cilja*

Koristeći opciju modeliranja u EnergyPlus da se pojedine vrednosti ne unose direktno u ulaznu datoteku, već u eksternu \*.csv datoteku, svi podaci prikupljeni merenjima na objektu u kojima su zabeležene dinamičke promene koje su se dešavale, kao i činjenice da se vrednosti iz eksterne datoteke mogu pozivati kao rezultati simulacije, minimizovana je funkcija:

$$f(\mathbf{x}) = 0.75 \times \min(MBE) + 0.25 \times \min(CV(RMSE)) \quad (4.3)$$

gde su:

$\min(MBE)$  – minimalna vrednost od svih izračunatih  $MBE$  po jednačini (2.1) i to za potrošenu energiju u zgradi, temperature i relativne vlažnosti u prostorijama u kojima postoje merenja, temperaturu i relativnu vlažnost pripremljenog vazduha, temperaturu i relativnu vlažnost vazduha na odsisavanju iz kancelarija, temperaturu svežeg vazduha nakon rekuperacije, temperaturu otpadnog vazduha nakon rekuperacije, potrošnju toplotne energije za zagrevanje vazduha u sistemu klimatizacije;  $\min(CV(RMSE))$  – minimalna vrednost od svih izračunatih  $CV(RMSE)$  po jednačini (2.2) (iste veličine kao i za  $MBE$ ).

Ovakva linearna kombinacija je usvojena na osnovu preporuka za kalibraciju na časovnom nivou u kojima je  $MBE$  tri puta manji od  $CV(RMSE)$ .

#### *Postavke optimizacionog algoritma*

Broj vektora u jednoj generaciji je definisan na veličinu 1500, broj generacija je definisan na 100, dok zaustavni kriterijum nije bio definisan (ukupno je izvršeno 150000 simulacija za potrebe kalibracije).

### **4.3. Izrada dnevnih operativnih strategija na osnovu kratkoročne vremenske prognoze**

Uz pretpostavku da je vremenska prognoza apsolutno tačna za vremenski period na koji se odnosi, sproveden je postupak izrade dnevnih operativnih strategija sistema koji opslužuju kancelarijski prostor FBB zgrade (prostorije sa oznakama 18–25 na slikama 4.4 i 4.11) na bazi kratkoročne vremenske prognoze izdate od strane RHMZ 05.04.2017. godine u 00:00UTC. Period planiranja se odnosio na 06.04.2017. i 07.04.2017. pri čemu su rezultati strategija implementirani u samoj zgradi (u obliku *offline* optimizacije) prvog dana horizonta. Cilj je dobijanje takvih strategija koje će trošiti najmanje moguće energije poštujući ograničenja postavljena na strani osrednjenog PMV indeksa toplotnog komfora u navedenom delu zgrade. Svaki dan u horizontu planiranja je podeljen na tri dela i to:

- period nekorišćenja je smatran jednim blokom (00:00–8:00 i 16:00–00:00).
- period korišćenja je podeljen na dva bloka: 08:00–12:00, 12:00–16:00.

Horizont izvršavanja je usvojen u trajanju od jednog dana.

Podaci prikupljeni iz SCADA kao i drugim merenjima su do 05.04.2017. godine iskorišćeni za formiranje termičke istorije modela, pri čemu sami sistemi nisu radili 05.04.2017. godine.

### *Nezavisno promenljive u postupku optimizacije*

Za svaki dan horizonta planiranja, u svakom od blokova koji pokrivaju period korišćenja kancelarija na spratu FBB zgrade usvojena je po jedna vrednost sledećih nezavisno promenljivih:

- raspoloživost sekcije grejača klima komore (4 binarne promenljive),
- zadata temperatura pripremljenog vazduha u opsegu 26–35°C (4 kontinualne promenljive),
- raspoloživost radijatora u prostorijama: *hodnik galerije, računovodstvo, kancelarija direktora, kancelarija 4 i kancelarija 5* (20 binarnih promenljivih),
- zadate temperature (položaj na termoglavama) u opsegu 18–24°C u prostorijama: *hodnik galerije, računovodstvo, kancelarija direktora, kancelarija 4 i kancelarija 5* (20 kontinualnih promenljivih).

Za periode nekorisćenja usvojena je ili po jedna vrednost promenljive za oba dana ili po jedna vrednost promenljive u svakom danu horizonta planiranja:

- raspoloživost sekcije grejača klima komore (2 binarne promenljive),
- zadata temperatura pripremljenog vazduha u opsegu 22–30°C (2 kontinualne promenljive),
- raspoloživost radijatora u posmatranim zonama (10 binarnih promenljivih),
- zadate unutrašnje temperature u prostorijama koje se razmatraju u opsegu 15–18°C (5 kontinualnih promenljivih).

Za svaki dan horizonta planiranja dozvoljena je po jedna vrednost korekcije sračunate temperature napojne vode sistema u periodu 05:00–16:00 (2 kontinualne promenljive).

Za ceo horizont planiranja dozvoljena je samo jedna vrednost protoka vazduha u sistemu klimatizacije.

Za navedeni period je identifikovano 70 nezavisno promenljivih na koje je moguće uticati u izvedenim sistemima KGH. Sve nezavisno promenljive se upisuju u odgovarajuća polja Erl programa, pri čemu su definisane i korelisane promenljive novim Erl rutinama (npr. ukoliko se generiše raspoloživost makar jednog radijatora ili grejača klima komore inicira se predaja energije zgradi; ukoliko je potrebno zagrevanje vazduha u sistemu klimatizacije, svi elementi klima komore se aktiviraju; ukoliko je aktivna klima komora vrši se skaliranje protoka vazduha u svakoj od zona u odnosu na generisanu vrednost protoka vazduha).

### *Funkcija cilja*

Funkcija cilja je minimalni utrošak energije uz zadovoljenje termičkog komfora svih prisutnih u kancelarijama na spratu FBB zgrade. Funkcija cilja ima oblik:

$$\min E = \sum_{i=1}^{i=5} E_{BBH,i} + E_{AHU} \quad (4.4)$$

uz ograničenje:

$$-0.2 < TCF < 0.2 \quad (4.5)$$

gde su:

$E$  - ukupno potrošena energija za grejanje kancelarija koje se razmatraju,

$E_{BBH,i}$  - potrošena energija radiatorima u  $i$  - toj prostoriji,

$E_{AHU}$  - potrošena toplotna energija u grejaču klima komore,

$TCF$  - generička funkcija PMV indeksa toplotnog komfora koja se izračunava po jednačini:

$$TCF = \sum_{j=1}^{j=6} (\min PMV_j) \times \frac{N_j}{N_{tot}} \quad (4.6)$$

pri čemu su:

$j$  - oznaka prostorije u kojoj borave ljudi,

$\min PMV_j$  - minimalna vrednost PMV indeksa u  $j$ -toj prostoriji za vreme perioda zauzetosti prostorije u toku celog horizonta planiranja,

$N_j$  - broj ljudi u  $j$ -toj prostoriji (tabela 4.14),

$N_{tot}$  - ukupan broj ljudi.

Ograničenja na strani komfora (4.5) su dosta stroga i odnose se na prostorije „A“ kategorije toplotnog komfora, pri čemu je izvršeno osrednjavanje PMV indeksa po broju ljudi. Razvijeno softversko rešenje dozvoljava fleksibilnost prilikom definisanja funkcije cilja, pa se mogu birati i drugi oblici funkcije cilja, postavljati druga ograničenja (npr. da se ne vrši osrednjavanje već da se kao ograničenje definiše neprelaženje granice komfora u bilo kojoj zoni, da se uključi još neki dodatni uslov na strani komfora itd.).

Kako se u optimizaciji koristi PMV indeks koji zavisi i od brzine strujanja vazduha, definisana je posebna Erl rutina kojom se u svakoj zoni modela, na osnovu protoka vazduha koji se ubacuje u zonu u konkretnoj simulaciji, vrši izračunavanje brzine strujanja vazduha u zoni boravka. Poznavajući tipove distributivnih elemenata, promenom protoka kroz distributivni element (u opsegu promena protoka koje su dozvoljene u optimizaciji) pronađena je zavisnost brzine strujanja u zoni boravka u funkciji protoka preko distributivnog elementa i prikazana je u tabeli 4.15.



**Tabela 4.15.** Promene brzine strujanja u zoni boravka u funkciji protoka na distributivnom elementu

Naziv prostorije	Funkcionalna zavisnost brzine
Hodnik galerije	$2.52 * HodCurrentAirSupply + 0.02$
Računovdstvo	$2.52 * RacCurrentAirSupply + 0.02$
Direktor	$2.367 * DirCurrentAirSupply - 0.0234$
Kancelarija1	$2.52 * Kanc1CurrentAirSupply + 0.02$
Kancelarija2	$2.52 * Kanc2CurrentAirSupply + 0.02$
Kancelarija3	$2.52 * Kanc3CurrentAirSupply + 0.02$
Kancelarija4	$2.0238 * Kanc4CurrentAirSupply - 0.0351$
Kancelarija5	$2.0238 * Kanc5CurrentAirSupply - 0.0351$

*Postavke optimizacionog algoritma*

Usvojena je veličina populacije od 1000 (broj vektora koji se generišu u jednoj generaciji), a broj generacija je usvojen na 40. Zaustavni kriterijum postupka optimizacije je bio nepostojanje poboljšanja funkcije cilja u 15 uzastopnih generacija.

#### 4.4. Izrada dnevnih operativnih strategija na osnovu rezultata analize osetljivosti

Da bi se smanjio broj promenljivih u optimizaciji na početku svakog horizonta planiranja vrši se globalna analiza osetljivosti, pri čemu se ispituje osetljivost izabranog pokazatelja energetske performansi (potrošnja energije cele zgrade za grejanje, kako bi se sprečilo zagrevanje iz susednih zona za koje se ne posmatra PMV) i usvojenog ograničenja funkcije cilja na promene u svim izabranim nezavisno promenljivim (ulazne promenljive u analizi osetljivosti). Definisanjem odgovarajućeg indikatora osetljivosti i granice osetljivosti (apsolutna vrednost usvojenog indikatora) dobija se smanjeni broj nezavisno promenljivih za postupak optimizacije. Po sprovedenoj analizi osetljivosti uticajne ulazne promenljive postaju nezavisno promenljive u postupku optimizacije, dok ostale zadržavaju svoje inicijalne vrednosti.

*Funkcija cilja*

Funkcija cilja je minimalni utrošak toplotne energije u celoj zgradi uz zadovoljenje termičkog komfora ljudi koji borave u kancelarijama na spratu FBB zgrade tokom horizonta planiranja. Funkcija cilja ima oblik:

$$\min E = \sum_{\tau=1}^{\tau=\tau_{HP}} E_{DEL}(\tau) \quad (4.7)$$

uz ograničenje:

$$-\varepsilon < TCF < \varepsilon \quad (4.8)$$

gde su:

$E_{DEL}(\tau)$  - toplotna energija isporučena zgradi u trenutku  $\tau$  (svaki sat horizonta planiranja),

$\varepsilon$  - ograničenje funkcije TCF koje prema [156] može biti 0.2, 0.5 ili 0.7.

### *Analiza osetljivosti*

Prateći proceduru opisanu u 4.4 svaki dan horizonta planiranja je podeljen na blokove:

- period nekorišćenja podeljen na dva bloka: 00:00–06:00 (pre dolaska ljudi na posao) i 16:00–24:00 (nakon odlaska ljudi sa posla),
- period zauzetosti podeljen na dva bloka: 06:00–11:00 i 11:00–16:00.

Svako od 99 identifikovanih promenljivih (tabela 4.16) je dodeljena odgovarajuća funkcija raspodele verovatnoće i opseg vrednosti.

Usvojeno je LHS uzorkovanje u Simlab 2.2. Rezultat uzorkovanja je matrica dimenzija 99x1500 u formi tekstualne datoteke. Preuređenjem dobijene datoteke u oblik pogodan za korišćenje parametarskog pretprocesora EnergyPlus-a pokreću se simulacije (svih 1500 paralelno). Iz simulacija se očitavaju rezultati od značaja (elementi funkcije cilja) i pripremaju za analizu osetljivosti. Po završetku analize osetljivosti; usvojen je SRRC kao indikator osetljivosti i postavljena je granica osetljivosti na 0.05. Uvidom u rezultate analize osetljivosti za sve elemente funkcije cilja (potrošnja energije zgrade i f-ja u jednačini (4.6)), uzimajući samo ulazne promenljive na koje je bilo koji od elemenata funkcije cilja osetljiv dobijene se nezavisno promenljive za postupak optimizacije.

Postupak optimizacije je identičan postupku opisanom u poglavlju 4.4. pri čemu se sprovodi nad redukovanim brojem promenljivih (samim tim i sa redukovanim brojem vektora nezavisno promenljivih u generaciji za koji je usvojeno da iznosi 500) sa nepromenjenim brojem generacija i zaustavnim kriterijumom, uz korišćenje podataka iz aktuelne meteorološke godine (deterministički pristup problemu, tj. smatra se da je prognoza idealno tačna). Optimalne vrednosti redukovanog broja promenljivih zajedno sa inicijalnim vrednostima ostalih ulaznih promenljivih u analizi osetljivosti postaju deo termičke istorije modela. Postupak se ponavlja na početku svakog novog horizonta planiranja.

**Tabela 4.16.** Funkcije raspodele verovatnoće, opseg i inicijalne vrednosti ulaznih promenljivih

Ulazna promenljiva	1. dan horizonta planiranja				2. dan horizonta planiranja			
	00:00–06:00	06:00–11:00	11:00–16:00	16:00–24:00	00:00–06:00	06:00–11:00	11:00–16:00	16:00–24:00
Protok vazduha u sistemu klimatizacije (procenat projektnog protoka)	Unif <sup>1</sup> (0.5 - 1.0; 1.0)							
Korekcija sračunate temp. napojne vode	Unif (0.5 - 1.2; 1.0)	Unif (0.5 - 1.2; 1.0)	Unif (0.5 - 1.2; 1.0)	Unif (0.5 - 1.2; 1.0)	Unif (0.5 - 1.2; 1.0)	Unif (0.5 - 1.2; 1.0)	Unif (0.5 - 1.2; 1.0)	Unif (0.5 - 1.2; 1.0)
Raspoloživost grejača klima komore	D <sup>2</sup> (0/1; 0)	D (0/1; 0)	D (0/1; 0)	D (0/1; 0)	D (0/1; 0)	D (0/1; 0)	D (0/1; 0)	D (0/1; 0)
Zadata temperatura pripremljenog vazduha	Unif (22.0, 35.0; 26.0)	Unif (22.0, 35.0; 30.0)	Unif (22.0, 35.0; 30.0)	Unif (22.0, 35.0; 30.0)	Unif (22.0, 35.0; 26.0)	Unif (22.0, 35.0; 30.0)	Unif (22.0, 35.0; 30.0)	Unif (22.0, 35.0; 30.0)
Raspoloživost radijatora u hodniku galerije	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)
Raspoloživost radijatora u računovodstvu	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)
Raspoloživost radijatora u direktor	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)

<sup>1</sup> Uniformna raspodela (donja granica, gornja granica; inicijalna vrednost)

<sup>2</sup> Diskretna (binarna) (0 ili 1; inicijalna vrednost) - verovatnoća izbora 0 ili 1 je jednaka

**Tabela 4.16.** nastavak

Ulazna promenljiva	1. dan horizonta planiranja				2. dan horizonta planiranja			
	00:00–06:00	06:00–11:00	11:00–16:00	16:00–24:00	00:00–06:00	06:00–11:00	11:00–16:00	16:00–24:00
Raspoloživost radijatora u kancelarija 4 i kancelarija 5	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)	D (0/1; 1)
Zadata temperatura u hodniku galerije	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	isto kao u 1. danu	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	Unif (17.0, 22.00; 22.0)
Zadata temperatura u računovodstvu	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	isto kao u 1. danu	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	Unif (17.0, 22.00; 22.0)
Zadata temperatura u direktor	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	isto kao u 1. danu	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	Unif (17.0, 22.00; 22.0)
Zadata temperatura u kancelarija 4	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	isto kao u 1. danu	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	Unif (17.0, 22.00; 22.0)
Zadata temperatura u kancelarija 5	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	isto kao u 1. danu	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	Unif (17.0, 22.00; 22.0)	Unif (17.0, 22.00; 22.0)
Raspoloživa toplotna snaga	Unif (0.00, 0.75; 0.00)	Unif (0.00, 0.75; 0.75)	Unif (0.00, 0.75; 0.75)	Unif (0.00, 0.75; 0.25)	isto kao u 1. danu	Unif (0.00, 0.75; 0.75)	Unif (0.00, 0.75; 0.75)	Unif (0.00, 0.75; 0.25)

## 5. Analiza i diskusija rezultata primenjene metodologije

### 5.1. Rezultati kalibrisane simulacije

Kalibracija inicijalnog modela je izvršena po postupku opisanom u poglavlju 4.2, koristeći razvijeno softversko rešenje za optimizaciju sa funkcijom cilja definisanom jednačinom (4.3). Parametri kalibracije, MBE i CV(RMSE), su izračunati za sve veličine koje su merene u FBB zgradi.

Rezultati primenjenog postupka kalibracije po časovnim vrednostima su prikazani u tabeli 5.1. U istoj tabeli je naveden i broj tačaka kalibracije za svaku od veličina, nakon sređivanja podataka.

**Tabela 5.1.** Kriterijumi kalibracije u časovnoj rezoluciji

Promenljiva kalibracije	Broj tačaka kalibracije	MBE [%]	CV(RMSE) [%]
Energija isporučena zgradi	1254	11.39	34.67
Temperatura u <i>Montaža izmenjivača</i>	1892	13.92	21.03
Temperatura u <i>Montaža elektorormana</i>	1892	11.31	29.10
Temperatura u <i>Radionica</i>	1892	11.55	29.13
Temperatura u <i>Laboratorija</i>	1892	9.91	16.61
Temperatura u <i>Pogon elektronike</i>	1892	6.45	14.46
Temperatura u <i>Hodnik galerije</i>	1892	8.97	21.50
Temperatura u <i>Direktor</i>	1892	8.44	28.01
Temperatura u <i>Kancelarija 4</i>	1892	9.26	19.64
Temperatura u <i>Kancelarija 5</i>	1892	9.69	23.86
Relativna vlažnost u <i>Hodnik galerije</i>	1830	9.75	21.45
Relativna vlažnost u <i>Direktor</i>	1830	5.20	21.22
Temperatura vazduha na ubacivanju	70	4.43	8.20
Temperatura vazduha na odsisavanju	70	-5.71	11.20
Relativna vlažnost vazduha na ubacivanju	70	-9.60	30.24
Relativna vlažnost vazduha na odsisavanju	70	-9.95	31.32

Prateći preporuke ASHRAE [20] o maksimalnim vrednostima kriterijuma za koje se model može smatrati kalibrisanim časovnim podacima prikazanim u tabeli 2.1, za isporučenu energiju zgradi model ne reprezentuje na najbolji način realnu zgradu. Međutim, kriterijumi kalibracije za većinu preostalih veličina su zadovoljeni. Razlozi ovakvog ponašanja modela su povezani sa nedostajanjem podataka o radu sistemu u pojedinim trenucima vremena i nemogućnosti eksplicitne inicijalizacije modela u satu koji je sledio nakon prekida u akviziciji podataka. Da bi se ovakvi problemi prevazišli, može se povećati vremenska rezolucija postupka kalibracije, tj. da se

kalibracija ne vrši po časovnim, već po dnevnim vrednostima. Energija potrošena u zgradi u toku jednog dana kada su postojali prekidi u akviziciji podataka se lako može odrediti iz baze merenja, dok se za temperature može vršiti osrednjavanje brojem sati u danu kada su vrednosti akvizirane. Povećanjem rezolucije kalibracije sa časovnog na dnevni (nedeljni) nivo, dobijeni su rezultati prikazani u tabeli 5.2 (samo za veličine koje nisu zadovoljile kriterijume kalibracije na časovnom nivou).

Pošto u osnovnoj literaturi za kalibraciju [20-22] ne postoje preporuke za kriterijume kalibracije na dnevnom nivou, a kako za većinu merenih veličina ovi kriterijumi imaju vrednosti u propisanim granicama između kalibracija na časovnom i mesečnom nivou, model se može smatrati dovoljno dobro kalibrisanim za izradu dnevnih operativnih strategija. Metodologijom se teži najmanjoj potrošnji energije na dnevnom nivou uz zadovoljenje uslova komfora u periodu boravka ljudi (časovni nivo) u definisanim prostorijama zgrade. Rezultati u tabeli 5.2 pokazuju da dobijeni kalibrisan model na dnevnom nivou dobro prediktuje potrošnju energije u zgradi, a na časovnom nivou dobro prediktuje temperature i relativne vlažnosti u prostorijama na spratu, što pokazuje da je gore izveden zaključak da se model može smatrati kalibrisanim opravdan.

**Tabela 5.2.** Kriterijumi kalibracije u dnevnoj i nedeljnoj rezoluciji

Promenljiva kalibracije	Dnevna rezolucija		Nedeljna rezolucija	
	MBE [%]	CV(RMSE) [%]	MBE [%]	CV(RMSE) [%]
Energija isporučena zgradi	-2.48	20.02	5.45	14.76
Temperatura u <i>Montaža izmenjivača</i>	-6.13	7.57	-	-
Temperatura u <i>Montaža elektorormana</i>	-7.9	9.82	-	-
Temperatura u <i>Radionica</i>	-8.1	9.86	-	-

Optimalne vrednosti parametara inicijalnog modela dobijene u postupku kalibracije su prikazane u tabeli 5.3 i korišćene su u svim ostalim fazama istraživanja.

**Tabela 5.3.** Optimalne vrednosti kalibrisanih veličina modela

Veličina	Optimalna vrednost
Koeficijent provođenja toplote opekarskih proizvoda, [W/m <sup>2</sup> K]	0.75
Koeficijent provođenja toplote armirano-betonskih elemenata, [W/m <sup>2</sup> K]	2.20
Koeficijent provođenja toplote mikro- i fero-betona, [W/m <sup>2</sup> K]	1.68
Koeficijent provođenja toplote jednostrukih prozora, [W/m <sup>2</sup> K]	5
Koeficijent dobitaka toplote od zračenja jednostrukih prozora, SHGC [-]	0.8
Koeficijent provođenja toplote prozora sa staklopaketom TP1, [W/m <sup>2</sup> K]	2.5
Koeficijent dobitaka toplote od zračenja prozora sa staklopaketom TP1, SHGC [-]	0.6
Koeficijent provođenja toplote prozora sa staklopaketom TP2, [W/m <sup>2</sup> K]	2

**Tabela 5.3.** nastavak

Koeficijent dobitaka toplote od zračenja prozora sa staklopaketom TP2, SHGC [-]	0.3
Koeficijent provođenja toplote prozora sa staklopaketom TP3, [W/m <sup>2</sup> K]	2
Koeficijent dobitaka toplote od zračenja prozora sa staklopaketom TP3, SHGC [-]	0.5
Elementi j-ne (4.2) u <i>Proizvodna hala</i> ; $n_{inf}$ [h <sup>-1</sup> ], A [-], B [-], C [-], D [-]	(0.2 0.5 0 1 0)
Elementi j-ne (4.2) u <i>Laboratorija</i> ; $n_{inf}$ [h <sup>-1</sup> ], A [-], B [-], C [-], D [-]	(0.1 1 0 0.93 0)
Elementi j-ne (4.2) u <i>Radionica</i> ; $n_{inf}$ [h <sup>-1</sup> ], A [-], B [-], C [-], D [-]	(0.1 0.5 0.76 0 0)
Elementi j-ne (4.2) u <i>Montaža izmenjivača</i> ; $n_{inf}$ [h <sup>-1</sup> ], A [-], B [-], C [-], D [-]	(1.1 1 0 0 0)
Elementi j-ne (4.2) u <i>Montaža elektroormana</i> ; $n_{inf}$ [h <sup>-1</sup> ], A [-], B [-], C [-], D [-]	(0.1 0.5 1 0 1)
Elementi j-ne (4.2) u <i>Pogon elektronike</i> ; $n_{inf}$ [h <sup>-1</sup> ], A [-], B [-], C [-], D [-]	(0.1 0.5 0 0 0)
Elementi j-ne (4.2) u <i>Hodnik galerije</i> ; $n_{inf}$ [h <sup>-1</sup> ], A [-], B [-], C [-], D [-]	(0.1 0.5 0 1 1)
Elementi j-ne (4.2) u <i>Kancelarija 4</i> ; $n_{inf}$ [h <sup>-1</sup> ], A [-], B [-], C [-], D [-]	(1.94 0.5 0 0 0)
Elementi j-ne (4.2) u <i>Kancelarija 5</i> ; $n_{inf}$ [h <sup>-1</sup> ], A [-], B [-], C [-], D [-]	(0.32 0.5 0 0 1)
Elementi j-ne (4.2) u <i>Računovodstvo</i> ; $n_{inf}$ [h <sup>-1</sup> ], A [-], B [-], C [-], D [-]	(0.1 0.5 0 0 1)
Elementi j-ne (4.2) u <i>Direktor</i> ; $n_{inf}$ [h <sup>-1</sup> ], A [-], B [-], C [-], D [-]	(0.1 0.5 1 1 0)
Nominalni kapacitet grejnog tela pri projektnom režimu u <i>Servis</i> , [W]	664
Nominalni kapacitet grejnog tela pri projektnom režimu u <i>Vetrobran</i> , [W]	550
Nominalni kapacitet grejnog tela pri projektnom režimu u <i>Poslovođa</i> , [W]	600
Nominalni kapacitet grejnog tela pri projektnom režimu u <i>Hodnik prizemlje</i> , [W]	1500
Nominalni kapacitet grejnog tela pri projektnom režimu u <i>Magacin repromaterijala</i> , [W]	1300
Nominalni kapacitet grejnog tela pri projektnom režimu u <i>Laboratorija</i> , [W]	2000
Nominalni kapacitet grejnog tela pri projektnom režimu u <i>Montaža izmenjivača</i> , [W]	3974
Nominalni kapacitet grejnog tela pri projektnom režimu u <i>Montaža elektroormana</i> , [W]	2951
Nominalni kapacitet grejnog tela pri projektnom režimu u <i>Garderoba</i> , [W]	2500
Nominalni kapacitet grejnog tela pri projektnom režimu u <i>Pogon elektronike</i> , [W]	9500
Nominalni kapacitet grejnog tela pri projektnom režimu u <i>Hodnik galerije</i> , [W]	1350
Nominalni kapacitet grejnog tela pri projektnom režimu u <i>Računovodstvo</i> , [W]	797
Nominalni kapacitet grejnog tela pri projektnom režimu u <i>Direktor</i> , [W]	3599
Nominalni kapacitet grejnog tela pri projektnom režimu u <i>Kancelarija 4</i> , [W]	1599
Nominalni kapacitet grejnog tela pri projektnom režimu u <i>Kancelarija 5</i> , [W]	2600
Deo protoka vazduha koji se ubacuje u <i>Direktor</i> , [-]	0.13
Deo protoka vazduha koji se ubacuje u <i>Računovodstvo</i> , [-]	0.08
Deo protoka vazduha koji se ubacuje u <i>Hodnik galerije</i> , [-]	0.136
Deo protoka vazduha koji se ubacuje u <i>Kancelarija 1</i> , [-]	0.094
Deo protoka vazduha koji se ubacuje u <i>Kancelarija 2</i> , [-]	0.084
Deo protoka vazduha koji se ubacuje u <i>Kancelarija 3</i> , [-]	0.113
Deo protoka vazduha koji se ubacuje u <i>Kancelarija 4</i> , [-]	0.18
Deo protoka vazduha koji se ubacuje u <i>Kancelarija 5</i> , [-]	0.183
Nominalni protok cirkulacione pumpe, [m <sup>3</sup> /s]	0.002
Nominalni napor cirkulacione pumpe, [Pa]	65000

## 5.2. Rezultati implementacije dnevnih operativnih strategija na osnovu kratkoročne vremenske prognoze

Postupak opisan u poglavlju 4.3. je rezultirao optimalnim vrednostima nezavisno promenljivih koje su implementirane u FBB zgradi. Definišući horizont planiranja u trajanju od dva dana i horizont izvršavanja u trajanju jednog dana (06.04.2017), primenom j-na (4.4–4.6), dobijene su optimalne vrednosti nezavisno promenljivih veličina postupka optimizacije i prikazane su u tabeli 5.4. Ograničenja definisana j-nom (4.5) su rezultovala promenama PMV indeksa komfora u posmatranim prostorijama prikazanim na slici 5.1. i uočljivo je da ovako strogo definisano ograničenje nije bilo zadovoljeno.

