



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



Aleksandar Anđelković

**MODELIRANJE ENERGETSKIH
KARAKTERISTIKA DVOSTRUKIH
VENTILISANIH FASADA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2015.



KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj, RBR :	
Identifikacioni broj, IBR :	
Tip dokumentacije, TD :	Monografska publikacija
Tip zapisa, TZ :	Tekstualni štampani materijal
Vrsta rada, VR :	Doktorska disertacija
Autor, AU :	Aleksandar Anđelković
Mentori, MN :	doc. dr Branka Gvozdenac Urošević i prof. dr Dušan Gvozdenac
Naslov rada, NR :	MODELIRANJE ENERGETSKIH KARAKTERISTIKA DVOSTRUKIH VENTILISANIH FASADA
Jezik publikacije, JP :	Srpski
Jezik izvoda, Jl :	Srpski
Zemlja publikovanja, ZP :	Srbija
Uže geografsko područje, UGP :	AP Vojvodina
Godina, GO :	2015.
Izdavač, IZ :	Autorski reprint
Mesto i adresa, MA :	FTN, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad
Fizički opis rada, FO : <small>(poglavlja/strana/ citata/tabela/slika/grafika/priloga)</small>	6/230/134/29/159/0/0
Naučna oblast, NO :	Mašinsko inženjerstvo
Naučna disciplina, ND :	Termotehnika i termoenergetika
Predmetna odrednica/Ključne reči, PO :	Višespratne prirodno ventilisane dvostruke fasade; Eksperimentalna tehnika; Termičke karakteristike; Modeliranje; EnergyPlus; Sezonske operativne strategije; Energetske performanse;
UDK	
Čuva se, ČU :	Biblioteka FTN, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad
Važna napomena, VN :	
Izvod, IZ :	Predmet istraživanja načelno se odnosi na razmatranje koncepta dvostrukih ventilisanih fasada (DVF) i njihov uticaj na energetske efikasnosti objekta. Ovaj koncept predstavlja jedan od primera adaptivnih fasada. Plan istraživanja zasnovan je na eksperimentalnom radu (na realnom objektu) i na numeričkim simulacijama modela objekta. Rezultati eksperimentalnog dela istraživanja pokazuju na koji način zavise termičke osobine objekta sa DVF od trenutnih meteoroloških uslova. Takođe, ovi rezultati poslužili su za fino podešavanje modela i za postizanje što vernije slike realnog objekta. Kriterijum prihvatljivosti, kada je model potvrđen, definisani su sa preporučenim statističkim indikatorima. Na taj način, formiran model u daljoj analizi je korišćen za definisanje sezonskih operativnih strategija. Rezultati simulacija za sve predložene operativne strategije, ocenjuju kakav je njihov uticaj na potrošnju energije za grejanje i klimatizaciju posmatranog objekta. Poređenjem sa modelima objekta sa tradicionalnom fasadom, pokazana je opravdanost primene koncepta DVF u klimatskim uslovima Beograda.
Datum prihvatanja teme, DP :	
Datum odbrane, DO :	
Članovi komisije, KO :	
Predsednik:	dr Ilija Ćosić, redovni profesor
Član:	dr Radivoje Bjelaković, redovni profesor
Član:	dr Bratislav Blagojević, redovni profesor
Član:	dr Vlastimir Radonjanin, redovni profesor
Član, mentor 1:	dr Branka Gvozdenac Urošević, docent
Član, mentor 2:	dr Dušan Gvozdenac, redovni profesor
	Potpis mentora



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monographic Publication
Type of record, TR :	Textual material, printed
Contents code, CC :	PhD thesis
Author, AU :	Aleksandar Anđelković
Mentor, MN :	Assistant professor Branka Gvozdenac Urošević, PhD Full professor Dušan Gvozdenac, PhD
Title, TI :	MODELLING OF THE ENERGY CHARACTERISTICS OF A NATURALLY VENTILATED DOUBLE SKIN FACADE
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian
Country of publication, CP :	Serbia
Locality of publication, LP :	AP Vojvodina
Publication year, PY :	2015
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad
Physical description, PD : <small>(chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)</small>	6/230/134/29/159/0/0
Scientific field, SF :	Mechanical Engineering
Scientific discipline, SD :	Thermotechnics and Thermal Energetics
Subject/Key words, S/KW :	Multi-storey building; Naturally ventilated double skin facade; Experimental technique; Thermal characteristics; Energy modelling; EnergyPlus; Seasonal operative control strategies; Energy performance;
UC	
Holding data, HD :	Library of Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad
Note, N :	
Abstract, AB :	Research generally refers to the consideration of the concept of a double skin facades (DSF) and their impact on energy efficiency of the building. This concept is an example of adaptive facades. The research plan is based on experimental work and on the numerical model simulation. The results of experimental research works show how energy characteristics of the object with the DSF depend of current meteorological conditions. Also, these results were used to fine-tune the model to achieve as closely as possible the real presentation of the real building. The criterion of eligibility, when the model is verified, are defined with the recommended statistical indicators. Validated model in further analysis is used to define seasonal operational strategies. The simulation results for all proposed operational strategies, assess what is their impact on the building energy consumption for heating and air-conditioning. Compared to the models with a traditional facade, analysis show justification for the application of the concept of DSF in the climatic conditions of Belgrade.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	
President:	Ilija Čosić, PhD, Full professor
Member:	Radivoje Bjelaković, PhD, Full professor
Member:	Bratislav Blagojević, PhD, Full professor
Member:	Vlastimir Radonjanin, PhD, Full professor
Member, Mentor 1:	Branka Gvozdenac Urošević, PhD, Assistant professor
Member, Mentor 2:	Dušan Gvozdenac, PhD, Full professor
	Menthor's sign

SADRŽAJ:

UVOD	1
PREDMET, CILJ, HIPOTEZE I ALGORITAM ISTRAŽIVANJA	7
1. DVOSTRUKE VENTILISANE FASADE - PREGLED LITERATURE.....	11
1.1 Istorijat	14
1.2 Definicija koncepta	20
1.3 Koncept i klasifikacija DVF	22
1.3.1 Konstrukcija DVF.....	22
1.3.2 Klasifikacija DVF	24
1.4 Mogućnosti i ocena dosadašnje primene koncepta DVF.....	30
1.4.1 Prednosti.....	30
1.4.2 Nedostaci.....	35
1.4.3 Integracija DVF i klimatizacionog sistema objekta	38
1.5 Ostale karakteristike DVF	42
1.5.1 Troškovi.....	42
1.5.2 Rizik od pojave kondenzacije	44
1.5.3 Održivost.....	45
1.5.4 Analiza rizika u procesu izgradnje objekta sa DVF.....	46
1.6 Pregled literature vezano za modeliranje i ocenu energetskih performansi DVF	47
1.7 Pregled postojeće prakse i objekata sa DVF u Srbiji.....	51
1.8 Literatura.....	54
2. OPIS IZABRANOG OBJEKTA I POSTAVKA EKSPERIMENTA	59
2.1 Opis klimatskih uslova Srbije i Beograda.....	60
2.2 Opis izabranog objekta.....	65
2.2.1 Opis sistema za grejanje i klimatizaciju	70
2.3 Postavka eksperimenta	74
2.3.1 Procedura merenja.....	75
2.3.2 Tehnike merenja	75
2.3.3 Merenje fizičkih veličina	76
2.4 Izbor mernih mesta i parametara koji se mere.....	79
2.5 Korišćena merna oprema	82
2.6 Literatura	83
3. ANALIZA IZMERENIH REZULTATA	85
3.1 Opis graničnih uslova koji se prate.....	86

3.1.1 Trenutni meteorološki uslovi na objektu	86
3.1.2 Granični uslovi u DVF	87
3.1.3 Metodologija analize izmerenih rezultata.....	88
3.2 Analiza rezultata u zimskom režimu	90
3.2.1 Termovizijsko snimanje omotača objekta u toku zimskog režima	106
3.3 Analiza rezultata u prelaznom režimu.....	109
3.4 Analiza rezultata u letnjem režimu.....	120
3.5 Zaključci izvršenih merenja.....	128
3.6 Literatura	132
4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA.....	133
4.1 Uvod	136
4.1.1 Fino podešavanje modela.....	137
4.1.2 Potvrđivanje (validacija) modela.....	139
4.2 Opšti uslovi za izbor metode modeliranja.....	142
4.2.2 Izbor metode i programa za energetske simulacije.....	144
4.2.3 EnergyPlus - program za energetske simulacije objekta.....	144
4.2.4 AirFlow Network - Mrežni model strujanja vazduha	148
4.3 Postupak formiranja modela objekta sa DVF	152
4.4 Rezultati potvrđivanja modela.....	155
4.4.1 Rezultati potvrđivanja temperatura površina unutrašnjeg dela stakla pridodatog sloja DVF	156
4.4.2 Rezultati potvrđivanja temperatura površina spoljašnjeg dela prozora osnovnog sloja DVF	158
4.4.3 Rezultati potvrđivanja temperatura površina spoljašnjeg dela parapeta osnovnog sloja DVF	160
4.4.4 Rezultati potvrđivanja temperatura vazduha u međuprostoru DVF.....	162
4.4.5 Rezultati potvrđivanja brzina strujanja vazduha u međuprostoru DVF	164
4.5 Zaključci formiranja i potvrđivanja modela	166
4.6 Literatura	168
5. PREDLOZI I OCENA SEZONSKIH OPERATIVNIH I KONTROLNIH STRATEGIJA - OPRAVDANOST PRIMENE KONCEPTA DVF	171
5.1 Predlozi sezonskih operativnih strategija.....	173
5.1.1 Modeli objekta sa tradicionalnom fasadom.....	176
5.1.2 Model postojećeg objekta sa i bez regulacionih klapni.....	176

5.1.3 Model postojećeg objekta sa zimskom operativnom strategijom	176
5.1.4 Model postojećeg objekta sa letnjom operativnom strategijom	179
5.2 Rezultati simulacija predloženih modela	181
5.2.1 Rezultati analize poređenja modela objekta sa tradicionalnom fasadom i modela objekta sa DVF – postojeće stanje	181
5.2.2 Rezultati analize poređenja sadašnjeg modela objekta sa DVF i modela sa DVF koji je unapređen postavljanjem regulacionih klapni.....	185
5.2.3 Rezultati analize poređenja modela sa DVF koji je unapređen postavljanjem regulacionih klapni i modela sa DVF koje imaju primenjene sezonske operativne strategije	189
5.2.4 Rezultati analize poređenja izbranih modela sa tradicionalnom fasadom i modela sa DVF koje imaju primenje sezonske operativne strategije.....	195
5.2.5 Uticaj orijentacije DVF na potrošnju toplotne energije - rezultati analize osetljivosti.	199
5.2.6 Rezultati analize poređenja specifičnih godišnjih potrošnji toplotne energije.....	200
5.3 Literatura	202
6. ZAVRŠNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA.....	204

SPISAK TABELA

Tabela 0.1: Sektor zgradarstva u Srbiji	5
Tabela 1.1: Identifikacija rizika prilikom izgradnje objekta sa DVF	46
Tabela 1.2: Pregled istraživanja uticaja DVF na energetske zahteve objekta	50
Tabela 2.1: Značajni toplotni rekordi u Beogradu u prethodnih 15 godina	62
Tabela 2.2: Karakteristike staklo paketa prvog i drugog dela fasade	67
Tabela 2.3: Karakteristike dvostrukog prozora prvog sloja fasade	68
Tabela 2.4: Karakteristike parapetnog dela prvog sloja fasade	68
Tabela 2.5: Proizvođačke karakteristike ugrađenih venecijanera	70
Tabela 2.6: Vrednosti koeficijenta ukupne solarne propustljivosti dobijene merenjem	70
Tabela 2.7: Unutrašnje projektne temperature u zimskom režimu	71
Tabela 2.8: Unutrašnje projektne temperature u zimskom režimu	72
Tabela 2.9: Lista mernih uređaja prema ASHRAE Guideline 14-2002	76
Tabela 2.10: Specifikacija opreme za realizaciju eksperimenta	82
Tabela 4.1: Pregled dosadašnjih rezultata vezanih za potvrđivanje modela objekta sa DVF	141
Tabela 4.2: Klasifikacija analitičkih metoda za analizu potrošnje energije u objektima	143
Tabela 4.3: Detalji o finom podešavanju parametara simulacije EnergyPlus+ Airflow Network	155
Tabela 4.4: Rezultati statističkih indikatora za slučaj potvrđivanja temperatura površina spoljašnjeg dela pridodatog sloja DVF - prvi deo	157
Tabela 4.5: Rezultati statističkih indikatora za slučaj potvrđivanja temperatura površina spoljašnjeg dela pridodatog sloja DVF - drugi deo	158
Tabela 4.6: Rezultati statističkih indikatora za slučaj potvrđivanja temperatura površina spoljašnjeg dela prozora osnovnog sloja DVF - prvi deo	159
Tabela 4.7: Rezultati statističkih indikatora za slučaj potvrđivanja temperatura površina spoljašnjeg dela prozora osnovnog sloja DVF - drugi deo	160
Tabela 4.8: Rezultati statističkih indikatora za slučaj potvrđivanja temperatura površina spoljašnjeg dela parapeta osnovnog sloja DVF - prvi deo	161
Tabela 4.9: Rezultati statističkih indikatora za slučaj potvrđivanja temperatura površina spoljašnjeg dela parapeta osnovnog sloja DVF - drugi deo	162
Tabela 4.10: Rezultati statističkih indikatora za slučaj potvrđivanja temperatura vazduha u međuprostoru DVF - prvi deo	163
Tabela 4.11: Rezultati statističkih indikatora za slučaj potvrđivanja temperatura vazduha u međuprostoru DVF - drugi deo	164
Tabela 4.12: Rezultati statističkih indikatora za slučaj potvrđivanja brzina vazduha u međuprostoru DVF - prvi deo	165

Tabela 4.13: Rezultati statističkih indikatora za slučaj potvrđivanja brzina vazduha u međuprostoru DVF - prvi deo	166
Tabela 5.1: Detaljna specifikacija predloženih modela i njihovih operativnih i kontrolnih strategija	174
Tabela 5.2: Poređenje modela 1, 2, 3 i 4 - procentualna ušteda potrošnje energije	197
Tabela 5.3: Poređenje modela 3, 4, 4.1 i 5+5.1 - procentualna ušteda potrošnje energije	198

SPISAK SLIKA

Slika 0.1: Analiza troškova objekta u toku životnog ciklusa (ASHRAE Journal, jul 2013.).....	4
Slika 0.2: Sektor zgradarstva u Srbiji i Beogradu.....	6
Slika 1.1: Koncept adaptivne fasade	13
Slika 1.2: Razvoj fizičkih svojstava staklenih površina.....	14
Slika 1.3: Steiff Factory, 1903. (Izvor: http://facadesconfidential.blogspot.co.at).....	15
Slika 1.4: Zgrada Narkomfin u Moskvi, 1932. (Izvor: wikipedia.org)	15
Slika 1.5: "Mur neutralisant" i "Respiration exacte" dijagram, objavljen u časopisu "Précisions".....	16
Slika 1.6: Vojni hostel "Cite de Refuge" u Parizu, pre i posle (Izvor: Le Corbusier Foundation).....	16
Slika 1.7: Skica sistema za kontrolu zračenja prema poziciji Sunca (Le Corbusier, 1968.)	17
Slika 1.8: Crteži koji opisuju Le Corbusier-ove ideje za zgradu UN-a, sadržaj pisma poslatog senatoru Austin-u, 1947. (Le Corbusier, Izvor: Architectural Review, 1950.)	17
Slika 1.9: IBM Plaza, Chicago, USA (Van der Rohe, L. M., 1950.).....	18
Slika 1.10: Hooker-ova zgrada, 1980. (Izvor: www.architecture.uwaterloo.ca).....	18
Slika 1.11: GSW, Debis i Commerzbank (Izvor: wikipedia.org).....	19
Slika 1.12: The Sydney Tower, The Shanghai Tower i The Ghekin (Izvor: wikipedia.org).....	19
Slika 1.13: Objekat "One Angel Square" u Mančesteru, UK (Izvor: zvanična brošura objekta)	20
Slika 1.14: Primer koncepta DVF	22
Slika 1.15: Izvedbe drugog sloja fasade (a - Fiksni paneli; b – Pokretni paneli).....	23
Slika 1.16: Sistem za kontrolu i zaštitu od sunčevog zračenja (a - Ispusti; b – Venecijaneri; c – Premazi za staklo).....	23
Slika 1.17: Tipovi otvora na drugom sloju fasade (a - Slobodan; b – Rešetkast; c – Damper).....	24
Slika 1.18: Tipovi ventilacije (1, 2, 3, 4, 5 i 6).....	25
Slika 1.19: Dvostruki ili "Box" prozor	26
Slika 1.20: Koridorna fasada ograničena na jedan sprat	26
Slika 1.21: Šahtno-kasetni tip fasade.....	27
Slika 1.22: Višespratni tip fasade (a – Nepokretni stakleni paneli; b – Pokretni stakleni paneli) ...	28
Slika 1.23: Višespratni tip fasade	29
Slika 1.24: Tip fasade sa integrisanim solarnim panelima (objekat izgrađen u Južnoj Koreji).....	29
Slika 1.25: Klasifikacija DVF	30
Slika 1.26: Klimatski parametri za tipičan letnji dan u Beogradu	33
Slika 1.27: Prednosti DVF - pregled literature	35

Slika 1.28: Vertikalni gradijent temperature u DVF	36
Slika 1.29: Nedostaci DVF - pregled literature	38
Slika 1.30: Korišćenje DVF fasade za predgrevanje vazduha (zima) i njeno provetravanje (leto)	40
Slika 1.31: Korišćenje DVF za izbacivanje otpadnog vazduha	40
Slika 1.32: Korišćenje DVF za distribuciju predgrijanog vazduha u željene zone (zima).....	41
Slika 1.33: DVF kao glavni vazdušni kanal za otpadni vazduh	41
Slika 1.34: Uporedna analiza investicionih troškova za evropske uslove.....	43
Slika 1.35: Pregled postojećih objekata u Srbiji (Beograd) sa DVF (Izvor: Google Earth).....	51
Slika 1.36: Jugoslovensko dramsko pozorište (Izvor: Google Earth).....	52
Slika 1.37: Poslovni objekat VIG Plaza (Izvor: projektna dokumentacija objekta).....	53
Slika 1.38: Zgrada Agencije za kontrolu letenja SCG (Izvor: projektna dokumentacija)	53
Slika 1.39: Zira Centar (Izvor: projektna dokumentacija objekta)	54
Slika 2.1: Odstupanje od normale srednje godišnje temperature za grad Beograd u periodu od 1888. do 2005. godine [14].....	61
Slika 2.2: Opseg srednjih i apsolutnih mesečnih temperatura u Beogradu [14]	61
Slika 2.3: Prosečne vrednosti temperature i sunčevog zračenja za Beograd.....	62
Slika 2.4: Učestalost i prosečna temperatura vetra u Beogradu.....	63
Slika 2.5: Procenat vlage u 9 i 15h u Beogradu	63
Slika 2.6: Psihometrijski dijagram sa izabranim pasivnim tehnikama.....	64
Slika 2.7: Optimalna orijentacija objekta za klimatske uslove Beograda	64
Slika 2.8: Prikaz objekta "VIG Plaza" (izgled, orijentacija, fasada, tipična osnova i preseci fasade)	66
Slika 2.9: Spektralna analiza za staklo paket drugog sloja fasade (6 mm+0,76 mm PVB+6 mm)	69
Slika 2.10: Spektralna analiza za staklo paket spoljašnjeg stakla dvostrukog prozora (6 mm)	69
Slika 2.11: Spektralna analiza za staklo paket unutrašnjeg stakla dvostrukog prozora (8,5 mm) ...	69
Slika 2.12: Spektralna analiza za dvostruki prozor (6 mm+16 mm+8,5 mm).....	69
Slika 2.13: Postavka eksperimenta i merne opreme	80
Slika 2.14: Upisivanje meteoroloških podataka u klimatsku datoteku "EnergyPlus"	80
Slika 3.1: Prikaz dela merenja u toku zimskog režima (24.01. - 06.02.2014.)	91
Slika 3.2: Zavisnost prosečne temperature vazduha u DVF od spoljašnje temperature vazduha (24.01. - 06.02.2014.).....	91

Slika 3.3: Tipičan trend prosečnih vrednosti temperatura vazduha u DVF u funkciji globalnog sunčevog zračenja (24.01. - 06.02.2014.).....	92
Slika 3.4: Prikaz uticaja vetra i sunčevog zračenja na brzinu vazduha u DVF (30.01. - 04.02.2014.).....	93
Slika 3.5: Prikaz uticaja vetra na maseni protok vazduha u DVF (zimski režim)	94
Slika 3.6: Vertikalni gradijent temperature u DVF za tipičan hladan i sunčan zimski dan (31.01.2014.).....	95
Slika 3.7: Vertikalni gradijent temperature u DVF za tipičan hladan i oblačan zimski dan (25.01.2014.)	95
Slika 3.8: Vertikalni gradijent temperature u DVF za tipičan topao i sunčan zimski dan (25.02.2014.).....	96
Slika 3.9: Vertikalni gradijent temperature u DVF za tipičan topao i oblačan zimski dan (06.03.2014.)	96
Slika 3.10: Horizontalni trend temperature u DVF (PARAPET) za tipičan hladan i sunčan zimski dan (31.01.2014.)	97
Slika 3.11: Horizontalni trend temperature u DVF (DVOSTRUKI PROZOR) za tipičan hladan i sunčan zimski dan (31.01.2014.).....	98
Slika 3.12: Horizontalni trend temperature u DVF (PARAPET) za tipičan hladan i oblačan zimski dan (25.01.2014.)	98
Slika 3.13: Horizontalni trend temperature u DVF (DVOSTRUKI PROZOR) za tipičan hladan i oblačan zimski dan (25.01.2014.)	99
Slika 3.14: Horizontalni trend temperature u DVF (PARAPET) za tipičan topao i sunčan zimski dan (12.02.2014.)	99
Slika 3.15: Horizontalni trend temperature u DVF (DVOSTRUKI PROZOR) za topao i sunčan zimski dan (12.02.2014.).....	100
Slika 3.16: Horizontalni trend temperature u DVF (PARAPET) za tipičan topao i oblačan zimski dan (20.02.2014.)	100
Slika 3.17: Horizontalni trend temperature u DVF (DVOSTRUKI PROZOR) za topao i oblačan zimski dan (20.02.2014.).....	101
Slika 3.18: Proračunate vrednosti apsolutnih vlažnosti vazduha u donjoj i gornjoj zoni DVF za zimski režim	102
Slika 3.19: Proračunate vrednosti entalpija unutrašnjeg i vazduha u DVF za zimski režim	103
Slika 3.20: Izabrani period zimskog režima - više vrednosti entalpija	104