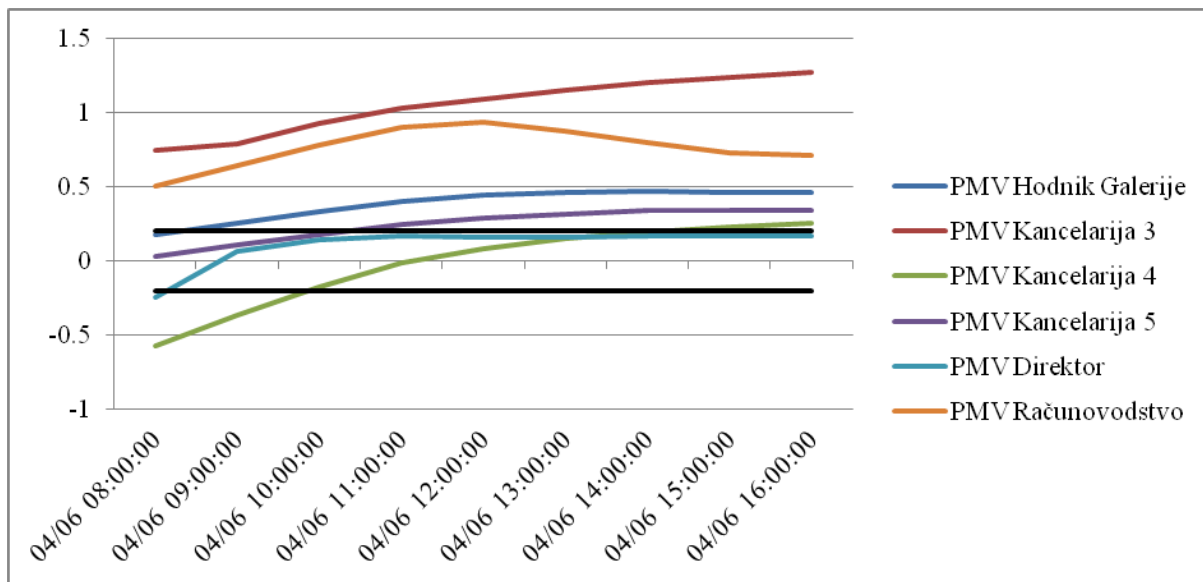
**Tabela 5.4.** Optimalne vrednosti na bazi kratkoročne vremenske prognoze

Veličina	Horizont izvršavanja 06.04.2017.			
	00:00–08:00	8:00–12:00	12:00–16:00	16:00–24:00
Raspoloživost klima komore, [0/1]	0	1	1	
Zadata temperatura pripremljenog vazduha, [°C]	–	35	33.3	
Raspoloživost radijatora u <i>Računovodstvo</i> , [0/1]	1	1	0	
Raspoloživost radijatora u <i>Hodnik galerije</i> , [0/1]	1	1	1	
Raspoloživost radijatora u <i>Direktor</i> , [0/1]	1	1	1	
Raspoloživost radijatora u <i>Kancelarija 4</i> , [0/1]	1	1	0	
Raspoloživost radijatora u <i>Kancelarija 5</i> , [0/1]	1	1	0	
Zadata temperatura u <i>Računovodstvo</i> , [°C]	15.4	18	–	
Zadata temperatura u <i>Hodnik galerije</i> , [°C]	15	23.4	18.3	
Zadata temperatura u <i>Direktor</i> , [°C]	15	23.5	18	
Zadata temperatura u <i>Kancelarija 4</i> , [°C]	15.3	19.3	–	
Zadata temperatura u <i>Kancelarija 5</i> , [°C]	18	22.4	–	
Korekcija sračunate temperature, [–]			1.1	
Procenat projektnog protoka vazduha, [%]	–		0.5	

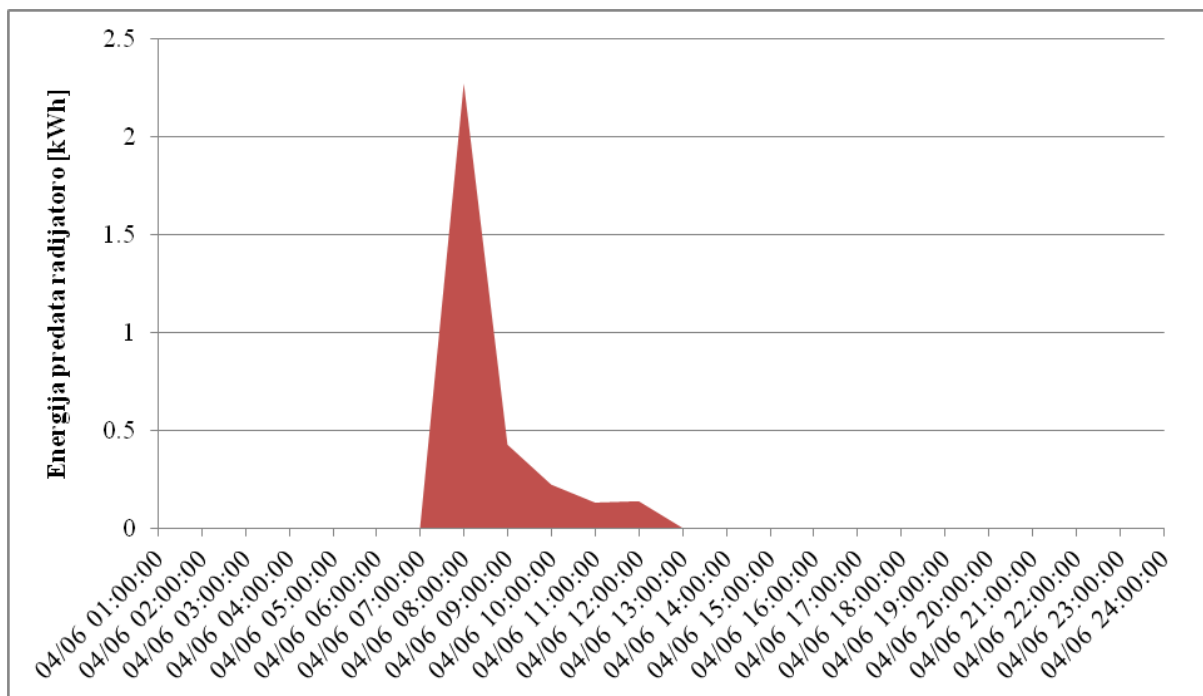
Dobijenom operativnom strategijom je definisano da se u periodima kada ljudi ne borave u prostorijama (u periodu 00:00–08:00 i 16:00–24:00) ne koristi sistem klimatizacije već sistem radijatorskog grejanja i to sa smanjenim vrednostima zadatih temperatura u svim prostorijama. U trenutku dolaska ljudi uključuje se klima komora sa smanjenim protokom vazduha u odnosu na projektni, ali sa visokim zadatim temperaturama pripremljenog vazduha (35°C i 33.3°C u prvom i drugom bloku perioda boravka respektivno). U sistemu radijatorskog grejanja se podižu zadate unutrašnje temperature u prvom bloku, dok se u drugom bloku zadate unutrašnje temperature snižavaju. Razlog viših zadatih temperatura u prvom bloku je period tranzicije, odnosno vreme



potrebno da se vazduh u prostoriji zagreje ubacivanjem pripremljenog vazduha, za koje vreme energiju zoni predaju radijatori. Kada unutrašnja temperatura u zonama dostigne zadate vrednosti, prestaje dovođenje energije radijatorima (npr. u prostoriji *direktor* se radijatorom predaje najviše energije u periodu 08:00–09:00 što je prikazano na slici 5.2) i sva energija za grejanje se dovodi u zonu sistemom klimatizacije. U periodu boravka je temperatura napojne vode bile uvećana 10% u odnosu na postojeću vrednost.



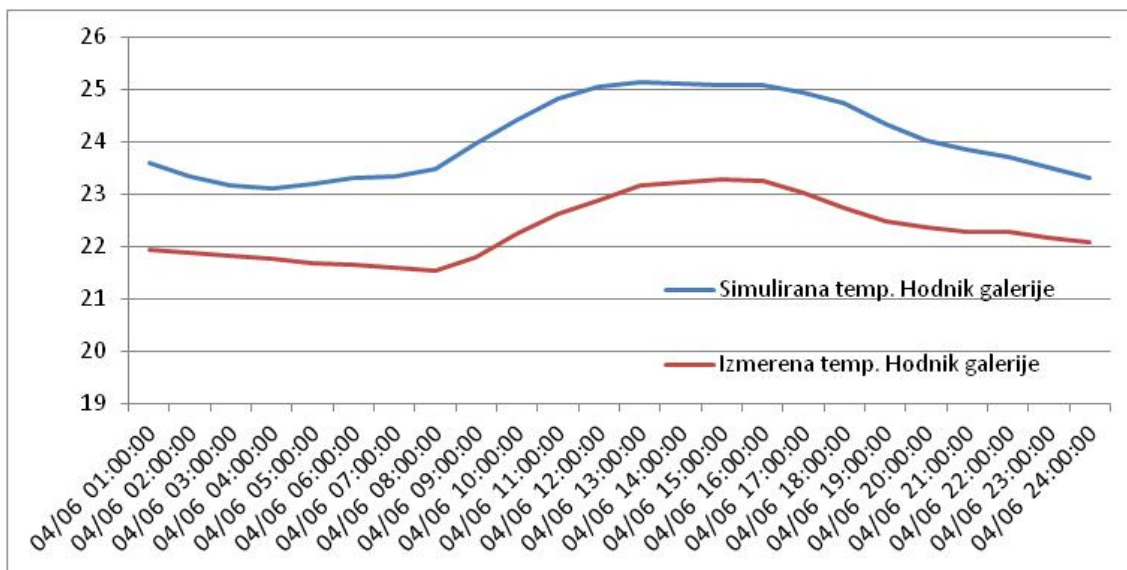
**Slika 5.1.** Promena PMV indeksa komfora primenom optimalne dnevne strategije



**Slika 5.2.** Energija predana radijatorom 06.04.2017. u prostoriji Direktor

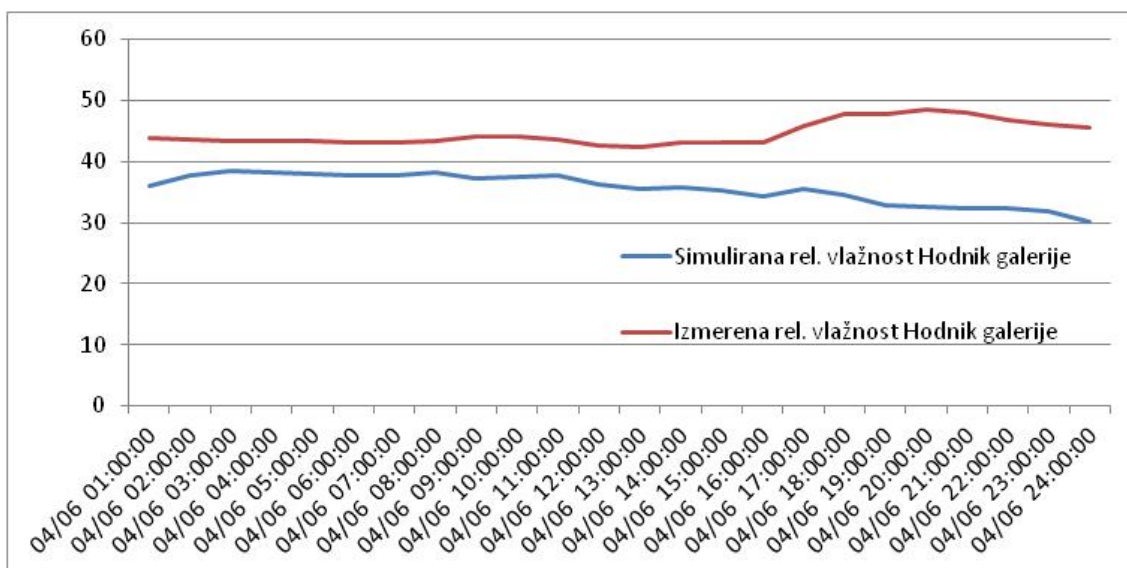
Rezultati implementacije operativne strategije su verifikovani merenjima na samom objektu, dok su rezultati grafički prikazani na slikama 5.3–5.9.

Na slici 5.3. su prikazane promene temperature vazduha (izmerenih i simuliranih) u prostoriji *hodnik galerije* i može se videti da se trendovi u promena izmerenih i simuliranih vrednosti dobro poklapaju, pri čemu model precenjuje vrednosti temperature u proseku za 1.74°C.



**Slika 5.3.** Upoređenje simulirane i izmerene temperature u Hodniku galerije

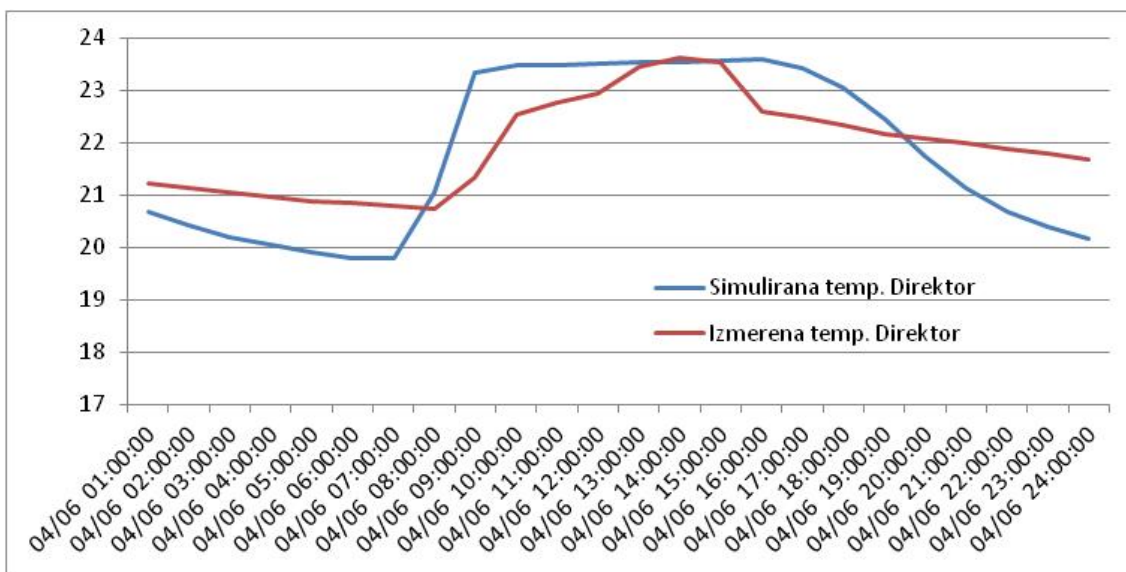
Promene izmerene i simulirane relativne vlažnosti u *hodnik galerije* su prikazane na slici 5.4 i vidi se da postoji dobro poklapanje u najvećem delu dana, sa prosečnim odstupanjem simuliranih vrednosti od -8.9% u odnosu na merene. U periodu boravka ljudi je to odstupanje dosta niže i iznosi oko -6.8%. Povećanje razlike posle 17:00 je posledica povećane infiltracije najverovatnije usled otvaranja prozora u prostoriji.



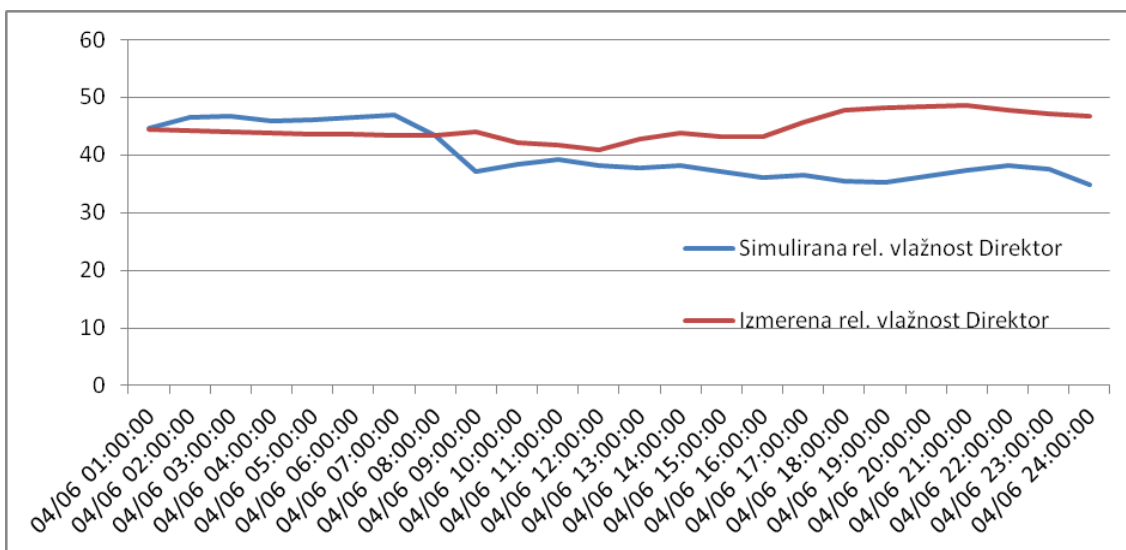
**Slika 5.4.** Upoređenje simulirane i izmerene relativne vlažnosti u Hodniku galerije

Promene izmerenih i simuliranih temperatura i relativnih vlažnosti u prostoriji *direktor* su prikazane na slikama 5.5. i 5.6. I u ovoj prostoriji postoji dobro poklapanje simuliranih i izmerenih vrednosti

sa odstupanjem simulirane temperature u granicama  $-1.53^{\circ}\text{C}$ – $2^{\circ}\text{C}$  i odstupanjem simulirane relativne vlažnosti u proseku za  $-4.6\%$  u odnosu na izmerene vrednosti respektivno.

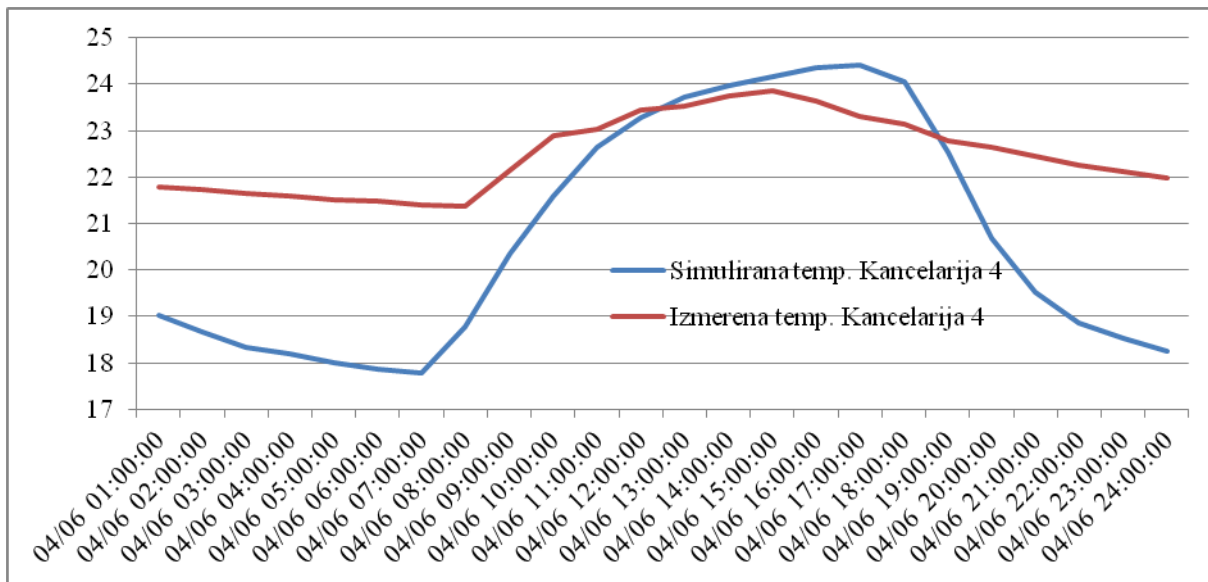


**Slika 5.5.** Upoređenje simulirane i izmerene temperature u Direktor

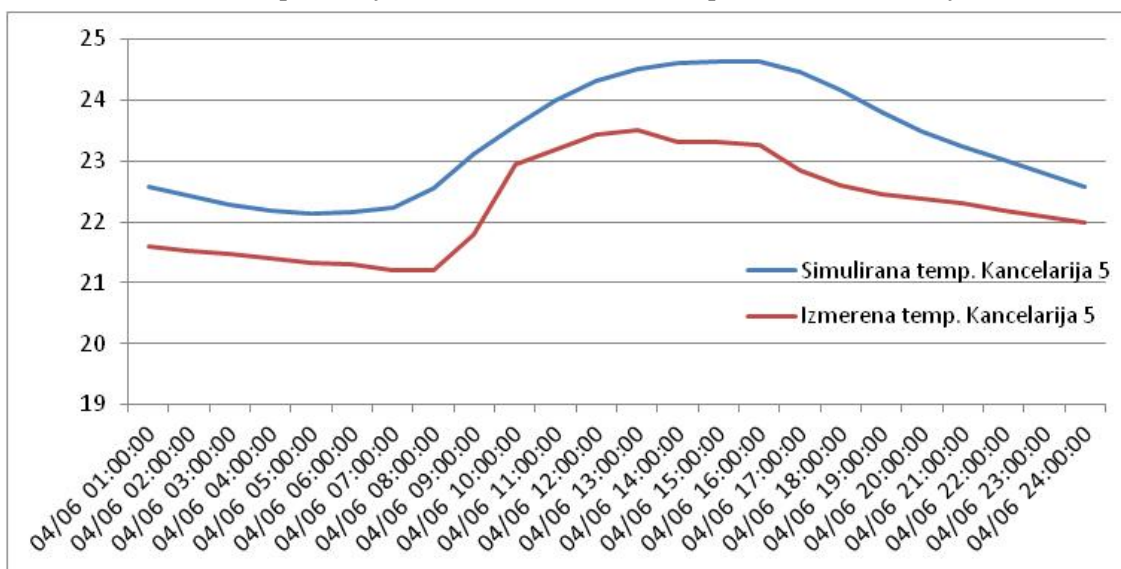


**Slika 5.6.** Upoređenje simulirane i izmerene relativne vlažnosti u Direktor

Slični zaključci se mogu izvesti i upoređenjem simuliranih i izmerenih temperatura u prostorijama kancelarija 4 i kancelarija 5. Prosečna odstupanja simuliranih vrednosti u kancelarija 4 iznose  $1.73^{\circ}\text{C}$  (u periodu boravka ljudi  $0.54^{\circ}\text{C}$ ), dok u kancelarija 5 iznose  $1.03^{\circ}\text{C}$ . Odstupanja simuliranih u odnosu na izmerene vrednosti jednim delom potiču i od nepreciznosti zadavanja temperatura na termoregulacionim ventilima grejnih tela.



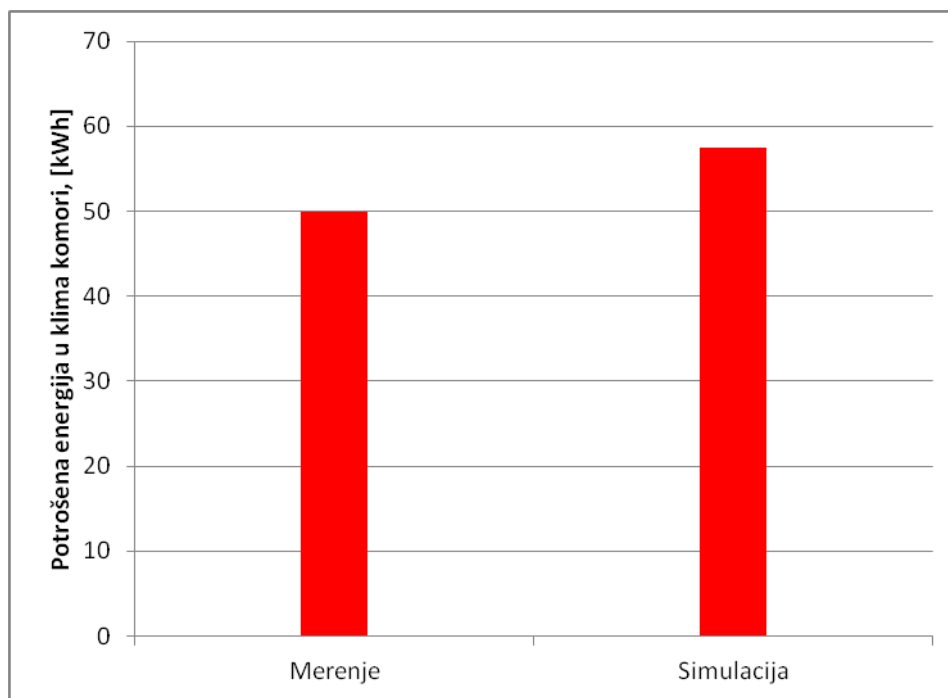
**Slika 5.7.** Upoređenje simulirane i izmerene temperature u kancelarija 4



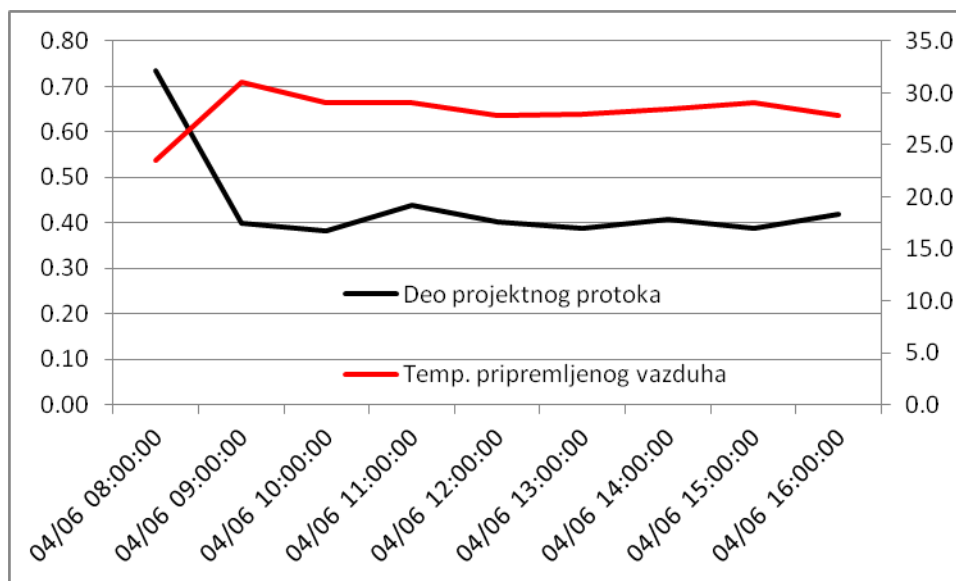
**Slika 5.8.** Upoređenje simulirane i izmerene temperature u kancelarija 5

Tokom implementacije operativnih strategija, u objektu su obezbeđeni takvi uslovi da se toplotna energija troši na pripremu vazduha, u radijatorima u kancelarijama na spratu, i radijatorima koji nisu opremljeni termostatskim ventilima (prostorije *garderoba*, *servis*, *magacin*). Svi ostali potrošači toplotne energije su bili isključeni (kaleriferi isključeni u *proizvodna hala* i *radionica*, termostatski ventili na svim ostalim radijatorima su bili zatvoreni), tako da je izmerena toplotna energija u podstanci objekta potrošena u grejaču klima komore (merena posebnim ultrazvučnim merilom utroška toplotne energije) i radijatorima u pomenutim prostorijama. Iz navedenog razloga su prikazane promene simulirane i izmerene vrednosti potrošnje energije za pripremu vazduha u klima komori na slici 5.9. Postoji dobro poklapanje ovih vrednosti u opsegu, pri čemu model

precenjuje potrošnju energije za 8 kWh što je posledica rada sistema klimatizacije sa nešto nižim protokom od simulacijom dobijenog i sa nižim temperaturama pripremljenog vazduha (slika 5.10).



**Slika 5.9.** Upoređenje simulirane i izmerene potrošnje toplotne energije u klima komori



**Slika 5.10.** Deo projektnog protoka i temperatura pripremljenog vazduha ostvareni na klima komori

Izračunavanjem kriterijuma kalibracije sa podacima prikazanim na slikama 5.3–5.9. dobijaju se rezultati prikazani u tabeli 5.5. koji jasno pokazuju da je hipoteza da se model smatra kalibrisanim i potvrđena.

Iako je stavljeno dosta strogo ograničenje na strani toplotnog komfora (odgovara kategoriji A prostora), iz simulacija se može zaključiti da bez obzira što ono nije zadovoljeno, realno je da se ograničenja koja odgovaraju drugim kategorijama prostora (kategorijama B i C) mogu održavati

većinu vremena kada borave ljudi u prostoriji (u većini prostorija) primenom ovakve metodologije. Uprkos ustaljenoj inženjerskoj praksi da se za ovakve sisteme, prilikom projektovanja, od parametara komfora uglavnom definišu unutrašnja temperatura vazduha i/ili unutrašnja relativna vlažnost (u slučaju vazdušnih sistema klimatizacije), rezultati pokazuju da se tradicionalno projektovanim sistemima KGH mogu delimično ispuniti i uslovi propisani standardom [156].

**Tabela 5.5.** MBE i CV(RMSE) za vreme implementacije strategije

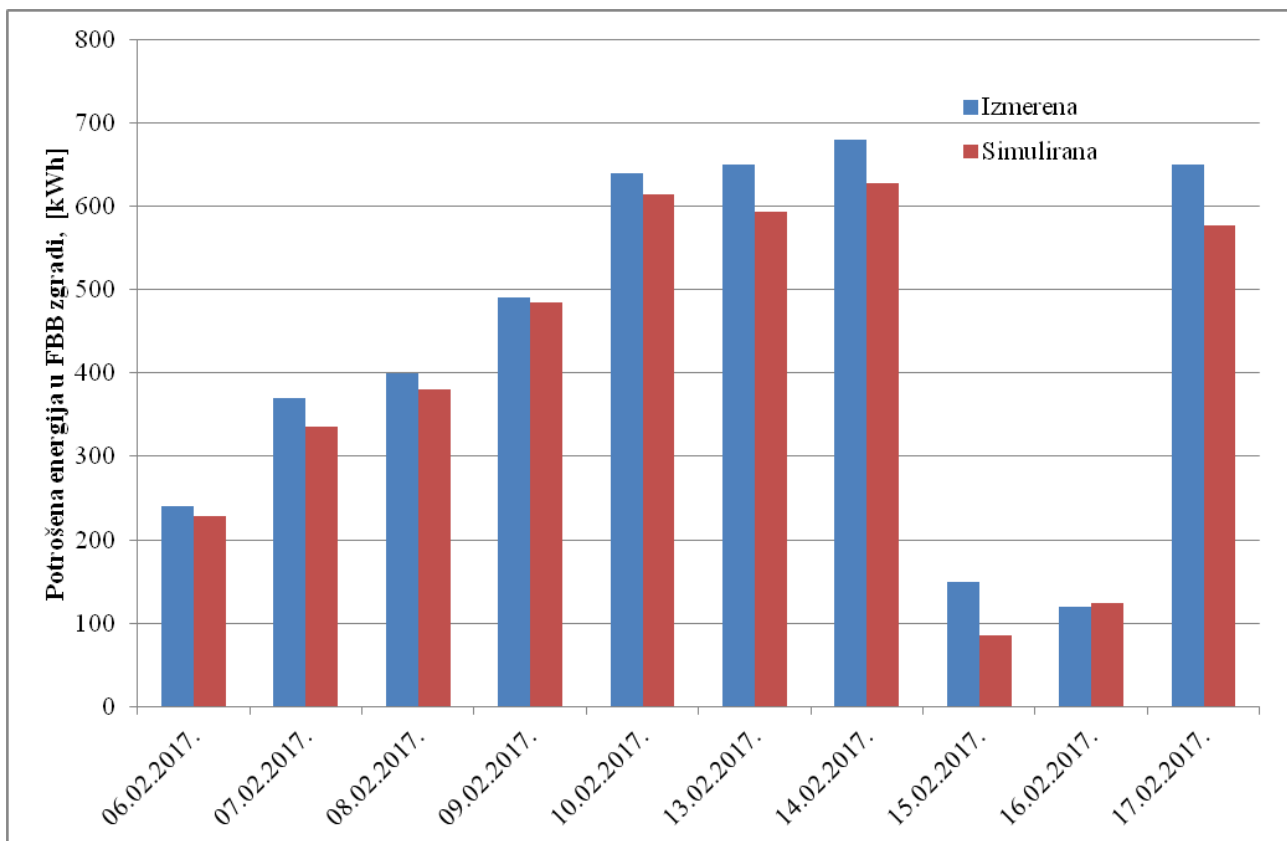
Promenljiva kalibracije	MBE [%]	CV(RMSE) [%]
Temperatura u <i>Hodnik galerije</i>	-7.79	7.90
Temperatura u <i>Direktor</i>	0.74	4.21
Temperatura u <i>Kancelarija 4</i>	7.77	10.87
Temperatura u <i>Kancelarija 5</i>	-4.65	4.83
Relativna vlažnost u <i>Hodnik galerije</i>	20.12	22.03
Relativna vlažnost u <i>Direktor</i>	10.46	16.22

### 5.3. Rezultati primene dnevnih operativnih strategija nakon primenjene analizi osetljivosti

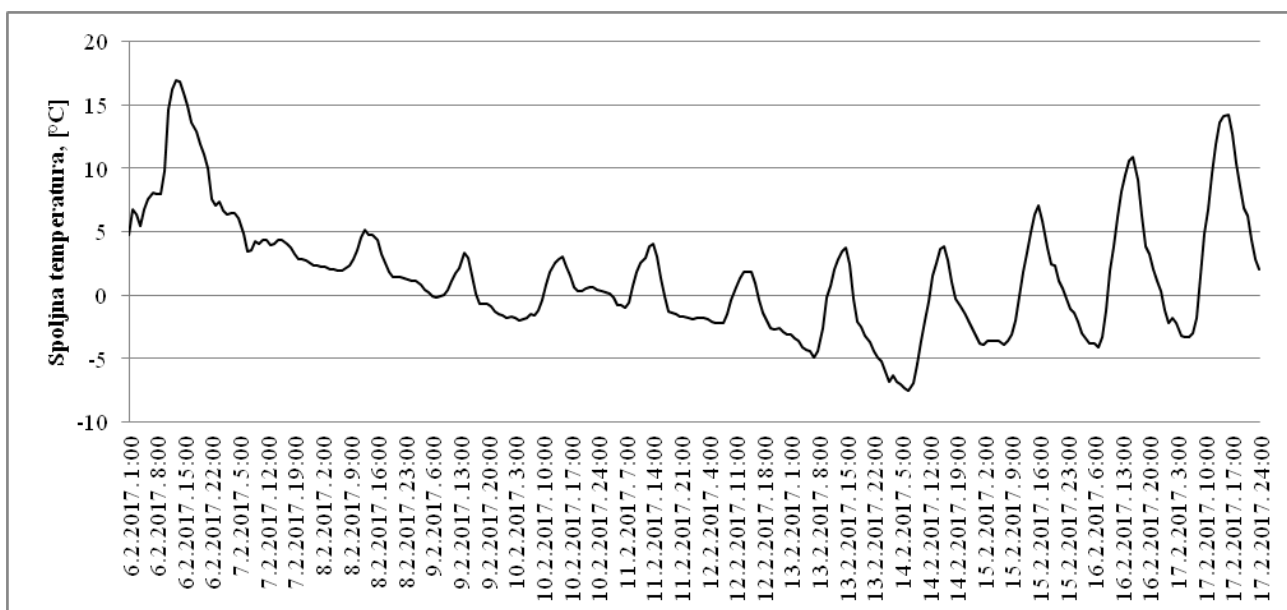
Pošto je eksperimentalno potvrđena mogućnost kreiranja operativnih strategija na osnovu kratkoročne vremenske prognoze, ispitana je mogućnost ovakvog pristupa sa brojem promenljivih koji je redukovan sprovođenjem analize osetljivosti na početku svakog novog horizonta planiranja. Za upoređenje rezultata dnevnih operativnih strategija sa redukovanim brojem promenljivih, korišćiće se rezultati dnevnih operativnih strategija sa punim brojem promenljivih (tabela 4.16) i situacija koja je postojala u realnoj zgradi, tačnije postojeće stanje sa uobičajenim radom sistema. Izabran je period od 06.02.2017. do 17.02.2017. koji je obuhvatao dve radne nedelje. Korišćeni su klimatski podaci iz aktuelne meteorološke godine. Optimalne vrednosti trenutnog horizonta izvršavanja su korišćene kao deo termičke istorije narednog horizonta planiranja.

#### *Postojeće stanje*

Izmerene i simulacijom dobijene vrednosti potrošnje toplotne energije u zgradi za radne dane u navedenom periodu su prikazane na slici 5.11, dok je na slici 5.12. prikazana promena spoljne temperature u istom periodu.



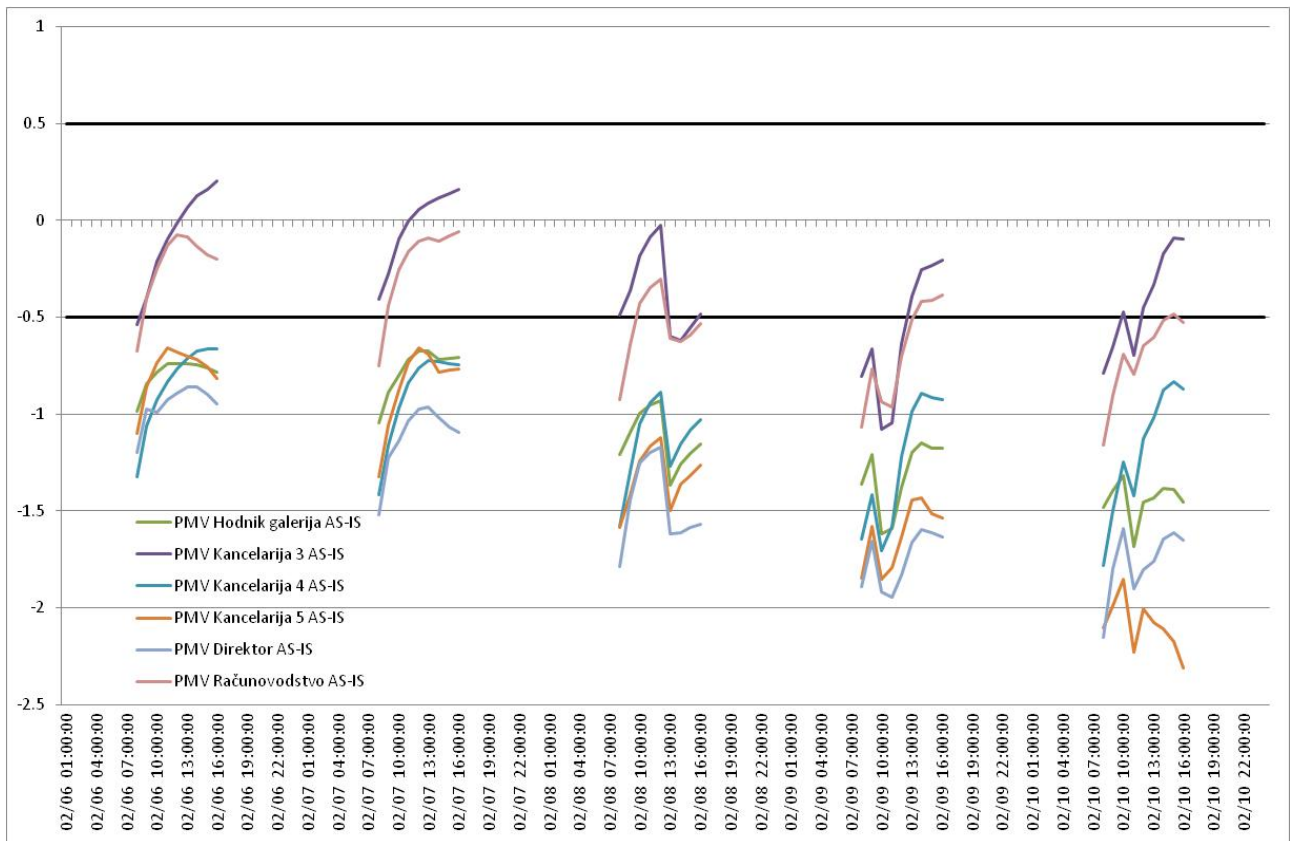
**Slika 5.11.** Upoređenje dnevne izmerene i simulirane potrošnje toplotne energije u FBB zgradi



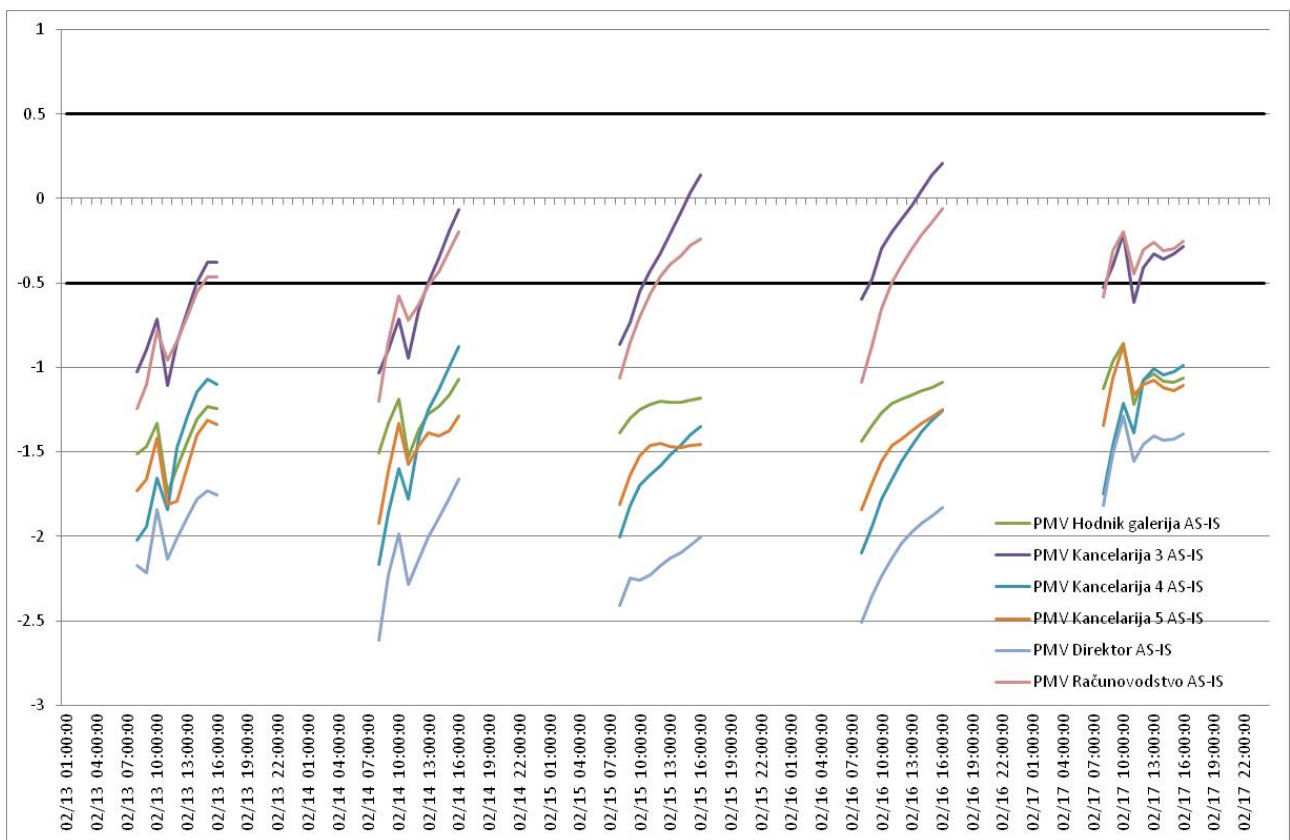
**Slika 5.12.** Promena spoljne temperature u analiziranom periodu

Kako je model kalibrisan za časovne predikcije unutrašnjih parametara u prostorijama od interesa i kalibrisan za dnevne predikcije potrošnje toplotne energije u zgradi, pretpostavlja se da model dobro predviđa i promenu PMV indeksa u navedenim prostorijama. PMV indeks u kancelarijama na spratu sa postojećim načinom rada sistema KGH je u većem delu vremena boravka ljudi bio van opsega komfora prema [156], što je i ilustrovano na slikama 5.13. i 5.14.