Slika 3.21: Izabrani period zimskog režima - delovi sa negativnim vrednostima toplotnog protoka	104
Slika 3.22: Izabrani period zimskog režima sa negativnim vrednostima toplotnog protoka.....	105
Slika 3.23: Termovizijska i digitalna slika objekta VIG Plaza	107
Slika 3.24: Detalj i analiza termograma severo-istočne fasade objekta.....	108
Slika 3.25: Detalj i analiza termograma jugo-istočne fasade objekta.....	109
Slika 3.26: Prikaz dela merenja u toku prelaznog režima (13.05. - 26.05.2014.).....	110
Slika 3.27: Zavisnost prosečne temperature vazduha u DVF od spoljašnje temperature vazduha (13.05. - 26.05.2014.).....	111
Slika 3.28: Tipičan trend prosečnih vrednosti temperatura vazduha u DVF u funkciji globalnog sunčevog zračenja (13.05. - 26.05.2014.).....	111
Slika 3.29: Prikaz uticaja vetra i sunčevog zračenja na brzinu vazduha u DVF (05.06. - 10.06.2014.)	112
Slika 3.30: Vertikalni gradijent temperature u DVF za tipičan hladan i oblačan prolećni dan (18.04.2014.)	113
Slika 3.31: Vertikalni gradijent temperature u DVF za tipičan hladan i sunčan prolećni dan (6.04.2014.).....	114
Slika 3.32: Vertikalni gradijent temperature u DVF za tipičan prolećni dan (28.05.2014.)	114
Slika 3.33: Horizontalni trend temperature u DVF (PARAPET) za tipičan hladan i oblačan prolećni dan (18.04.2014.)	116
Slika 3.34: Horizontalni trend temperature u DVF (DVOSTRUKI PROZOR) za tipičan hladan i oblačan prolećni dan (18.04.2014.)	116
Slika 3.35: Horizontalni trend temperature u DVF (PARAPET) za tipičan prolećni dan (28.05.2014.).....	117
Slika 3.36: Horizontalni trend temperature u DVF (DVOSTRUKI PROZOR) za tipičan prolećni dan (28.05.2014.)	117
Slika 3.37: Proračunate vrednosti apsolutnih vlažnosti vazduha u donjoj i gornjoj zoni DVF za prelazni režim.....	118
Slika 3.38: Proračunate vrednosti entalpija unutrašnjeg i vazduha u DVF za prelazni režim.....	119
Slika 3.39: Izabrani tipični period prelaznog režima	119
Slika 3.40: Toplotni potencijal u prelaznom režimu.....	120
Slika 3.41: Prikaz dela merenja u toku letnjeg režima (16.07. - 22.07.2014.)	121
Slika 3.42: Zavisnost prosečne temperature vazduha u DVF od spoljašnje temperature vazduha (16.07. - 22.07.2014.).....	122

Slika 3.43: Tipičan trend prosečnih vrednosti temperatura vazduha u DVF u funkciji globalnog sunčevog zračenja (16.07. - 22.07.2014.).....	122
Slika 3.44: Prikaz uticaja vetra i sunčevog zračenja na brzinu vazduha u DVF (16.07. - 22.07.2014.)	123
Slika 3.45: Vertikalni gradijent temperature u DVF za tipičan topao i sunčan letnji dan (21.07.2014.).....	124
Slika 3.46: Horizontalni trend temperature u DVF (PARAPET) za tipičan letnji dan (22.07.2014.).....	125
Slika 3.47: Horizontalni trend temperature u DVF (DVOSTRUKI PROZOR) za tipičan letnji dan (22.07.2014.).....	125
Slika 3.48: Proračunate vrednosti entalpija unutrašnjeg i vazduha u DVF za izabrani deo letnjeg režima (21.06 – 12.07.2014.).....	126
Slika 3.49: Izabrani tipični period letnjeg režima	127
Slika 3.50: Toplotni potencijal u letnjem režimu	128
Slika 3.51: Izabrani periodi zimskog, prelaznog i letnjeg režima.....	129
Slika 3.52: Zavisnost prosečne temperature vazduha u DVF od spoljašnje temperature vazduha za sve režime	130
Slika 3.53: Energetske performanse DVF za izabrane periode zimskog, prelaznog i letnjeg režima.....	131
Slika 4.1: Odnos simulacije i formiranja modela [2].....	134
Slika 4.2: Integralno-dinamički pristup interakcije podsistema objekta	135
Slika 4.3: Algoritam toka programa za energetske simulacije objekata [3].....	137
Slika 4.4: Modularna struktura EnergyPlus-a [34]	147
Slika 4.5: Grafički prikaz EnergyPlus-a [14].....	147
Slika 4.6: Izgled kompleksa i izabrani deo omotača objekta koji se koristi za EnergyPlus model	152
Slika 4.7: Preseci i tipična osnova objekta sa naglašenim delovima koji se koristi za EnergyPlus model	153
Slika 4.8: Izgled kreiranog modela dela objekta sa izabranom dvostrukom fasadom u programskom okruženju "Design Builder"-a	154
Slika 4.9: Potvrđivanje temperatura površina spoljašnjeg dela pridodatog sloja DVF.....	157
Slika 4.10: Potvrđivanje temperatura površina spoljašnjeg dela prozora osnovnog sloja DVF ...	159
Slika 4.11: Potvrđivanje temperatura površina spoljašnjeg dela parapeta osnovnog sloja DVF ..	161
Slika 4.12: Potvrđivanje temperatura vazduha u međuprostoru DVF	163

Slika 4.13: Potvrđivanje brzina strujanja vazduha u međuprostoru DVF.....	165
Slika 4.14: R^2 i CV(RSME) - prva zona, temperatura vazduha u DVF	167
Slika 4.15: R^2 i CV(RSME) - druga zona, temperatura vazduha u DVF	167
Slika 4.16: R^2 i CV(RSME) - treća zona, temperatura vazduha u DVF	168
Slika 5.1: Modeli sa izabranim operativnim i kontrolnim strategijama.....	175
Slika 5.2: Šema jednokanalne klimatizacije sa mešnom komorom spoljašnjeg (SV) i recirkulisanog vazduha (RV) - modeli 1, 2, 3, 4, 4.1	177
Slika 5.3: Šema jednokanalne klimatizacije sa dve mešne komore - model 5.....	178
Slika 5.4: Kontrolni algoritam prirodnog provetravanja - model 5.1.....	179
Slika 5.5: Deo koda napisanog u "EnergyPlus Runtime Language" koji vrši kontrolu protoka provetravanja prve zone modela 5.1.....	180
Slika 5.6: Komparativna analiza mesečnih potrošnja energije modela 1, 2, 3 i 4.....	181
Slika 5.7: Komparativna analiza potrošnje energije za grejanje modela 1, 2, 3 i 4.....	182
Slika 5.8: Komparativna analiza potrošnje energije za grejanje, za tri eksperimentalno analizirane zone (modeli 1, 2, 3 i 4)	182
Slika 5.9: Komparativna analiza prolaza sunčevog zračenja u klimatizovane zone objekta.....	183
Slika 5.10: Komparativna analiza potrošnje energije za hlađenje modela 1, 2, 3 i 4.....	184
Slika 5.11: Komparativna analiza potrošnje energije za hlađenje, za tri eksperimentalno analizirane zone (modeli 1, 2, 3 i 4)	184
Slika 5.12: Komparativna analiza ukupne godišnje potrošnje toplotne energije (modeli 1, 2, 3 i 4).....	185
Slika 5.13: Komparativna analiza mesečnih potrošnji energije modela 4 i 4.1	186
Slika 5.14: Komparativna analiza potrošnje energije za grejanje modela 4 i 4.1	186
Slika 5.15: Časovna komparativna analiza potrošnje energije i razlika u temperaturama vazduha u DVF modela 4 i 4.1.....	187
Slika 5.16: Komparativna analiza potrošnje energije za grejanje, za tri eksperimentalno analizirane zone (model 4 i 4.1).....	187
Slika 5.17: Komparativna analiza potrošnje energije za hlađenje modela 4 i 4.1	188
Slika 5.18: Komparativna analiza potrošnje energije za hlađenje, za tri eksperimentalno analizirane zone (model 4 i 4.1).....	188
Slika 5.19: Komparativna analiza ukupne godišnje potrošnje toplotne energije (model 4 i 4.1)	189
Slika 5.20: Komparativna analiza mesečnih potrošnji energije modela 4.1 i 5+5.1	190
Slika 5.21: Komparativna analiza potrošnje energije za grejanje modela 4.1 i 5	191

Slika 5.22: Časovna komparativna analiza potrošnje energije, razlika u temperaturama vazduha u DVF i razlika u temperaturama vazduha na ulazu klima komore modela 4.1 i 5.....	191
Slika 5.23: Komparativna analiza potrošnje energije za grejanje, za tri eksperimentalno analizirane zone (model 4.1 i 5).....	192
Slika 5.24: Komparativna analiza potrošnje energije za hlađenje modela 4.1 i 5.1.....	192
Slika 5.25: Udeo prirodnog provetravanja na časovnom nivou za model 5.1.....	193
Slika 5.26: Komparativna analiza potrošnje energije za hlađenje, za tri eksperimentalno analizirane zone (model 4 i 4.1).....	194
Slika 5.27: Komparativna analiza ukupne godišnje potrošnje toplotne energije (model 4.1 i 5+5.1).....	194
Slika 5.28: Komparativna analiza mesečnih potrošnje energije modela 3, 4, 4.1 i 5+5.1.....	195
Slika 5.29: Komparativna analiza potrošnje energije za grejanje, za tri eksperimentalno analizirane zone (modeli 3, 4, 4.1 i 5+5.1).....	196
Slika 5.30: Komparativna analiza potrošnje energije za hlađenje, za tri eksperimentalno analizirane zone (modeli 3, 4, 4.1 i 5+5.1).....	196
Slika 5.31: Komparativna analiza ukupne godišnje potrošnje toplotne energije (izabrani modeli).....	197
Slika 5.32: Rezultati analize osetljivosti za model 4.....	199
Slika 5.33: Rezultati analize osetljivosti - karakter mesečne potrošnje toplotne energije za hlađenje modela 4.....	200
Slika 5.34: Komparativna analiza potrošnje toplotne energije po m ² korisne površine.....	201
Slika 5.35: Komparativna analiza potrošnje toplotne energije po m ² korisne površine za različite klimatske uslove Evrope.....	201

SPISAK SKRAĆENICA I OZNAKA

AAT - apsolutna tolerancija konvergencije protoka

AIRFLOW NETWORK - Mrežni model protoka vazduha u EnergyPlus-u

AIRNET - Mrežni model protoka vazduha

ANSI - Američki nacionalni institut za standardizaciju

ASHRAE - Američko društvo inženjera za KGH

BIM ("Building Information Model") - Informacioni model objekta

BMS ("Building Management System")- Sistem za upravljanje u objektu

BREEAM ("Building Research Establishment's Environmental Assessment Method") - Britanski sistem za ocenu objekata

CB ("Child Beam") - Rashladne grede

CFD - Računarska dinamika fluida (" Computational Fluid Dynamics ")

CHP - postrojenje za kogeneraciju

CV (RMSE) - Koefficijent varijacije kvadratnog korena srednje kvadratne greške

DVF - Dvostruke ventilisane fasade

ENERGYPLUS - Program za energetske simulacije objekata

EPW - EnergyPlus meteorološka datoteka

ESG - HST - Termički obrađeno ojačano staklo

EU - Evropska unija

GMT - Vreme po Griniču

IEA - Međunarodna agencija za energetiku

IWEC - Meteorološka datoteka podataka za energetske simulacije po ASHRAE

KGH - Klimatizacija, grejanje i hlađenje

L - Letnji režim

LCA - Analiza životnog veka ("Life Cycle Assessment")

LEED ("Leadership in Energy and Environmental Design") - Američki sistem za ocenu objekata

MBE - Srednja relativna greška

OIE - Obnovljivi izvori energije

P - Prelazni režim

PV - Povratni vazduh

PVB - Polyvinyl-butyril folija

SV - Spoljašnji vazduh

TMY - Tipična meteorološka godina

TRY - Test referentna meteorološka godina

RAT - relativna tolerancija konvergencije protoka

RHMZ - Republički hidrometeorološki zavod Srbije

RMSE - Kvadratni koren srednje kvadratne greške

U - Prosečna vrednost za sve režime

UV - Ubacni vazduh

VBA - "Visual Basic for Applications"

Z - Zimski režim

- A_i [m^2] - površina i-te pregrade, $i=1, 2, \dots, 12$
 a, b [-] - koeficijenti koji se primenjuju u određenim intervalima za zonske vrednosti temperatura vazduha
 a_s [%] - koeficijent direktne (sunčeve) apsorpcije
 a_v [%] - koeficijent direktne apsorpcije vidljivog spektra zračenja
 C_i [m^3] - koeficijent masenog protoka
 c [J/kgK] - specifična toplota vazduha
 c_p [-] - koeficijent pritiska vetra na površinu omotača objekta
 $E(\tau)$ [kJ/m^2] - kumulativno termičko opterećenje
 $E^*(\tau)$ [kJ/m^2] - dnevno kumulativno termičko opterećenje
 f [-] - udeo površine otvora prema ukupnoj površini fasade
 g_s [%] - solarni faktor (koeficijent ukupnih solarnih dobitaka)
 h_{ci} [W/m^2K] - koeficijent konvekcije na unutrašnju površinu
 i [-] - indeks površine
 j [-] - indeks vremena
 M_i [K] - izmerena vrednost temperature u trenutku i
 \dot{m}_i [kg/s] - maseni protok za svaku i-tu vezu
 n [-] - ukupan broj merenja
 N [K] - aritmetička vrednost temperature izmerenih podataka
 $q(\tau)$ [W/m^2] - specifični toplotni fluks
 Q_{IV} [W] - osetno opterećenje nastalo infiltracijom ili ventilacijom
 Q_{CE} [W] - konvektivni delovi unutrašnjih dobitaka toplote
 $Q_{c,intj}$ [W] - suma konvektivnih delova svih unutrašnjih dobitaka toplote
 Q_{sisj} [W] - prenos toplote KGH sistema (rashladno toplotno opterećenje), $j=1, 2, \dots, 24$
 Q_v [W] - toplotni fluks uklonjen vazduhom, koji cirkuliše u međuprostoru fasade
 Q_u [W] - ukupan toplotni fluks koji prolazi kroz spoljašnji sloj fasade
 ΔP_i [Pa] - pad pritiska za svaku i-tu vezu
 r_{sp} [%] - koeficijent refleksije za prednji deo stakla (sunčeve)
 r_{sz} [%] - koeficijent refleksije za zadnji deo stakla (sunčeve)
 r_{vp} [%] - koeficijent refleksije vidljivog spektra zračenja za prednji deo stakla
 r_{vz} [%] - koeficijent refleksije vidljivog spektra zračenja za zadnji deo stakla
 R^2 [%] - koeficijent determinacije
 R_u [dB] - ukupno smanjenje buke
 R_k [dB] - zvučna izolacija klasične fasade
 R_w [dB] - redukcija buke po EN 717-1
 S_i [K] - simulirana vrednost temperature u trenutku i
 SC ($g_s/0,87$) [%] - koeficijent zasenčenja
 T_{a_j} [K] - zonska temperatura vazduha, $j=1, 2, \dots, 24$
 $T_{bezd\dot{m}}$ [-] - bezdimenzionalna temperatura
 T_m [K] - temperatura vazduha u međuprostoru fasade
 T_p [K] - temperatura vazduha u prostoriji
 T_s [K] - temperatura spoljašnjeg vazduha
 $T_{si,j}$ [K] - unutrašnja temperatura površine, $i=1, 2, \dots, 12$; $j=1, 2, \dots, 24$
 t_{a_j} [$^{\circ}C$] - temperatura vazduha u zoni, $j=1, 2, \dots, 24$
 t_{o_j} [$^{\circ}C$] - temperatura spoljašnjeg vazduha, $j=1, 2, \dots, 24$
 t_{v_j} [$^{\circ}C$] - temperatura vazduha za ventilaciju, $j=1, 2, \dots, 24$
 U [W/m^2K] - koeficijent prolaza toplote
 V [m^3/h] - zapreminski protok vazduha
 η_t [-] - efikasnost predgrevanja

η_d [-] - efikasnost dinamičke izolacije
 λ [W/mK] - toplotna provodljivost
 μ [Pa·s] - viskoznost vazduha
 ρ [kg/m³] - gustina
 τ_v [%] - koeficijent propustljivosti vidljivog spektra zračenja
 τ_s [%] - koeficijent direktne sunčeve propustljivosti
 τ_{UV} [%] - koeficijent UV propustljivosti
 φ [%] - relativna vlažnost vazduha

APSTRAKT

Omotač (fasada), predstavlja deo objekta koji formira primarnu termičku barijeru između unutrašnjosti zgrade i spoljašnjeg uticaja meteoroloških i drugih uslova. On zauzima najznačajnije mesto u određivanju nivoa komfora, prirodnog osvetljenja i ventilacije, a na kraju i koliko je potrebno energije za grejanje i klimatizaciju posmatranog objekta.

Predmet istraživanja načelno se odnosi na razmatranje koncepta dvostrukih ventilisanih fasada (DVF) i njihov uticaj na energetske efikasnost objekta. Ovaj koncept predstavlja jedan od primera adaptivnih fasada. Plan istraživanja zasnovan je na eksperimentalnom radu (na realnom objektu) i na numeričkim simulacijama modela objekta. Dakle, zadatak istraživanja je da se eksperimentalnim i numeričkim putem prouče potencijali višespratnog tipa DVF, u cilju sniženja potrošnje toplotne energije objekta. Osnovno pitanje koje se postavlja je da li i na koji način DVF mogu dati doprinos u smanjenju energetske potrebe objekta, uz povećanje kvaliteta termičkog i drugog komfora korisnika. Iako je osnovni cilj disertacije da se pruži univerzalna i što sveobuhvatnija metodologija proračuna i analize, istraživanje je u velikoj meri fokusirano na višespratni tip DVF koji se nalazi u klimatskim uslovima umereno kontinentalne klime. U vezi sa tim, dobijeni rezultati oslikavaju ponašanje objekta sa višespratnom DVF samo u posmatranom klimatskom području.

Eksperimentalna studija je sprovedena za prirodno ventilisanu dvostruku fasadu višespratnog tipa. Rezultati eksperimentalnog dela istraživanja pokazuju na koji način zavise termičke osobine objekta sa DVF od trenutnih meteoroloških uslova i načina regulacije. Zaključak eksperimentalnog dela je, da je za postizanje željenih performansi neophodno imati odgovarajući tip i dizajn fasade, uz njeno kvalitetno vođenje i kontrolu u operativnoj fazi. Takođe, rezultati eksperimenta poslužili su i za detaljniju analizu ponašanja termičkih karakteristika i strujanja vazduha u međuprostoru, kao i za fino podešavanje modela i za postizanje što vernije slike realnog objekta. Kriterijumi prihvatljivosti, kada je model potvrđen, definisani su sa preporučenim statističkim indikatorima. Na taj način formiran model u daljoj analizi se koristi za definisanje sezonskih operativnih strategija. Rezultati simulacija za sve predložene operativne strategije, pružaju ocenu kakav je njihov uticaj na potrošnju energije za grejanje i klimatizaciju posmatranog objekta. Poređenjem sa modelima objekta sa tradicionalnom fasadom, pokazana je opravdanost primene koncepta DVF sa energetske gledišta, u klimatskim uslovima Beograda.

Ključne reči: Višespratne prirodno ventilisane dvostruke fasade; Eksperimentalna tehnika; Termičke karakteristike; Modeliranje; EnergyPlus; Sezonske operativne strategije; Energetske performanse;

ABSTRACT

The envelope (facade) is the part of the building which forms the primary thermal barrier with its environment. It represents the most important factor in determining the level of thermal comfort, natural lighting and ventilation ability, and finally how much energy is needed for heating and air-conditioning.

Research generally refers to the consideration of the concept of a double skin facades (DSF) and their impact on energy efficiency of the building. This concept is an example of adaptive facades. The research plan is based on experimental work and on the numerical model simulation. Thus, the task of this research is to experimentally and numerically study the potential of multi-storey naturally ventilated DSF in order to reduce the building energy consumption. The main question that arises is whether and how the DSF may contribute to the decrease in the building energy consumption by increasing quality of the thermal comfort of the occupants. Although the main aim of the dissertation is to provide universal and comprehensive methodology for calculation and analysis, research is mainly focused on multi-storey naturally ventilated DSF type located in the climatic conditions of the moderate continental climate. Regarding the results reflect the behaviour of multi-story building placed in observed climatic region.

The experimental study was conducted for multi-storey naturally ventilated DSF type. The results of performed experimental research show how energy characteristics of the object with the DSF depend of current meteorological conditions and facade regulation. Conclusion of the experimental work is, for achieving the desired performance, that it is necessary to have the appropriate type and design of the facade with its quality management and control in the operational phase. Also, the results of the experiment were used for detailed analysis of the thermal characteristics and the air flow behaviour in the cavity, as well as to fine-tune the model to achieve as closely as possible the real presentation of the real building. The criteria of eligibility, when the model is verified, are defined with the recommended statistical indicators. Validated model in further analysis is used to define seasonal operational strategies. The simulation results for all proposed operational strategies, assess what is their impact on the building energy consumption for heating and air-conditioning. Compared to the models with a traditional facade, energy analysis shown justification for the application of the concept of DSF in the climatic conditions of Belgrade.

Keywords: Multi-storey building; Naturally ventilated double skin facade; Experimental technique; Thermal characteristics; Energy modelling; EnergyPlus; Seasonal operative control strategies; Energy performance;

ZAHVALNOST

Mojoj majci, Nadi, ocu Siniši, sestri Teodori, dedi Mitru, babi Dunji i tetki Snežani, za podršku tokom celog života i veru u mene.

Mojoj supruzi Ivani, zahvalnost za podršku, ljubav i veru da se ovaj rad na kraju može i završiti. Zahvalnost na strpljenju, za sve one duge dane i noći kada sam radio na doktoratu.

Mom sinu Vuku, da mu ovo jednog dana bude motiv za učenje i školovanje, kao i "zahvalnost na verovanju" da će tata jednog dana završiti doktorat i imati više vremena za igru.

Svim mojim kolegama, sa Departmana za energetiku i procesnu tehniku, na pomoći i korisnim savetima. Mentorima, profesorima Dušanu Gvozdencu i Branki Gvozdenac-Urošević, za pažljivu recenziju i vođenje tokom istraživanja, vezanog za izradu doktorske disertacije.

Specijalna zahvalnost profesorima Branislavu i Mariji Todorović, za nesebičnu podršku i za bezbroj otvorenih vrata u zemlji i svetu.

Zahvalnost ASHARE ("American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers") za dodeljena finansijska sredstva, koja su bila velika podrška prilikom izrade disertacije. Novčana sredstva su dodeljena kroz "ASHRAE Grant-in-Aid" fond, koji je podržan i od "ASHRAE Life Member" kluba.

UVOD

Mi ne nasleđujemo svet od naših predaka,
mi ga pozajmljujemo od naše dece
["We do not inherit the Earth from our ancestors,
we borrow it from our children"]
(Antoan de Sent-Egziperi)

Posle energetske krize, koja se dogodila 70-ih godina prošlog veka, sve više se razvija svest ljudi o iscrpivosti konvencionalnih izvora energije. Fosilna goriva ulaze u svoju tercijalnu fazu i veliki broj zemalja je započeo proces energetske tranzicije i prelaska na alternativnu energetsku infrastrukturu. Ubrzani rast troškova podstiče inženjere da pronalaze nove, inovativne tehnike, koje bi svojom primenom smanjili zahteve i potrošnju energije. Svet počinje sve više da se okreće obnovljivim izvorima energije i čistim energetske tehnologijama. Za veliki broj zemalja ovo postaje šansa da se smanji potrošnja konvencionalnih izvora energije i smanji zavisnost od uvoza energenata. Ključni aspekt bilo koje buduće energetske infrastrukture je upravljanje u realnom vremenu ("real-time management"), koje treba da obezbedi snabdevanje energijom u skladu sa trenutnim potrebama, pogotovo na mestima gde su energetske izvori stohastički (slučaj obnovljivih izvora energije).

U članku objavljenom u časopisu "Nature", autor Daniel M. Kammen, navodi da do 2020. godine ljudska vrsta mora uveliko biti na putu "low-carbon" društva, gde će dominirati visoko efikasne i čiste energetske tehnologije. Kao energetske efikasni ciljevi, koji mogu pomoći smanjenju potrošnje, navode se objekti sa pozitivnim neto energetske bilansom ("Positive-Net Energy Buildings" - PNEB) i električna vozila. Takođe, pominju se i pametne mreže ("smart grids"), koje će omogućiti da se svet snabdeva sa više od 80% električne energije iz obnovljivih izvora (sunčeva, energija vetra, geotermalna i hidro energija). Kao dodatak, navodi se i proizvodnja električne energije iz nuklearnih elektrana.

Sektor zgradarstva predstavlja jedan od najvećih potrošača. Na nivou EU, u zgradama se troši oko 40% primarne energije. Ovaj sektor predstavlja potrošača od oko 50% celokupne proizvodnje električne energije, više od 40% potrošnje prirodnog gasa i odgovoran je za više od 25% ukupne emisije CO₂. U Srbiji taj udeo iznosi 42,1% potrošnje finalne energije (4,08 Mtoe), od čega preko 70% pripada stambenom sektoru (2010.). Stambene zgrade troše oko 56% ukupne proizvedene električne energije, od čega se 65% odnosi na potrošnju energije za zagrevanje objekta.

Unapređenje energetske performansi objekata predstavlja veliki i jedan od glavnih izazova XXI veka u svetu. Da bi ostvarila svoj zacrtani zacrtani cilj 20-20-20 (20% smanjenje potrošnje energije - 20% smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte - 20% energije iz obnovljivih izvora) do 2020. godine, EU je usvojila čitav niz direktiva. Ključna direktiva u oblasti zgradarstva je direktiva o energetske performansi zgrada (EPBD 2002/91/EC) usvojena 16.12.2002. godine, a koju je počev od 19.05.2010. godine zamenila nova direktiva o energetske performansi zgrada (Direktiva 2010/31/EU). Ova direktiva obavezuje zemlje članice EU da od 31.12.2018. godine sve nove zgrade visoko efikasni objekti, čija potrošnja energije mora biti blizu nule ("Nearly Zero Energy Building" - nZEB). U Americi, od početka 2020. godine, sve nove federalne zgrade moraju biti projektovane kao zgrade neto nulte potrošnje i biti takve do 2030. ("Zero Net Energy Building" - ZNEB). Sledeća pokrenuta inicijativa u Americi je inicijativa kojom se putem javno - privatnog partnerstva podstiče cilj ostvarive komercijalno dostupne izgradnje ZNEB objekata do 2025. godine. Vlada Velike Britanije je usvojila zahteve za sektor zgradarstva, kojima se obavezuju da od 2016. godine svi novi objekti moraju biti nulte emisije CO₂ ("Zero Carbon Building" - ZCB). Republika Srbija je, prateći trendove u ovoj oblasti, usvojila pravilnike o energetske efikasnosti zgrada, čijom primenom je obavezna energetska sertifikacija novih građevinskih objekata. Na ovaj način, omogućena je procena potrošnje energije u objektu, koji je još uvek u fazi projektovanja. Ovi pravilnici predstavljaju početak dobrog puta u poboljšanju energetske efikasnosti novoizgrađenih objekata u Srbiji.

Osobenost ovog sektora je to, da je trenutno jedini sektor gde je uobičajena praksa da se isporučuje "proizvod" bez njegovog potpunog ispitivanja. Ovo se odnosi na potrošnju energije

zgrade i njene energetske performanse. Kako bi proces testiranja finalnog proizvoda (zgrade) bio zadovoljavajući, projektovanje objekta mora biti zasnovano na povratnim informacijama dobijenih merenjem radnih performansi. Takođe, neophodna su tačna predviđanja performansi u fazi projektovanja i njihova pravovremena isporuka samim projektantima. Jedini način da se na kvalitetan i tačan način ustanovi ponašanje objekta pre izgradnje je upotreba energetske simulacije. Energetske simulacije su koristan alat u procenivanju potrošnje energije u zgradama, kako u fazi projektovanja, tako i u ostalim fazama životnog veka zgrade. Problem simulacija pre svega predstavljaju netačni ulazni podaci i uprošćenja modela. Praksa pokazuje da većina modela retko kad pokazuje realnu potrošnju energije. Slična situacija je i kod dodeljenih energetske sertifikata objekata, s tim što ovi rezultati pokazuju još drastičnije razlike (metodologije koje se koriste pri izradi sertifikata su još uprošćenije u odnosu na one koje se koriste u energetske simulacijama). Jedino rešenje da se približimo realnoj potrošnji objekta prilikom energetske simulacije je konstantno potvrđivanje (validacija) modela izmerenim vrednostima osetljivih parametara (kalibracija). Kod dodeljivanja energetske sertifikata objektima, neophodno ih je, u definisanim vremenskim intervalima, proveravati prema realnoj potrošnji energije i ponovo izdavati. Pored primene u istraživačkim i naučnim krugovima, energetske simulacije su danas sve zastupljenije u praksi:

- uvršćeni su kao sastavni delovi međunarodno priznatih sistema za ocenjivanje objekata ("Building Research Establishment's Environmental Assessment Method" - BREEAM, formiran od strane Britanskog saveta BRE Global Ltd. i "Leadership in Energy and Environmental Design" - LEED, formiran od strane Američkog saveta zelene gradnje - USGBC);
- sastavni su delovi lokalnih regulativa vezanih za zgradarstvo ("California Title 24" izdat od strane komisije za energiju Kalifornije i ASHRAE standard 90.1) i procedura za energetske revizije ("Efficiency Valuation Organisation" - Međunarodni protokol za merenje i verifikaciju).

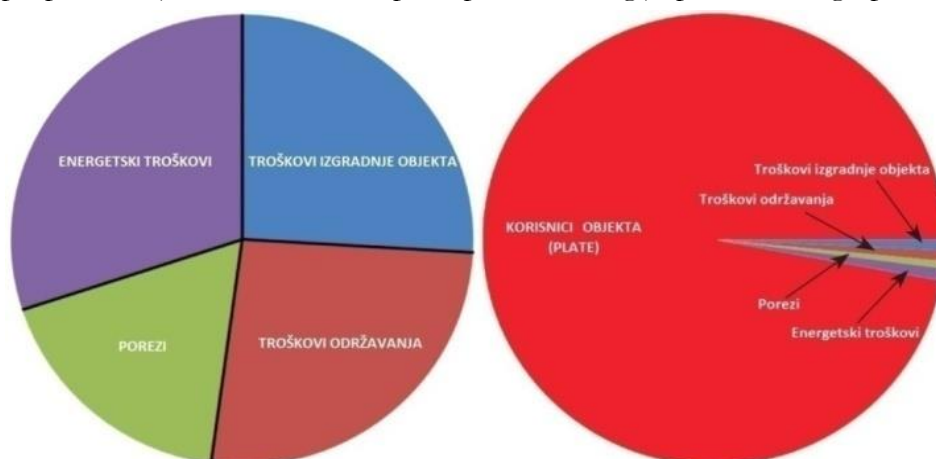
Komunikacija i diskusija između različitih struka, kroz integralni i holistički pristup projektovanju, dovodi do postizanja cilja, a to je pronalazak optimalnog rešenja. Važna napomena je, da je svaka zgrada jedinstvena i da se tako mora i posmatrati. "Kao arhitekta projektujete za sadašnjost, uz iskustvo iz prošlosti, za budućnost koja je u suštini nepoznata", rečenica koju je izgovorio jedan od najpoznatijih svetskih arhitekata, Norman Foster, govori o realnom problemu u kojem se nalaze inženjeri.

Definišući energetske performanse, budući standardi i pravilnici moraju obratiti pažnju i na odnos između zacrtane energetske potrošnje i unutrašnjeg komfora i kvaliteta vazduha, koji se na taj način postižu. Razlog je veoma jednostavan, produktivnost korisnika je u bliskoj vezi sa kvalitetom vazduha i uslovima unutrašnjeg termičkog komfora objekta. Ako su standardi fokusirani samo na smanjenje potrošnje energije u objektu, to može dovesti do problema korisnika i njihove loše produktivnosti vezane za narušen unutrašnji komfor. Najčešći problemi se javljaju zbog restriktivnih zahteva standarda za minimalni broj izmena vazduha u prostoriji. Smanjena infiltracija i prirodna ventilacija dovode do ustajalosti vazduha, povećanja koncentracije CO₂, pojave bakterija, buđi i slično. Međutim, ne treba misliti da povećanje energetske efikasnosti objekta dovodi do loših uslova komfora u zgradi. Do najvećeg problema dolazi kada imamo nezadovoljavajući i loš projekat mašinskih instalacija, ili se u toku eksploatacije loše upravlja objektom u celini. Većina visoko efikasne zgrade predstavljaju objekte koje su i najprijatniji za boravak (jako dobro su izolovani, imaju dobro prirodno osvetljenje i sisteme za zaštitu od sunčevog zračenja, sistemi za KGH su pravilno dimenzionisani i poseduju sistem automatike koja reaguje na trenutne potrebe za toplotom, što može eliminisati probleme sa predimenzionisanom KGH opremom). Ovi objekti poseduju inovativne sisteme koji su jako zahtevni sa aspekta

eksploatacije. Suština je da se akcenat u operativnoj fazi ovakvih objekata mora usmeriti ka treningu i edukaciji korisnika. Na osnovu navedenog, zaključak je da je stanje kvaliteta unutrašnje sredine objekta najznačajniji faktor potrošnje energije, produktivnosti, zdravlja i komfora korisnika koji borave u njemu. Potrošnja energije, kao i uticaj unutrašnjeg komfora na korisnike prostora su uvek troškovni faktori. Međutim, trošak koji uzrokuju loši uslovi unutrašnjeg komfora su najčešće mnogo veći za zaposlenog, poslodavca, pa i celo društvo, od troška energije koja se koristi u objektu. To potvrđuje i sledeća studija.

Američka studija (ASHRAE Journal, strana 134, jul 2013.) pokazuje da poslovne zgrade troše u rasponu od 12 do 33 \$/m²god za troškove grejanja i klimatizacije, dok su troškovi za plate korisnika ovih objekata od 900 do 7000 \$/m²god. Oko ovih cifara se može voditi polemika (zemlja porekla, veličina objekta, broj korisnika, stručna sprema...), ali procentualni odnos u ukupnim troškovima je isti (Slika 0.1). Na osnovu ovih studija može se zaključiti da smanjenje energetske potrošnje i za 40%, predstavlja malu uštedu u poređenju sa troškovima zaposlenih korisnika objekta, koji rade u uslovima koje smo stvorili. Ako je moguće izgraditi objekat sa nultom energetskom potrošnjom ("ZNEB"), taj poduhvat i dalje predstavlja samo 1% uštede u odnosu na troškove plata korisnika. Međutim, ovakav zaključak nije u potpunosti opravdan, jer povećanjem energetske efikasnosti objekta u svim njegovim fazama unapredićemo i unutrašnji komfor i indirektno smanjiti ostale troškove. Akcenat ovakvog zaključka je, pre svega, da se mora obratiti veća pažnja na kvalitet vazduha i komfora u objektu, kako bi se povećala produktivnost zaposlenih i smanjio rizik od njihovog oboljenja, što svakako smanjuje ukupne troškove.

Sledeća veoma važna stvar koju budući propisi o energetskoj efikasnosti objekata moraju uzeti u obzir je takozvana "pripadajuća" energija koja je učestvovala u formiranju konstrukcije objekta (korišćeni materijali, proces izgradnje, transporta...). Na sličan način se može analizirati i takozvana "pripadajuća" emisija CO₂. Koji je to prihvatljiv nivo emisije i koji su to adekvatni emisioni koeficijenti? Na koji način posmatrati zgrade u gradskim jezgrima, a kako one koje se nalaze u prigradskim i seoskim naseljima? Emisija nastala usled transporta veća je kod ruralnih objekata, ali kada je u pitanju potrošnja energije, tu je emisija manja. Da li zbog toga ove zgrade trebaju da imaju strožije zahteve energetske efikasnosti? Poznato je, da je ekvivalentna "pripadajuća" emisija konstrukcije objekta jednaka emisiji nastaloj usled potrošnje energije u objektu za vreme od 5 do 10 godina njegovog trajanja. Postavlja se pitanje, šta raditi sa starim neefikasnim objektima, rušenje ili revitalizacija? Procenat učešća "pripadajuće" emisije CO₂ opreme koja je instalirana u objektu, iznosi od 10 do 20% ukupne "pripadajuće" emisije konstrukcije zgrade. Inače, većina opreme se u toku životnog veka objekta više puta zameni, tako da je i samo učešće opreme u ukupnoj "pripadajućoj" emisiji, ovako gledajući veće. Zaključak je da budući propisi moraju imati adekvatan pristup i metodologiju procene ovog tipa emisije CO₂.



Slika 0.1: Analiza troškova objekta u toku životnog ciklusa (ASHRAE Journal, jul 2013.)

Kako bi počeli da rešavamo probleme visoke potrošnje energije u sektoru zgradarstva, moramo prepoznati da samo 2% (1% Srbija) objekata predstavljaju novi objekti. To znači da 75% - 85% objekata koji će postojati 2030. godine, predstavljaju objekte koji postoje danas. Takođe, ako bi danas svaki novi objekat bio projektovan kao objekat nulte potrošnje energije, imali bismo samo uticaj od 15% u sektoru zgradarstva do 2030. godine. Zaključak je jasan, ako bi naš fokus u rešavanju ovog problema bio samo na novim objektima, verovatno ne bismo ostvarili željene ciljeve u smislu smanjenja potrošnje energije ovog sektora. Glavni fokus buduće tehnologije i razvoja mora biti usmeren na postojeće objekte i njihovo unapređenje.

Prema najnovijoj mapi puta Međunarodne agencije za energetiku (IEA), "IEA Technology Roadmap Energy Efficient Building Envelopes 2013", objavljene 18.12.2013. godine, akcentat energetske efikasnosti objekata se fokusira na omotač zgrade. Dokument se sastoji iz definicija i analiza postojećih tehnologija, viziji istraživanja i razvoja novih tehnologija, kao i finansijskim i drugim potrebama u ovoj oblasti. Kao jedan od ključnih prioriteta navedena je transformacija postojećih objekata (omotač) u duhu temeljne revitalizacije ("deep renovation"). Ovaj pojam predstavlja smanjenje energetske potrošnje objekta za 75%, odnosno postavljanje limita potrošnje energije za grejanje, klimatizaciju, ventilaciju, toplu potrošnu vodu i osvetljenje na 60 kWh/m²god (prema "Global Buildings Performance Network - GBPN", 2013.). Kao najznačajnije teme budućeg razvoja navode se: visoko izolovani prozori, napredne visoko efikasne tanke izolacije, dinamički automatski vođeni omotači sa elementima za zaštitu od sunčevog zračenja, aerogel i fazno promenljivi materijali i novi tipovi stakla. Takođe, navode se i testovi merenja koji će služiti za potvrđivanje navedenih performansi.

Presek sektora zgradarstva sa osvrtom na poslovne zgrade u Srbiji i Beogradu

Kao što je navedeno, sektor zgradarstva u Srbiji predstavlja najdominantnijeg potrošača finalne energije sa udelom od oko 42%. Prosečna starost objekata se kreće od 25-30 godina, dok je prosečna specifična potrošnja finalne energije od oko 165 kWh/m² godišnje. Kada se vrednosti specifične potrošnje uporede sa prosekom razvijenih zemalja EU (70-130 kWh/m²), zaključuje se da se ulaganjem u revitalizaciju sektora zgradarstva u Srbiji mogu očekivati i velike energetske uštede.

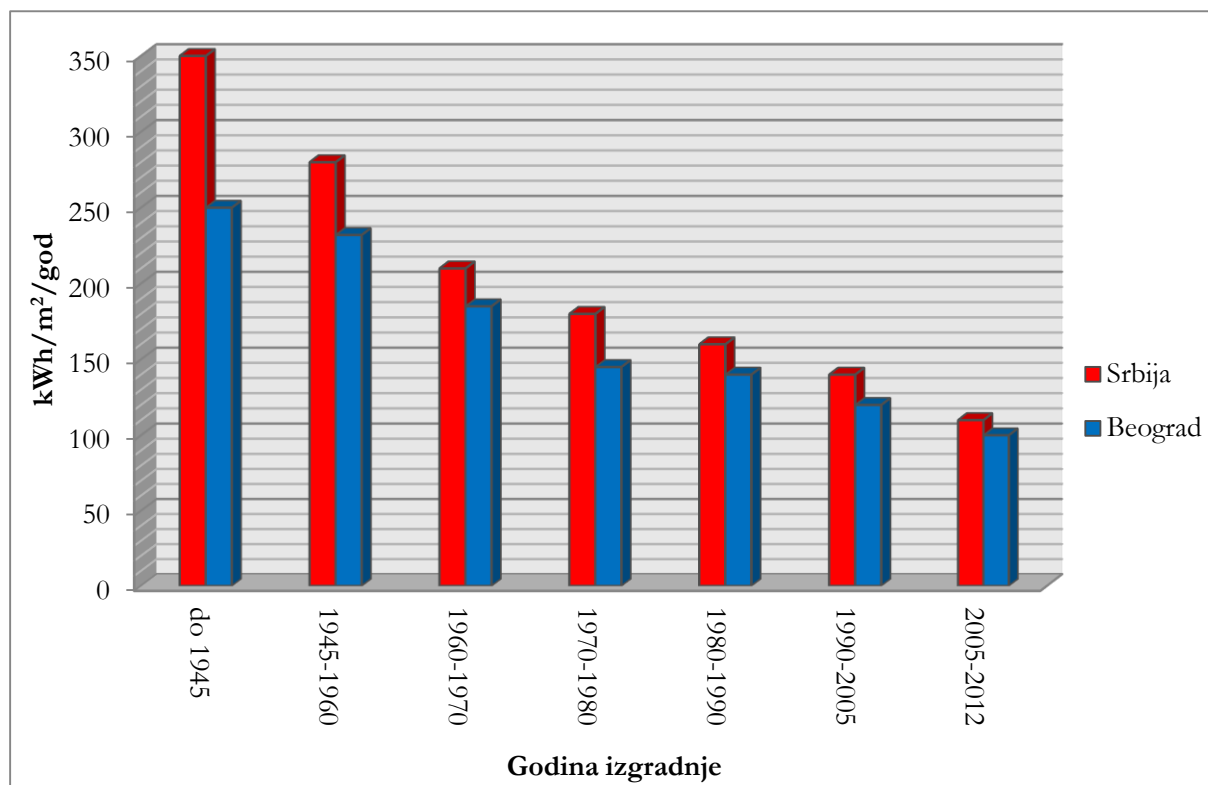
Na osnovu podataka Republičkog zavoda za statistiku, ukupna procenjena vrednost površine svih objekata u Srbiji iznosi oko 250 miliona m². Preko 90% svih objekata se nalazi u urbanim delovima, tj. gradovima. Najdominantniji tip zgrada su porodične kuće koje čine oko 50% ukupnog sektora. U tabeli 0.1 prikazani su različiti tipovi zgrada u Srbiji prema njihovoj procenjenoj površini i udelu u ukupnom sektoru.

Tabela 0.1: Sektor zgradarstva u Srbiji

Tip objekta		Procenjena površina (mil. m ²)	Udeo u ukupnom sektoru zgradarstva (%)
Stambeni sektor	Porodične kuće	123,00	49,2
	Stambene zgrade	70,00	28,0
Javni sektor	Bolnice	4,00	1,6
	Škole	12,00	4,8
	Javne zgrade	13,00	5,2
Poslovni sektor	Poslovne zgrade	20,00	8
Ostalo		8,00	3,2

Kao što se vidi iz tabele, poslovni sektor je procenjen na oko 20 miliona m². Najveći udeo u ovom sektoru čine hoteli, moteli i hosteli sa oko 34%, slede poslovne zgrade sa 30%, uslužne zgrade (šoping molovi i ostale prodavnice) sa 28% i ostale zgrade sa 8%. Ukupan broj poslovnih zgrada i prodavnica je teško odrediti, pošto se veliki broj njih nalazi u sklopu stambenih objekata.

Na slici 0.2, prikazane su procenjene vrednosti specifične potrošnje finalne energije po m² za poslovne zgrade u Beogradu i Srbiji u različitim periodima izgradnje.



Slika 0.2: Sektor zgradarstva u Srbiji i Beogradu

PREDMET, CILJ, HIPOTEZE I ALGORITAM ISTRAŽIVANJA

Vizija bez implementacije je sanjarenje;
Implementacija bez vizije je noćna mora
[Vision without implementing is a daydream;
Implementing without a vision is a nightmare]
(japanska poslovice)

Omotač (fasada), predstavlja deo objekta koji formira primarnu termičku barijeru između unutrašnjosti zgrade i spoljašnjeg uticaja meteoroloških i drugih uslova. On zauzima najznačajnije mesto u određivanju nivoa komfora, prirodnog osvetljenja i ventilacije, a na kraju i koliko je potrebno energije za grejanje i klimatizaciju posmatranog objekta. Omotač je u mogućnosti da u značajnoj meri unapredi unutrašnji komfor korisnika, pružajući veliki doprinos u "neenergetskim" benefitima. Pod ovim, naglasak je okrenut prema zdravlju i smanjenim troškovima lečenja korisnika.

Predmet istraživanja načelno se odnosi na razmatranje koncepta dvostrukih ventilisanih fasada (DVF) i njihov uticaj na energetske efikasnosti objekta. Koncept DVF predstavlja jedan od primera adaptivnih fasada. Nastao je kao želja i potreba inženjera da poboljšaju transparentnost, akustiku, unutrašnji komfor i estetski nivo objekata, a da se pri tome smanji potrošnja energije i njen uticaj na okolinu. DVF sa svojim dodatnim konstruktivnim elementima, postižu još bolju zaštitu objekata od nepovoljnih spoljašnjih uslova koristeći raspoloživu solarnu i energiju vetra, zagrevaju i rashlađuju, ili provetravaju objekat. Na taj način, kao što je pomenuto, fasada nije samo statička pregrada, već postaje i "snabdevač" i "upravljач" energijom u objektu.

Cilj istraživanja je razvoj fino podešenog (kalibrisanog) modela, koji bi simulativnom analizom omogućio određivanje termičkih karakteristika i predikciju potrošnje energije objekta sa dvostrukom ventilisanom fasadom (DVF) u realnim uslovima. Pojam kalibrisan model znači, da simulacijom ovakvog modela očekujemo da dobijemo rezultate bliske izmerenim vrednostima. Kako bi smo ostvarili zacrtani cilj, plan istraživanja se zasniva na eksperimentalnom radu (na realnom objektu) i numeričkim simulacijama modela realnog objekta. Rezultati eksperimentalnog dela istraživanja pokazaće na koji način termičke osobine objekta sa DVF zavise od trenutnih meteoroloških uslova. Takođe, ovi rezultati poslužiće za fino podešavanje modela i za postizanje što vernije slike realnog objekta. Kriterijum prihvatljivosti, kada je model kalibrisan, definišaće preporučeni statistički indikatori. Na taj način formiran model biće iskorišćen za definisanje sezonskih operativnih strategija. Rezultati simulacija za sve predložene operativne strategije, oćeniće kakav je njihov uticaj na potrošnju energije za grejanje i klimatizaciju u objektu. Poređenjem sa modelima objekata sa tradicionalnom fasadom, pokazaće se da li je i koliko opravdana primena koncepta DVF u klimatskim uslovima Beograda. Cilj je, da se uradi analiza za sve režime (letnji, prelazni i zimski) i da se da celogodišnja procena potrošnje energije.