*Slika 5.13. Promena PMV indeksa, postojeće stanje, 06–10.02.2017.*



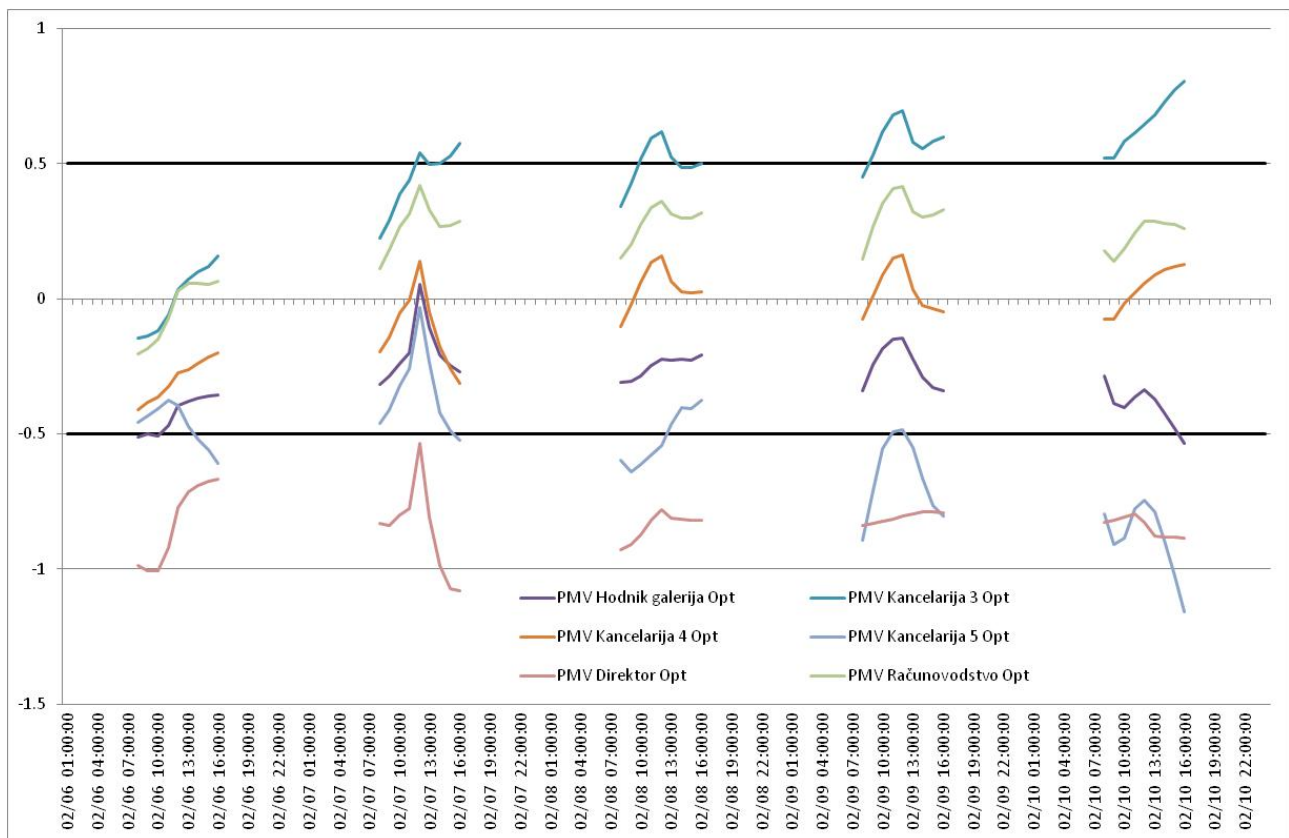
*Slika 5.14. Promena PMV indeksa, postojeće stanje, 13–17.02.2017.*



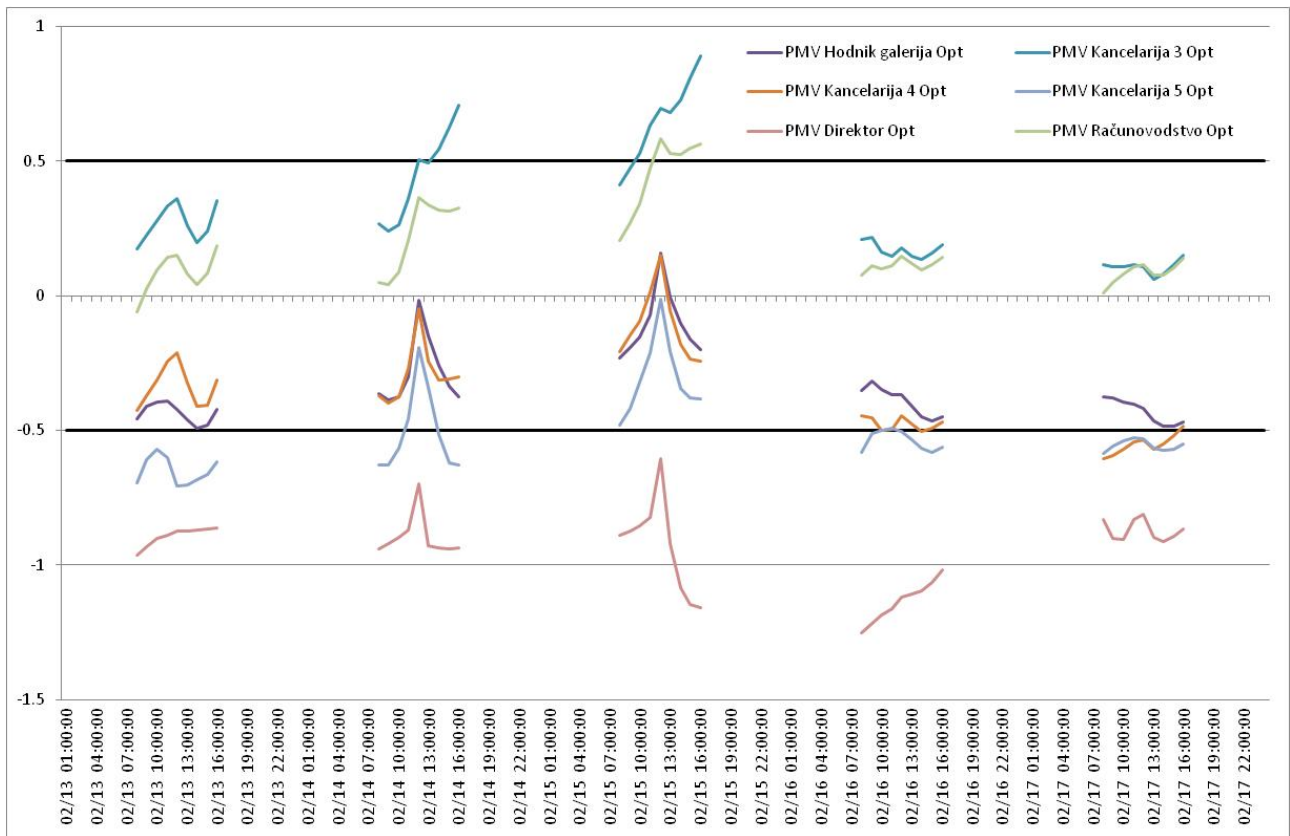
Razlog ovakvog stanja se ogleda u činjenici da sistemi rade u predefinisanim rasporedu (isporuka energije počinje radnim danima u 06:00 (u slučaju niskih spoljnih temperatura može se početi i ranije). Klima komora se uključuje po potrebi, i u posmatranom periodu je povremeno radila. Analizom izmerenih vrednosti potrošnje toplotne energije u celoj zgradi i grejaču klima komore, oko 9% potrošene energije u prvoj nedelji se trošilo na pripremu vazduha u klima komori (2043kWh je izmerena potrošnje cele zgrade). U drugoj nedelji potrošnja cele zgrade je iznosila 2007kWh, od čega se oko 10% trošilo na pripremu vazduha u sistemu klimatizacije.

#### *Dnevne operativne strategije sa punim brojem promenljivih*

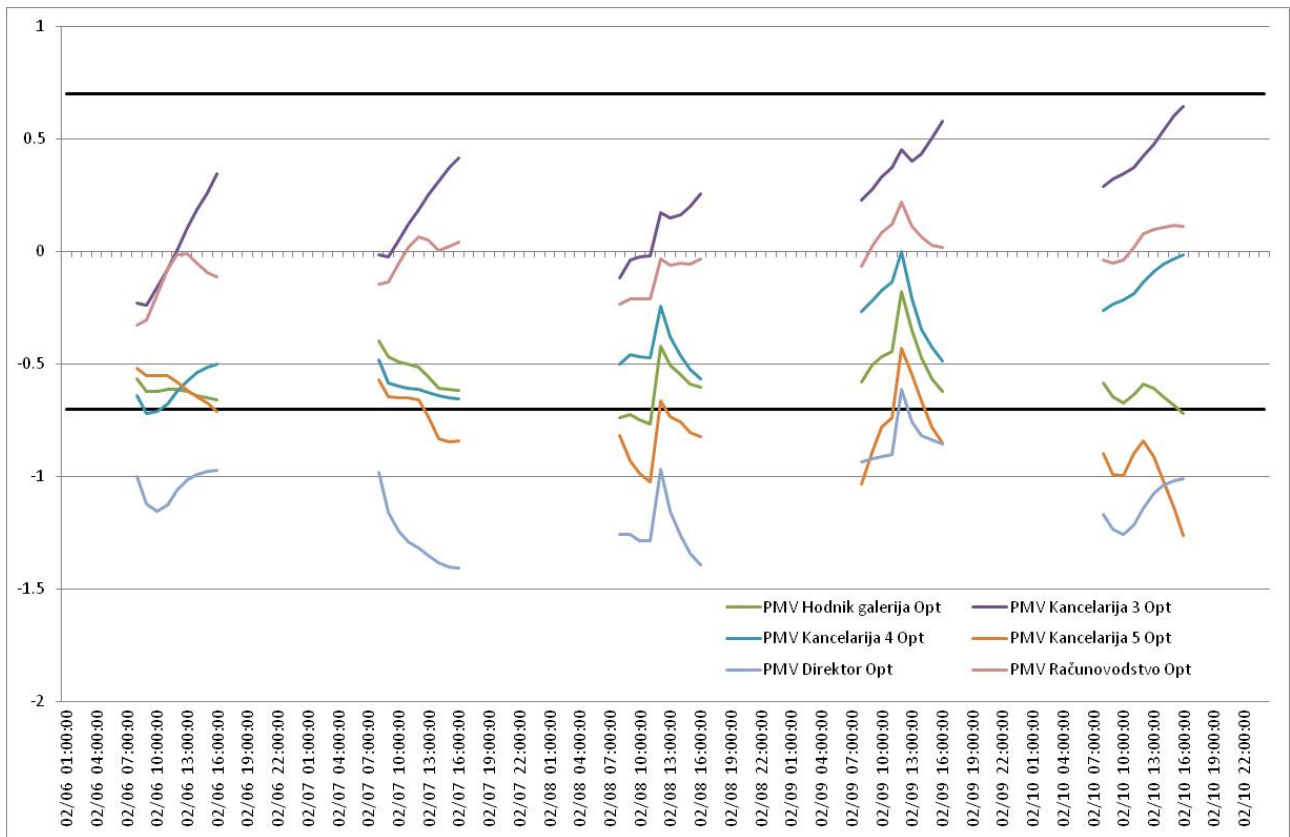
Kao referentni scenario, pored postojećeg stanja koriste se i rezultati metodologije primenjene za pun broj promenljivih (tabela 4.16) sa funkcijom cilja datoj jednačinom (4.7), koristeći podatke iz aktuelne meteorološke godine. Promena PMV indeksa u razmatranim zonama prikazana je na slikama 5.15. i 5.16, kada je ograničenje u jednačini (4.8) odgovaralo „B“ kategoriji prostora ( $-0.5 < PMV < 0.5$ ), odnosno slikama 5.17. i 5.18, kada je ograničenje odgovaralo „C“ kategoriji prostora ( $-0.7 < PMV < 0.7$ ).



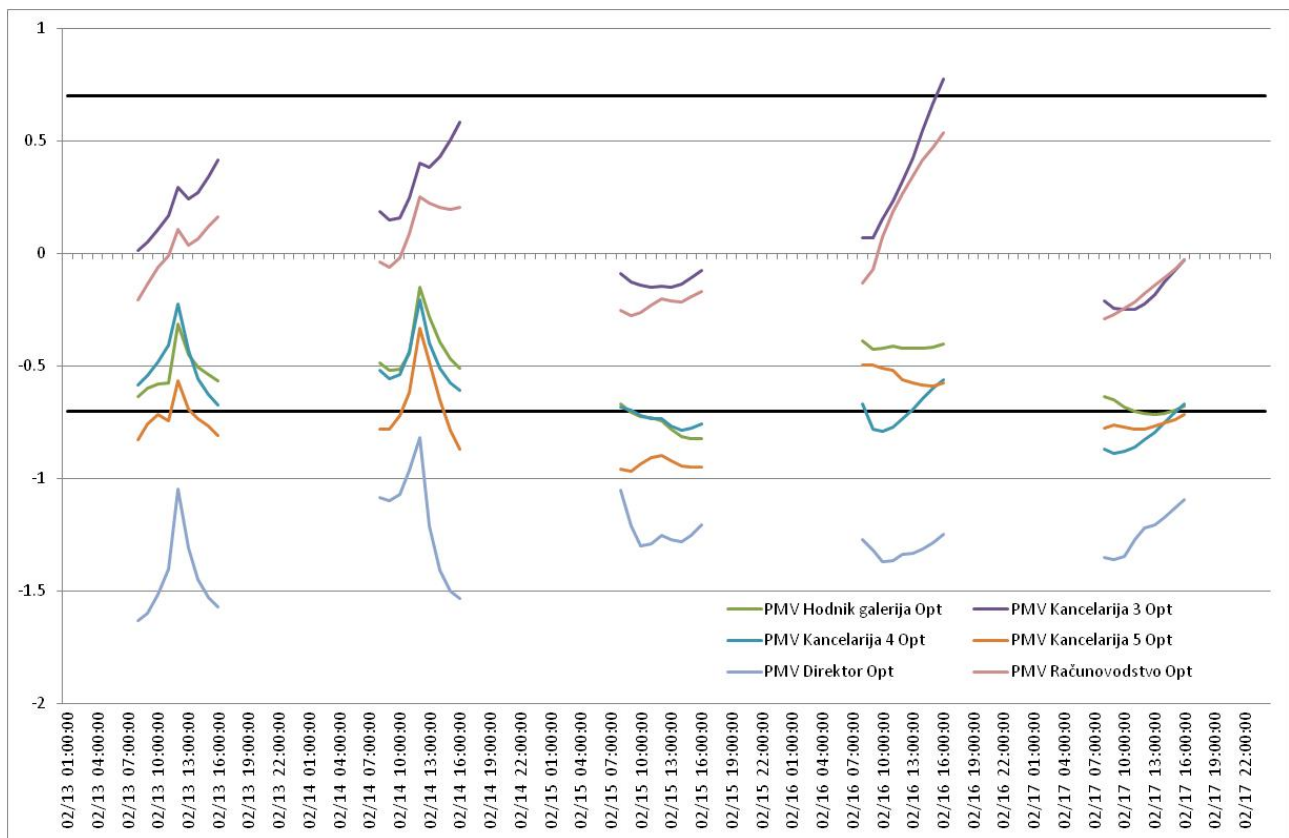
**Slika 5.15.** Promena PMV indeksa sa punim brojem promenljivih, 06–10.02.2017,  $\varepsilon=0.5$



Slika 5.16. Promena PMV indeksa sa punim brojem promenljivih, 13–17.02.2017,  $\epsilon=0.5$



Slika 5.17. Promena PMV indeksa sa punim brojem promenljivih, 06–10.02.2017,  $\epsilon=0.7$



**Slika 5.18.** Promena PMV indeksa sa punim brojem promenljivih, 13–17.02.2017,  $\varepsilon=0.7$

Implementacijom operativnih strategija sa punim brojem promenljivih, u periodu 06–10.02.2017. bilo bi potrebno 4146 kWh toplotne energije uz zadovoljenje ograničenja postavljenog na strani toplotnog komfora u granicama  $\varepsilon = 0.5$ , odnosno 3110 kWh toplotne energije uz zadovoljenje ograničenja u granicama  $\varepsilon = 0.7$ . Učešće sistema klimatizacije u potrošnji toplotne energije bi iznosilo 35% i 32%, respektivno.

Slično, u periodu 10–17.02.2017. bilo bi potrebno 3256 kWh toplotne energije za održavanje toplotnog komfora u granicama  $\varepsilon = 0.5$ , odnosno 2470 kWh toplotne energije za održavanje komfora u granicama  $\varepsilon = 0.7$ . U ovom periodu procentualno učešće klima komore u potrošnji energije iznosi 32.2% i 31.4% respektivno.

U odnosu na uobičajeno korišćenje sistema, primetan je porast potrošnje energije, koji se mahom ogleda kroz porast potrošnje energije za pripremu vazduha (zagrevanje) u klima komori.

#### *Analiza osetljivosti za PMV indeks toplotnog komfora u granicama $-0.5$ do $0.5$*

Rezultati sprovedene analize osetljivosti su prikazani u tabelama 5.6 (za period 06–10.02.2017) i 5.7 (13–17.02.2017) po ulaznim promenljivim iz tabele 4.16.

**Tabela 5.6.** Rezultati analize osetljivosti, 06–10.02.2017,  $\varepsilon=0.5$ 

Ulazna promenljiva	06–07. 02.	07–08. 02.	08–09. 02.	09–10. 02.	10–11. 02.
Protok vazduha	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 1.dana u prvom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 2.dana u prvom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 1.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 2.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 1.dana u trećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 2.dana u tećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 1.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 2.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 1.dana u prvom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 1.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 1.dana u trećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 1.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 2.dana u prvom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 2.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 2.dana u tećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 2.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Zadata temp. pripremljenog vazduha 1.dana u prvom bloku	NE	DA	DA	DA	DA
Zadata temp. pripremljenog vazduha 1.dana u drugom bloku	DA	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. pripremljenog vazduha 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. pripremljenog vazduha 1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. pripremljenog vazduha 2.dana u prvom bloku	NE	DA	DA	NE	NE
Zadata temp. pripremljenog vazduha 2.dana u drugom bloku	NE	DA	DA	DA	DA
Zadata temp. pripremljenog vazduha 2.dana u tećem bloku	DA	DA	DA	NE	DA
Zadata temp. pripremljenog vazduha 2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija1.dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija 1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija 2.dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo1.dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo2.dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Direktor 1.dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Direktor 1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Direktor 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Direktor 1.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Direktor 2.dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Direktor 2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Direktor 2.dana u tećem bloku	NE	NE	DA	DA	NE
Raspoloživost radijatora u Direktor 2.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 1.dana u prvom bloku	DA	NE	NE	NE	NE

**Tabela 5.6. nastavak**

Ulazna promenljiva	06-07. 02.	07-08. 02.	08-09. 02.	09-10. 02.	10-11. 02.
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 1.dana u drugom bloku	DA	NE	NE	NE	DA
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 1.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 2.dana u prvom bloku	NE	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 2.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 2.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Zadata temp. Hodnik galerija 1. i 2. dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Hodnik galerija 1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Hodnik galerija 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Hodnik galerija 1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Hodnik galerija 2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Hodnik galerija 2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Hodnik galerija 2.dana u četvrtom bloku	NE	DA	DA	NE	NE
Zadata temp. Računovodstvo 1. i 2. dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Računovodstvo 1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Računovodstvo 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Računovodstvo 1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Računovodstvo 2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Računovodstvo 2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Računovodstvo 2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Direktor 1. i 2. dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Direktor 1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Direktor 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Direktor 1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Direktor 2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Direktor 2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Direktor 2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 1. i 2. dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 1. i 2. dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Deo kapaciteta podstanice 1. i 2. dana u prvom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Deo kapaciteta podstanice 1.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Deo kapaciteta podstanice 1.dana u trećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Deo kapaciteta podstanice 1.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Deo kapaciteta podstanice 2.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Deo kapaciteta podstanice 2.dana u tećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Deo kapaciteta podstanice 2.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Ukupan broj osetljivih	33	35	36	33	34

**Tabela 5.7.** Rezultati analize osetljivosti, 13–17.02.2017,  $\varepsilon=0.5$ 

Ulazna promenljiva	13–14. 02.	14–15. 02.	15–16. 02.	16–17. 02.	17–18. 02.
Protok vazduha	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 1.dana u prvom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 2.dana u prvom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 1.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 2.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 1.dana u trećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 2.dana u tećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 1.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 2.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 1.dana u prvom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 1.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 1.dana u trećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 1.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 2.dana u prvom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 2.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 2.dana u tećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 2.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Zadata temp. pripremljenog vazduha 1.dana u prvom bloku	DA	NE	DA	DA	DA
Zadata temp. pripremljenog vazduha 1.dana u drugom bloku	DA	NE	DA	DA	DA
Zadata temp. pripremljenog vazduha 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. pripremljenog vazduha 1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. pripremljenog vazduha 2.dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. pripremljenog vazduha 2.dana u drugom bloku	DA	NE	NE	NE	DA
Zadata temp. pripremljenog vazduha 2.dana u tećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Zadata temp. pripremljenog vazduha 2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija1.dana u prvom bloku	DA	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija 1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija 2.dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija2.dana u drugom bloku	DA	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija2.dana u četvrtom bloku	NE	DA	NE	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo1.dana u prvom bloku	DA	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo2.dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Direktor 1.dana u prvom bloku	NE	DA	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Direktor 1.dana u drugom bloku	NE	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Direktor 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Direktor 1.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Direktor 2.dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Direktor 2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Direktor 2.dana u tećem bloku	DA	NE	DA	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Direktor 2.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 1.dana u prvom bloku	NE	DA	DA	NE	NE

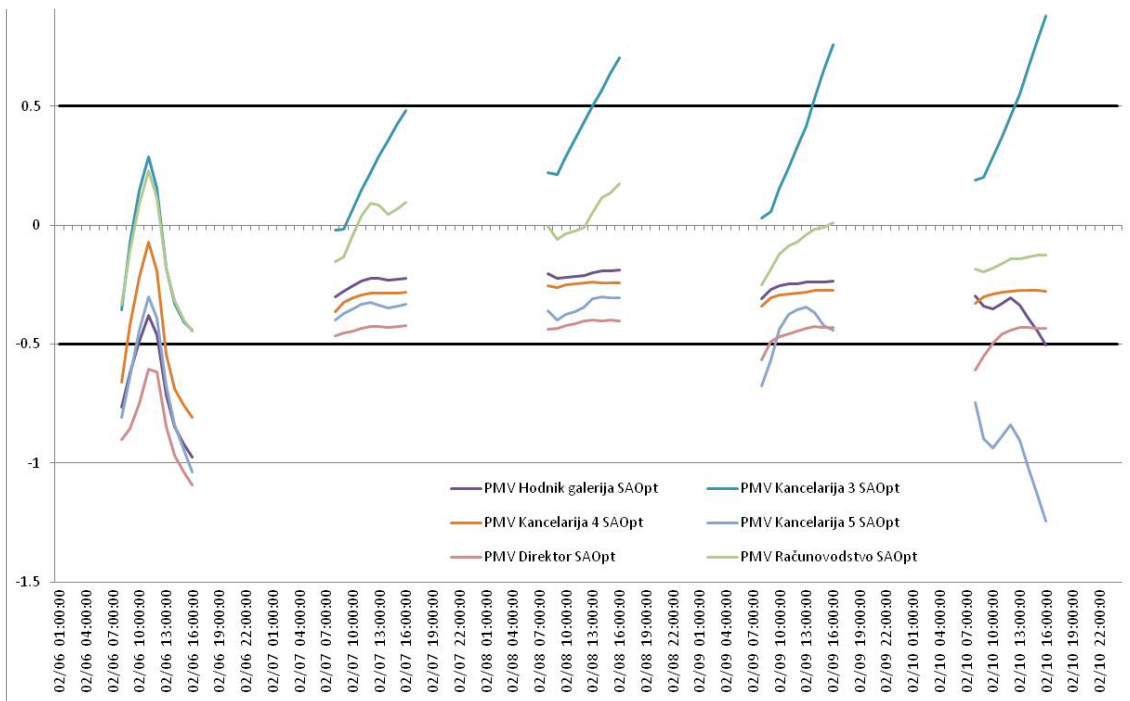
**Tabela 5.7.** nastavak

Ulazna promenljiva	13-14. 02.	14-15. 02.	15-16. 02.	16-17. 02.	17-18. 02.
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 1.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 1.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 2.dana u prvom bloku	DA	DA	DA	DA	NE
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 2.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 2.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	NE	DA
Zadata temp. Hodnik galerija 1. i 2. dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Hodnik galerija 1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Hodnik galerija 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Hodnik galerija 1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	DA	DA
Zadata temp. Hodnik galerija 2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Hodnik galerija 2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Hodnik galerija 2.dana u četvrtom bloku	DA	NE	DA	NE	NE
Zadata temp. Računovodstvo 1. i 2. dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Računovodstvo 1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Računovodstvo 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Računovodstvo 1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Računovodstvo 2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Računovodstvo 2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Računovodstvo 2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	DA	DA
Zadata temp. Direktor 1. i 2. dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Direktor 1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Direktor 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Direktor 1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Direktor 2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Direktor 2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Direktor 2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 1. i 2. dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 1. i 2. dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 1.dana u drugom bloku	NE	DA	DA	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Deo kapaciteta podstanice 1. i 2. dana u prvom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Deo kapaciteta podstanice 1.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Deo kapaciteta podstanice 1.dana u trećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Deo kapaciteta podstanice 1.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Deo kapaciteta podstanice 2.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Deo kapaciteta podstanice 2.dana u tećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Deo kapaciteta podstanice 2.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Ukupan broj osetljivih	40	37	39	39	40

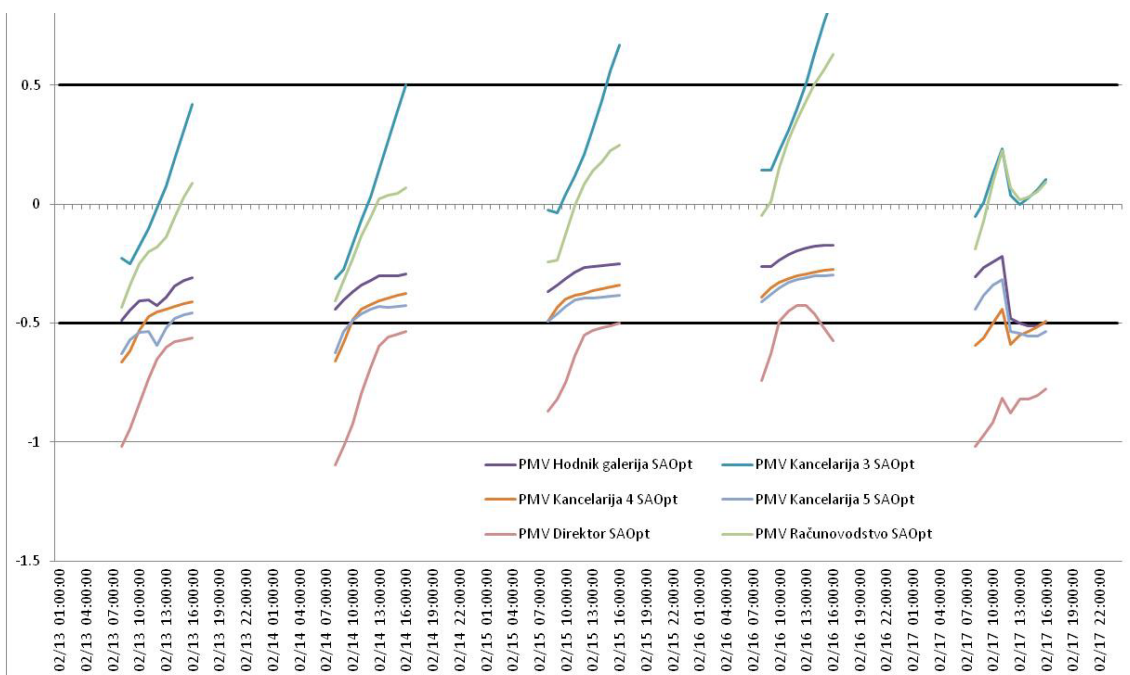


Ono što je uočljivo iz tabela jeste da su energija ili ograničenje na strani toplotnog komfora po pravilu bili osetljivi na promene u radu klima komore (protok vazduha, raspoloživost klima komore i zadatu temperaturu pripremljenog vazduha delimično), kapaciteta toplotne podstanice, i delom na promene u statusu raspoloživosti radijatora u zonama u periodu nekorišćenja, čime je identifikovan značaj akumulacije energije u termičkoj masi objekta.