Oćekivani rezultati istraživanja mogu biti od velikog znaćaja za buduću akademsku i inženjersku praksu u pristupu primene koncepta DVF. Analizama će se pokazati kvalitativno i kvantitativno, koje su to najpogodnije sezonske operativne strategije objekata sa DVF. Takođe, rezultati mogu poslužiti daljoj popularizaciji primene ovog koncepta u Srbiji, ili kao podrška zainteresovanim investitorima za donošenje odluke pri izboru tipa fasade poslovnog objekta.

Hipoteze istraživanja

Na osnovu postavljenog cilja, definišana je i osnovna hipoteza, da se primenom numeričkih simulacija fino podešenog modela objekta sa dvostrukom ventilisanom fasadom mogu realno odrediti njegove termičke karakteristike i definišati predložiti sezonskih operativnih strategija.

Za proveru hipoteze, u okviru istraživanja potrebno je da se ispune sledeći zadaci:

1. izbor ključnih termičkih karakteristika DVF koje će se pratiti i meriti;
2. razvoj fino podešenog modela posmatranog objekta, ćijom numeričkom simulacijom se dobijaju rezultati bliski izmerenim vrednostima. Kriterijumi prihvatljivosti modela definišani su preporućenim statističkim indikatorima;

3. da se sprovede analiza predloženih sezonskih operativnih strategija i pokaže njihov uticaj na energetska efikasnost objekta;
4. da se pokaže opravdanost primene koncepta DVF u poređenju sa tradicionalnim konceptom izgradnje fasade objekta.

Posebne hipoteze istraživanja su:

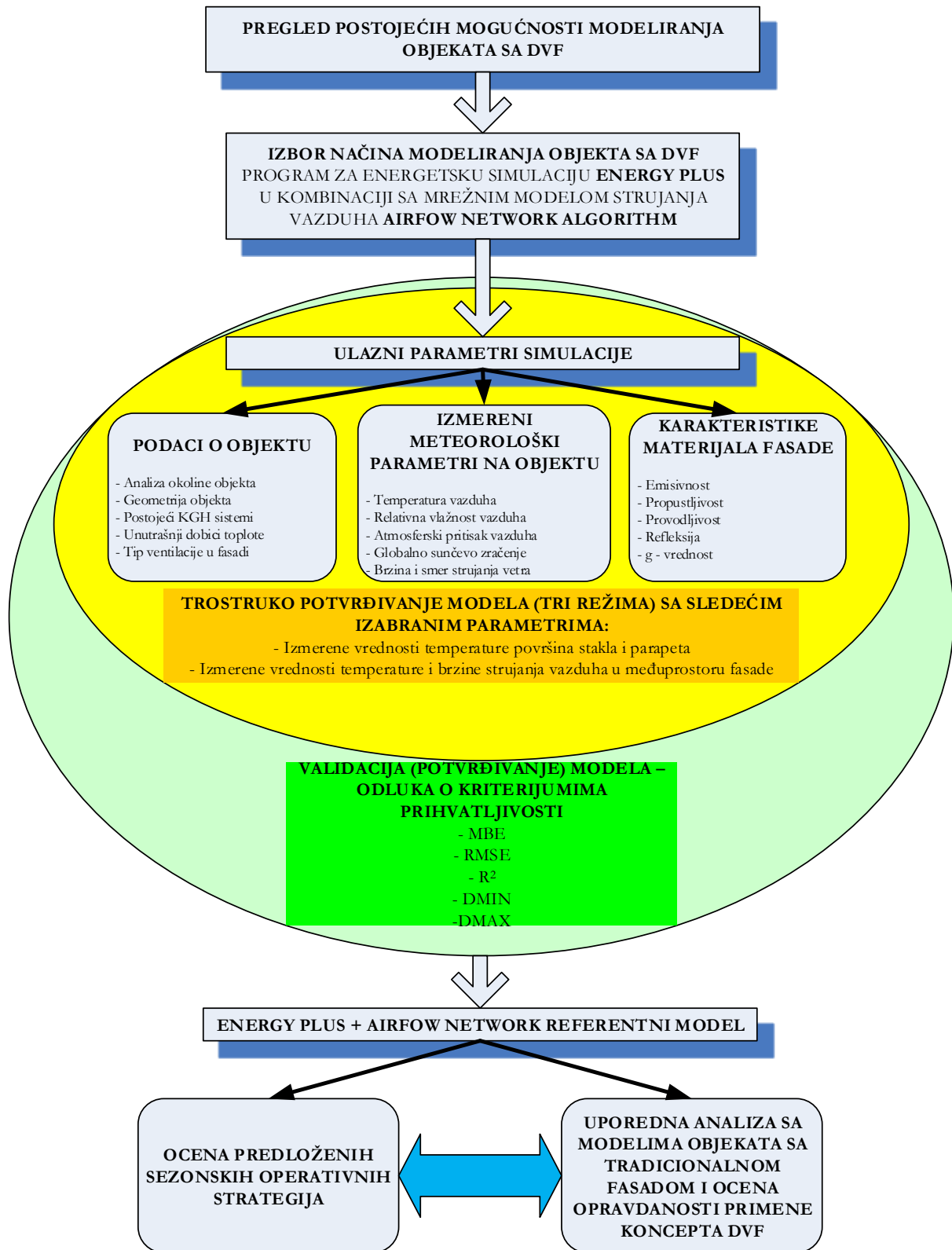
1. razvojem i finim podešavanjem modela, moguće je napraviti vernu sliku realnog objekta sa DVF;
2. primenom fino podešenog modela objekta, moguće je dobiti rezultate bliske izmerenim vrednostima;
3. primena koncepta i predloženih operativnih strategija objekta sa DVF u klimatskim uslovima Beograda povećava energetska efikasnost objekta.

Metode koje će biti primenjene u toku istraživanja

Predloženo istraživanje je interdisciplinarno. U skladu sa postavljenim ciljevima istraživanja, primeniće se odgovarajuća metodologija zasnovana na sledećem:

- pregled dosadašnjih stavova i prakse prilikom analize koncepta DVF;
- eksperimentalna analiza izabranih termičkih karakteristika objekta sa DVF;
- definisanje osnovnog modela objekta u programskom okruženju EnergyPlus, koji je povezan sa mrežnim algoritmom protoka vazduha AirFlow Network;
- fino podešavanje osnovnog modela objekta;
- potvrđivanje (validacija) modela preporučenim statističkim metodama;
- primena tehnike kvazidinamičke (na časovnom nivou) energetske simulacije modela objekta u izabranom programu EnergyPlus + AirFlow Network. Pod ovim se podrazumevaju računarske metode simulacije energetske performansi modela u različitim okolnostima i u različitim scenarijima. Rezultati simulacije predloženih sezonskih strategija daju rešenja i preporuke za efikasno projektovanje i upravljanje objekata sa DVF.

Algoritam istraživanja



1. DVOSTRUKE VENTILISANE FASADE - PREGLED LITERATURE

Cilj bez plana je samo želja
["A goal without a plan is just a wish"]
(Antoine de Saint-Exupery)
Želja za pobedom je ništa bez želje za dobrom pripremom
["The will to win is nothing without the will to prepare"]
(Juma Ikangaa)

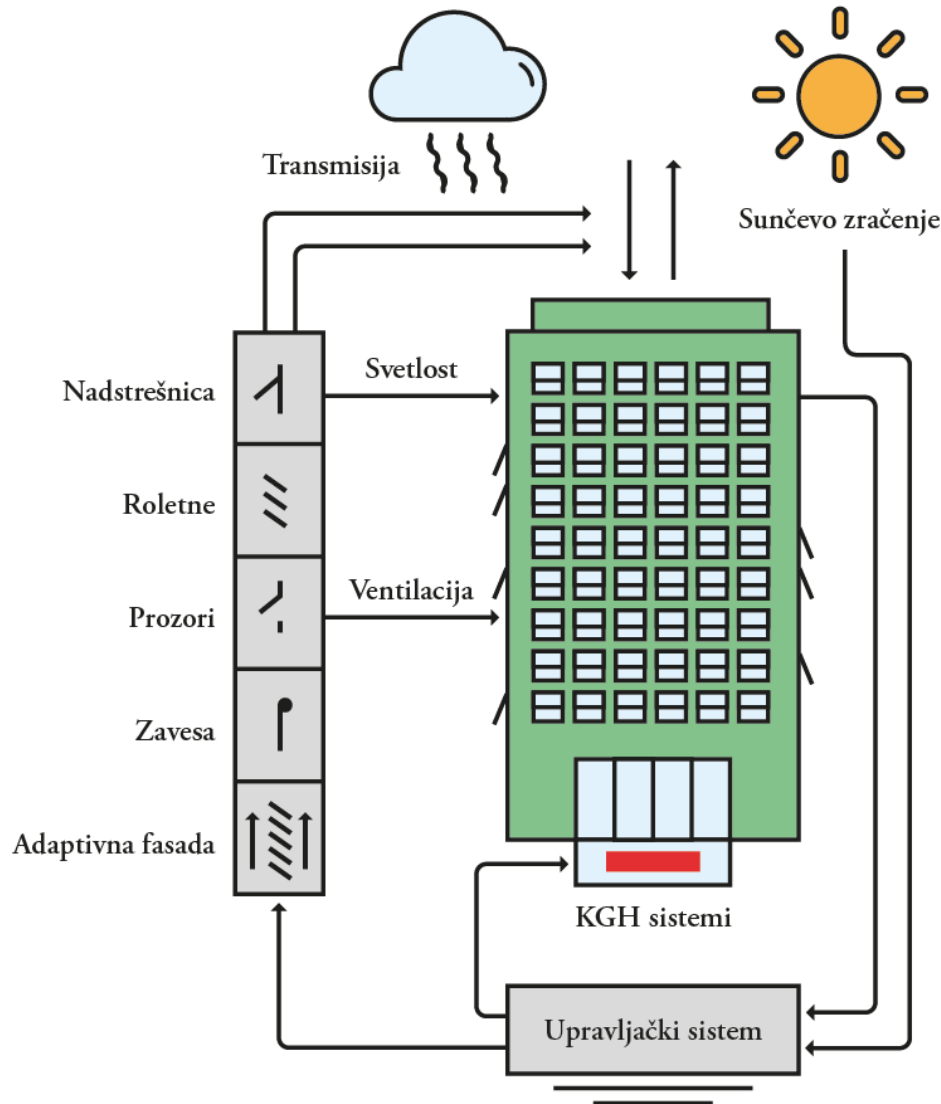
Istorijski gledano, zgrade su se razvile od struktura zasnovanih na masivnim zidovima sa malim otvorima, do struktura sa visokim procentom transparentnih površina koje se danas koriste. Kao posledica uvećanja staklene površine na fasadama objekata, sa energetskog stanovišta, gradnja je postala dramatično osetljivija na klimatske varijacije i uslove spoljašnje sredine. U skladu sa tim, kada moderna arhitektura zahteva sve veći udeo staklenih površina u fasadama objekata, svest o energetskoj efikasnosti objekta u celini postala je izuzetno važno pitanje.

Zahtevi za poboljšanjem energetske efikasnosti i kvaliteta unutrašnjeg komfora objekata kroz smanjenje potrošnje energije i investicionih troškova, motivišu naučnike i inženjere da pronalaze nova tehnička i tehnološka rešenja u sektoru zgradarstva. Objekti sa visokim procentom stakla poznati su po mnogobrojnim problemima, kao što su obezbeđenje zahtevanog unutrašnjeg termičkog i vizuelnog komfora u uslovima kako zimskog, tako i letnjeg režima. Potpuno zastakljeni objekti imaju očigledne nedostatke, kao što su povećani gubici u toku zime i povećan rizik od pregrevanja u toku letnjih meseci. Kako bi rešili navedene probleme, inženjeri pokušavaju da pronađu nove koncepte i pristupe u projektovanju ovih objekata. Korišćenjem novih tehnika i uređaja, kao što su uređaji za zaštitu od sunčevog zračenja, automatski uređaji za kontrolu provetravanja i ventilacije i kombinacijom premaza za stakla (nisko emisiona, reflektujuća stakla...), moguće je eliminisati deo problema. Da li je to dovoljno i da li može bolje?

Nisko emisiona stakla su razvijena u cilju povećanja nivoa izolacije fasade objekta, odnosno smanjenja uticaja sunčevog zračenja (reflektujuća). U tom smislu postoje tri tipa nisko-emisionih premaza: visoko transmisioni (za klimatske uslove gde dominira grejanje), nisko transmisioni (za klimatske uslove gde dominira hlađenje) i selektivni (za klimatske uslove koji zahtevaju i grejanje i hlađenje). Međutim, upotreba ovih tipova stakala odgovara zahtevima u jednom režimu, dok u drugom njihov uticaj može dovesti do neželjenih efekata - mora se pronaći kompromis prilikom odabira stakla. Pored toga, primenom novih metoda zaštite dolazi i do smanjenja prirodnog osvetljenja, a samim tim i do povećanja korišćenja veštačkog svetla. Ovo neminovno rezultira povećanjem dobitka toplote od električnih uređaja i kancelarijske opreme, koji se koriste da bi se nadoknadio nedostatak prodora prirodnog osvetljenja. Da bi se izašlo na kraj sa ovakvom situacijom, poslovni objekti sa visokim procentom stakla u fasadi sve više zahtevaju složene sisteme za klimatizaciju. Upotreba klimatizacije dovodi do povećanja potrošnje energije, što svakako dovodi do povećanja troškova. Veštački stvorena klima ni u kom slučaju ne odgovara normalnim, prirodnim uslovima na koje je čovek naviknut. Takođe, najnovije studije navode da duži boravak ljudi u prostorijama sa potpunom klimatizacijom dovodi i do smanjenja radnih sposobnosti i većeg stepena oboljevanja (Sindrom bolesnih zgrada – "Sick Building Syndrom"). Inženjeri se sada nalaze pred novim izazovom, kako pronaći optimalno rešenje između korišćenja ovih metoda i posledica koje one prouzrokuju? Kako pronaći novi koncept u izgradnji koji bi zadržao visok procenat transparentnosti fasade, a da se pri tom potrošnja energije za klimatizaciju ne poveća, ili da zahtevamo i njeno smanjenje. Da li je to koncept DVF?

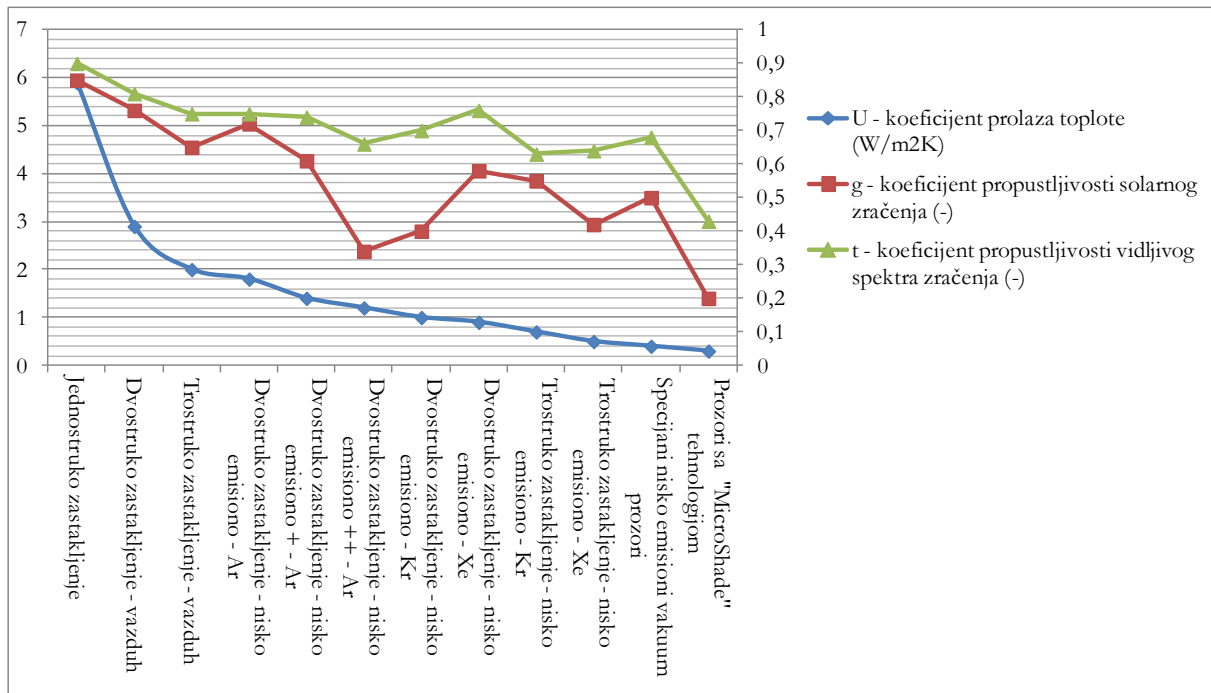
Sa druge strane, fasade se ne smeju posmatrati samo kao statička pregrada koja razdvaja spoljašnje od unutrašnjih termičkih uslova. One u svakom trenutku moraju biti prilagodljive klimatskim uslovima koji vladaju spolja. U kontekstu adaptivnih fasada, prema različitim autorima, nastali su pojmovi "aktivnih", "inteligentnih", "naprednih", "dinamičnih", "pametnih" i "interaktivnih" fasada.

Osnovni cilj jeste napraviti takvo prilagodljivo fasadno rešenje koje bi imalo mogućnost da reverzibilno i neprekidno menja neke od svojih funkcija i elemenata kao odgovor na promene spoljašnjih klimatskih uslova (granični uslovi), sve sa ciljem da se poboljšaju ukupne energetske performanse objekta (slika 1.1).



Slika 1.1: Koncept adaptivne fasade

Kao što je navedeno, od posebnog interesa za povećanje energetske efikasnosti objekata su otkrića u industriji stakla. Jednostruki prozori, koji su imali koeficijente prolaza toplote od 5 do 6 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, prvi put su poboljšani dodavanjem još jednog sloja stakla. Ovi prozori, koji su ličili na kutije, bili su uobičajena pojava u gradovima centralne Evrope [49] i imali su koeficijente prolaza toplote od oko 2,5 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$. Krajem 50-tih godina prošlog veka, razvijeni su dvostruki prozori. Koeficijent prolaza toplote je u ovom slučaju neznatno porastao na vrednost od oko 3 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, ali što je još važnije, izgradnja je znatno pojednostavljena. U daljem razvoju, količina staklenih slojeva povećana je do izgradnje tro, pa čak i četvostrukih prozora. Ovaj tip zastakljivanja u početku nije postao popularan zbog dodatne težine i dubine glazure, što je zahtevalo ojačavanje okvira prozora i šarki. Međutim, kako su zahtevi za smanjenje potrošnje energije bili sve rigorozniji, potrebe za ovom vrstom prozora su postale veće. Dalja poboljšanja, sa malim posledicama po težinu i dimenzije, ogledala su se u primeni nisko emisionih premaza (nizak e) i zameni suvog vazduha u šupljinama inertnim gasovima poput argona, kriptona i ksenona, ili korišćenjem vakuuma. U oblasti solarne kontrole, spektralni selektivni premazi niske emisivnosti efikasno su smanjili solarni prenos bez ugrožavanja vidljivosti i prozračnosti. Kao alternativa za ove premaze mogu se postavljati i poliester filmovi niske emisivnosti. Slika 1.2, ilustruje konstantno poboljšanje fizičkih svojstava staklenih površina.



Slika 1.2: Razvoj fizičkih svojstava staklenih površina

Kroz istoriju, ljudi su pokušavali da razviju strategiju i koncept koji će prevazići pitanja i probleme u vezi sa povećanom upotrebom stakla u novim poslovnim zgradama. Kao rezultat toga nastao je koncept dvostrukih ventilisanih fasada (DVF). Iako je prvobitno odbijen, danas ovaj koncept može da obezbedi visok nivo komfora (termalnog i vizuelnog) koristeći pasivne i druge operativne strategije. Renckens [55], tvrdi da se zbog sve većeg broja objekata sa tzv. sindromom bolesnih zgrada, pokreće oživljavanje koncepta dvostrukih ventilisanih fasada u poslovnim objektima. Mnogo više pažnje treba posvetiti integraciji prirodne ventilacije u višespratnim poslovnim zgradama putem dvostrukih ventilisanih fasada. Sve ovo dovodi do mogućnosti za postizanje idealnog komfora sa manje energije, približavajući se zacrtanom cilju nulte energetske potrošnje.

U narednom poglavlju biće predstavljen istorijat nastanka, razvoja i šta danas predstavlja koncept dvostrukih ventilisanih fasada.

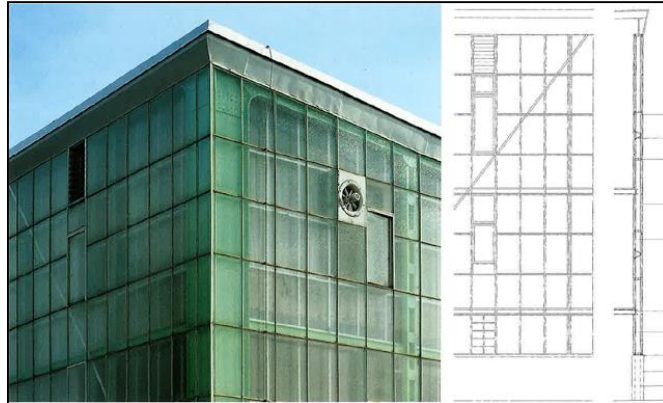
1.1 ISTORIJAT

Hronološki gledano, nastanak i razvoj dvostrukih ventilisanih fasada opisan je u nekoliko knjiga, izveštaja i članaka. Žan-Batist Jobard, koji je 1849. godine bio direktor industrijskog muzeja u Briselu, opisao je ranu verziju mehanički ventilisane višestruke fasade. On napominje kako u zimskom periodu topao vazduh treba da cirkuliše između dva sloja, dok leti to treba da bude hladan vazduh [19]. Bilo je potrebno 65 godina da se ova ideja ponovo javi, a 1914. godine, Pol Scheerbaert predlaže sličnu ideju u svojoj knjizi "Glasarchitectur" [65].

Preteča dvostrukih ventilisanih fasada su takozvane "zid zavesa" fasade ("curtain wall"). Najstarija poznata zgrada sa ovakvim tipom fasade je Steiff-ova fabrika [41] koju je projektovao Ričard Steiff u Giengenu u Nemačkoj (slika 1.3). Projektant je prvobitnu namenu zgrade osmislio kao fabriku igračaka. Glavna karakteristika zgrade trebala je da obezbedi poboljšano prirodno osvetljenje i poboljšanu izolaciju protiv ekstremno hladnog vremena i izlaganja zgrade jakim vetrovima, koji duvaju u ovom regionu. Zgrada se sastoji od trospratne strukture sa prizemnim

1. DVOSTRUKE VENTILISANE FASADE - PREGLED LITERATURE

delom za skladištenje i gornjih spratova namenjenih radnim prostorijama. Ona u osnovi koristi čelične okvire za fasadu, sa dopunama u vidu drvenih ramova. Zgrada je još uvek u upotrebi.



Slika 1.3: Steiff Factory, 1903. (Izvor: <http://facadesconfidential.blogspot.co.at>)

Drugi primer rane upotrebe ramova dvostruke fasade u omotačima mogu se videti u zgradi Poštanske štedionice u Beču koju je razvio Oto Wagner. Ova zgrada koristi čelične konstrukcije, kako bi držala staklene svetlarnike. Ovde je koncept dvostruke fasade korišćen kao svetlarnik za glavnu bankarsku salu [43]. Zgrada je trenutno u upotrebi, a urađeno je njeno renoviranje kako bi se uvela klimatizacija i poboljšalo osvetljenje.

Tokom dvadesetih godina prošlog veka, napravljen je pomak u gradnji objekata koji su koristili ovaj fasadni koncept. Moisei Ginzburg je koristio koncept dvostrukih fasada na komunalnom stambenom projektu Narkomfin zgrade, koju je projektovao 1928. godine, a koja je završena 1932. godine [7]. Ovo je nesumnjivo bilo jedno od njegovih najpoznatijih dela. Međutim, u ovom trenutku, objekat je u stanju raspadanja, jer je zgrada bez održavanja nekoliko decenija, iako se nalazi na listi ugroženih objekata Uneska (slika 1.4).



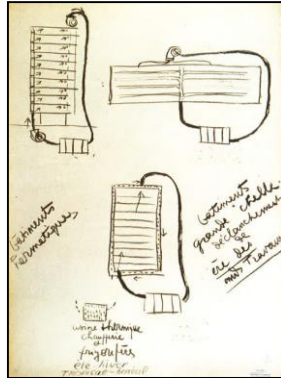
Slika 1.4: Zgrada Narkomfin u Moskvi, 1932. (Izvor: wikipedia.org)

Koncept dvostruke fasade je takođe bio analiziran i primenjen od strane Le Corbusier-a. Ono što je moguće zaključiti na osnovu njegovih projekata i radova, jeste da je Le Corbusier utvrdio pet različitih tehnika za efikasnije iskorišćenje koncepta DVF:

1. prirodna ventilacija;
2. prirodno osvetljenje;
3. solarna kontrola;
4. termički aktivna fasada u neprovidnim ili staklenim zidovima;
5. unutrašnja klimatizacija fasade.

1. DVOSTRUKE VENTILISANE FASADE - PREGLED LITERATURE

Dva aktivna koncepta, poslednja dva iz prethodnog niza, koja je Le Corbusier razvio u periodu između 1926. i 1933. godine bili su "Mur neutralisant" i "Respiration exacte" (slika 1.5). On je jasno naveo da oba koncepta treba da budu primenjena istovremeno, jer su komplementarna.



Slika 1.5: "Mur neutralisant" i "Respiration exacte" dijagram, objavljen u časopisu "Précisions"

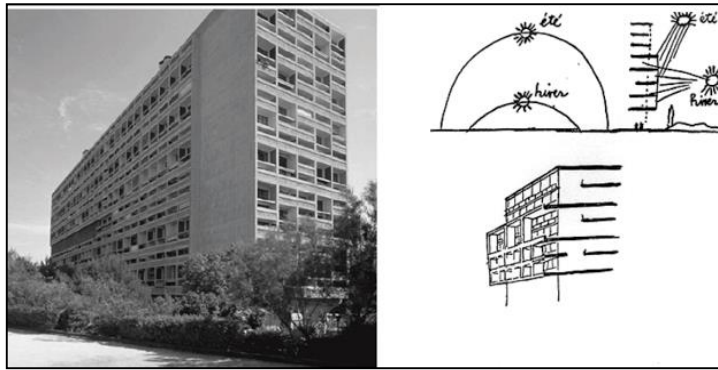
Prvi pokušaj implementacije ovih pritupa bili su objekti "Cite de Refuge" u Parizu i "Centrosyuz" u Moskvi. Namera mu je bila da se dobiju zadovoljavajući uslovi unutrašnjeg komfora tokom cele godine u oba klimatska podneblja. Takođe, on je želeo da primeni ovu ideju u objektu Ministarstva za laku industriju u Moskvi, međutim ideja je bila odbijena od strane investitora, a sam projekat nije ni zaživeo. Takođe, prethodna dva slučaja su bila bezuspešna.

Njegov koncept se sastoji od sistema dvostrukog staklenog panela sa prostorom za ventilaciju. Prilikom projektovanja vojnog hostela Cite de Refuge-a (1928), prikazanom na slici 1.6, on je predstavio pomenuti koncept u okviru svojih idejnih rešenja. Kao posledica ovog rešenja, Le Corbusier je bio u stanju da zameni tradicionalne prozore [71]. Ipak, sistem nije bio primenjen, jer se u to vreme smatrao veoma skupim za gradnju i veoma neefikasnim [3].



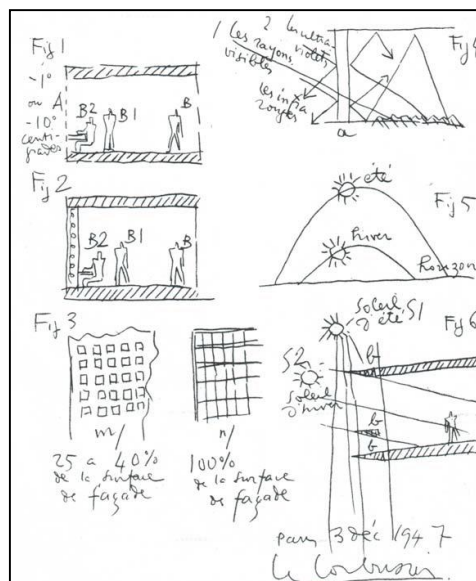
Slika 1.6: Vojni hostel "Cite de Refuge" u Parizu, pre i posle (Izvor: Le Corbusier Foundation)

Nakon neuspešnih pokušaja, Le Corbusier uspostavlja saradnju sa brazilskim arhitektama, koji su bili zaduženi za projektovanje zgrade Ministarstva za obrazovanje u Rio de Žaneiru 1936. godine, a naručilac izgradnje bio je Oscar Niemeyer. Zgrada je uključivala korišćenje aktivne solarne zaštite nazvane po njemu, "brise-soleil" [18]. Slika 1.7 ilustruje skicu elemenata za kontrolu zračenja u odnosu na sezonske pozicije Sunca.



Slika 1.7: Skica sistema za kontrolu zračenja prema poziciji Sunca (Le Corbusier, 1968.)

Tokom projektovanja zgrade Ujedinjenih nacija u Njujorku, Le Corbusier je poslao pismo senatoru Austin-u 1947. godine [44]. Pošto je jedan od zahteva za fasadu zgrade bio da ona bude urađena po principu "zid zavese", on je ponovo predložio svoj pronalazak "Mur neutralisant". Ovaj koncept je objasnio: "kao sistem velikih staklenih panela postavljenih u aluminijskim okvirima; paneli bi bili dupli, razmaknuti stopu jedan od drugog; u ovom prostoru bi topao vazduh cirkulisao tokom zime, a hladan vazduh tokom leta". On, takođe, pominje da bi fasada objekta, zbog ekstremnih uslova tokom leta u Njujorku, zahtevala i kontrolu sunčevog zračenja putem "brise-soleil"-ja, kako bi se izbeglo pregrevanje. U svom pismu, on detaljno objašnjava analizu dnevnog osvetljenja, raspored otvora na objektu i orijentaciju fasade, zbog koje je "Mur Neutralizan" sa ventilisanim otvorima bio od vitalnog značaja bio za istočnu fasadu. Slika 1.8 ilustruje crteže koji su bili uključeni u pismu, obrazlažući ideje koncepta fasade i solarne kontrole.



Slika 1.8: Crteži koji opisuju Le Corbusier-ove ideje za zgradu UN-a, sadržaj pisma poslatog senatoru Austin-u, 1947. (Le Corbusier, Izvor: Architectural Review, 1950.)

Prve studije o takozvanim provetravajućim prozorima ("airflow-windows") objavljene su 50-tih godina prošlog veka u Skandinaviji [6, 52, 57]. Zadatak studije je bio poboljšanje energetske efikasnosti i komfora stambenog prostora. Godine 1957. prvi patent koji se odnosi na ovaj tip prozora, prikazan je u Švedskoj, a 1967. godine kompanija EKONO je izgradila prvu poslovnu zgradu u Helsinkiju, Finska [6, 52].

1. DVOSTRUKE VENTILISANE FASADE - PREGLED LITERATURE

Kako je vreme prolazilo, a modernizam postao široko prihvaćen, koncept fasade tipa "zid zavesa" postaje prepoznatljiva odlika tog doba. Ovaj tip fasade podrazumeva korišćenje jednostruke staklene fasade, prilikom projektovanja omotača objekta. Ideje koje su gotovo zaboravljene, postale su opšte prihvaćen način gradnje za velike američke korporacije. Nemački arhitekta, Mies van der Rohe, koji je emigrirao u SAD, izdvaja se kao jedan od prvih koji je koristio ovaj koncept u visokogradnji. Godine 1950. IBM-ova centralna zgrada u Čikagu (slika 1.9) bila je jedan od mnogih objekata na kome je primenjen koncept potpuno zastakljene fasade.



Slika 1.9: IBM Plaza, Chicago, USA (Van der Rohe, L. M., 1950.)

Nakon preliminarnih pokušaja Le Corbusier-a da primeni koncept dvostruke fasade, ne postoji relevantan napredak na ovom polju do kasnih 70-tih godina prošlog veka. Prva zgrada u Severnoj Americi, koja je primenila Le Corbusier-ov koncept duplih fasada, bila je hemijski centar, takođe poznat kao Hooker-ova poslovna zgrada na Nijagarinim vodopadima. Ova zgrada je projektovana po idejama Cannon-a i Hooker-a (1978. godine), a kada je završena 1980. godine postala je jedan od najstarijih primera objekta sa dvostrukom fasadom (slika 1.10) [27].

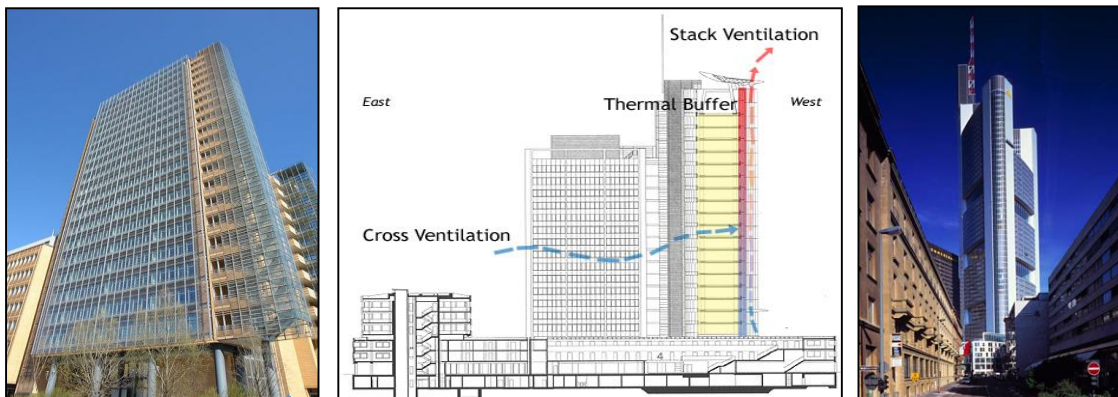


Slika 1.10: Hooker-ova zgrada, 1980. (Izvor: www.architecture.uwaterloo.ca)

Drugi objekat koji je inkorporirao koncept dvostrukih fasada bila je zgrada "Lloids", projektovana od strane Richard Rogers-a u kasnim 70-im godinama prošlog veka. U ovoj zgradi, neki delovi fasade uključuju tampon zonu zbog izolacije i kontrolisanog provetravanja [78]. U Britaniji, koncept je postao popularan 80-tih godina prošlog veka. Kompanija Arup je ovaj koncept prva primenila na poslovnoj zgradi "Briarcliff House" u Farnborou. Zgrada sadrži dvostruku fasadu koja se koristi za zvučnu izolaciju, solarnu zaštitu i ventilaciju. U objektu postoji i kombinacija mehaničke i prirodne ventilacije i na taj način se ostvaruju uštede energije potrebne za grejanje objekta [17].

1. DVOSTRUKE VENTILISANE FASADE - PREGLED LITERATURE

Rastuća svest o energetskej efikasnosti i uštedi energije u sektoru zgradarstva, uticala je na širenje i veću primenu koncepta dvostrukih fasada u izgradnji poslovnih zgrada. Zgrade poput sedišta GSW-a dizajnirane od strane Sauerbrucha-a i Hutton-a, Debis (arhitekta Renzo Piano), sedište Commerzbanke (arhitekta Norman Foster), samo su neke od primera koje koriste ovaj pristup projektovanju (slika 1.11).



Slika 1.11: GSW, Debis i Commerzbank (Izvor: wikipedia.org)

Zbog povećane tražnje klijenata i investitora, a kao rezultat inovativnog i modernog pristupa projektovanju, gde je staklo dominantni element u fasadama poslovnih objekata, ovaj koncept postaje opšte prihvaćen posebno u Evropi. Primer je zgrada Swiss Re, poznata kao "Gherkin", koju je dizajnirao Norman Foster (slika 1.12). Ova zgrada se u većini arhitektonskih časopisa opisuje kao kamen temeljac održive arhitekture.

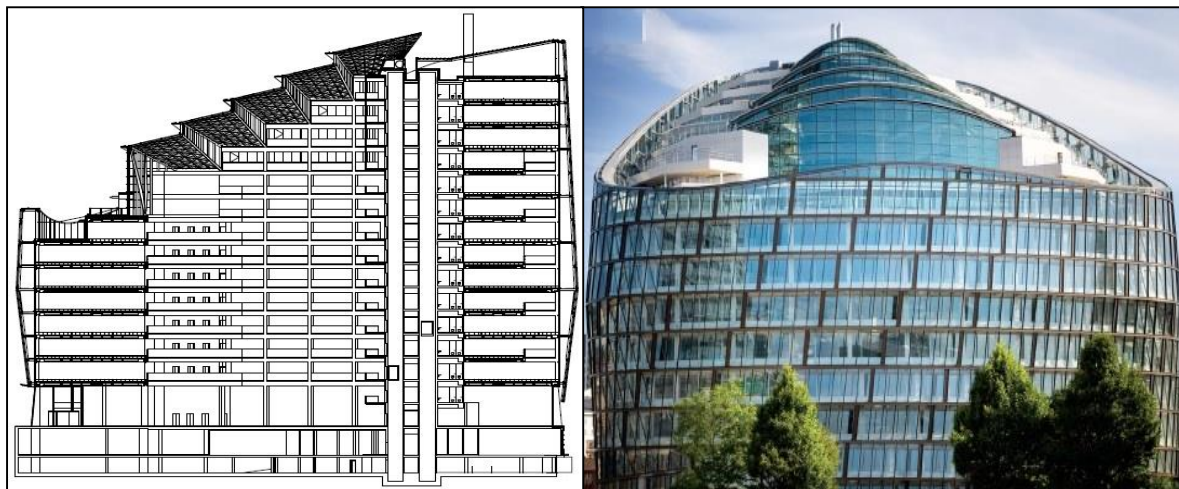
Danas, najpoznatiji primeri građevina sa dvostrukim fasadama su: Beetham Tower, City Hall, Loyd's u Londonu, Gotz-GmbH-ov poslovni objekat u Wurzburg-u, RWE AG-ova poslovna zgrada u Esenu, City Gate u Dizeldorfu, The Sydney Tower u Australiji, kao i The Shanghai Tower u Kini (slika 1.12). U SAD, interesovanje za dvostruke fasade je na mnogo nižem nivou.



Slika 1.12: The Sydney Tower, The Shanghai Tower i The Gherkin (Izvor: wikipedia.org)

Kao dokaz da objekti sa DVF mogu biti visoko efikasni, ističe se primer najnovijeg projekta poslovne zgrade "One Angel Square" u Mančesteru, UK (slika 1.13), koja je završena polovinom 2013. godine. Zgrada je dobila najvišu ocenu ikada po međunarodnom sistemu za sertifikaciju BREEAM (ocena 95,15%). Objekat ima ukupno 30.439 m² korisne površine, raspoređenih na 15 spratova i u kojem je zaposleno oko 3.000 radnika. Fasada je u potpunosti urađena po konceptu DVF koja svojom konfiguracijom omogućava dovoljan dotok dnevnog osvetljenja uz neophodnu termičku zaštitu, kako u letnjem, tako i zimskom režimu. Svi energetskeji zahtevi objekta se

podmiruju iz sopstvenog CHP postrojenja na biomasu. Sa BREEAM sertifikatom "Outstanding", ovaj projekat predstavlja najbolji primer održivog "Eco-friendly" objekta na svetu.



Slika 1.13: Objekat "One Angel Square" u Mančesteru, UK (Izvor: zvanična brošura objekta)

1.2 DEFINICIJA KONCEPTA

Definicijom koncepta dvostrukih fasada bavili su se mnogi autori u svojim radovima, člancima, doktoratima, a na kraju i u relevantnim standardima. Kako bi originalnost definicije ostala na visokom nivou, navodi autora će ostati na engleskom jeziku.

Među prvima svoju definiciju izneo je Oesterle u svojoj knjizi [49]: "a multi layered façade envelope, which has an external and internal layer that contains a buffer space used for controlled ventilation and solar protection".

Saelens, [61] dvostruke fasade definiše kao: "an envelope construction, which consists of two transparent surfaces separated by a cavity, which is used as an air channel. This definition includes three main elements: (1) the envelope construction, (2) the transparency of the bounding surfaces and (3) the cavity airflow".

Prema Safer-u [59]: "Double-skin facade is a special type of envelope, where a second skin, usually a transparent glazing, is placed in front of a regular building facade. The air space in between, called the channel, can be rather important (up to 0.8 - 1.0 m). In general the channel is ventilated (naturally, mechanically, or using a hybrid system) in order to diminish overheating problems in summer and to contribute to energy savings in winter".

Ding [76] je izneo da: "Double-skin facade is composed of an external facade, an intermediate space and an inner facade. The outer facade layer (glazing) provides protection against the weather and improved acoustic insulation against external noise. An adjustable sunshade device, such as blinds, is usually installed in the intermediate space to protect the internal rooms from high cooling loads caused by insulation".

U poređenju sa jednoslojnim fasadama Roth [58], je definisao dvostruke fasade kao: "Compared to a single-skin facade, a DSF consists of an external glazing offset from an internal glazing integrated into a curtain wall, often with a controllable shading system located in the cavity between the two glazing systems. Typically, the external glazing is a single layer of heat-strengthened safety or laminated safety glass, while the interior layer consists of single- or double pane glass with or without operable windows".

Kim [37] i Wang [75] navode da: "Double-skin facades are multiple layer skins construction with an external skin, an intermediate space and an inner skin. The external and internal skins could be of either single glaze or double glazed glass panes of float glass or safety glass. An adjustable sun shading device is usually installed at the intermediate space for thermal controls. The double-skin constructions generally could be grouped under Box Window facade, Shaft-box facade, Corridor facade and Multi-story facade".

Chan [9] navodi da: "Double skin facade refers to a building facade covering one or several stories with multiple glazed skins. The skins can be air tight or naturally/mechanically ventilated. The outer skin is usually a hardened single glazing and can be fully glazed. Inner skin can be insulating double glazing and is not completely glazed in most applications. The width of the air cavity between the two skins can range from 200 mm to more than 2 m. An air-tightened double skin facade can provide increased thermal insulation for the building so as to reduce the heat loss in winter season. On the other hand, moving cavity air inside a ventilated double skin facade can absorb heat energy from the sunlit glazing and reduce the heat gain as well as the cooling demand of a building".

I na kraju, evropski standard prEN 13119 [8] uvodi novu terminologiju i pravi razliku između konstrukcija tipa "zid zavesa" i dvostrukih fasada. Međutim, u ovom standardu se ne pominje ventilisani međuprostor dvostruke fasade. U tom smislu nije moguće izjednačiti pojmove dvostruka i dvostruka ventilisana fasada.

Definicije su sledeće: "Curtain walling: external building facade produced with framing made mainly of metal, timber or PVC-U, usually consisting of vertical and horizontal structural members, connected together and anchored to the supporting structure of the building, which provides, by itself or in conjunction with the building construction, all the normal functions of an external wall, but does not contribute to the load bearing characteristics of the building structure". "Double-Skin Facade: a curtain wall construction comprising an outer skin of glass and an inner wall constructed as a curtain wall that together with the outer skin provide the full function of a wall".

Da bi se izbegle moguće terminološke zabune, u ovom radu ćemo uvesti novi termin "dvostruke ventilisane fasade (DVF)", bez obzira na način strujanja vazduha (prirodna - uzgonska sila + dejstvo vetra, mehanička - uz pomoć ventilatora u međuprostoru fasade i mešovita - kombinacija prve dve).

Na osnovu svega izloženog definicija dvostruke ventilisane fasade – DVF može se predstaviti kao: aktivna konstrukcija omotača (ili dinamička izolacija) zgrade koja se sastoji iz dva integrisana sloja između kojih se nalazi međuprostor kroz koji struji vazduh. Ključna razlika između dvostruke ventilisane fasade i tradicionalne fasade je namerno i najčešće kontrolisano strujanje vazduha u međuprostoru. Spoljašnji (drugi) sloj uvek predstavlja staklena površina, dok unutrašnji (prvi) sloj može biti staklena ili tradicionalna fasada (kombinacija zida i prozora). Najčešća širina međuprostora je od 0,4 m do 1 m. Strujanje vazduha može biti kontrolisano pomoću ventilatora i/ili površine poprečnog preseka otvora, ili da je nekontrolisano i obavlja se pomoću otvora nepromenljive površine poprečnog preseka. Automatski uređaji kao što su venecijaneri, klapne i ventilatori, nalaze se integrisani u međuprostoru fasade. Današnja primena koncepta DVF koristi se i kao projektno rešenje i kao rešenje koje se koristi za obnovu ili zaštitu istorijskih i drugih fasada (revitalizacija i zaštita starih objekata).

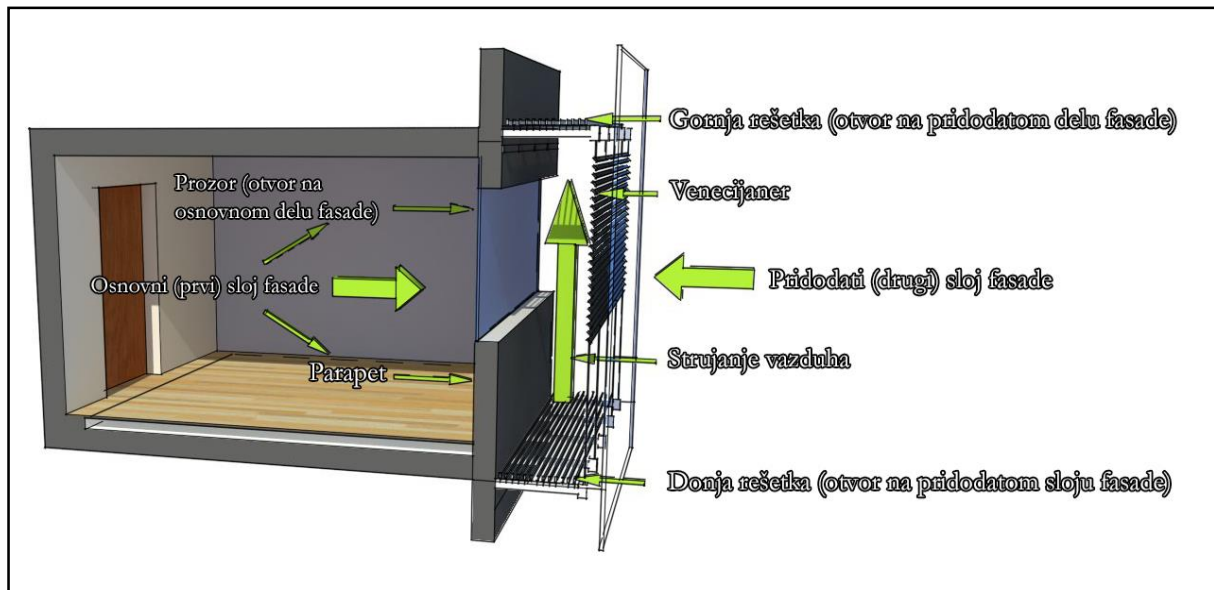
Ključni principi na kojima funkcionišu DVF su pre svega:

1. dinamičko ponašanje;
2. prilagodljivost;
3. sposobnost obavljanja različitih funkcija;
4. inteligentna kontrola.