Promene PMV indeksa u zonama, nakon optimizacije sa redukovanim brojem promenljivih ilustrovane su na slikama 5.19. i 5.20.



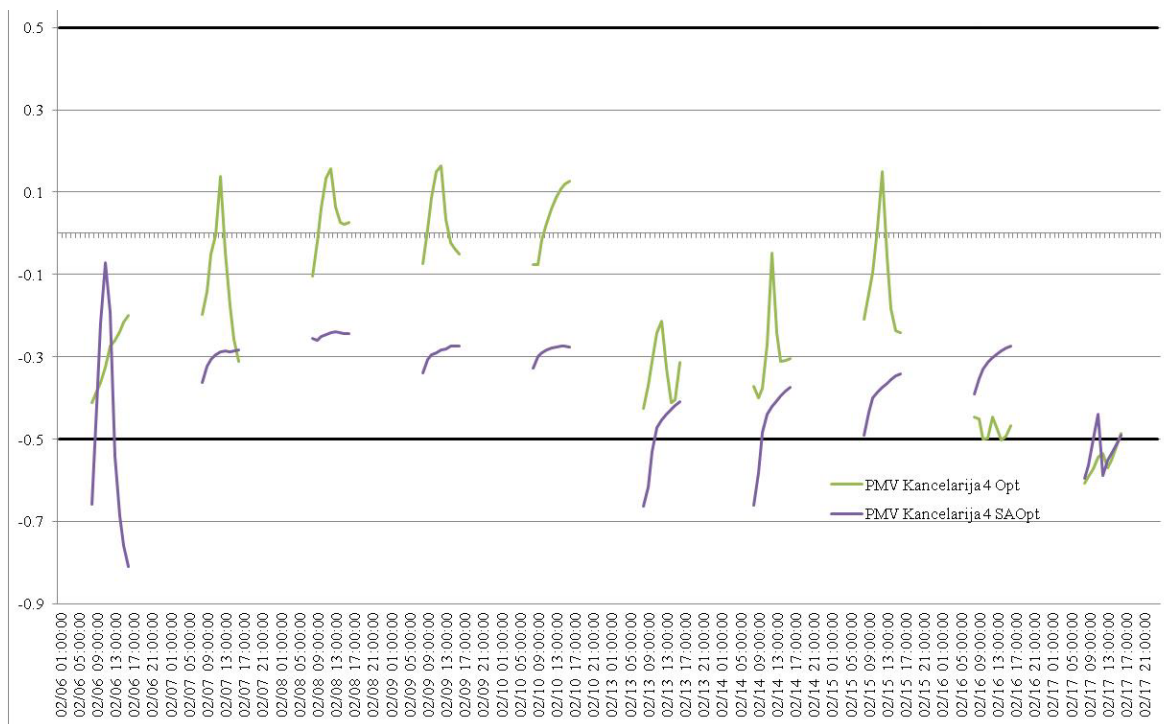
**Slika 5.19.** Promena PMV indeksa nakon redukcije broja promenljivih, 06–10.02.2017,  $\epsilon = 0.5$



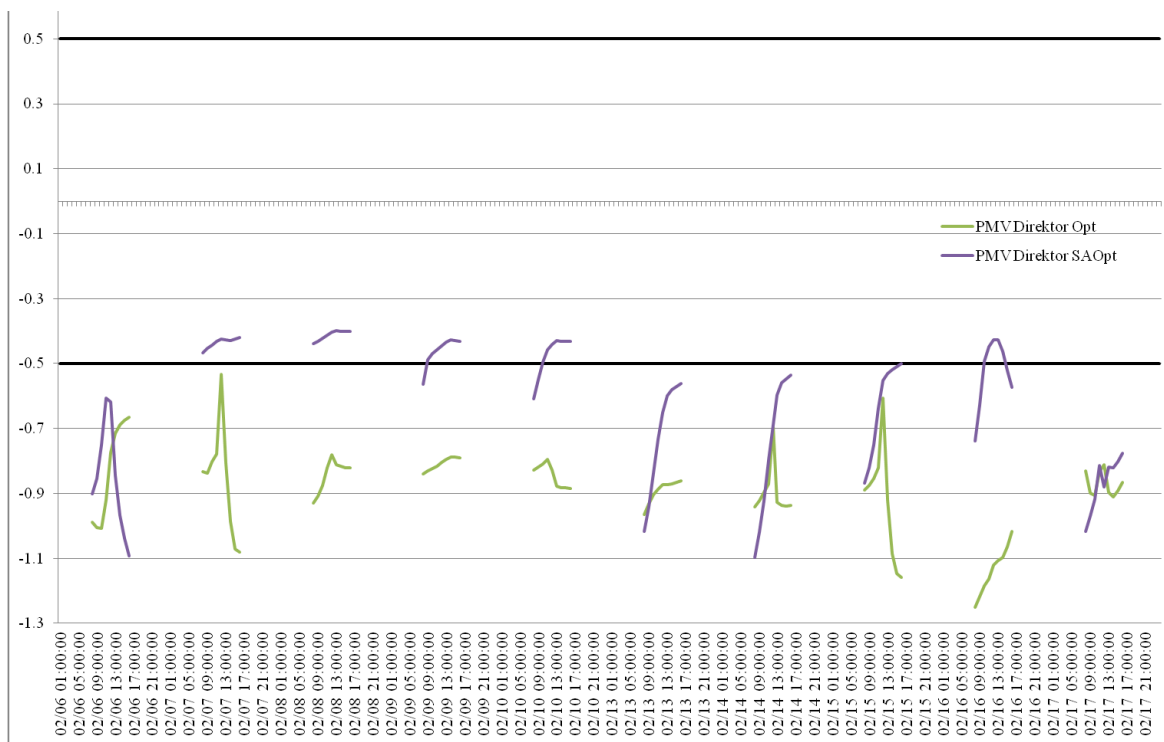
**Slika 5.20.** Promena PMV indeksa nakon redukcije broja promenljivih, 13–17.02.2017,  $\epsilon = 0.5$



Upoređenjem rezultata prikazanih na slikama 5.19. i 5.20, sa rezultatima prikazanim na slikama 5.15. i 5.16. može se uočiti da u većini zona ne dolazi do značajnijih odstupanja na strani toplotnog komfora. Za ilustraciju su usvojene dve prostorije i to: *kancelarija 4 i direktor*, pa su na slikama 5.21. i 5.22. uporedno predstavljene promene PMV indeksa dobijene postupcima sa punim i redukovanim brojem promenljivih.

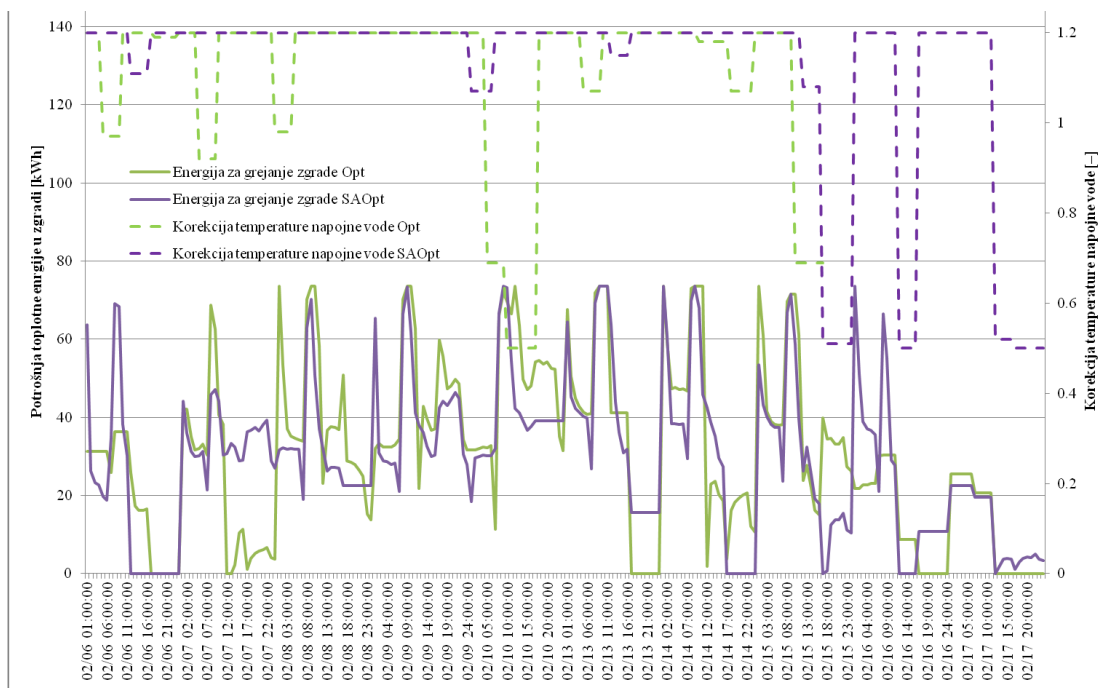


**Slika 5.21.** Promena PMV indeksa u kancelariji 4, 06–17. 2. 2017,  $\epsilon=0.5$

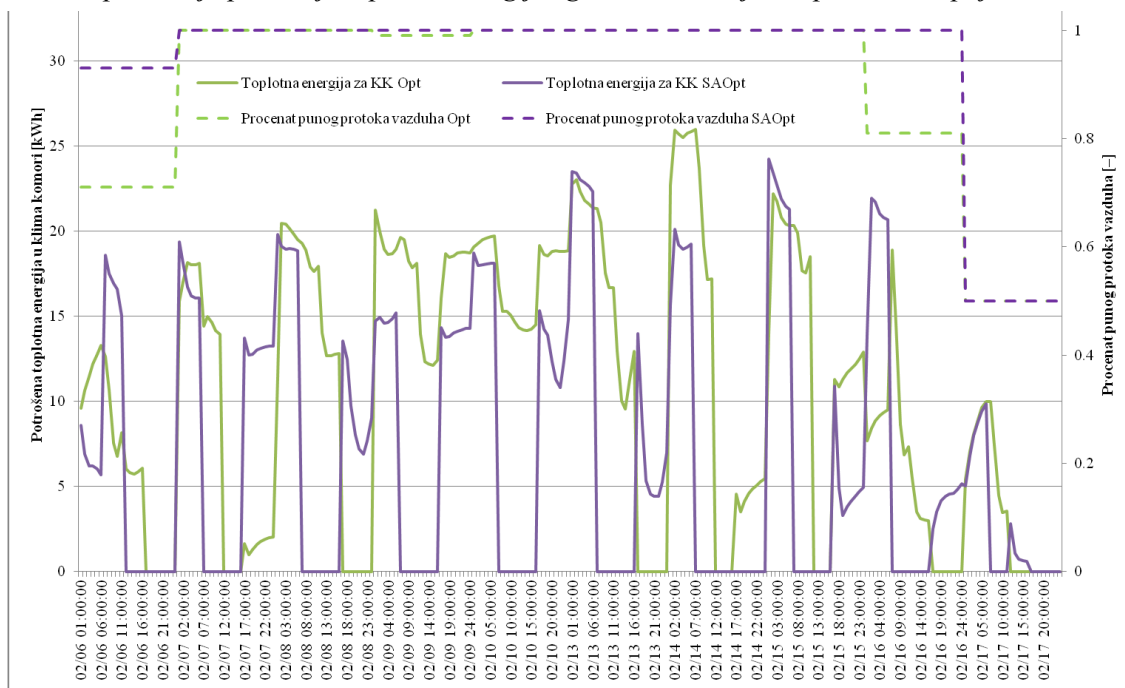


**Slika 5.22.** Promena PMV indeksa u kancelariji direktora, 06–17.02.2017,  $\epsilon=0.5$

Potrošnja energije u zgradi u razmatranim periodima se smanjila: za 5.02% u prvom periodu (smanjenje sa 4146 kWh na 3937 kWh) i za 1.37% u drugom (smanjenje sa 3256 kWh na 3211 kWh). Upoređenjem vrednosti potrebne snage podstanice i korekcija temperature napojne vode dobijenih postupcima sa punim i redukovanim brojem promenljivih (slika 5.23), može se uočiti da su kod oba postupka korekcije temperature napojne vode bile uglavnom na gornjoj vrednosti opsega (20% povećanje), pri čemu je postupkom sa analizom osetljivosti ređe bilo prekida u isporuci energije zgradi, tj. bolje je iskorišćena termička masa objekta. Poslednja konstatacija je potvrđena uvidom u potrošnju energije za zagrevanje vazduha u klima komori i promenu protoka vazduha u sistemu klimatizacije (slika 5.24), jer je udeo energije potrošen za pripremu vazduha u klima komori značajno smanjen (na 24% u prvom periodu i 21% u drugom).



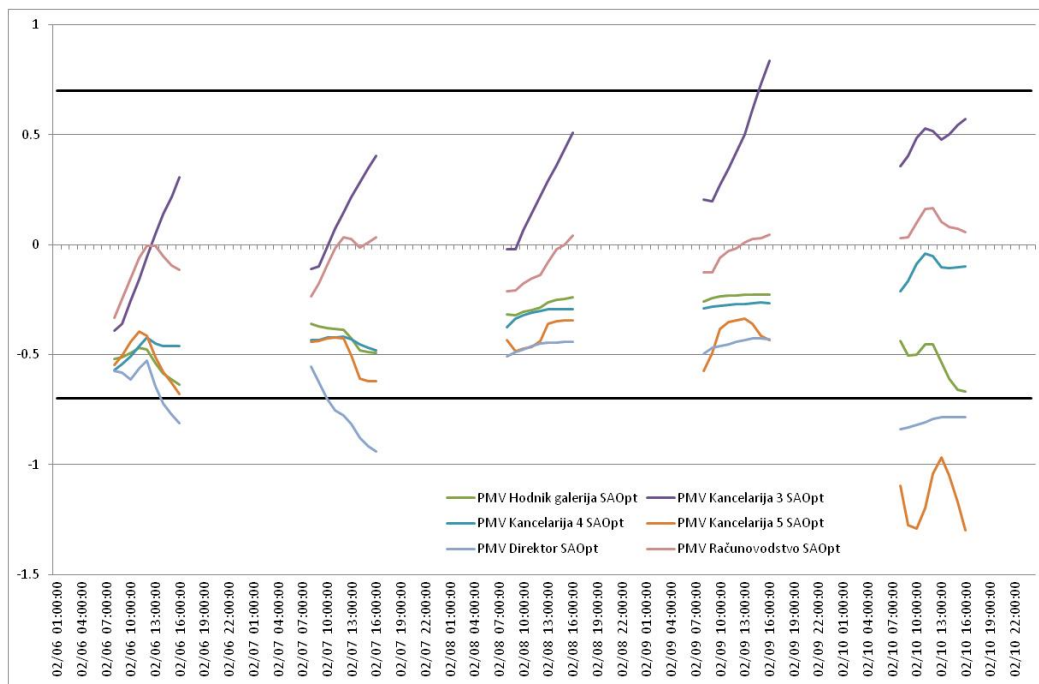
Slika 5.23. Upoređenje potrošnje toplotne energije zgrade i korekcije temperature napojne vode za  $\epsilon=0.5$



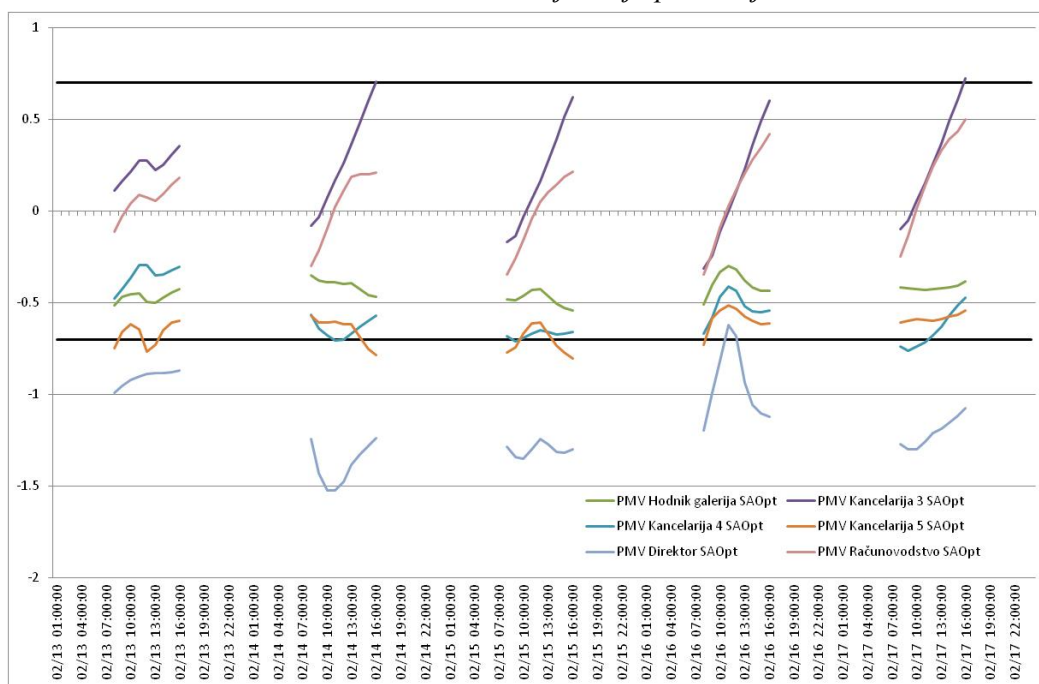
Slika 5.24. Upoređenje potrošnje toplotne energije u klima komori i protoka vazduha za  $\epsilon=0.5$

### Analiza osetljivosti za PMV indeks toplotnog komfora u granicama $-0.7$ do $0.7$

Promenom ograničenja termičkog komfora i smanjenjem na vrednost  $-0.7$  do  $0.7$ , ne dolazi značajno do promene u strukturi osetljivih ulaznih promenljivih u odnosu na strože ograničenje (i dalje su energija i osrednjeni PMV indeks komfora najosetljiviji na promenljive kojima se definiše rad klima komore i potrebna toplotna snaga zgrade), ali je primetna veća disperzija raspoloživosti radijatora u većini zona, što je i prikazano u tabelama 5.8. i 5.9. Promene PMV indeksa u zonama, nakon optimizacije sa redukovanim brojem promenljivih ilustrovane su na slikama 5.25 i 5.26.

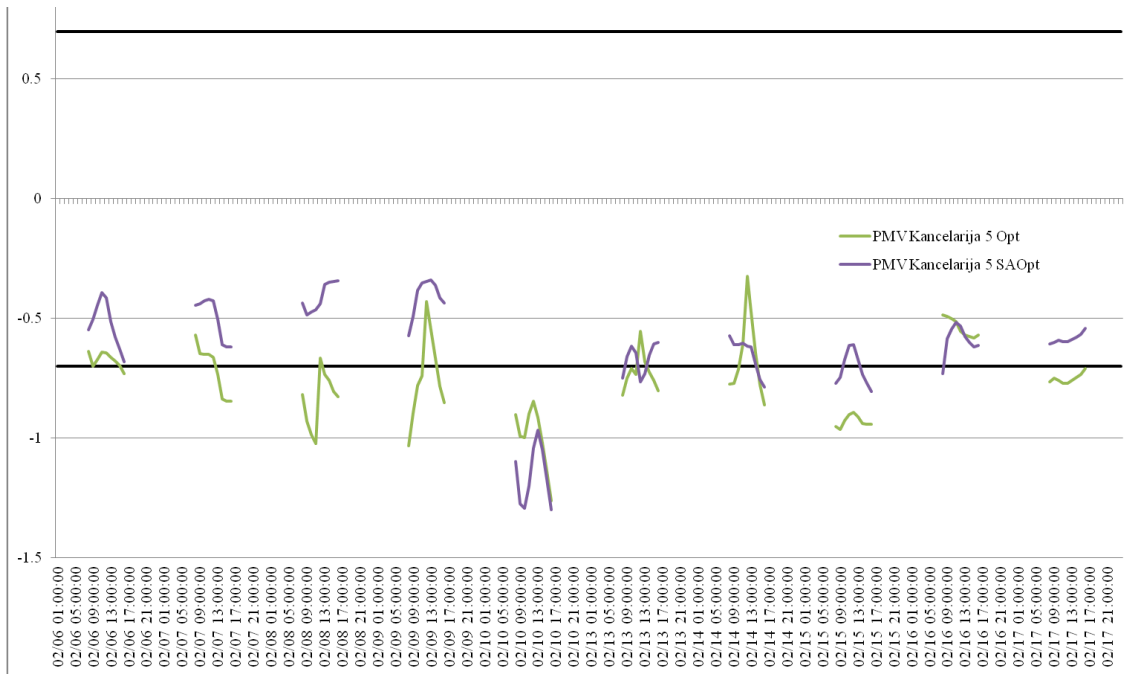


Slika 5.25. Promena PMV indeksa nakon redukcije broja promenljivih, 06–10.02.2017,  $\varepsilon=0.7$

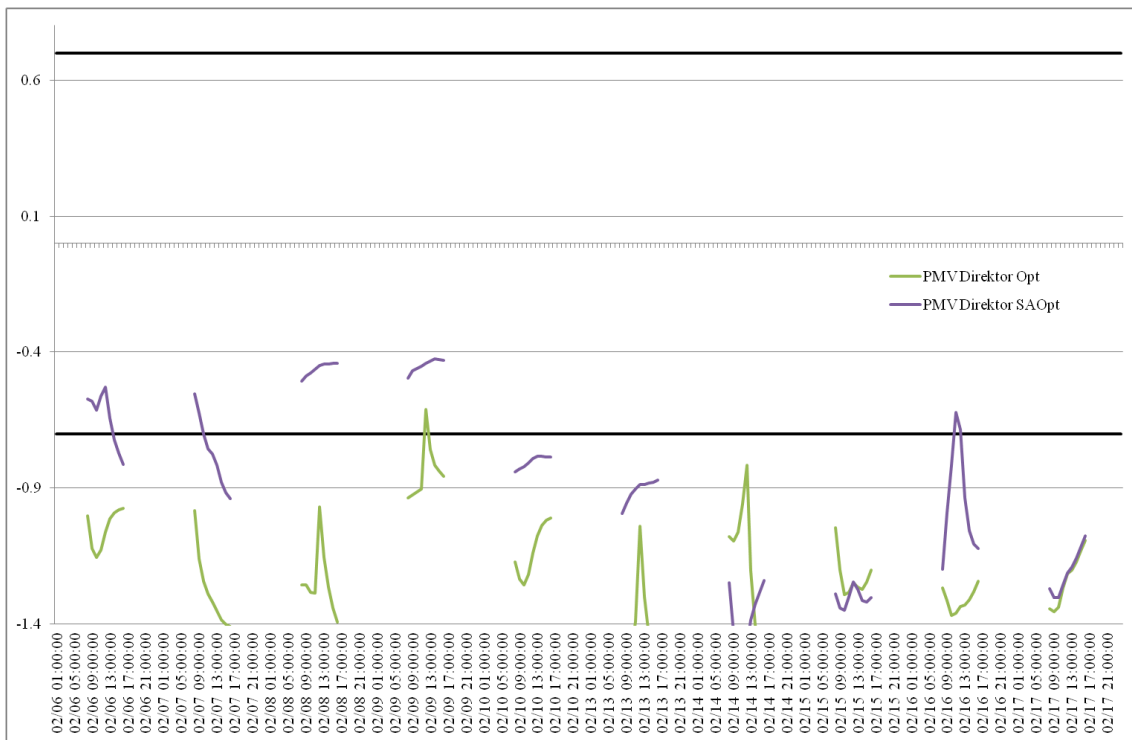


Slika 5.26. Promena PMV indeksa nakon redukcije broja promenljivih, 13–17.02.2017,  $\varepsilon=0.7$

I u ovom slučaju upoređenjem rezultata dobijenih postupkom sa punim (slike 5.17. i 5.18) i redukovanim (slike 5.25. i 5.26) brojem promenljivih ne postoji veliko odstupanje u promenama PMV indeksa u zonama, već delimično i do poboljšanja, kao npr. u prostorijama *kancelarija 5* i *direktor*, što je i ilustrovano na slikama 5.27. i 5.28 respektivno.