Koncepti "dinamičnost" i "prilagodljivost" podrazumevaju činjenicu da se funkcije, karakteristike i termofizička svojstva elemenata DVF menjaju tokom vremena i na preporučeni način uklapaju, sa jedne strane prema zahtevima objekta i korisnika (grejanje i hlađenje, veća ili manja potreba za ventilacijom...), a sa druge strane prema različitim graničnim uslovima (meteorološki, unutrašnji dobici toplote, procenat zagađenja...).

1.3 KONCEPT I KLASIFIKACIJA DVF

Osnovno obeležje objekata sa dvostrukom ventilisanom fasadom predstavlja pridodati spoljašnji sloj fasade, koji stvara poboljšanu izolaciju (termičku i zvučnu) i vrši zaštitu uređaja za regulaciju sunčevog zračenja od nepovoljnih spoljašnjih uticaja. Takođe, omogućava otvaranje prozora na unutrašnjoj fasadi, izbegavajući probleme lošeg vremena ili potencijalne krađe. Ova karakteristika, u povoljnim meteorološkim uslovima, omogućava noćnu ventilaciju kao način za rashlađivanje objekta u toku leta. Na slici 1.14 opisan je primer klasične DVF sa pratećim delovima.



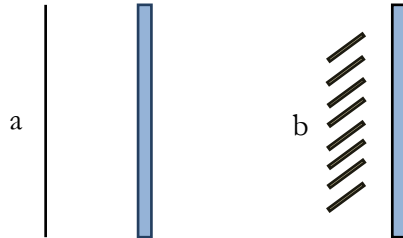
Slika 1.14: Primer koncepta DVF

1.3.1 KONSTRUKCIJA DVF

Postoji veliki broj konstruktivnih rešenja DVF koji nastaju različitim kombinacijama elemenata fasade. Osnovi delovi fasade su [70]:

1. osnovni ili prvi sloj fasade, najčešće predstavlja staklenu površinu ili tradicionalnu fasadu sastavljenu od parapetnog i prozorskog dela;
2. pridodati ili drugi sloj fasade, najčešće je konstruisan od jednostrukog stakla, sigurnosnog, kaljenog ili višeslojnog, kao i od termoizolacionog stakla za efikasniju termičku izolaciju vazdušnog sloja međuprostora. U nekim slučajevima kada se zahteva

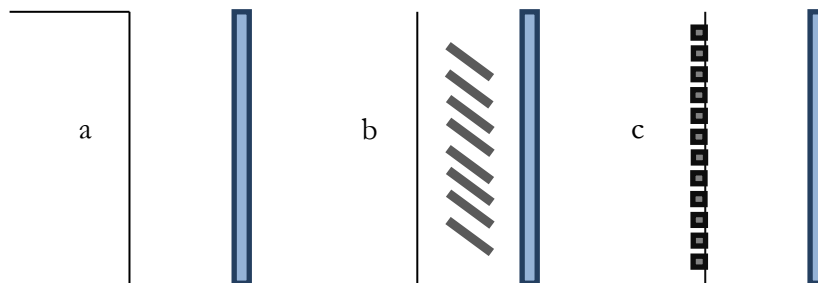
cirkulacija vazduha između prostorija i fasade, drugi sloj fasade može biti i dvostruko staklo, kako bi se smanjili gubici (izrazito hladna klimatska područja). Međuprostor koji se nalazi između ova dva sloja, donosi glavne prednosti ovog tipa fasade u smislu potrošnje energije, komfora i estetike. Konstrukcija ovog sloja može biti sastavljena od fiksnih ili pokretnih panela (Slika 1.15). Kod pokretnih panela se može očekivati lošija termička i zvučna izolacija;



Slika 1.15: Izvedbe drugog sloja fasade (a - Fiksni paneli; b – Pokretni paneli)

3. sistem za kontrolu i zaštitu od sunčevog zračenja, predstavlja elemente fasade koji primaju i reflektuju zračenje, sprečavajući pregrevanje objekta i/ili vazduha u međuprostoru koji se koristi za ventilaciju. On predstavlja ključni faktor u sprečavanju povećanja toplotnih dobitaka kod objekata sa visokim procentom stakla u fasadi. Osnovi tipovi zaštite (Slika 1.16) mogu se svrstati u sledeće grupe (takođe se može vršiti i njihova kombinacija):

- ispusti ili prepusti, zadržavaju solarne dobitke za vreme kada se Sunce nalazi u zenitu i na taj način redukuju uticaj zračenja. Dobro rešenje za uslove sa veoma toplom klimom;
- roletne ili venecijaneri se smeštaju u međuprostoru fasade, gde su zaštićeni od loših spoljašnjih uticaja. Nedostatak je mogućnost pregrevanja međuprostora. Ovaj problem se izbegava kontrolom uređaja i ventilacijom međuprostora. Automatskom kontrolom upravljanom prema poziciji Sunca, pomoću ovih uređaja se propušta dovoljna količina zračenja i svetlosti u objekat;
- premazi za staklo se najčešće koriste, kako bi se prilagodio koeficijent apsorpcije ili refleksije stakla. Stakla sa premazima uvek smanjuju prolaz sunčevog zračenja u objekat. Za pregrevanje vazduha u međuprostoru predložena tehnika nije efikasna kao venecijaneri. Najveći nedostatak ove tehnike je nemogućnost kontrole prolaza i apsorpcije zračenja. Što se tiče zaštite od pregrevanja, tehnika sa ispuštima ima mnogo bolje rezultate;



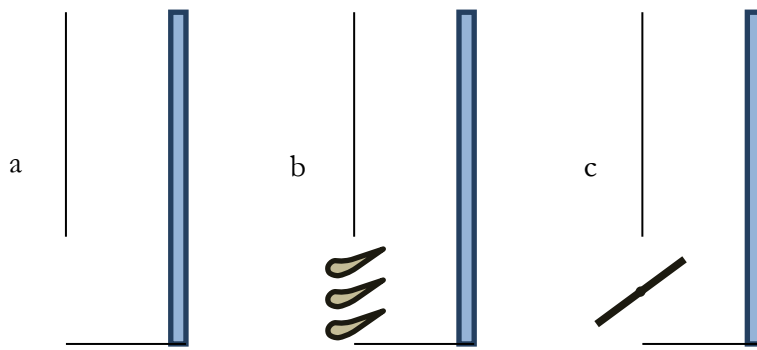
Slika 1.16: Sistem za kontrolu i zaštitu od sunčevog zračenja (a - Ispusti; b – Venecijaneri; c – Premazi za staklo)

4. otvori na fasadi se dele na one koji se nalaze na prvom ili drugom sloju fasade. Otvori na prvom sloju fasade najčešće predstavljaju prozore koji omogućuju ventilaciju između objekta i međuprostora fasade. Sa stanovišta energetske performanse objekta, ovi otvori

igraju jednu od najznačajnijih uloga, pošto se njihov efekat direktno reflektuje na unutrašnju klimu. Postoje različite izvedbe prozora čiji se otvori prilagođavaju zadatom slučaju. Mogu biti automatski podešeni ili da zahtevaju ručno otvaranje. Takođe, mogu postojati i mali otvori tzv. "trickle fan" koji propuštaju male količine vazduha. Prednost ovoga je kompaktna konstrukcija, ali se pojavljuju problemi sa zvučnom izolacijom. Na kraju, može se koristiti i mehanička ventilacija koja je u svakom trenutku kontrolisana. Problemi, kod ovog slučaja, vezani su za povećanu potrošnju električne energije i buke.

Što se tiče otvora na drugom sloju, oni omogućavaju ventilaciju između fasade i spoljašnje sredine [70]. Postoje tri opšte izvedbe (Slika 1.17):

- slobodni i nezaštićeni otvori na ulazu i izlazu je rešenje koje je najjeftinije, najjednostavnije, ali daje najlošije termičke i zvučne karakteristike;
- rešetkasti otvori na ulazu i izlazu štite objekat od nečistoća i insekata i imaju bolje termičke i zvučne karakteristike. Nedostatak je što smanjuju efekat vetra, koji može imati ključnu ulogu u stabilizaciji strujanja u međuprostoru i nemaju mogućnost kontrole;
- damperi dozvoljavaju kontrolu protoka vazduha i zbog toga imaju najbolje termičke i zvučne karakteristike.



Slika 1.17: Tipovi otvora na drugom sloju fasade (a - Slobodan; b – Rešetkast; c – Damper)

1.3.2 KLASIFIKACIJA DVF

Na osnovu opšteprihvaćenog načina klasifikacije DVF, usvajaju se tri osnovna kriterijuma podele [54]:

1. prema tipu ventilacije, odnosno prema pogonskoj sili koja je obezbeđuje;
2. prema načinu ventilacije (misli se na putanju);
3. prema fasadnoj konstrukciji i podeljenosti međuprostora.

Pogonska sila protoka vazduha u međuprostoru definiše i tip ventilacije. U skladu sa tim imamo tri tipa ventilacije i to [54]:

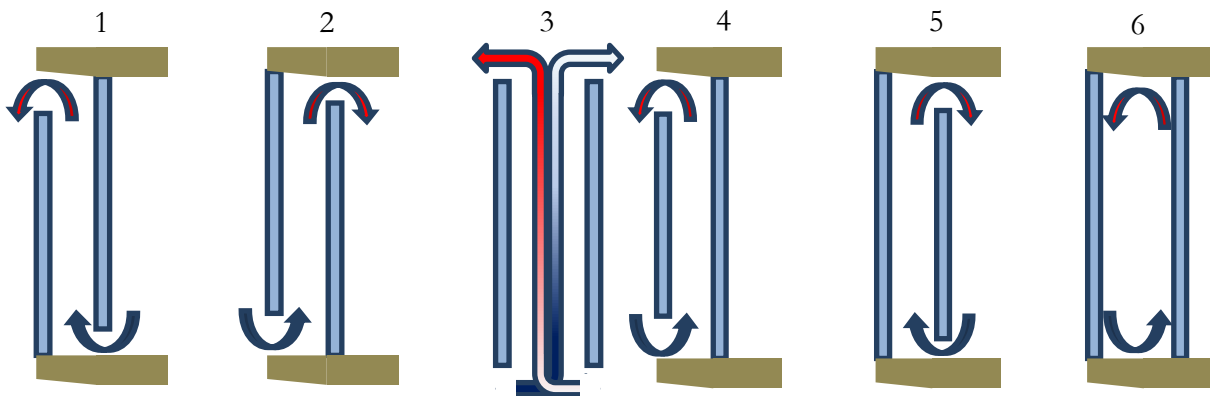
- prirodna ventilacija, kod koje razlika pritiska nastaje usled dejstva vetra ili razlike u temperaturama (uzgonska sila);
- mehanička ventilacija, nastaje usled dejstva radnih mašina (ventilatora);
- hibridna (kombinovana) ventilacija, nastaje kao kombinacija prirodne i mehaničke ventilacije. Princip je da se prirodna ventilacija koristi dokle god je to moguće. Mehanička ventilacija se uključuje tek kada prirodna ne može da obezbedi dovoljan protok vazduha.

Strujanje vazduha na prvom mestu zavisi od polja pritiska u međuprostoru. Sa druge strane zavisi od niza faktora, kao što su brzina i pravac vetra, sunčevo zračenje, način rada mehaničkog sistema za ventilaciju same zgrade itd.

Važno je naglasiti da ventilacija ima presudan značaj na formiranje povoljnih termičkih karakteristika fasade. S obzirom na to, treba imati na umu da je kod mehaničke ventilacije uvek moguće ostvariti željeni režim strujanja, što nije slučaj kod prirodne ventilacije, koja u najvećoj meri zavisi od meteoroloških uslova. Zaključak je da je najprikladniji tip hibridna ventilacija.

Strujanje vazduha kroz međuprostor predstavlja, takođe, važno pitanje i u tesnoj je vezi sa načinom na koji se integriše u KGH i kontrolne sisteme objekta. Ovaj kriterijum se odnosi na raspored izvora i ponora u strujnom polju unutar DVF. Slika 1.18, prikazuje moguća rešenja strujanja vazduha [54]:

1. ventilacija unutrašnjim vazduhom, pomoću njega se provetrava fasada i uklanja vazduh iz prostorija;
2. ventilacija svežim vazduhom, pomoću spoljašnjeg vazduha fasada se provetrava i vazduh se uvodi u unutrašnji prostor ili u klimatizacioni sistem;
3. reverzibilna ventilacija, ponaša se kao prethodne dve izvedbe u zavisnosti od trenutnih unutrašnjih/spoljašnjih uslova, ili zahteva kontrolnog sistema;
4. ventilacija svežim vazduhom bez kontakta sa vazduhom iz prostorija (spoljašnja vazдушna zavesa), spoljašnji vazduh se kroz usisne otvore uvodi u međuprostor, da bi odmah bio potisnut ka ispuscima, nazad u atmosferu. Na taj način formira se spoljašnja vazдушna zavesa;
5. ventilacija unutrašnjim vazduhom bez kontakta sa spoljašnjim vazduhom (unutrašnja vazдушna zavesa), unutrašnji vazduh struji kroz međuprostor fasade i ponovo se vraća u prostoriju, ili direktno, ili kroz klimatizacioni sistem. Na taj način formira se unutrašnja vazдушna zavesa;
6. bafer zona, formira se tako što su svi otvori na fasadi zatvoreni. U tom slučaju sloj umirujućeg vazduha deluje kao izolator. Postoji i mogućnost da bafer zona bude povezana sa spoljašnjom sredinom, zbog ujednačavanja pritiska u međuprostoru.



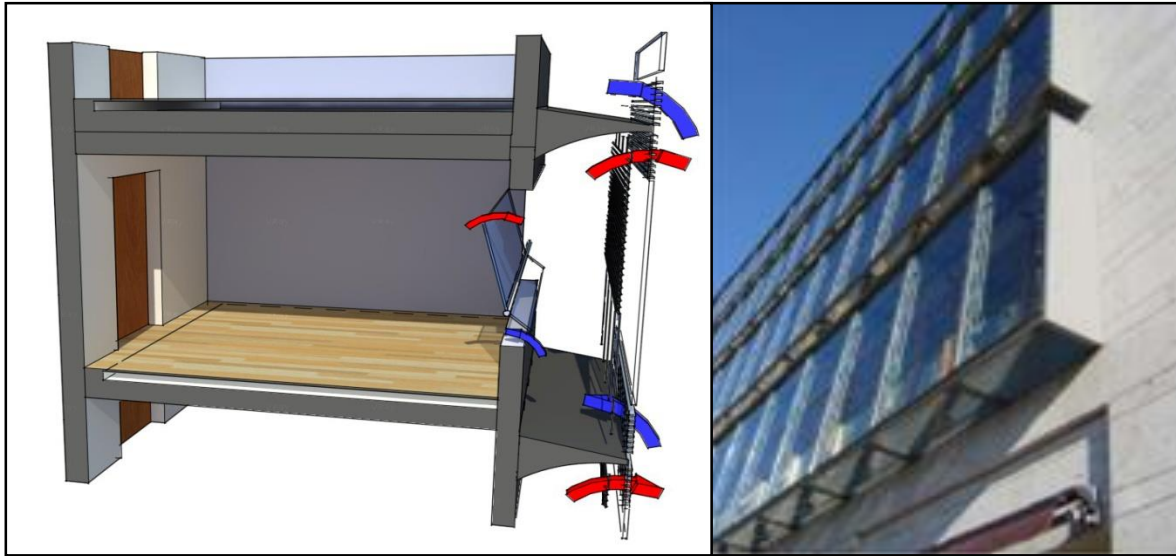
Slika 1.18: Tipovi ventilacije (1, 2, 3, 4, 5 i 6)

Kod analiziranih rešenja 1, 2, 4 i 5, može se pojaviti strujanje i u obrnutom smeru, sve u zavisnosti od trenutnih uslova i razlike pritiska.

Kada posmatramo fasadnu konstrukciju i podeljenost međuprostora, u praksi se javljaju sledeća projektna rešenja [54]:

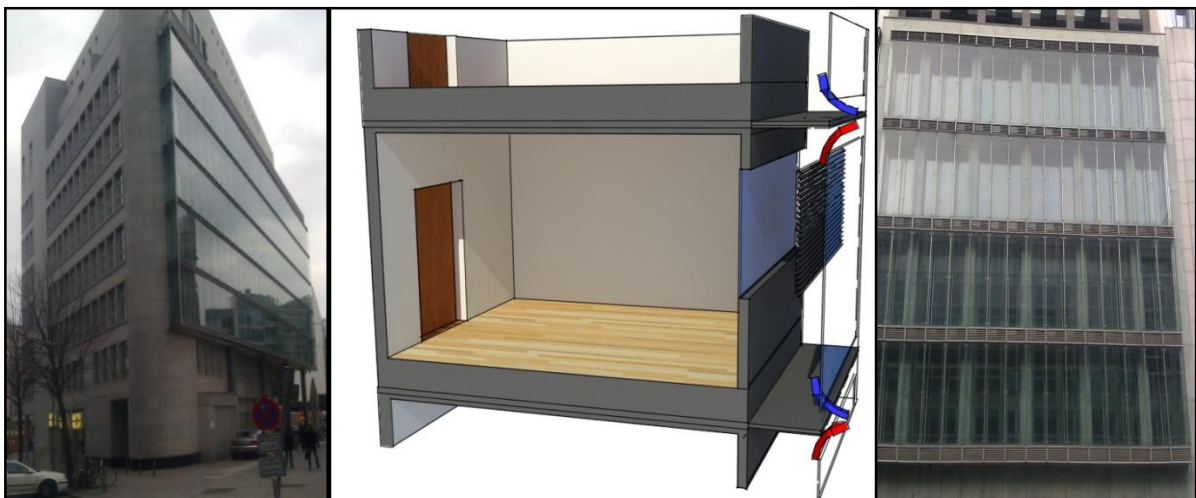
1. DVOSTRUKE VENTILISANE FASADE - PREGLED LITERATURE

1. dvostruki ili "Box" prozor se sastoji od rama, koji na dnu i vrhu ima otvore (Slika 1.19). Karakteristika međuprostora je da izdijeljen i horizontalno i vertikalno, deli fasadu na manje i nezavisne delove (boksove). Ovo rešenje ima značajnu primenu na objektima koji zahtevaju visok stepen privatnosti i zaštite od buke. Takođe, korisnici imaju mogućnost kontrole bez narušavanja potreba ostalih korisnika objekta. Kao nedostatak se može navesti niži stepen pregrevanja vazduha, zbog manje visine prozora u poređenju sa ostalim tipovima DVF. Postoji i mogućnost dijagonalnog strujanja vazduha, kako bi se izbeglo mešanje vazduha između boksova. Ovaj tip fasade može imati i fleksibilne pokretne elemente, koji omogućavaju međusobni kontakt vazduha iz susednih boksova. Visina je, takođe, ograničena na jedan sprat;



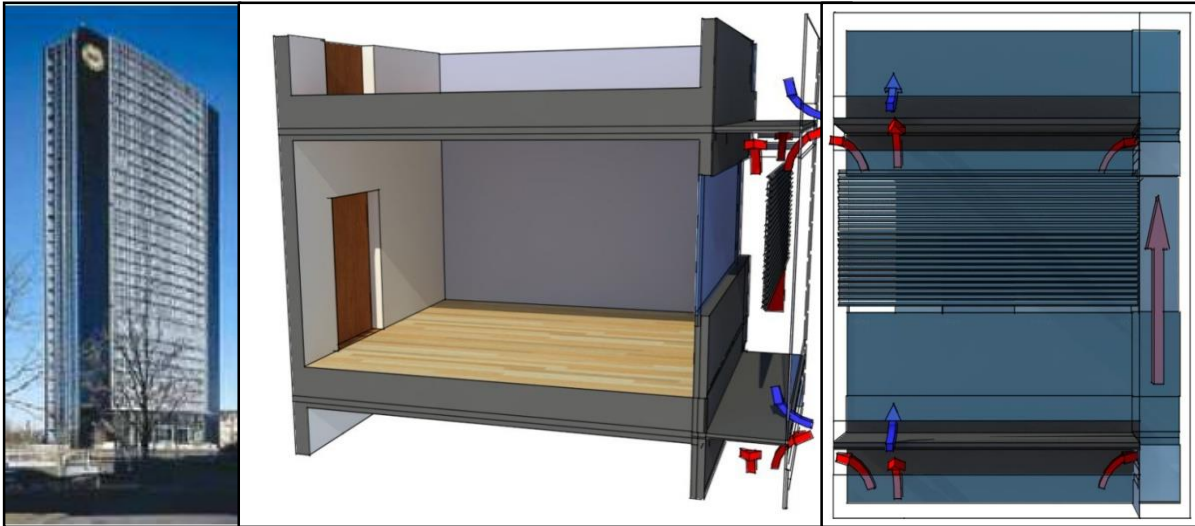
Slika 1.19: Dvostruki ili "Box" prozor

2. koridorni tip fasade, ograničen je na jedan sprat i predstavlja tip fasade koji karakteriše širi međuprostor, koji omogućava kretanje ljudi u njemu (Slika 1.20). To omogućava stabilna platforma koja se nalazi na svakom spratu. Međuprostor je horizontalnim pregradama izdijeljen po spratovima, dok vertikalnih pregrada nema. Ulaz vazduha se nalazi pri dnu fasade, dok je izlaz pri vrhu svakog sprata. Otvori mogu biti tako postavljeni da sprečavaju mešanje izlaznog i ulaznog vazduha. Kao prednost ovog tipa fasade navodi se poboljšano kretanje vazduha, smanjen rizik od letnjeg pregrevanja, dok je nedostatak slabija zvučna i mirisna izolacija između prostorija;



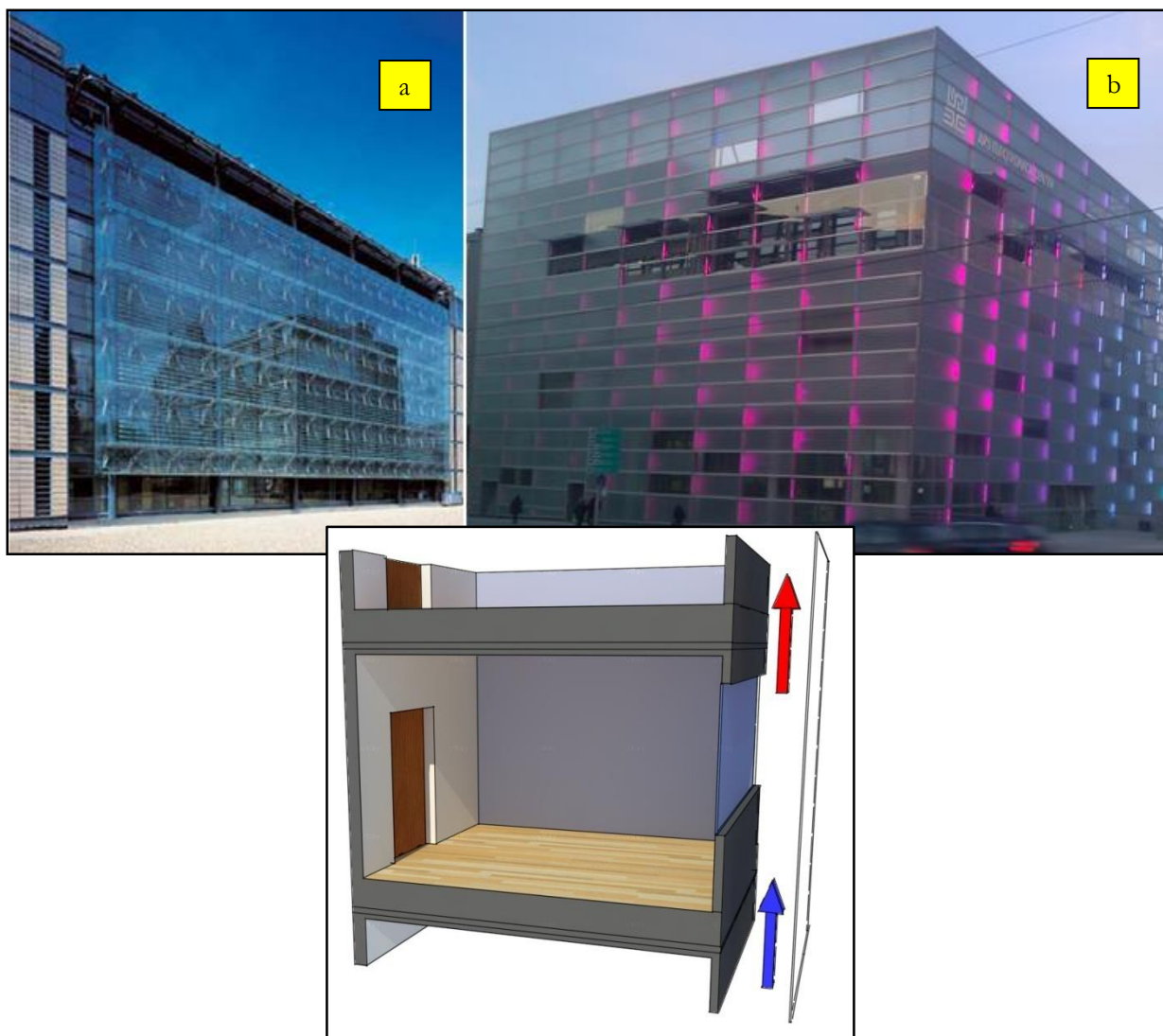
Slika 1.20: Koridorna fasada ograničena na jedan sprat

3. šahtno-kasetni tip fasade, suštinski predstavlja koncept pospešivanja prirodne ventilacije, odnosno usvajanjem ove konfiguracije međuprostora, uzgonska sila se pojačava u odnosu kakva je bila kod spratno izdvojene fasade (Slika 1.21). Ovom tipu fasade su pridodati vertikalni ventilacioni vodovi, koji se mogu prostirati i do nekoliko spratova. Svaki spratni segment fasade je povezan sa vertikalnim vodom. U toku zime vertikalni vodovi mogu biti zatvoreni i na taj način predgrejati vazduh, koji se može ubacivati u objekat. Leti, zbog povećanje uzgonske sile, smanjuje se rizik od pregrevanja i pospešuje se ventilacija fasade. Primena ovog tipa fasade je ograničena samo na fasade sa prirodnom ventilacijom;



Slika 1.21: Šahtno-kasetni tip fasade

4. višespratni tip fasade (Slika 1.22), predstavlja koncept gde nema vertikalnog i horizontalnog deljenja fasade, već predstavlja jedinstvenu zapreminu. Ukupna količina vazduha ulazi u zonu pri dnu fasade, gde se usled sunčevog zračenja zagreva i kreće ka vrhu. Topao vazduh izlazi u zoni na vrhu fasade. Međuprostor je dovoljno širok, tako da ljudi imaju pristup u slučaju održavanja i čišćenja. Na svakom spratu postoje podovi (rešetke), koji omogućuju slobodno kretanje. Ventilacija fasade je najčešće prirodna, mada postoje izvedbe i sa mehaničkom. Ovaj tip fasade ima odličnu izolaciju od buke koja dolazi spolja, tako da je njihova upotreba značajna na teritoriji užeg gradskog jezgra. Takođe, stvara prijatan ambijent za korisnike, a kao potencijalno rešenje može se po potrebi postaviti biljna vegetacija u međuprostoru fasade. Kao glavni nedostaci navode se vertikalni gradijent temperature i protivpožarna zaštita. Kao varijanta ove fasade, postoji izvedba kada je drugi sloj fasade konstruisan od pokretnih staklenih panela;



Slika 1.22: Višespratni tip fasade (a – Nepokretni stakleni paneli; b – Pokretni stakleni paneli)

5. fasadni tip sa horizontalnom i vertikalnom ventilacijom – kombinovana ventilacija, predstavlja tip koji je dosta sličan koridornoj fasadi, ali u toku primene dozvoljava se i vertikalna ventilacija između spratova (Slika 1.23). Karakteristika ovog tipa fasade je hibridni, odnosno mehanički tip ventilacije. Duž cele visine fasade postavljeni su ventilatori, koji u skladu sa zadatim uslovima formiraju vazдушnu struju u međuprostoru. Na ovaj način se omogućava homogena distribucija temperature za vreme svih godišnjih doba i za sve orijentacije fasade;



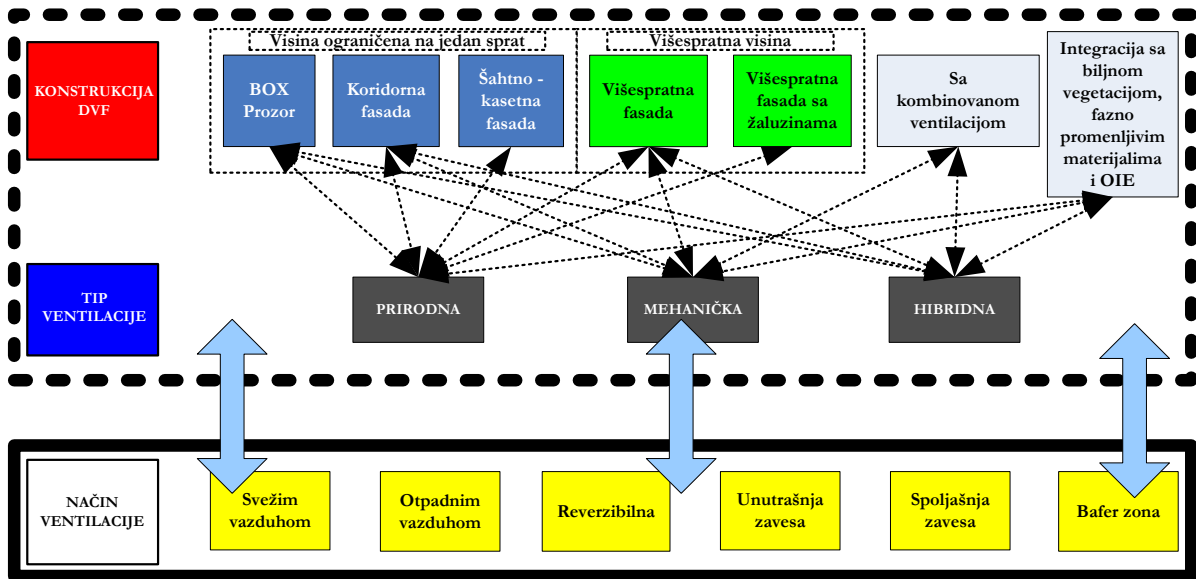
Slika 1.23: Višespratni tip fasade

- fasade sa integrisanim solarnim panelima, predstavljaju savremenu primenu obnovljivih izvora energije integrisanih u fasadnu konstrukciju (Slika 1.24). Na ovaj način može se proizvesti topla voda, čija primena može biti u smanjenju toplotnih gubitaka objekta, ili za potrošnju sanitarne tople vode. Takođe, može se putem postavljenih PV panela proizvoditi električna energija. Primena ovog koncepta kod DVF je tek u začetku, a pozitivni rezultati se tek očekuju.



Slika 1.24: Tip fasade sa integrisanim solarnim panelima (objekat izgrađen u Južnoj Koreji)

Na osnovu svega izloženog, pregled opšte klasifikacije DFV prikazan je na slici 1.25.



Slika 1.25: Klasifikacija DVF

1.4 MOGUĆNOSTI I OCENA DOSADAŠNJE PRIMENE KONCEPTA DVF

Jedan od glavnih razloga za primenu koncepta DVF u objektima jeste poboljšanje njihove termičke zaštite. Pravilnim projektovanjem i kasnijom kontrolom i održavanjem, DVF mogu smanjiti toplotne gubitke zimi i solarne dobitke leti. Zbog različitih zahteva u zimskim i letnjim periodima, ovi režimi se uvek razmatraju i analiziraju odvojeno. Takođe, treba obratiti pažnju i na prelazne režime kada klimatski uslovi to i podrazumevaju.

Ocena, odnosno prednosti i nedostaci primene koncepta DVF mogu se podeliti u dve grupe: tehnološke (tehničke) i netehnološke. Pod tehnološkim podrazumevamo one karakteristike koje opisuju stepen energetske i druge efikasnosti nastale primenom koncepta DVF, kako takav objekat utiče na korisnike, a kako na neposrednu okolinu. Što se tiče netehnoloških, one govore o nivou znanja i iskustva u naučnim i inženjerskim krugovima, prisustvu pravilnika i standarda za primenu koncepta, kao i nivou svesti inženjera i korisnika o mogućnostima projektnog rešenja.

Ocena objekata sa DVF nije uvek na visokom nivou. Postoji velika skepsa u naučnim krugovima o energetskej efikasnosti, kvalitetu unutrašnjeg komfora i nivou dnevnog osvetljenja objekata sa DVF. Razlog tome je što do sada u svetu postoji veoma mali broj detaljno analiziranih objekata sa DVF, na osnovu kojih bi se objektivno moglo proceniti ponašanje i uticaj fasade na energetske performanse objekta u celini. Posledica toga je nizak nivo znanja i iskustva u inženjerskim i drugim krugovima o tipovima, karakteristikama i dizajnu DVF. Takođe, slaba je informisanost ljudi iz struke o relevantnim indikatorima energetske potrošnje ovakvih objekata za različite klimatske uslove. Ne postoji pravilnik ili standard koji bi detaljno opisao način projektovanja objekata sa DVF. Uzak je krug firmi koje mogu pravilno da projektuju i izvedu ovakve objekte na svetskom nivou. Oni poseduju znanje i iskustvo, ali nedostaje širenje znanja i informacija do ostalih inženjera i potencijalnih klijenata. Moramo biti svesni da, kao posledica različitih iskustava i rezultata, upotreba DVF ne poboljšava uvek energetske efikasnosti objekta.

1.4.1 PREDNOSTI

Poboljšana toplotna izolacija

Prema mnogim autorima [5, 17, 49, 60, 82], DVF pružaju bolju toplotnu izolaciju i leti i zimi. Razlog je dodatni sloj (stakleni panel) koji svojim uticajem može smanjiti koeficijent prolaza

toplote omotača objekta od 10 do 70%. Naravno taj uticaj varira u zavisnosti od konstrukcije fasade. Nekoliko istraživača je predložilo način proračuna koeficijenta prolaza toplote [30, 47, 60]. U zimskom periodu spoljašnja opna poboljšava izolaciju, tako što povećava otpor prolazu toplote. Ako poredimo ekvivalentni koeficijent prolaza toplote za DVF i klasičnu fasadu, treba napomenuti da je on kod DVF manji. Ukoliko se otvori koji povezuju međuprostor sa spoljašnjom sredinom, odnosno unutrašnjošću objekta zatvore, strujanje vazduha će praktično prestati i formiraće se masa umirujućeg vazduha. Smanjena brzina strujanja i povišena temperatura vazduha u međuprostoru, imaju za posledicu smanjenje koeficijenta prelaza toplote sa staklene površine, odnosno smanjenje toplotnog fluksa, samim tim i gubitaka toplote. Prema [70], zimi su pogodnije fasade sa užim međuprostorom, jer obezbeđuju željeni protok vazduha za ventilaciju i njegovo predgrevanje. Takođe, u zimskim uslovima postoji mogućnost da klima komora bude povezana sa DVF i koristi već zagrejan vazduh iz međuprostora. Ovim putem dostižu se uštede i do 41% u odnosu na objekte sa tradicionalnom fasadom [12, 33].

Zvučna i mirisna izolacija

Prema nekim autorima, ovo može da bude jedan od glavnih aduta za primenu DVF. Razlog tome je dodatni sloj stakla koji poboljšava efikasnost i zaštitu objekta od buke u poređenju sa tradicionalnim tipom fasade. Smanjenje količine buke i mirisa može se podeliti na dva tipa. Prvi se odnosi na prenos unutar zgrade (iz prostorije u prostoriju), dok je drugi smanjenje spoljašnje buke i mirisa od saobraćaja i drugih spoljašnjih faktora.

Tip DVF, kao i veličina, broj i položaj otvora na njoj su od ključnog značaja. Ovo se prevashodno odnosi na spoljašnji sloj DVF. Uticaj površine otvora spoljašnjeg sloja DVF na smanjenje buke može se predstaviti formulom 1.1 [49]:

$$R_u = R_k - 10 \ln(1 + f(10^{0,1R_k} - 1)) \quad (1.1)$$

Gde su:

R_u - ukupno smanjenje buke DVF [dB];

R_k - zvučna izolacija klasične fasade [dB];

f - udeo površine otvora prema ukupnoj površini fasade [-];

Kod kontinualnih DVF (koridorne ili višespratne) može doći do prenosa buke i mirisa unutar zgrade, dok kod prekidnih DVF taj problem ne postoji. Redukcija buke prema [4, 49, 56] može biti u rasponu od 4 do 8 dB. Takođe, merenja na objektima pokazala su isti rezultat. Prema [49], na objektu "DB Cargo" u Nemačkoj, poboljšanje zvučne izolacije je iznosilo 6 dB, dok se na objektu "UCB" u Belgiji izolacija poboljšala na 5 dB.

Smanjenje uticaja sunčevog zračenja i vetra

U toku letnjeg perioda, zadatak fasade je da u što većoj meri smanji prodor sunčevih zraka u unutrašnjost objekta. Efikasnost fasade kao sistema za zaštitu od Sunca je ključan faktor u konceptu DVF. U visokim poslovnim zgradama teško je postaviti spoljašnju zaštitu od sunčevog zračenja. DVF omogućuje da se u njenoj unutrašnjosti postave venecijaneri koji mogu stvoriti efekat zaštite od Sunca [45]. Na taj način stvara se i bolja zaštita za venecijanere ili rasvetu, pošto se ovi uređaji nalaze unutar međuprostora, zaštićeni su od vetra i kiše. U letnjem periodu višak toplote u međuprostoru se može odstraniti ventilacijom (prirodnom ili veštačkom). Da bi se obezbedila odgovarajuća ventilacija međuprostora, između ostalog, neophodno je pažljivo odabrati odgovarajući tip venecijanera, kako ne bi došlo do pregrevanja vazduha. Potrebno je postaviti prilagodljive venecijanere, koji se mogu kontrolisati tako da su uvek u optimalnom položaju, definisanom od trenutnog intenziteta sunčevog zračenja. Dva ključna faktora koja

definišu efikasnost fasade u letnjim mesecima su g - koeficijent solarnih dobitaka i τ - koeficijent propustljivosti vidljivog spektra zračenja.

Koeficijent solarnih dobitaka - g , uzima u obzir energiju direktno prenetu i energiju apsorbovanu putem konvekcije, kondukcije i zračenja u unutrašnjost objekta.

Vrednosti g , kada je u kombinaciji staklo sa spoljašnjim venecijanerima, iznose u opsegu od 0,13 do 0,15. Još jedan dodat sloj stakla (slučaj DVF) može da smanji vrednost koeficijenta i do 0,10 [45] (dobro projektovane DVF). Sa druge strane treba paziti na temperaturu vazduha u međuprostoru, pošto je ona u većini slučajeva viša od spoljašnje temperature vazduha.

Koeficijent propustljivosti vidljivog spektra zračenja (τ_v) predstavlja odnos svetlosti koji je prošao u unutrašnjost prostorije, prema ukupnoj svetlosti koja je pala na fasadu. Idealno staklo za ove uslove bi trebalo da ima dovoljnu propusnost svetlosti, a da pri tome ima i malu g - vrednost. Iz tog razloga staklo se kombinuje sa kontrolisanim spoljašnjim venecijanerima. Pri tome, uvek treba paziti da količina dnevne svetlosti odgovara radnim uslovima u prostoriji. Nasuprot tome, korišćenje veštačkog svetla povećaće potrošnju energije u objektu.

Ako je međuprostor prirodno ventilisan, geometrija međuprostora i otvora presudno utiču na temperaturu i strujanje. Većina studija je zaključila da venecijaneri treba da budu smešteni bliže spoljašnjem sloju DVF, kako bi se sprečilo pregrevanje međuprostora. Grubo rečeno, pozicija venecijanera bi trebala biti na trećini širine međuprostora. Prema [23], minimum 15 cm je potrebno da budu udaljeni venecijaneri od spoljašnjeg stakla, kako bi se obezbedila dovoljna ventilacija. Kragh [39], tvrdi da su dve najveće prednosti DVF smanjenje U i g vrednosti omotača zgrade.

Pored korišćenja venecijanera kao zaštite, nekoliko autora je analiziralo uticaj postavljanja biljne vegetacije kao zaštite od zračenja i povećanja temperature u međuprostoru fasade. Dobijeni rezultat je ukazivao, da za iste vrednosti zračenja upotreba biljaka kao štita, snižava temperaturu međuprostora fasade. U slučaju korišćenja biljaka, temperatura ne prelazi 35°C, dok kod upotrebe venecijanera može dostići i 55°C. Sama temperatura površine biljaka u odnosu na temperaturu venecijanera je duplo niža. Ušteda u potrošnji energije za hlađenje objekta se može smanjiti za 20% [68, 70]. Problem kod primene biljaka, kao zaštite od sunčevog zračenja, je odsustvo mogućnosti za regulaciju.

Takođe, dodatni stakleni sloj omogućava bolju zaštitu objekta od dejstva vetra. Ova karakteristika se pre svega odnosi na mogućnost korisnika da mogu provetravati prostorije, nezavisno od spoljašnjih uslova i brzine vetra. Ovo se odnosi na prelazne režime (proleće i jesen) ili u toku sunčanih dana zimi.

Provetravanje

Jedna od glavnih prednosti DVF je ta, što omogućuju provetravanje unutrašnjih prostorija u poslovnim zgradama. U različitim klimatskim oblastima, za različite orijentacije, lokacije i tipove zgrada, mogu da se primene različite izvedbe DVF, sa ciljem da se omogući uvođenje željene količine svežeg vazduha. Provetravanje preko DVF može da se obavlja na različite načine, pre svega preko prozora koje je moguće otvarati, pri čemu se provetravanje obezbeđuje dejstvom vetra i/ili uzgonske sile. Moguće je provetravati samo jednu stranu zgrade ili ceo objekat. Prema [49], značajne uštede energije mogu da se ostvare samo ako DVF omogućava otvaranje prozora i provetravanje. Na taj način smanjuje se količina energije potrebna za ventilaciju i klimatizaciju.

Smanjenje loših uticaja spoljašnje sredine

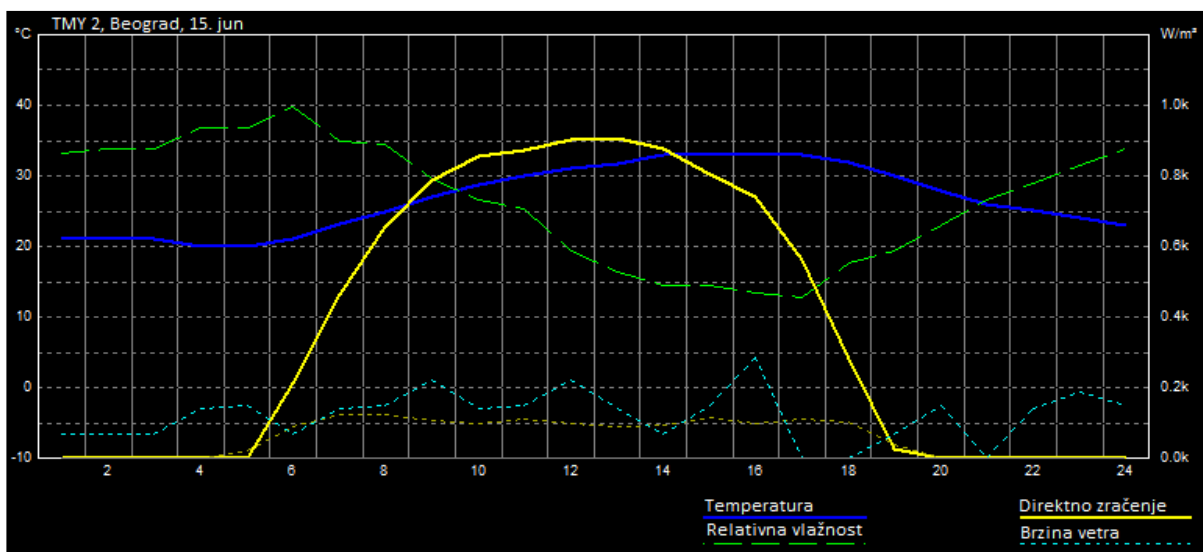
Značajna korist DVF, je sposobnost da obezbedi provetravanje prostora uz pružanje i dodatne zaštite od provalnika i vremenskih uslova (kiša, jak vetar). Prema [49], moguće ublažiti kratkotrajne fluktuacije pritiska izazvane npr. iznenadnim udarima vetra. To je upotpunjeno efektom tampon zone (bafer efektom) u međuprostoru.

Noćna ventilacija

Tokom vrelih letnjih dana, objekat akumulira većinu dobitaka toplote nastalih od visoke spoljne temperature, sunčevog zračenja, kao i od unutrašnjih dobitaka. Na taj način unutrašnji prostor postaje pregrejan. Ipak, u toku noći dobici toplote se smanjuju i u većini slučajeva se mogu zanemariti. Takođe, spoljašnja temperatura se snižava i najčešće postaje niža nego unutrašnja projektna temperatura prostorija. U tom slučaju, ušteda energije može da se ostvari tako što će se prostorije intenzivno provetravati u toku noći preko prirodno ventilisanih DVF. Na taj način se tokom jutarnjih sati obezbeđuju niže temperature i bolji kvalitet vazduha u unutrašnjem prostoru, koji uz manji dodatak mehaničke klimatizacije može da obezbedi kompletan rashladni kapacitet objekta. Istovremeno, vazduh kojim se objekat provetrava noću, odstranjuje deo toplote koja se tokom dana akumulira u građevinskoj masi i predmetima koji se nalaze u unutrašnjosti objekta. Noćna ventilacija omogućava prirodnu razmenu vazduha i toplote u toku letnjih noći, a objekti sa DVF omogućuju da se ovaj proces odvija ne narušavajući sigurnosne zahteve u objektu.