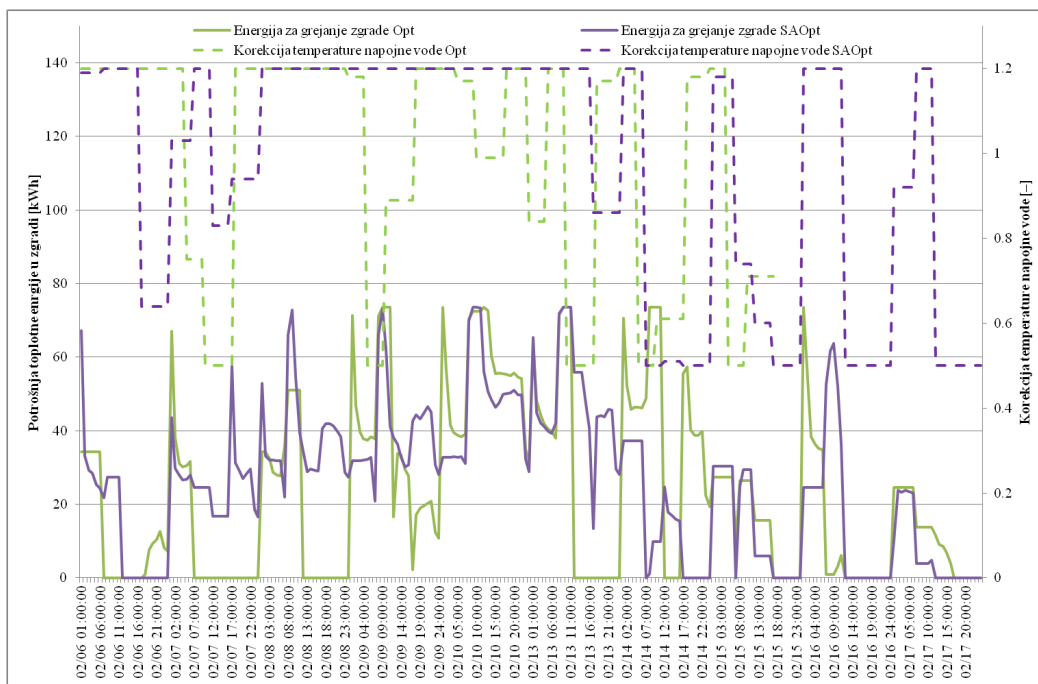
**Slika 5.27.** Promena PMV indeksa u kancelariji 5, 06–17.02.2017,  $\varepsilon=0.7$



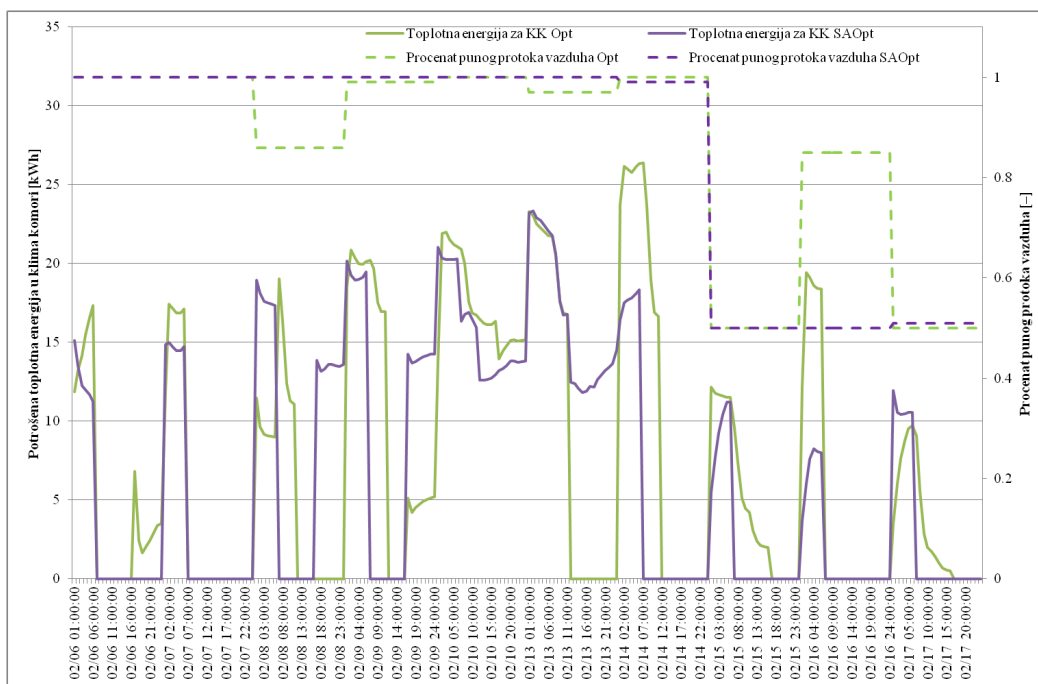
**Slika 5.28.** Promena PMV indeksa u kancelariji direktora, 06–17.02.2017,  $\varepsilon=0.7$

Što se potrošnje energije u zgradi tiče, primetan je porast potrošnje energije u zgradi u prvom periodu od 27.5% (sa 3110 kWh za pun broj promenljivih na 3965 kWh za redukovan broj

promenljivih) usled redih prekida u radu sistema, ali i smanjenje potrošnje energije u zgradi u drugom periodu za 3.08% (sa 2470 kWh na 2388 kWh) što je ilustrovano na slici 5.29. Trend smanjenja korišćenja klima komore je zadržan i u ovom slučaju, jer je procentualno ušće potrošnje toplotne energije za zagrevanje vazduha u sistemu klimatizacije iznosilo 24.84% u prvom periodu i 23.76% u drugom periodu (slika 5.30), što je posledica korišćenja akumulacije energije u masi zgrade.



**Slika 5.29.** Upoređenje potrošnje toplotne energije zgrade i korekcije temperature napojne vode za  $\epsilon=0.7$



**Slika 5.30.** Upoređenje potrošnje toplotne energije u klima komori i protoka vazduha za  $\epsilon=0.7$

**Tabela 5.8.** Rezultati analize osetljivosti, 06–10.02.2017,  $\varepsilon=0.7$ 

Ulazna promenljiva	06–07. 02.	07–08. 02.	08–09. 02.	09–10. 02.	10–11. 02.
Protok vazduha	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 1.dana u prvom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 2.dana u prvom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 1.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 2.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 1.dana u trećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 2.dana u tećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 1.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 2.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 1.dana u prvom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 1.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 1.dana u trećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 1.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 2.dana u prvom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 2.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 2.dana u tećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 2.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Zadata temp. pripremljenog vazduha 1.dana u prvom bloku	NE	DA	DA	DA	DA
Zadata temp. pripremljenog vazduha 1.dana u drugom bloku	DA	NE	NE	NE	DA
Zadata temp. pripremljenog vazduha 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. pripremljenog vazduha 1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. pripremljenog vazduha 2.dana u prvom bloku	NE	NE	NE	DA	NE
Zadata temp. pripremljenog vazduha 2.dana u drugom bloku	NE	DA	DA	DA	DA
Zadata temp. pripremljenog vazduha 2.dana u tećem bloku	DA	DA	NE	DA	DA
Zadata temp. pripremljenog vazduha 2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija1.dana u prvom bloku	NE	NE	NE	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija 1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija 2.dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	DA	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	DA	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo1.dana u prvom bloku	NE	DA	NE	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo2.dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Direktor 1.dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Direktor 1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Direktor 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Direktor 1.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Direktor 2.dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Direktor 2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Direktor 2.dana u tećem bloku	NE	NE	DA	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Direktor 2.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 1.dana u prvom bloku	DA	NE	NE	NE	NE

**Tabela 5.8.** nastavak

Ulazna promenljiva	06–07. 02.	07–08. 02.	08–09. 02.	09–10. 02.	10–11. 02.
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 1.dana u drugom bloku	DA	DA	NE	NE	DA
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 1.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 2.dana u prvom bloku	NE	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 2.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 2.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Zadata temp. Hodnik galerija 1. i 2. dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Hodnik galerija 1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Hodnik galerija 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Hodnik galerija 1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Hodnik galerija 2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Hodnik galerija 2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Hodnik galerija 2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	DA	DA
Zadata temp. Računovodstvo 1. i 2. dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Računovodstvo 1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Računovodstvo 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Računovodstvo 1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Računovodstvo 2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Računovodstvo 2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Računovodstvo 2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Direktor 1. i 2. dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Direktor 1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Direktor 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Direktor 1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Direktor 2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Direktor 2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Direktor 2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 1. i 2. dana u prvom bloku	NE	NE	NE	DA	NE
Zadata temp. Kanc4 1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 1. i 2. dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	DA	NE
Zadata temp. Kanc5 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Deo kapaciteta podstanice 1. i 2. dana u prvom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Deo kapaciteta podstanice 1.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Deo kapaciteta podstanice 1.dana u trećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Deo kapaciteta podstanice 1.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Deo kapaciteta podstanice 2.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Deo kapaciteta podstanice 2.dana u tećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Deo kapaciteta podstanice 2.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Ukupan broj osetljivih	33	35	33	43	40

**Tabela 5.9.** Rezultati analize osetljivosti, 13–17.02.2017,  $\varepsilon=0.7$ 

Ulazna promenljiva	13–14. 02.	14–15. 02.	15–16. 02.	16–17. 02.	17–18. 02.
Protok vazduha	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 1.dana u prvom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 2.dana u prvom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 1.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 2.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 1.dana u trećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 2.dana u tećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 1.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Korekcija sračunate temperature 2.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 1.dana u prvom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 1.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 1.dana u trećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 1.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 2.dana u prvom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 2.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 2.dana u tećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost klima komore 2.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Zadata temp. pripremljenog vazduha 1.dana u prvom bloku	DA	NE	DA	NE	DA
Zadata temp. pripremljenog vazduha 1.dana u drugom bloku	NE	NE	DA	DA	DA
Zadata temp. pripremljenog vazduha 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. pripremljenog vazduha 1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. pripremljenog vazduha 2.dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. pripremljenog vazduha 2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	DA
Zadata temp. pripremljenog vazduha 2.dana u tećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Zadata temp. pripremljenog vazduha 2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija1.dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija 1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija 2.dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Hodnik galerija2.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo1.dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo1.dana u drugom bloku	DA	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo2.dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Računovodstvo2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Direktor 1.dana u prvom bloku	NE	DA	DA	DA	NE
Raspoloživost radijatora u Direktor 1.dana u drugom bloku	NE	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Direktor 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Direktor 1.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Direktor 2.dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Direktor 2.dana u drugom bloku	DA	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Direktor 2.dana u tećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Direktor 2.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Kanc5 1.dana u prvom bloku	NE	DA	DA	DA	DA



**Tabela 5.9.** nastavak

Ulazna promenljiva	13– 14.02.	14– 15.02.	15– 16.02.	16– 17.02.	17– 18.02.
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 1.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 1.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 2.dana u prvom bloku	DA	DA	DA	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 2.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Raspoloživost radijatora u Kanc4 i Kanc5 2.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Zadata temp. Hodnik galerija 1. i 2. dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Hodnik galerija 1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Hodnik galerija 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Hodnik galerija 1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	DA	DA
Zadata temp. Hodnik galerija 2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Hodnik galerija 2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Hodnik galerija 2.dana u četvrtom bloku	NE	DA	DA	NE	DA
Zadata temp. Računovodstvo 1. i 2. dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Računovodstvo 1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Računovodstvo 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Računovodstvo 1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Računovodstvo 2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Računovodstvo 2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Računovodstvo 2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	DA	DA
Zadata temp. Direktor 1. i 2. dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Direktor 1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	DA
Zadata temp. Direktor 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Direktor 1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Direktor 2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Direktor 2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Direktor 2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 1. i 2. dana u prvom bloku	NE	DA	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 1.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc4 2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 1. i 2. dana u prvom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 1.dana u drugom bloku	DA	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 1.dana u trećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 1.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 2.dana u drugom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 2.dana u tećem bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Zadata temp. Kanc5 2.dana u četvrtom bloku	NE	NE	NE	NE	NE
Deo kapaciteta podstanice 1. i 2. dana u prvom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Deo kapaciteta podstanice 1.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Deo kapaciteta podstanice 1.dana u trećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Deo kapaciteta podstanice 1.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Deo kapaciteta podstanice 2.dana u drugom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Deo kapaciteta podstanice 2.dana u tećem bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Deo kapaciteta podstanice 2.dana u četvrtom bloku	DA	DA	DA	DA	DA
Ukupan broj osetljivih	38	39	40	40	42

Primena oba postupka (sa punim i redukovanim brojem promenljivih) izrade operativnih strategija, je u poređenju sa postojećim stanjem dovela do:

- značajnog poboljšanja PMV indeksa toplotnog komfora u većini posmatranih prostorija,
- povećanja potrošnje toplotne energije u zgradi kao posledicu ranijeg uključivanja sistema i češćeg rada sistema klimatizacije.

Za oba definisana ograničenja na strani PMV indeksa komfora su primenom analize osetljivosti kao prvog koraka u izradi dnevnih operativnih strategija postignuti sledeći rezultati:

- ostvareni PMV indeks toplotnog komfora je u većini prostorija bio blizak vrednostima postignutim postupkom sa punim brojem promenljivih, dok je u određenim prostorijama dolazilo i do poboljšanja,
- smanjen je udeo potrošnje toplotne energije za pripremu vazduha u sistemu klimatizacije, korišćenjem akumulacije energije u termičkoj masi zgrade, a sve kao posledica intenzivnijeg rada sistema radijatorskog grejanja,
- u većini analiziranih slučajeva dolazi do smanjene potrošnje energije za grejanje cele zgrade,
- dobijeni radni parametri sistema (korekcije temperature napojne vode, protok vazduha i temperatura pripremljenog vazduha sistema klimatizacije) su slični vrednostima ostvarenim postupkom sa punim brojem promenljivim.

Osnovni razlog ovakvih rezultata je u činjenici da je smanjeni broj nezavisno promenljivih u postupku optimizacije (smanjena je i veličina populacije u PSO algoritmu), doveo do bržeg nalaženja rešenja koja zadovoljavaju postavljena ograničenja na strani toplotnog komfora, pa je u većem broju generacija vršena minimizacija potrošnje energije bez narušavanja pomenutog ograničenja.

## 6. Zaključci

U ovoj doktorskoj disertaciji prikazana je opšta metodologija izrade dnevnih operativnih strategija rada postojećih sistema grejanja i klimatizacije pomoću modela kreiranog detaljnim simulacionim alatom, realizovana preko pomerajućeg horizonta planiranja (optimizacije), uz korišćenje podataka sadržanih u kratkoročnim vremenskim prognozama. Za potrebe smanjenja broja nezavisno promenljivih u postupku optimizacije uvedena je Monte Carlo analiza osetljivosti. Analiza osetljivosti se sprovodi sa rezultatima dobijenim detaljnim simulacionim alatom.

Pregledom naučne literature pokazani su značaj i aktuelnost razmatranog problema, tačnije korišćenja detaljnih simulacionih alata kao podrške u dnevnom radu sistema grejanja i klimatizacije.

Razvijeno je softversko rešenje za definisanje radnih parametara upravljačkih sistema postrojenja grejanja i klimatizacije. Softversko rešenje je zasnovano na optimizaciji rojevima čestica primenom dobro poznatog i intenzivno korišćenog detaljnog simulacionog alata EnergyPlus, koje pored podataka o potrošnji energije koristi i simulacijom dobijene rezultate predikcije PMV indeksa toplotnog komfora. Softversko rešenje je fleksibilno sa stanovišta definisanja funkcije cilja čiji se jedan ili više članova izračunavaju iz rezultata simulacija. Metodologija je takođe fleksibilna i omogućava slobodno definisanje horizonta planiranja, horizonta izvršavanja i vremenskog koraka u kome se nezavisno promenljive optimizacije smatraju konstantnim. Rezultati predložene metodologije su verifikovani primerom primene na zgradi preduzeća „Feniks BB“ iz Niša.

Kako je metodologija razvijena za izvedene zgrade i sisteme grejanja i klimatizacije, sproveden je postupak kalibracije simulacionog modela zgrade kreiranog u EnergyPlus. Za potrebe kalibracije iskorišćena su merenja koja postoje u zgradi i podaci Republičkog Hidrometeorološkog Zavoda Srbije, kao i merenja za čiju realizaciju nije potrebna rekonstrukcija sistema. Rezultati postupka kalibracije na časovnom nivou su pokazali da model dobro predviđa promene unutrašnjih parametara i parametara u rada sistema (unutrašnja temperatura i relativna vlažnost u prostorijama zgrade, temperatura i relativna vlažnost pripremljenog vazduha, temperatura i relativna vlažnost vazduha na odsisavanju iz prostorija), dok predikcija potrošnje energije ne zadovoljava postavljene kriterijume kalibracije. Imajući u vidu da se metodologijom teži smanjivanju potrošnje energije na dnevnom nivou, kriterijumi kalibracije su izračunati i za dnevne vrednosti izmerene i simulacijom dobijene potrošnje energije zgrade. U nedostatku kriterijuma kalibracije na dnevnom nivou, zaključeno je da se model može smatrati kalibrisanim, jer su izračunate vrednosti kriterijuma na dnevnom nivou bile u opsegu vrednosti istih kriterijuma na časovnom i mesečnom nivou, dostupnim u literaturi.

Poznavanjem prednosti i ograničenja izabranog simulacionog alata, odgovarajućim postupkom modeliranja i prepoznavanjem radnih parametara izvedenog upravljačkog sistema u izabranoj zgradi, metodologija je primenjena sa podacima sadržanim u kratkoročnoj vremenskoj prognozi koju izdaje Republički Hidrometeorološki Zavod Srbije. Tom prilikom je usvojeno najstrože ograničenje na strani toplotnog komfora u kancelarijskom delu zgrade. Dobijene vrednosti definisanih parametara rada sistema su implementirane u samoj zgradi, čime je omogućena i eksperimentalna provera. Rezultati implementacije su pokazali da je prethodno izveden zaključak o kalibrisanosti modela opravdan.

Metodologija je dodatno proširena Monte Carlo analizom osetljivosti kao prvim korakom u izradi operativnih strategija. Analizom osetljivosti je ispitivana osetljivost promene elemenata definisane funkcije cilja na promene u radnim parametrima sistema koji se koriste u optimizaciji, a krajnji cilj je bio smanjenje broja nezavisno promenljivih u postupku optimizacije. Numeričkim eksperimentom koji je sproveden za usvojene periode za ograničenja na strani toplotnog komfora koja odgovaraju kategorijama B i C, upoređenjem sa rezultatima primene metodologije bez analize osetljivosti, uočeno je da su dobijeni krajnji rezultati bliski, pri čemu je smanjena potrošnja energije u sistemu klimatizacije, što dovodi do zaključka da je više energije akumulirano u termičkoj masi zgrade. Upoređenjem sa uobičajenim radom sistema, oba definisana postupka daju daleko bolji toplotni komfor u posmatranim prostorijama, uz veću potrošnju energije, čime je pokazano da metodologija daje fleksibilnost u balansu između potrošnje energije sa jedne, i toplotnog komfora sa druge strane.

Kako su posmatrani sistemi grejanja i klimatizacije projektovani na tradicionalan način sagledavanjem jedino unutrašnje temperature (sistem grejanja) i unutrašnje relativne vlažnosti (sistem klimatizacije) kao termičkih uslova komfora, primenom ove metodologije u fazi projektovanja instalacija bi se mogli zadovoljiti i propisani uslovi komfora za relevantne kategorije prostorija koji su bazirani na PMV indeksu, a koji je redovno dostupan u rezultatima simulacija.

Prikazana metodologija je fleksibilna i može poslužiti kao osnova za dalja istraživanja. Adekvatnim modeliranjem, moguća je integracija i optimizacije rada primarnih sistema. Definisanjem drugačije funkcije cilja, uključivanjem npr. cena energenata, moguće je vršiti balans između troškova za energiju i toplotnog komfora ljudi koji borave. Takođe moguće je ispitivati i različite modele predikcije prisustva ljudi ili uključiti u razmatranje i dinamičke modele promena subjektivnih parametara komfora koji postoje u literaturi, kao i upoređenje različitih metoda optimizacije.

## Literatura

1. Pérez-Lombard, L, Ortiz, JPout, C, A review on buildings energy consumption information. *Energy and buildings*, 2008. 40(3): 394-398.
2. Directive, E, 31/EU on the energy performance of buildings (recast). Strasbourg: EU, 2010.
3. Directive, E, 91/EC (2010), 2002, Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the Energy Performance of Buildings, available at: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do>.
4. Directive, EE, Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32. *Official Journal, L*, 2012. 315: 1-56.
5. Ministarstvo životne sredine, ripp, Pravilnik o energetskej efikasnosti zgrada, 2011, "Službeni glasnik RS".
6. Clarke, JA, *Energy simulation in building design*. 2001: Routledge.
7. Hunn, BD, *Fundamentals of building energy dynamics*. Vol. 4. 1996: MIT Press.
8. Hensen, JLLamberts, R, *Building performance simulation for design and operation*. 2012: Routledge.
9. Handbook, AF, American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers. Inc.: Atlanta, GA, USA, 2009.
10. ISO, E, 13790: 2008 Energy performance of buildings–Calculation of energy use for space heating and cooling. International Standard Organisation, 2008.
11. USDOE, *Energy Plus Energy Simulation Software*.
12. Trnsys, A, *Transient System Simulation Program*. University of Wisconsin, 2000.
13. ESP-r, *Modelling tool for building performance simulation*.
14. Norford, L, Socolow, R, Hsieh, ESSpadaro, G, Two-to-one discrepancy between measured and predicted performance of a 'low-energy' office building: insights from a reconciliation based on the DOE-2 model. *Energy and buildings*, 1994. 21(2): 121-131.
15. Marchio, DRabl, A, Energy-efficient gas-heated housing in France: predicted and observed performance. *Energy and Buildings*, 1991. 17(2): 131-139.

16. Branco, G, Lachal, B, Gallinelli, PWeber, W, Predicted versus observed heat consumption of a low energy multifamily complex in Switzerland based on long-term experimental data. *Energy and Buildings*, 2004. 36(6): 543-555.
17. Scofield, JH, Do LEED-certified buildings save energy? Not really.... *Energy and Buildings*, 2009. 41(12): 1386-1390.
18. Coakley, D, Raftery, PKeane, M, A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2014. 37: 123-141.
19. Reddy, TA, Literature Review on Calibration of Building Energy Simulation Programs: Uses, Problems, Procedures, Uncertainty, and Tools. *ASHRAE transactions*, 2006. 112(1).
20. Guideline, A, Guideline 14-2002, Measurement of Energy and Demand Savings. American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, Georgia, 2002.
21. Subcommittee, IR, Concepts and Practices for Determining Energy Savings in Renewable Energy Technologies Applications (Vol. III). *International Performance Measurement & Verification Protocol [L]*, 2003.
22. FEMP, M, Guidelines: Measurement and Verification for Federal Energy Projects, Version 3.0. *Energy Efficiency and Renewable Energy*, 2008.
23. Carroll, WHitchcock, R, Tuning simulated building descriptions to match actual utility data: methods and implementation. *ASHRAE Transactions-American Society of Heating Refrigerating Airconditioning Engin*, 1993. 99(2): 928-934.
24. Bertagnolio, S, Evidence-based model calibration for efficient building energy services, 2012, Université de Liège, Liège, Belgium.
25. De Wilde, P, The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation. *Automation in Construction*, 2014. 41: 40-49.
26. Liu, GLiu, M, A rapid calibration procedure and case study for simplified simulation models of commonly used HVAC systems. *Building and Environment*, 2011. 46(2): 409-420.
27. Saltelli, A, Ratto, M, Andres, T, Campolongo, F, Cariboni, J, Gatelli, D, *et al.*, *Global sensitivity analysis: the primer*. 2008: John Wiley & Sons.
28. Tian, W, A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013. 20: 411-419.
29. Doe, U, *Building energy software tools directory*, 2012.
30. Hirsch, JJ, eQuest, the QUick Energy Simulation Tool. DOE2. com, 2006.

31. IES<VE>. <https://www.iesve.com/software/ve-for-engineers>.
32. AB, ES, IDA indoor climate and energy (IDA ICE), 2014, October.
33. Association, M, Modelica and the modelica association, 2013.
34. DOE, D, based Building Energy Use and Cost Analysis Software.
35. MathWorks, MUsG, MathWorks Inc. South Natick MA, 1989.
36. Dassault Systems AB. <http://www.claytex.com/products/dymola/>.
37. Zhang, YKorolija, I, jEPlus-An EnergyPlus simulation manager for parametrics, 2016.
38. Params. <https://bigladdersoftware.com/projects/params/>.
39. Wetter, M, Generic Optimization Program User Manual Version 3.0. 0. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2009.
40. jEPlus+EA. [http://www.jeplus.org/wiki/doku.php?id=docs:jeplus\\_ea:start](http://www.jeplus.org/wiki/doku.php?id=docs:jeplus_ea:start).
41. Christensen, C, Anderson, R, Horowitz, S, Courtney, ASpencer, J, BEopt™ Software for Building Energy Optimization: Features and Capabilities. National Renewable Energy Laboratory (NREL) Technical Report, 2006.
42. Wetter, M, Co-simulation of building energy and control systems with the Building Controls Virtual Test Bed. *Journal of Building Performance Simulation*, 2011. 4(3): 185-203.
43. MLE+ Toolbox. <http://mlab.seas.upenn.edu/projectsites/mlep/>.
44. Crawley, DB, Hand, JW, Kummert, MGriffith, BT, Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and environment*, 2008. 43(4): 661-673.
45. Attia, S, Hensen, JL, Beltrán, LDe Herde, A, Selection criteria for building performance simulation tools: contrasting architects' and engineers' needs. *Journal of Building Performance Simulation*, 2012. 5(3): 155-169.
46. Machairas, V, Tsangrassoulis, AAxarli, K, Algorithms for optimization of building design: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014. 31: 101-112.
47. Nguyen, A-T, Reiter, SRigo, P, A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy*, 2014. 113: 1043-1058.
48. Corbin, CD, Henze, GPMay-Ostendorp, P, A model predictive control optimization environment for real-time commercial building application. *Journal of Building Performance Simulation*, 2013. 6(3): 159-174.

49. Li, XWen, J, Review of building energy modeling for control and operation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014. 37: 517-537.
50. Mirakhorli, ADong, B, Occupancy behavior based model predictive control for building indoor climate—A critical review. *Energy and Buildings*, 2016. 129: 499-513.
51. Afram, AJanabi-Sharifi, F, Theory and applications of HVAC control systems—A review of model predictive control (MPC). *Building and Environment*, 2014. 72: 343-355.
52. Aste, N, Manfren, MMarenzi, G, Building Automation and Control Systems and performance optimization: A framework for analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017. 75: 313-330.
53. Thieblemont, H, Haghighat, F, Ooka, RMoreau, A, Predictive control strategies based on weather forecast in buildings with energy storage system: A review of the state-of-the art. *Energy and Buildings*, 2017. 153: 485-500.
54. Cigler, J, Privara, S, Váňa, Z, Žáčková, EFerkl, L, Optimization of predicted mean vote index within model predictive control framework: Computationally tractable solution. *Energy and Buildings*, 2012. 52: 39-49.
55. Oldewurtel, F, Parisio, A, Jones, CN, Gyalistras, D, Gwerder, M, Stauch, V, *et al.*, Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control. *Energy and Buildings*, 2012. 45: 15-27.
56. Stojiljković, MM, Ignjatović, MGVučković, GD, Greenhouse gases emission assessment in residential sector through buildings simulations and operation optimization. *Energy*, 2015. 92: 420-434.
57. Dounis, AICaraiscos, C, Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009. 13(6): 1246-1261.
58. Alcalá, R, Benítez, JM, Casillas, J, Cordon, OPérez, R, Fuzzy control of HVAC systems optimized by genetic algorithms. *Applied Intelligence*, 2003. 18(2): 155-177.
59. Yang, K-T, Artificial neural networks (ANNs): a new paradigm for thermal science and engineering. *Journal of heat transfer*, 2008. 130(9): 093001.
60. Ahmad, MW, Mourshed, M, Yuce, BRezgui, Y. *Computational intelligence techniques for HVAC systems: A review*. U: *Building Simulation*. 2016. Springer.



61. Afram, A, Janabi-Sharifi, F, Fung, ASRaahemifar, K, 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*, 2017. 141: 96-113.
62. Atam, E, Current software barriers to advanced model-based control design for energy-efficient buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017. 73: 1031-1040.
63. Hall, IJ, Prairie, R, Anderson, HBoes, E, Generation of a typical meteorological year, 1978, Sandia Labs., Albuquerque, NM (USA).
64. Wilcox, SMarion, W, Users manual for TMY3 data sets. 2008: National Renewable Energy Laboratory Golden, CO.
65. Crawley, DLawrie, L. Rethinking the tmy: is the 'typical' meteorological year best for building performance simulation? U: Conference: Building Simulation. 2015.
66. Zhu, M, Pan, Y, Huang, ZXu, P, An alternative method to predict future weather data for building energy demand simulation under global climate change. *Energy and Buildings*, 2016. 113: 74-86.
67. Lazos, D, Sproul, ABKay, M, Optimisation of energy management in commercial buildings with weather forecasting inputs: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014. 39: 587-603.
68. Hammad, FAbu-Hijleh, B, The energy savings potential of using dynamic external louvers in an office building. *Energy and Buildings*, 2010. 42(10): 1888-1895.
69. Bojić, M, Johannes, KKuznik, F, Optimizing energy and environmental performance of passive Trombe wall. *Energy and Buildings*, 2014. 70: 279-286.
70. Ascione, F, De Masi, RF, de Rossi, F, Ruggiero, SVanoli, GP, Optimization of building envelope design for nZEBs in Mediterranean climate: Performance analysis of residential case study. *Applied Energy*, 2016. 183: 938-957.
71. Ignjatović, MG, Blagojević, BD, Stojanović, BVStojiljković, MM, Influence of glazing types and ventilation principles in double skin facades on delivered heating and cooling energy during heating season in an office building. *Thermal Science*, 2012. 16(suppl. 2): 461-469.
72. Anđelković, AS, Gvozdenc-Urošević, B, Kljajić, MIgnjatović, MG, Experimental research of the thermal characteristics of a multi-storey naturally ventilated double skin facade. *Energy and Buildings*, 2015. 86: 766-781.
73. Seong, Y-BLim, J-H, Energy saving potentials of phase change materials applied to lightweight building envelopes. *Energies*, 2013. 6(10): 5219-5230.

74. Kokogiannakis, G, Tietje, ADarkwa, J, The role of green roofs on reducing heating and cooling loads: a database across Chinese climates. *Procedia Environmental Sciences*, 2011. 11: 604-610.
75. Bojić, M, Nikolić, N, Nikolić, D, Skerlić, JMiletić, I, A simulation appraisal of performance of different HVAC systems in an office building. *Energy and Buildings*, 2011. 43(6): 1207-1215.
76. Stojanović, BV, Janevski, JN, Mitković, PB, Stojanović, MBIgnjatović, MG, Thermally activated building systems in context of increasing building energy efficiency. *Thermal Science*, 2014. 18(3): 1011-1018.
77. Lamnatou, C, Mondol, JD, Chemisana, DMaurer, C, Modelling and simulation of Building-Integrated solar thermal systems: Behaviour of the coupled building/system configuration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015. 48: 178-191.
78. Lamnatou, C, Mondol, JD, Chemisana, DMaurer, C, Modelling and simulation of Building-Integrated solar thermal systems: Behaviour of the system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015. 45: 36-51.
79. Djuric, N, Novakovic, V, Holst, JMitrovic, Z, Optimization of energy consumption in buildings with hydronic heating systems considering thermal comfort by use of computer-based tools. *Energy and Buildings*, 2007. 39(4): 471-477.
80. Bichiou, YKrtarti, M, Optimization of envelope and HVAC systems selection for residential buildings. *Energy and Buildings*, 2011. 43(12): 3373-3382.
81. Bojić, M, Nikolić, N, Nikolić, D, Skerlić, JMiletić, I, Toward a positive-net-energy residential building in Serbian conditions. *Applied Energy*, 2011. 88(7): 2407-2419.
82. Rodrigues, MK, da Silva Brum, R, Vaz, J, Rocha, LAO, dos Santos, EDIsoldi, LA, Numerical investigation about the improvement of the thermal potential of an Earth-Air Heat Exchanger (EAHE) employing the Constructal Design method. *Renewable Energy*, 2015. 80: 538-551.
83. Gunay, HB, O'Brien, WBeausoleil-Morrison, I, Implementation and comparison of existing occupant behaviour models in EnergyPlus. *Journal of Building Performance Simulation*, 2016. 9(6): 567-588.
84. Ramesh, T, Prakash, RShukla, K, Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and buildings*, 2010. 42(10): 1592-1600.
85. Hernandez, PKenny, P, Development of a methodology for life cycle building energy ratings. *Energy Policy*, 2011. 39(6): 3779-3788.

86. Drury Browne Crawley IV, B, Building performance simulation: a tool for policymaking, 2008, University of Strathclyde.
87. Soebarto, VI. Calibration of hourly energy simulations using hourly monitored data and monthly utility records for two case study buildings. U: Proceedings of Building Simulation. 1997.
88. Pedrini, A, Westphal, FSLamberts, R, A methodology for building energy modelling and calibration in warm climates. Building and Environment, 2002. 37(8): 903-912.
89. Tamburrini, M, Palmer, DMacdonald, IA. Calibrating models for simulation use in design practices. U: Building Simulation. 2003.
90. Pan, Y, Huang, ZWu, G, Calibrated building energy simulation and its application in a high-rise commercial building in Shanghai. Energy and Buildings, 2007. 39(6): 651-657.
91. Carrillo, A, Dominguez, FCEjudo, JM. Calibration of an EnergyPlus simulation model by the STEM-PSTAR method. U: Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland. 2009.
92. Reddy, TA, Maor, IPanjanornpon, C, Calibrating detailed building energy simulation programs with measured data—Part I: General methodology (RP-1051). Hvac&R Research, 2007. 13(2): 221-241.
93. Sun, JReddy, TA, Calibration of building energy simulation programs using the analytic optimization approach (RP-1051). HVAC&R Research, 2006. 12(1): 177-196.
94. Tahmasebi, F, Zach, R, Schuß, MMahdavi, A, Simulation model calibration: an optimization-based approach. BauSIM 2012, 2012. 1.
95. Penna, P, Cappelletti, F, Gasparella, A, Tahmasebi, FMahdavi, A, Multi-stage calibration of the simulation model of a school building through short-term monitoring. Journal of Information Technology in Construction (ITcon), 2015. 20(10): 132-145.
96. Penna, P, Schmiedhofer, S, Cappelletti, F, Gasparella, A, Tahmasebi, FMahdavi, A. A multi-stages approach to the calibration of a school building's simulation model. U: the proceedings of the 14th International Conference of the International Building Performance Simulation Association (IBPSA), India, Hyderabad. 2015.
97. Lavigne, K. Assisted calibration in building simulation: algorithm description and case studies. U: Proceedings of the Eleventh International IBPSA Conference. 2009.
98. De Wit, SAugenbroe, G, Analysis of uncertainty in building design evaluations and its implications. Energy and Buildings, 2002. 34(9): 951-958.

99. Westphal, FSLamberts, R. Building simulation calibration using sensitivity analysis. U: Ninth International IBPSA Conference. 2005.
100. Lam, JC, Wan, KKYang, L, Sensitivity analysis and energy conservation measures implications. *Energy Conversion and Management*, 2008. 49(11): 3170-3177.
101. Corrado, VMechri, HE, Uncertainty and sensitivity analysis for building energy rating. *Journal of building physics*, 2009. 33(2): 125-156.
102. Capozzoli, A, Mechri, HECorrado, V, Impacts of architectural design choices on building energy performance applications of uncertainty and sensitivity techniques. International Building Performance Simulation Association, 2009.
103. Yıldız, YArsan, ZD, Identification of the building parameters that influence heating and cooling energy loads for apartment buildings in hot-humid climates. *Energy*, 2011. 36(7): 4287-4296.
104. SIMLAB, V. <https://ec.europa.eu/jrc/en/samo/simlab>.
105. Eisenhower, B, O'Neill, Z, Fonoberov, VAMEzić, I, Uncertainty and sensitivity decomposition of building energy models. *Journal of Building Performance Simulation*, 2012. 5(3): 171-184.
106. Hopfe, CJHensen, JL, Uncertainty analysis in building performance simulation for design support. *Energy and Buildings*, 2011. 43(10): 2798-2805.
107. Spitz, C, Mora, L, Wurtz, EJay, A, Practical application of uncertainty analysis and sensitivity analysis on an experimental house. *Energy and Buildings*, 2012. 55: 459-470.
108. Rodríguez, GC, Andrés, AC, Muñoz, FD, López, JMCZhang, Y, Uncertainties and sensitivity analysis in building energy simulation using macroparameters. *Energy and Buildings*, 2013. 67: 79-87.
109. Ioannou, Altard, L, Energy performance and comfort in residential buildings: Sensitivity for building parameters and occupancy. *Energy and Buildings*, 2015. 92: 216-233.
110. SPSS. <https://www.ibm.com/analytics/data-science/predictive-analytics/spss-statistical-software>.
111. Ignjatović, MG, Blagojević, BD, Stojiljković, MM, Mitrović, DM, Andjelković, ALjubenović, MB, Sensitivity analysis for daily building operation from the energy and thermal comfort standpoint. *Thermal Science*, 2016. 20.

112. Killian, MKozek, M, Ten questions concerning model predictive control for energy efficient buildings. *Building and Environment*, 2016. 105: 403-412.
113. Hazyuk, I, Ghiaus, CPenhouet, D, Optimal temperature control of intermittently heated buildings using Model Predictive Control: Part I–Building modeling. *Building and Environment*, 2012. 51: 379-387.
114. Hazyuk, I, Ghiaus, CPenhouet, D, Optimal temperature control of intermittently heated buildings using Model Predictive Control: Part II–Control algorithm. *Building and Environment*, 2012. 51: 388-394.
115. Mahdavi, A, Simulation-based control of building systems operation. *Building and Environment*, 2001. 36(6): 789-796.
116. Clarke, J, Cockroft, J, Conner, S, Hand, J, Kelly, N, Moore, R, *et al.*, Simulation-assisted control in building energy management systems. *Energy and buildings*, 2002. 34(9): 933-940.
117. Cho, SZaheer-Uddin, M, Predictive control of intermittently operated radiant floor heating systems. *Energy Conversion and Management*, 2003. 44(8): 1333-1342.
118. Karlsson, HHagentoft, C-E, Application of model based predictive control for water-based floor heating in low energy residential buildings. *Building and environment*, 2011. 46(3): 556-569.
119. Paris, B, Eynard, J, Grieu, S, Talbert, TPolit, M, Heating control schemes for energy management in buildings. *Energy and Buildings*, 2010. 42(10): 1908-1917.
120. Petersen, SSvendsen, S, Method for simulating predictive control of building systems operation in the early stages of building design. *Applied energy*, 2011. 88(12): 4597-4606.
121. Petersen, SBundgaard, KW, The effect of weather forecast uncertainty on a predictive control concept for building systems operation. *Applied Energy*, 2014. 116: 311-321.
122. Ma, J, Qin, J, Salsbury, TXu, P, Demand reduction in building energy systems based on economic model predictive control. *Chemical Engineering Science*, 2012. 67(1): 92-100.
123. Ma, J, Qin, SJSalsbury, T, Application of economic MPC to the energy and demand minimization of a commercial building. *Journal of Process Control*, 2014. 24(8): 1282-1291.
124. Touretzky, CRBaldea, M, Integrating scheduling and control for economic MPC of buildings with energy storage. *Journal of Process Control*, 2014. 24(8): 1292-1300.
125. Kwak, Y, Huh, J-HJang, C, Development of a model predictive control framework through real-time building energy management system data. *Applied Energy*, 2015. 155: 1-13.

126. Privara, S, Široký, J, Ferkl, LCigler, J, Model predictive control of a building heating system: The first experience. *Energy and Buildings*, 2011. 43(2): 564-572.
127. Široký, J, Oldewurtel, F, Cigler, JPrivara, S, Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system. *Applied energy*, 2011. 88(9): 3079-3087.
128. Privara, S, Váňa, Z, Žáčková, ECigler, J, Building modeling: Selection of the most appropriate model for predictive control. *Energy and Buildings*, 2012. 55: 341-350.
129. Privara, S, Cigler, J, Váňa, Z, Oldewurtel, F, Sagerschnig, CŽáčková, E, Building modeling as a crucial part for building predictive control. *Energy and Buildings*, 2013. 56: 8-22.
130. Hazyuk, I, Ghiaus, CPenhouet, D, Model Predictive Control of thermal comfort as a benchmark for controller performance. *Automation in Construction*, 2014. 43: 98-109.
131. May-Ostendorp, P, Henze, GP, Corbin, CD, Rajagopalan, BFelsmann, C, Model-predictive control of mixed-mode buildings with rule extraction. *Building and Environment*, 2011. 46(2): 428-437.
132. Hu, JKarava, P, Model predictive control strategies for buildings with mixed-mode cooling. *Building and Environment*, 2014. 71: 233-244.
133. Medved, S, Babnik, M, Vidrih, BArkar, C, Parametric study on the advantages of weather-predicted control algorithm of free cooling ventilation system. *Energy*, 2014. 73: 80-87.
134. Coffey, B, Approximating model predictive control with existing building simulation tools and offline optimization. *Journal of Building Performance Simulation*, 2013. 6(3): 220-235.
135. Coffey, B, Haghghat, F, Morofsky, EKutrowski, E, A software framework for model predictive control with GenOpt. *Energy and Buildings*, 2010. 42(7): 1084-1092.
136. Zakula, T, Armstrong, PRNorford, L, Modeling environment for model predictive control of buildings. *Energy and buildings*, 2014. 85: 549-559.
137. Cole, WJ, Powell, KM, Hale, ETedgar, TF, Reduced-order residential home modeling for model predictive control. *Energy and Buildings*, 2014. 74: 69-77.
138. Rackes, AWaring, MS, Using multiobjective optimizations to discover dynamic building ventilation strategies that can improve indoor air quality and reduce energy use. *Energy and Buildings*, 2014. 75: 272-280.

139. Garnier, A, Eynard, J, Caussanel, MGrieu, S, Low computational cost technique for predictive management of thermal comfort in non-residential buildings. *Journal of Process Control*, 2014. 24(6): 750-762.
140. Ferreira, P, Ruano, A, Silva, SConceicao, E, Neural networks based predictive control for thermal comfort and energy savings in public buildings. *Energy and Buildings*, 2012. 55: 238-251.
141. Kusiak, A, Xu, GZhang, Z, Minimization of energy consumption in HVAC systems with data-driven models and an interior-point method. *Energy Conversion and Management*, 2014. 85: 146-153.
142. Hussain, S, Gabbar, HA, Bondarenko, D, Musharavati, FPokharel, S, Comfort-based fuzzy control optimization for energy conservation in HVAC systems. *Control Engineering Practice*, 2014. 32: 172-182.
143. Li, XMalkawi, A, Multi-objective optimization for thermal mass model predictive control in small and medium size commercial buildings under summer weather conditions. *Energy*, 2016. 112: 1194-1206.
144. Dobbs, JRHencey, BM, Model predictive HVAC control with online occupancy model. *Energy and Buildings*, 2014. 82: 675-684.
145. Colmenar-Santos, A, de Lober, LNT, Borge-Diez, DCastro-Gil, M, Solutions to reduce energy consumption in the management of large buildings. *Energy and Buildings*, 2013. 56: 66-77.
146. Ren, MJWright, JA, Adaptive diurnal prediction of ambient dry-bulb temperature and solar radiation. *HVAC&R Research*, 2002. 8(4): 383-401.
147. Henze, GP, Kalz, DE, Felsmann, CKnabe, G, Impact of forecasting accuracy on predictive optimal control of active and passive building thermal storage inventory. *HVAC&R Research*, 2004. 10(2): 153-178.
148. Florita, ARHenze, GP, Comparison of short-term weather forecasting models for model predictive control. *HVAC&R Research*, 2009. 15(5): 835-853.
149. Dong, BLam, KP. A real-time model predictive control for building heating and cooling systems based on the occupancy behavior pattern detection and local weather forecasting. U: *Building Simulation*. 2014. Springer.
150. Zhang, YHanby, VI. Short-term prediction of weather parameters using online weather forecasts. U: *Building simulation*. 2007.

151. Kwak, Y, Seo, D, Jang, CHuh, J-H, Feasibility study on a novel methodology for short-term real-time energy demand prediction using weather forecasting data. *Energy and Buildings*, 2013. 57: 250-260.
152. Alibabaei, N, Fung, ASRaahemifar, K, Development of Matlab-TRNSYS co-simulator for applying predictive strategy planning models on residential house HVAC system. *Energy and Buildings*, 2016. 128: 81-98.
153. Weather Underground. [https://www.wunderground.com/hourly/rs/nis/date/2017-11-28?cm\\_ven=localwx\\_hour](https://www.wunderground.com/hourly/rs/nis/date/2017-11-28?cm_ven=localwx_hour).
154. DoE, U, Energyplus engineering reference. *The reference to energyplus calculations*, 2010.
155. DOE, U, *Application Guide for EMS Energy Management System–User Guide*, 2015.
156. Iso, E, 7730: 2005. *Ergonomics of the thermal environment-Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*, 2005.
157. Ignjatović, M., Blagojević, B., Stojanović, B, Application of sensitivity analysis in pre-measurement phase of building energy model calibration, in *The proceedings of the III International Conference Industrial Engineering and Environmental Protection (IIZS 2013)*2013: Zrenjanin. 364-369.
158. Kennedy, J, Particle swarm optimization, in *Encyclopedia of machine learning*. 2011, Springer. 760-766.
159. Shi, YEberhart, R. A modified particle swarm optimizer. U: *Evolutionary Computation Proceedings*, 1998. *IEEE World Congress on Computational Intelligence.*, The 1998 IEEE International Conference on. 1998. IEEE.



## Biografija autora

Marko Ignjatović, diplomirani inženjer mašinstva, rođen je 11. juna 1980. godine u Nišu, gde i sada živi. Oženjen je i otac dvoje maloletne dece. Odlično govori engleski jezik.

Diplomirao je 30.09.2004. godine na Mašinskom fakultetu u Nišu, na obrazovnom profilu Termoenergetika i termotehnika sa prosečnom ocenom 9.95 u toku studija i ocenom 10 na diplomskom radu iz predmeta Provetravanje i klimatizacija. Dobitnik je Povelje Univerziteta u Nišu kao najbolji diplomirani student Mašinskog fakulteta u Nišu u školskoj 2003/2004. godini. Tokom studija bio je stipendista Ministarstva prosvete i sporta RS i Republičke fondacije za razvoj naučnog i umetničkog podmlatka. Nakon diplomiranja upisao je poslediplomske magistarske studije na Mašinskom fakultetu u Nišu na smeru Termoenergetika i termotehnika, a zatim prešao na doktorske akademske studije smer Energetika i procesna tehnika.

U periodu od maja 2005. godine do oktobra 2008. godine radio je kao istraživač pripravnik na Mašinskom fakultetu u Nišu u okviru Regionalnog centra za energetske efikasnost. Od oktobra 2008. godine radi kao asistent na Mašinskom fakultetu u Nišu za užu naučnu oblast Termotehnika, termoenergetika i procesna tehnika. Angažovan je na izvođenju vežbi iz predmeta: Klimatizacija i provetravanje, Grejanje, Gasna tehnika, Daljinsko grejanje, Termodinamika, Energetski menadžment u zgradama.

Učestvovao je u realizaciji više međunarodnih i nacionalnih, naučnih i stručnih projekata iz oblasti energetske efikasnosti u zgradama i industriji, korišćenja obnovljivih izvora energije, zaštite životne sredine. Bavi se energetskim modeliranjem i detaljnim simulacijama energetskih performansi zgrada. Autor ili koautor je više naučnih i stručnih radova i softverskih rešenja. Aktivan je član Društva za KGH Srbije pri SMEITS (Savez mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara Srbije), ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) i IBPSA (International Building Performance Simulation Association).

## Изјава 1.

### ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом:

**„Енергетске перформансе климатизованих објеката на бази краткорочне временске прогнозе“**

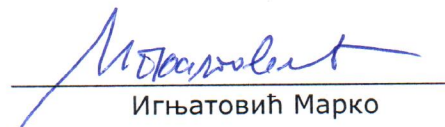
која је одбрањена на Машинском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао/ла на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио/ла ауторска права, нити злоупотребио/ла интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада, и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, 30.03.2018.

Потпис аутора дисертације:

  
Игњатовић Марко

**Изјава 2.**

**ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ ОБЛИКА  
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

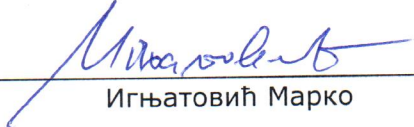
Наслов дисертације:

**„Енергетске перформансе климатизованих објеката на бази  
краткорочне временске прогнозе“**

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао/ла за уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**, истоветан штампаном облику.

У Нишу, 30.03.2018.

Потпис аутора дисертације:

  
Игњатовић Марко

### Изјава 3:

#### ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

**„Енергетске перформансе климатизованих објеката на бази краткорочне временске прогнозе“**

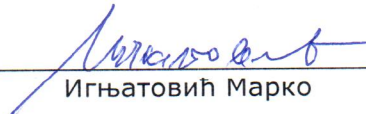
Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство **(CC BY)**
2. Ауторство – некомерцијално **(CC BY-NC)**
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде **(CC BY-NC-ND)**
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима **(CC BY-NC-SA)**
5. Ауторство – без прераде **(CC BY-ND)**
6. Ауторство – делити под истим условима **(CC BY-SA)<sup>4</sup>**

У Нишу, 30.03.2018.

Потпис аутора дисертације:

  
Игњатовић Марко

<sup>4</sup> Аутор дисертације обавезан је да изабере и означи (заокружи) само једну од шест понуђених лиценци; опис лиценци дат је у наставку текста.

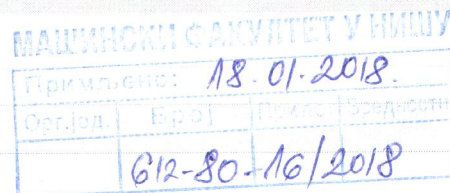


## ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

### ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Презиме, име једног  
родитеља и име  
Датум и место рођења

Игњатовић Гаврило Марко  
11.06.1980. Ниш, Србија



### Основне студије

Универзитет Универзитет у Нишу  
Факултет Машински факултет у Нишу  
Студијски програм Термоенергетика и термотехника  
Звање дипломирани инжењер машинства, образовни профил Термоенергетика и термотехника  
Година уписа 1999.  
Година завршетка 2004.  
Просечна оцена 9,95 (девет и 95/100)

### Мастер студије, магистарске студије

Универзитет —  
Факултет —  
Студијски програм —  
Звање —  
Година уписа —  
Година завршетка —  
Просечна оцена —  
Научна област —  
Наслов завршног рада —

### Докторске студије

Универзитет Универзитет у Нишу  
Факултет Машински факултет у Нишу  
Студијски програм Машинско инжењерство  
Година уписа 2007.  
Остварен број ЕСПБ бодова 300 (основне студије) + 150 (докторске студије) = 450  
Просечна оцена 10,00 (десет)

### НАСЛОВ ТЕМЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Наслов теме докторске дисертације Енергетске перформансе климатизованих објеката на бази краткорочне временске прогнозе  
Име и презиме ментора, звање Др Братислав Благојевић, редовни професор  
Број и датум добијања сагласности за тему докторске дисертације НСВ број 8/20-01-005/14-011, 02.07.2014. године

### ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Број страна 180  
Број поглавља 6  
Број слика (шема, графикона) 85  
Број табела 30  
Број прилога —



**ПРИКАЗ НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КАНДИДАТА  
који садрже резултате истраживања у оквиру докторске дисертације**

P. бр.	Аутор-и, наслов, часопис, година, број волумена, странице	Категорија
1	<p>Marko G. Ignjatović, Bratislav D. Blagojević, Mirko M. Stojiljković, Dejan M. Mitrović, Aleksandar S. Anđelković, Milica B. Ljubenović, Sensitivity analysis for daily building operation from the energy and thermal comfort standpoint, Thermal Science, 2016, Vol. 20, Suppl. 5, pp. S1485 - S1500, DOI: 10.2298/TSCI16S5485I</p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i></p> <p>У раду је приказана процедура за спровођење глобалне анализа осетљивости, као и алати који се у њој могу користити. За изабрани постојећи пословни објекат који је моделиран у EnergyPlus симулационом алату спроведена је анализа осетљивости потрошње топлотне енергије и осредњеног ПМВ индекса топлотног комфора на промене у дефинисаним улазним променљивим и то за три карактеристичне недеље у режиму грејања. Одређене су улазне променљиве на чије су промене најосетљивије и потрошња топлотне енергије у објекту и топлотни комфор. Показано је да се додавањем две субјективне величине топлотног комфора као улазних променљивих у анализу осетљивости, редослед најосетљивијих термичких улазних променљивих није променио.</p>	M23
2	<p>Marko G. Ignjatović, Bratislav D. Blagojević, Branislav V. Stojanović, Mladen M. Stojiljković, Influence of glazing types and ventilation principles in double skin façade on delivered heating and cooling energy during heating season in an office building, Thermal Science, 2012, Vol. 16, Suppl. 2, pp. S461-S469, DOI: 10.2298/TSCI120427183I</p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i></p> <p>У раду је приказана могућност евалуације различитих концепата вентилације двоструке фасаде на потрошњу топлотне енергије за грејање и хлађење пословне зграде помоћу симулационог алата EnergyPlus. За 90 различитих комбинација стакло пакета на омотачу зграде и у двострукој фасади, као и три концепта вентилације, извршене су симулације потрошње топлотне енергије за грејање и хлађење са типичном метеоролошком годином. Анализа резултата симулација је показала да се додавањем двоструке фасаде на јужној страни објекта по правилу смањује потрошња топлотне енергије за грејање. Анализа је такође показала да се неправилним избором застакљења спољне површине двоструке фасаде може значајно повећати потрошња топлотне енергије за хлађење објекта.</p>	M23
3	<p>Mirko M. Stojiljković, Marko G. Ignjatović, Goran D. Vučković, Greenhouse gases emission assessment in residential sector through buildings simulations and operation optimization, Energy, 2015, Vol. 92(3), pp. 420-434, doi: 10.1016/j.energy.2015.05.021</p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i></p> <p>У раду је предложен приступ за одређивање радних параметара флексибилних енергетских система са когенерацијом и акумулаторима топлотне енергије. Приступ је заснован на краткорочној оптимизацији са померајућим хоризонтом оптимизације како би се одредиле скоро оптималне оперативне стратегије рада система. Применљивост оваквог приступа је илустрована на студији случаја која се односи на унапређење термофизичких својстава омотача реалног стамбеног насеља уз имплементацију система когенерације и акумулатора топлотне енергије. За симулације стамбеног насеља коришћен је EnergyPlus. За процену ефекта мера енергетске ефикасности наглашен је значај узимања у обзир радних режима система.</p>	M21a
4	<p>Marko G. Ignjatović, Bratislav D. Blagojević, Mirko M. Stojiljković, Dejan M. Mitrović, Possibilities to minimize greenhouse gases emission and maintain thermal comfort in office building with co-simulation assisted operation of air handling units, FACTA UNIVERSITATIS, Series: Working and Living Environmental Protection, 2015, Vol. 12 (2), pp. 151-160, UDC 504.7:628.8</p> <p><i>Кратак опис садржине (до 100 речи)</i></p> <p>У раду је приказан поступак минимизације емисије гасова са ефектом стаклене баште уз истовремено одржавање топлотног комфора у дефинисаним границама, оптимизацијом рада</p>	M52



постојећег централног једноканалног система климатизације константног протока којим се припремљен ваздух доводи у канцеларијски простор. Примењена је метода оптимизације ројевима честица, при чему је оптимизација вршена за петодневни хоризонт планирања. За израчунавање емисије и ПМВ индекса топлотног комфора коришћен је EnergyPlus. Резултати оваквог приступа показују да је одржавање топлотног комфора у прописаним границама оваквог система могуће у већини анализираних случајева, за разлику од уобичајеног рада система, али да се као последица оваквог приступа јављају и веће емисије.

Marko G. Ignjatović, Bratislav D. Blagojević, Mirko M. Stojiljković, Dejan M. Mitrović, Aleksandar S. Anđelković, Optimizacija rada sistema KGH zasnovana na dinamičkom simulacionom alatu, Klimatizacija, grejanje, hlađenje, 2016, Vol. 45(1), str. 53-57

*Кратак опис садржине (до 100 речи)*

У овом раду је примењена паралелна оптимизација ројевима честица за налажење оптималних радних параметара постојећег система КГХ. Функција циља поступка оптимизације је минимална потрошња примарне енергије у КГХ системима уз задовољење топлотног комфора људи који бораве у објекту. Целокупан поступак оптимизације је креиран око модела постојећег објекта и система развијених у EnergyPlus. Усвојена је методологија померајућег хоризонта оптимизације у скоро реалном времену. Резултати су показали да је могуће одржавање топлотног комфора и са системима КГХ пројектованим на класичан начин, али уз познавање будућих поремећаја који ће деловати на зграду, како би системи проактивно деловали и одржавали жељени ниво комфора уз минималну потрошњу енергената.

5

M51

Aleksandar S. Anđelković, Branka Gvozdenac-Urošević, Miroslav Kljajić, Marko G. Ignjatović, Experimental research of the thermal characteristics of a multi-storey naturally ventilated double skin façade, Energy and Buildings, 2015, Vol. 86, pp. 766-781, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.11.007

*Кратак опис садржине (до 100 речи)*

У раду су представљени резултати стварног термичког понашања вишеспратне природно вентилисане двоструке фасаде и њеног утицаја на енергетске перформансе објекта. За те потребе реализована су дугорочна мерења на пословној згради. Методологијом је укључена и детаљна анализа промене енталпије ваздуха у простору двоструке фасаде. На основу измерених вредности анализирана је размењена топлота трансимијом и одређена је веза промене енталпије ваздуха у простору фасаде са струјањем које се у њој јавља. За испитивање потенцијала природне вентилације дефинисан је одговарајући индикатор. Анализа резултата је показала да коришћење двоструке фасаде не доводи увек до смањења потрошње енергије.

6

M21a

Branislav V. Stojanović, Jelena N. Janevski, Petar B. Mitković, Milica B. Stojanović, Marko G. Ignjatović, Thermally activated building systems in context of increasing building energy efficiency, Thermal Science, 2014, Vol. 18(3), pp. 1011-1018, DOI: 10.2298/TSCI1403011S

*Кратак опис садржине (до 100 речи)*

У раду је анализиран утицај термички-активних конструкција на енергетске перформансе објекта, конкретно утицај температуре оваквих конструкција и својстава осталих материјала непровидног дела омотача објекта. За анализу је усвојено директно коришћење геотермалне енергије у термички-активним конструкцијама. На примеру породичног стамбеног објекта чије су потребе за грејањем добијене симулацијама у EnergyPlus, показано је да термички-активни системи могу повећати енергетску ефикасност објекта и да се одговарајућим напојним температурама могу постићи и енергетске перформансе нискоенергетских објеката.

7

M22

Ignjatović, M., Blagojević, B., Stojanović, B., Application of sensitivity analysis in pre-measurement phase of building energy model calibration, The proceedings of the III International Conference Industrial Engineering and Environmental Protection (IIZS 2013), ISBN 978-86-7672-208-2, pp. 364-369

*Кратак опис садржине (до 100 речи)*

У раду је описан поступак спровођења глобалне анализе осетљивости како би се одредиле

8

M33



величине које је потребно мерити на објекту у циљу калибрације симулационог модела постојеће зграде, креираног у EnergyPlus симулационом алату. Идентификовани су улазни параметри модела на које је потрошена топлотна енергија за грејање била најосетљивија и то климатским подацима из типичне метеоролошке године и актуелне метеоролошке године.

Blagojević, B., Ignjatović, M., Calibrating building energy models - "FBB" building case study, Proceedings, 16<sup>th</sup> Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, SIMTERM 2013, ISBN 978-86-6055-43-1 pp. 537-544

*Кратак опис садржине (до 100 речи)*

- 9 У раду је посебно истакнут значај и поступак спровођења калибрисане симулације у случају коришћења модела постојећих објеката за симулације енергетских перформанси. Дефинисани су параметри за калибрацију, као и границе у којима се могу налазити да би се модел сматрао калибрисаним. За постојећи пословно-производни објекат описана су сва мерења која је потребно реализовати како би се извршила калибрација модела у два нивоа: по параметрима унутрашњег ваздуха у појединим зонама и по потрошеној топлотној енергији.

МЗЗ

**НАПОМЕНА:** уколико је кандидат објавио више од 3 рада, додати нове редове у овај део документа

### ИСПУЊЕНОСТ УСЛОВА ЗА ОДБРАНУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кандидат испуњава услове за оцену и одбрану докторске дисертације који су предвиђени Законом о високом образовању, Статутом Универзитета и Статутом Факултета.

ДА

Марко Игњатовић је положио све испите предвиђене планом и програмом докторских академских студија на Машинском факултету, студијски програм Машинско инжењерство, и стекао право на израду докторске дисертације.

Марко Игњатовић поднео је 29.04.2014. године Одсеку за наставна и студентска питања Машинског факултета у Нишу захтев за одобрење теме докторске дисертације (број 612-301/14) под радним насловом „Енергетске перформансе климатизованих објеката на бази краткорочне временске прогнозе“.

Наставно-научно веће Машинског факултета у Нишу, на седници одржаној 08.05.2014. године одлуком број 612-308-6/2014, именовало је комисију за оцену научне заснованости теме докторске дисертације у саставу: др Братислав Благојевић, редовни професор Машинског факултета у Нишу, др Младен Стојиљковић, редовни професор Машинског факултета у Нишу, др Милорад Бојић, редовни професор Факултета инжењерских наука у Крагујевцу, др Бранислав Стојановић, ванредни професор Машинског факултета у Нишу и др Дејан Митровић, доцент Машинског факултета у Нишу.

Наставно-научно веће Машинског факултета у Нишу је на седници одржаној 17.06.2014. године, на основу Извештаја (број 612-400/14) Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Марка Игњатовића, под насловом „Енергетске перформансе климатизованих објеката на бази краткорочне временске прогнозе“ донело Одлуку (број 612-398-9-/14 став 1) о усвајању предложене теме докторске дисертације. На истој седници Наставно-научног већа Машинског факултета у Нишу донета је Одлука (број 612-398-9/14 став 2) о именовању др Братислава Благојевића, редовног професора Машинског факултета у Нишу за ментора израде дисертације Марка Игњатовића.

Научно-стручно веће за техничко-технолошке науке Универзитета у Нишу, на седници која је одржана 02.07.2014. године донело је Одлуку (број 8/20-01-002/14-011) о давању сагласности на Одлуку о усвајању теме докторске дисертације Марка Игњатовића под називом „Енергетске перформансе климатизованих објеката на бази краткорочне временске прогнозе“ на Машинском факултету у Нишу.

Марко Игњатовић поднео је 13.12.2017. године Одсеку за наставна и студентска питања Машинског факултета у Нишу Захтев (број 612-80-445/17) за одређивање Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације.

Наставно-научно веће Машинског факултета у Нишу је на седници одржаној 22.12.2017. године донело Одлуку (број 612-596-6/2017) о именовању Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације Марка Игњатовића под називом „Енергетске перформансе климатизованих објеката на бази краткорочне временске прогнозе“ у саставу: др Братислав Благојевић, редовни професор Машинског факултета у Нишу - ментор, др Бранислав Стојановић, редовни професор Машинског факултета у Нишу, др Дејан Митровић, ванредни професор Машинског факултета у Нишу, др Александар Анђелковић, доцент Факултета техничких наука у Новом Саду и др Мирко Стојиљковић, доцент Машинског факултета у Нишу. Истом одлуком је за председника Комисије именован др Братислав Благојевић, редовни професор Машинског факултета у Нишу.



Марко Игњатовић је првопотписани аутор два рада која су објављени у часописима са импакт фактором из области којој припада тема докторске дисертације, првопотписани је аутор једног објављеног рада у часопису који издаје Универзитет Нишу, из области теме докторске дисертације.

На основу свега наведеног, Марко Игњатовић, дипл. инж. маш., испуњава све услове за оцену и одбрану докторске дисертације који су прописани Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Нишу и Статутом Машинског факултета у Нишу.

## **ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Кратак опис појединих делова дисертације *(до 500 речи)*

Докторска дисертација се састоји од шест поглавља: увод, стање проблема, симулације енергетских перформанси објеката, примена методологије на постојећој згради, анализа и дискусија резултата примењене методологије и закључци. Претходе им: резиме на српском и енглеском језику, садржај, спискови слика и табела, док се на крају налази списак коришћене литературе (159 цитираних библиографских јединица) и биографија аутора.

У уводу је објашњена мотивација за бављење проблемом кроз значај коришћења детаљних симулационих алата за одређивање енергетских перформанси како новопројектованих, тако и постојећих објеката. Посебно је наглашена могућност коришћења симулационих алата у оптимизацији рада изведених система грејања и климатизације, на дневном нивоу познавајући будуће поремећаје којима ће објекат бити изложен.

У другом поглављу приказана је подела метода предикције енергетских перформанси зграда као и приступи моделирању објеката са посебним освртом на моделирању унапред, на коме су засновани најзаступљенији симулациони алати. Назначена је потреба калибрације симулационих модела постојећих објеката и дефинисани су критеријуми чијим се задовољењем модел може сматрати калибрисаним. Описана је анализа осетљивости као корисна техника у анализи енергетских перформанси. Дат је и приказ основних карактеристика најчешће коришћених симулационих алата. Посебан акценат је стављен на унапређење енергетских перформанси постојећих објеката симулацијом подржаним радом система грејања и климатизације. Извршена је и подела метода управљања радом термотехничких система са детаљним приказом моделски-предиктивног управљања које у себи садржи моделе објеката развијене у симулационим алатима, оптимизацију са померајућим хоризонтом која може да искористи познавање будућих климатских параметара да би се оптимизовао рад система. Детаљно је описан поступак добијања типичне метеоролошке године као и основне методе за предикцију климатских променљивих. Извршен је квалитетан и свеобухватан преглед литературе значајне за истраживање.

У трећем поглављу је представљена детаљна методологија одређивања дневних оперативних стратегија на бази краткорочне временске прогнозе, као и могућности примене глобалне анализе осетљивости за редукацију броја независно променљивих у поступку израде стратегија. Методологија се заснива на оптимизационом окружењу око модела постојећег објекта креираног симулационим алатом, функција циља поступка оптимизације се израчунава из доступних резултата симулација, а оптимизација се врши са покретним периодом. Као симулациони алат је изабран EnergyPlus и наведене су основне предности, али и ограничења у коришћењу овог алата. Како је методологија намењена примени на постојећим објектима описан је цео поступак креирања актуелне метеоролошке године у формату који подржава изабрани симулациони алат. Дат је математички модел глобалне анализе осетљивости и оптимизације ројевима честица. Приказан је и поступак добијања краткорочне временске прогнозе у Републичком Хидрометеоролошком Заводу Србије и конверзије у датотеку која се користити у симулацијама.

У четвртом поглављу детаљно је описана реална зграда са системима грејања и климатизације на којој је примењена развијена методологија. Целокупно поглавље прати појединачне фазе методологије, па су приказани поступци креирања иницијалног модела, мерења на објекту за потребе калибрације, сам поступак калибрације, као и израда дневних оперативних стратегија са дефинисаном функцијом циља на бази краткорочне временске прогнозе.

У петом поглављу су приказани резултати калибрације модела на часовном и дневном нивоу, резултати имплементације оперативних стратегија са краткорочном временском прогнозом на реалном објекту, и резултати примене анализе осетљивости у изради дневних оперативних стратегија. За изабрани период поређени су резултати оперативних стратегија са пуним бројем независно променљивих и са редукованим бројем независно променљивих.

У шестом поглављу представљени су закључци до којих је кандидат дошао током истраживања.

## **ВРЕДНОВАЊЕ РЕЗУЛТАТА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Ниво остваривања постављених циљева из пријаве докторске дисертације *(до 200 речи)*

Радом на докторској дисертацији у потпуности су остварени циљевии постављени у пријави докторске дисертације, као и предложени оквирни садржај.

У оквиру докторске дисертације развијена је методологија којом се могу корелисати радни параметри



термотехничких система, подаци садржани у краткорочној временској прогнози и управљачке функције које постоје у системима. Извршено је повезивање детаљног симулационог алата енергетских перформанси и система управљања постројења грејања и климатизације, без реконструкције објекта и постројења у објекту.

Такође, омогућена је експериментална провера побољшања енергетских перформанси изведених објеката имплементацијом оперативних стратегија на бази краткорочне временске прогнозе.

Примењена методологија у потпуности обезбеђује реализацију концепта минималне потрошње енергије у климатизованим објектима уз задовољење услова топлотног комфора.

**Вредновање значаја и научног доприноса резултата дисертације (до 200 речи)**

Истраживање приказано у докторској дисертацији је веома значајно, и са научног и са стручног аспекта, због актуелности теме повећања енергетске ефикасности постојећих објеката оптимизовањем рада термотехничких система у објекту. Додатни научни значај представља могућност даљих проширења развијене методологије у смеру имплементације резултата у реалном времену и примене других метода оптимизације. Практични значај дисертације се огледа у могућности примене ове методологије и приликом пројектовања нових објеката, тачније система грејања и климатизације у њима.

Дисертација представља оригиналан и вредан научни допринос кандидата. Научни допринос се огледа у следећем:

- Дефинисана је оригинална методологија израде оптималних дневних оперативних стратегија рада изведених система грејања и климатизације на бази података краткорочне временске прогнозе детаљним симулационим алатом, без реконструкције система.
- Методологија је проширена глобалном анализом осетљивости као почетним корак у изради дневних оперативних стратегија за побољшање енергетских перформанси објекта уз задовољење постављених ограничења функције циља.
- Развијено је оригинално софтверско решење за дефинисање радних параметара управљачких система постројења грејања и климатизације на бази познавања унутрашње структуре симулационог алата.
- Дефинисањем одговарајуће функције циља могуће је реализовати даља истраживања у области оптимизације рада система и за снабдевање енергијом или имплементације у системима енергетског менаџмента ради процене исплативости мера енергетске ефикасности.

**Оцена самосталности научног рада кандидата (до 100 речи)**

Кандидат Марко Игњатовић је показао значајно теоријско и практично знање, а у истраживању је испољио висок ниво самосталности, оригиналности и креативности. Кандидат је приказао детаљну и свеобухватну анализу постојеће научне литературе из области теме докторске дисертације. Кандидат поседује потребна знања из више области која је успешно применио у овом истраживању. За примену предложене методологије развио је сопствено софтверско решење око детаљног симулационог алата.

Резултате истраживања публиковао је у значајним међународним часописима и на међународним конференцијама.

### **ЗАКЉУЧАК (до 100 речи)**

На основу прегледа поднете докторске дисертације и увидом у публиковане научне радове кандидата, чланови Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације закључују:

- Поднета докторска дисертација одговара теми докторске дисертације одобреној од стране Наставно-научног већа Машинског факултета у Нишу и Научно-стручног већа Универзитета у Нишу.
- Докторска дисертација представља оригиналан и вредан научни допринос актуелној теми побољшања енергетских перформанси објеката кроз симулацијом подржан рад система грејања и климатизације.
- Докторска дисертација је студиозно конципирана и технички квалитетно урађена.
- Резултати истраживања имају висок степен општости.
- Кандидат поседује знања из више научних области потребних за унапређење енергетске ефикасности постојећих објеката кроз симулацијом подржан рад система.
- Кандидат је показао висок степен самосталности и систематичности у бављењу научно-истраживачким радом.



Имајући у виду све наведено, Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Нишу и Научно-стручном већу за техничко-технолошке науке Универзитета у Нишу да се поднесу рукопис кандидата **Марка Игњатовића**, дипломираног инжењера машинства под називом:

**„ЕНЕРГЕТСКЕ ПЕРФОРМАНСЕ КЛИМАТИЗОВАНИХ ОБЈЕКТА  
НА БАЗИ КРАТКОРОЧНЕ ВРЕМЕНСКЕ ПРОГНОЗЕ“**

прихвати као докторска дисертација и да се кандидат позове на усмену јавну одбрану.

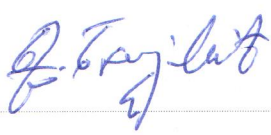
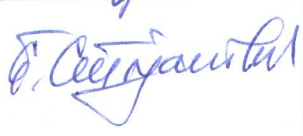


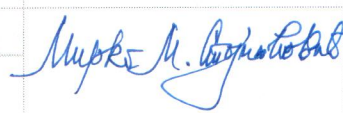
**КОМИСИЈА**

Број одлуке ННВ о именовану Комисије

612-596-6/2017

Датум именовања Комисије

22.12.2017.

Р. бр.	Име и презиме, звање		Потпис
1.	др Братислав Благојевић, редовни професор		председник, ментор 
	Термотехника, термоенергетика и процесна техника (Научна област)	Универзитет у Нишу, Машински факултет у Нишу (Установа у којој је запослен)	
2.	др Бранислав Стојановић, редовни професор		члан 
	Термотехника, термоенергетика и процесна техника (Научна област)	Универзитет у Нишу, Машински факултет у Нишу (Установа у којој је запослен)	
3.	др Дејан Митровић, ванредни професор		члан 
	Термотехника, термоенергетика и процесна техника (Научна област)	Универзитет у Нишу, Машински факултет у Нишу (Установа у којој је запослен)	
4.	др Александар Анђелковић, доцент		члан 
	Термотехника и термоенергетика (Научна област)	Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука (Установа у којој је запослен)	
5.	др Мирко Стојиљковић, доцент		члан 
	Термотехника, термоенергетика и процесна техника (Научна област)	Универзитет у Нишу, Машински факултет у Нишу (Установа у којој је запослен)	

Датум и место:

Јануар, 2018. године,

У Нишу и Новом Саду

# ЗАПИСНИК

са усмене одбране докторске дисертације Марка Игњатовића, дипломираног инжењера машинства, одржане 30. марта 2018. године на Машинском факултету у Нишу.

Одбрана докторске дисертације почела је у 12<sup>00</sup> часова уводним излагањем Председника Комисије, који је саопштио основне биографске податке о кандидату, ток поступка израде докторске дисертације као и Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације.

Кандидат је приступио излагању докторске дисертације, износећи методологију рада и постигнуте резултате до којих је дошао.

После завршеног усменог излагања кандидата, чланови Комисије су поставили више питања на које је кандидат дао одговоре.

Одбрана је завршена у \_\_\_\_\_ часова.

На основу усмене одбране, одговора кандидата на постављена питања чланова Комисије и на основу Одлуке о усвајању Извештаја Наставно-научног већа Факултета и Научно-стручног већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Нишу, чланови Комисије су једногласно донели

## О Д Л У К У

Марко Игњатовић, дипломирани инжењер машинства, одбранио је докторску дисертацију под називом:

**„ЕНЕРГЕТСКЕ ПЕРФОРМАНСЕ КЛИМАТИЗОВАНИХ ОБЈЕКТА НА БАЗИ  
КРАТКОРОЧНЕ ВРЕМЕНСКЕ ПРОГНОЗЕ“**

и стекао научни назив

**ДОКТОР НАУКА – МАШИНСКО ИНЖЕЊЕРСТВО**

др Братислав Благојевић, редовни професор  
Машинског факултета у Нишу

др Бранислав Стојановић, редовни професор  
Машинског факултета у Нишу

др Дејан Митровић, ванредни професор  
Машинског факултета у Нишу

др Александар Анђелковић, доцент  
Факултета техничких наука у Новом Саду

др Мирко Стојиљковић, доцент  
Машинског факултета у Нишу

Број: 612-80-445-3/2018  
У Нишу, 30.03.2018.год.