U protivnom, ukoliko su vrata i prozori zatvoreni, a klimatizacioni sistem radi tokom cele noći, to će dovesti do povećane potrošnje energije i/ili pogoršavanja uslova ugodnosti u jutarnjim satima. Naravno, mora se paziti da prilikom noćne ventilacije, temperature koje vladaju u međuprostoru i spoljašnjosti ne prelaze 26°C. Visoke temperature se mogu dogoditi zbog tzv. "heat island" efekta, kada u toku noći, usled visokih dnevnih temperatura okolne površine emituju zračenje koje dovodi do visokih noćnih temperatura. Prema [66, 70], noćno hlađenje provetravanjem zahteva velike otvore u spoljašnjoj opni.

Slika 1.26 predstavlja promenu svih klimatskih parametara za jedan prosečan sunčan letnji dan u Beogradu. U toku dana spoljašnja temperatura dostiže i prelazi 33°C, dok maksimalno direktno Sunčevo zračenje iznosi oko 900 W/m². U toku noći spoljašnja temperatura se snižava na 20°C. Dijagram pokazuje da za područje Beograda postoji veliki potencijal za korišćenje noćne ventilacije.



Slika 1.26: Klimatski parametri za tipičan letnji dan u Beogradu

Van Passen je među prvima definisao kriterijume za primenu noćne ventilacije u objektima sa DVF [73, 74]. Kasnije, pozitivan uticaj noćne ventilacije prikazan je u studijama [21, 53]. Rezultati pokazuju veliku uštedu u potrošnji energije, čak se u nekim slučajevima vidi da noćna ventilacija zadovoljava sve potrebe objekta za hlađenjem.

Smanjen projektni kapacitet i potrošnja energije uređaja za KGH

Zbog poboljšane izolacije omotača i smanjenja uticaja sunčevih zraka na objekat, kapacitet opreme i veličina instalacija KGH sistema je smanjena.

Psihološki uticaj prozračne fasade na ljude koje borave u objektu

Transparentna (prozračna) fasada dovodi i do dobrih psiholoških uticaja na ljude koji borave u objektu. To se odnosi na: vizuelni kontakt sa spoljašnjom sredinom, pristup dnevnom svetlu, redukciji zimske depresije, kao i smanjenju efekta klaustrofobije, pogotovo u visokim objektima.

Poboljšani arhitektonski i estetski aspekti

Ovaj način projektovanja fasade objekta daje jedan iskorak u vizuelnom identitetu objekta. Na primer, staklene fasade mogu menjati izgled sa promenom vremenskih prilika, ili se dekorativna LED rasveta može postaviti unutar nje. U većini literature se pominje težnja arhitekata za korišćenjem staklenih površina. Prema [42], DVF su u arhitektonskom smislu fenomen EU, nastao estetskim aspektima i težnjom za staklenim fasadama. Kragh [39], navodi kako su prozračnost i transparentnost poželjne u arhitekturi i da je problem oduvek bio kako konstruisati prozračan omotač zgrade, a da to ne bude na račun povećane potrošnje energije i lošijih uslova u unutrašnjosti.

Poboljšan osećaj ugodnosti u kancelarijskom prostoru

Smanjenjem temperaturske razlike između temperatura spoljašnjeg omotača i temperature unutar kancelarije, dolazi do poboljšanja termičkog komfora u prostoriji. Tokom grejne sezone, temperatura vazduha u međuprostoru je viša od spoljašnje temperature, kao posledica toga viša je i temperatura unutrašnje površine unutrašnje opne. Sa druge strane, kao što je već više puta napomenuto, pravilnim projektovanjem možemo izbeći problem pregrevanja vazduha u međuprostoru, tokom letnjeg perioda. U suštini, odgovarajućom kombinacijom projektnih parametara DVF (tip fasade, geometrija, brzine strujanja, tip i položaj zastora...) možemo ostvariti uštedu energije uz povećan komfor u svim klimatskim uslovima i za bilo koji tip zgrade.

Smanjeni investicioni troškovi u odnosu na nova fasadna rešenja

Investicioni troškovi DVF u odnosu na rešenja sa elektrohromatskim, fotohromatskim i termohromatskim pločama (materijali čija se svojstva menjaju u zavisnosti od uslova spoljašnje sredine) su znatno niži. Iako su ove ploče veoma funkcionalne, one su izrazito skupe. Sa druge strane pravilnim projektovanjem DVF može se doći do veoma fleksibilnih rešenja.

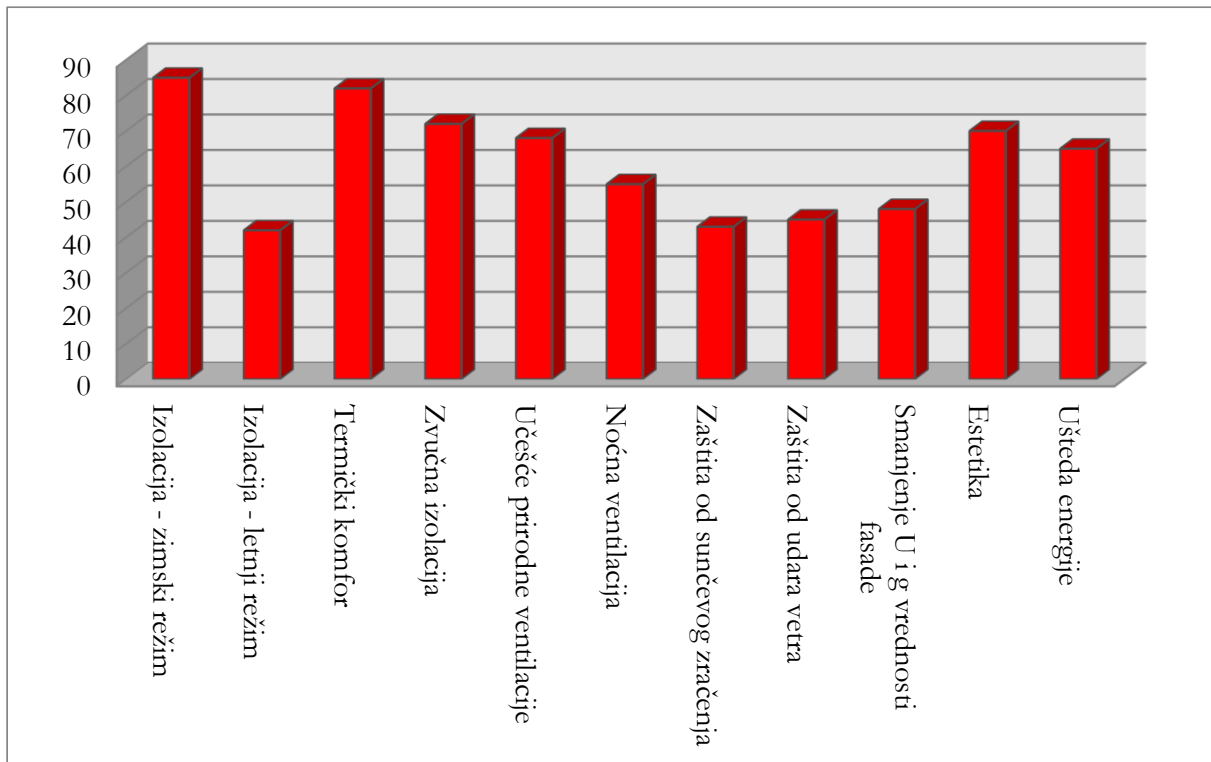
Integracija sistema koji koriste obnovljive izvore energije

Objekti za DVF imaju mogućnost da u okviru jednog svog dela spoljašnje opne integrišu solarne panele za produkciju električne i toplotne energije [10]. Veliki broj autora je ispitivao različite konfiguracije DVF, ali je veoma mali broj studija urađen na temu sistematske optimizacije i integracije OIE, koja je sa druge strane i finansijski opravdana.

Prostor za evakuaciju u slučaju požara

Claessens i De Hedre [16], napomenuli su da se međuprostor DVF u nekim slučajevima može koristiti i kao prostor za evakuaciju.

Slika 1.27, predstavlja sistematski pregled o mogućim prednostima DVF, pregled proučene literature.

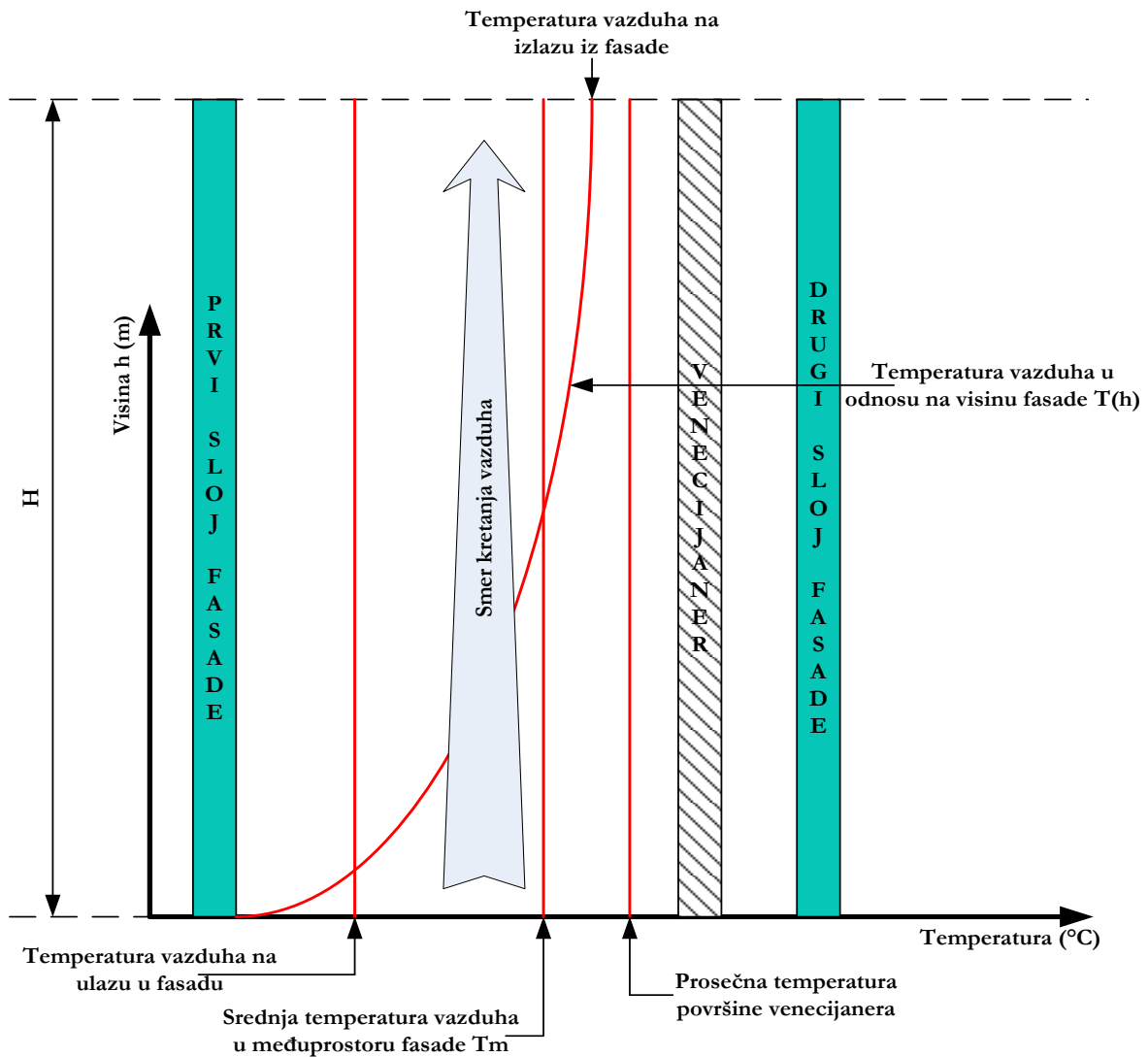


Slika 1.27: Prednosti DVF - pregled literature

1.4.2 NEDOSTACI

Vertikalni gradijent temperature i povećanje brzine strujanja vazduha

Jedan od najvećih problema, koji izaziva velike dileme u samom projektovanju DVF, jeste pojava vertikalnog gradijenta temperature (slika 1.28), koji nastaje zbog akumulacije toplote u višim slojevima DVF nastale od sunčevog zračenja [20]. Kao posledica nastaju i problemi vezani za pregrevanje. Ukoliko fasada nije adekvatno konstruisana i ako se na pravi način ne tretira vazduh u međuprostoru, postoji mogućnost pregrevanja vazduha, što dovodi do povećane potrošnje energije za hlađenje unutrašnjih prostorija i smanjenog osećaja ugodnosti. Povećana brzina strujanja vazduha u međuprostoru, pre svega u višespratnim tipovima DVF može da dovede do stvaranja značajne razlike u pritiscima između određenih kancelarija.



Slika 1.28: Vertikalni gradijent temperature u DVF

Povećani investicioni troškovi

U poređenju sa konvencionalnim fasadama, povećavaju se investicioni troškovi zbog postojanja dodatne spoljašnje opne i dodatnih pregrada i elemenata koji se nalaze u međuprostoru [49, 54]. Zbog postojanja spoljašnje opne, opada korisna površina poda. Ovaj gubitak zavisi od toga kako se međuprostor tretira u urbanističkom smislu, tj. da li osnova objekta obuhvata međuprostor ili ne. Usled postojanja dodatne opne i ostalih uređaja, povećava se i težina konstrukcije. Ovaj nedostatak bi se pre trebao definisati kao inicijalno povećani troškovi izgradnje. Takođe, dodatnim slojem fasade povećava se i masa konstrukcije, čime se menja njena statika.

Međutim, prilikom detaljne analize troškova, potrebno je uzeti u obzir smanjenje poprečnog preseka klimatizacionih kanala zbog smanjenja gubitaka i dobitaka toplote, koji su posledica DVF. Usled toga, smanjuje se međuspratna konstrukcija koja nije zanemariv faktor kada su u pitanju visoki objekti. Takođe, treba uzeti u obzir i kvalitet unutrašnjeg vazduha, koji je sigurno poboljšán. On utiče na produktivnost korisnika prostora i tako smanjuje troškove radne snage. Na taj način gledano, ukupan bilans troškova i dobiti od korišćenja DVF je pozitivan.

Povećani troškovi za kontrolu i održavanje sistema DVF

Kako bi DVF funkcionisala na pravi način, ne proizvodeći negativne efekte vezane za pregrevanje vazduha, umanjene dnevnog osvetljenja i povećanje potrošnje energije, moraju se pravilno primeniti kontrolne strategije u eksploataciji. Usvojene strategije kontrole definisane su algoritmima (automatski sistem), koji pre svega zavise od uslova u međuprostoru fasade i vremenskih prilika u neposrednom okruženju zgrade. Usled toga, povećani su troškovi vezani za integraciju svih komponenti (aktivni i pasivni) sa sistemom za KGH objekta. Dodatni troškovi korišćenja i održavanja su uvećani u poređenju sa konvencionalnom (jednostrukom) fasadom i lako je pretpostaviti da DVF imaju povišene troškove projektovanja, čišćenja, kontrole, održavanja i servisiranja [49].

Protivpožarna zaštita

Još uvek nije sasvim jasan uticaj DVF sa aspekta protivpožarne zaštite [49]. Neki autori smatraju da DVF mogu da imaju pozitivan efekat u tom smislu, ali je izvesno da mogu da pospeše prenošenje dima od prostorije do prostorije, ili od sprata do sprata [32].

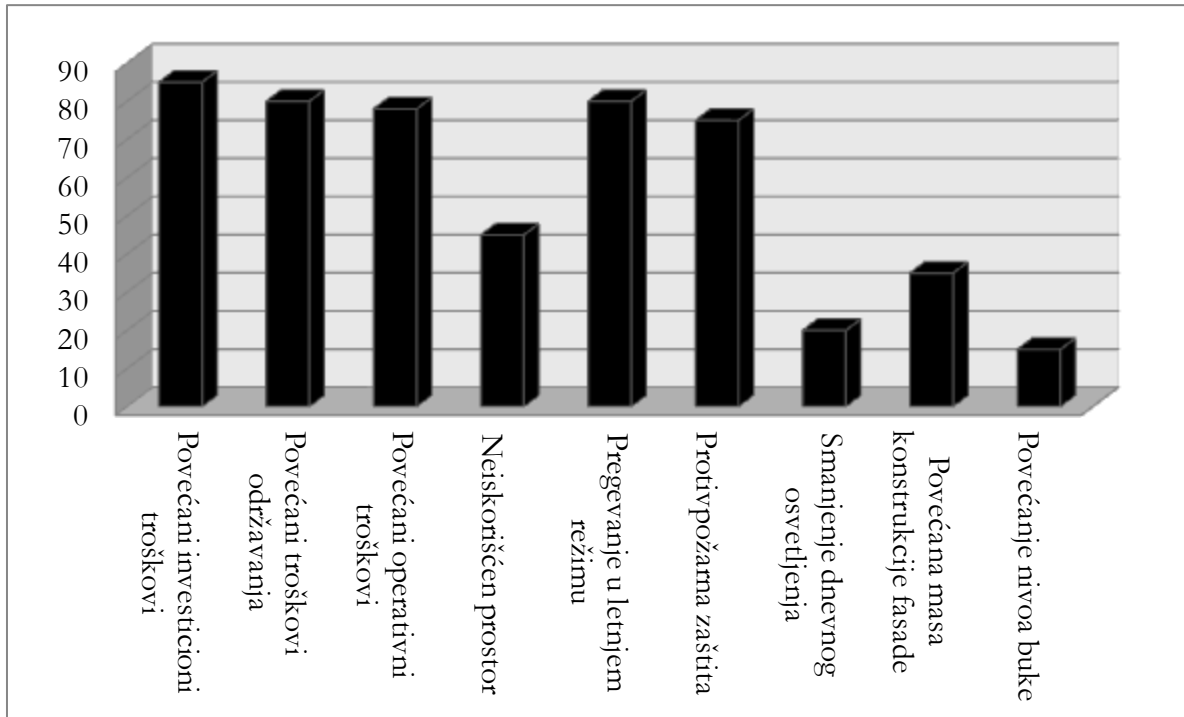
Poslednje studije daju nove rezultate koji izazivaju veliku sumnju u protivpožarnu sigurnost u objektima sa DVF. Veliki broj novih objekata sa DVF nisu u potpunosti ispunili norme za protivpožarnu zaštitu. U skladu sa tim, rezultati studija [13, 14] pokazuju negativan proces širenja dima i vatre u objektima sa DVF. Formirani temperaturski gradijent povećava rizik od uništenja stakla u DVF. Kao dodatak, rezultati studije [77], pokazuju da se pravilnim organizovanjem otvora i ventilacijom DFV može sprečiti širenje dima i vatre u DVF.

Dnevna svetlost i akustika

Prema [49] moguća je redukcija ulaska dnevne svetlosti u prostorije usled dodatnog sloja fasade i uređaja za zaštitu od sunčevog zračenja. Takođe, javlja se i odsajni efekat zbog velike površine pod staklom. Zahtevani nivo osvetljenja u radnom prostoru procenjen je od 300 do 500 lux. Zadatak fasade je da obezbedi ovaj nivo osvetljenja (uniformno po celoj površini prostorije) bez rizika od pregrevanja. Procenjeno je da se gubi od 10% do 20% dnevnog svetla usled uticaja dodatnog sloja fasade i sistema za zaštitu od sunčevog zračenja. Kako bi se smanjio ovaj efekat, predlaže se upotreba venecijanera sa mogućnošću kontrole prema intenzitetu sunčevog zračenja [49].

Što se tiče prenosa buke, mogući su problemi prenosa od prostorije do prostorije, ili od sprata do sprata, najčešće kod neprekidnog tipa (koridorni ili višespratni tip) DVF. Prepreke ili loše projektovani ulazi i izlazi fasade mogu izazvati konstantan šum. Neodgovarajuća instalacija uređaja za zaštitu od sunčevog zračenja, kao i velike brzine strujanja vazduha, takođe mogu izazvati buku. Pravilno projektovanje gore navedenih elemenata, kao i testiranje su neophodne mere, kako bi se sprečili problemi sa bukom.

Slika 1.29 predstavlja sistematsko odrađen pregled o mogućim nedostacima DVF, dostupna literatura.



Slika 1.29: Nedostaci DVF - pregled literature

Kao glavne poteškoće za primenu koncepta DVF smatraju se:

- nedovoljno znanje i iskustvo u izgradnji i kasnijem održavanju i kontroli;
- nepostojanje pravilnika i standarda za primenu koncepta;
- nedovoljno merenjem ispitanih objekata;
- pretpostavke da objekti sa DVF ne mogu biti visoko efikasni;
- veći inicijalni troškovi izgradnje;
- problemi regulativa protivpožarne zaštite;
- ako nije dobro projektovan i kontrolisan sistem DVF, dolazi do pregevanja u toku leta.

1.4.3 INTEGRACIJA DVF I KLIMATIZACIONOG SISTEMA OBJEKTA

Integrisanje DVF kod poslovnih objekata je ključno za ostvarivanje komfora i energetske efikasnosti. Za različite tipove DVF potrebno je primeniti i različite koncepte klimatizacije.

Procedura pri projektovanju zgrade sa DVF treba da obuhvati sledeće zadatke [66, 67, 70]:

1. definisanje funkcije odnosno uloge DVF. Treba definisati zahteve u pogledu termičkog ponašanja, strujanja vazduha, zaštite od buke, kao i mogućnosti regulisanja otvorenosti;
2. izbor tipa DVF, njenih komponenti, materijala i dimenzionisanje fasade koja ispunjava zahteve;
3. optimizacija klimatizacionog sistema koji funkcioniše u sprezi sa DVF;
4. izbor strategije za kontrolu i nadgledanje čitavog sistema.

Autori [54], ukratko objašnjavaju uticaj različitih širina međuprostora na strujanje vazduha i temperature u njemu. Dimenzije fasade i otvora, određuju strujanje kroz fasadu. Što je međuprostor uži, to je otpor strujanju veći, a protok vazduha manji. Sa druge strane uži međuprostor znači intenzivniju konvekciju i porast temperature vazduha. To nas dovodi do sledećih zaključaka:

1. DVOSTRUKE VENTILISANE FASADE - PREGLED LITERATURE

1. u hladnijim periodima bolje je koristiti uzak međuprostor, čime se smanjuje protok i povećava temperatura vazduha;
2. u toplim periodima DVF bi trebalo da deluje u smislu smanjenja toplotnih dobitaka od zračenja i transmisije. Teško je dati generalnu ocenu o tome, da li su bolje fasade sa širim ili užim međuprostorom.

Ove analize su veoma bitne i moraju biti u direktnoj vezi sa klimatskim uslovima gde se objekat nalazi. Takođe, neophodna je i analiza orijentacije DVF.

U zgradama sa DVF, klimatizacioni sistem može da se koristi na tri načina [54]:

1. samostalan klimatizacioni sistem (DVF nije deo klimatizacionog sistema). Ova opcija rezultuje povećanu potrošnju energije. Sa druge strane, korisnik može da bira da li u unutrašnjem prostoru želi uslove koje obezbeđuje klimatizacioni sistem, ili želi provetravanje preko DVF;
2. ograničeni klimatizacioni sistem (DVF delimično doprinosi ili ima značajnu ulogu u klimatizaciji zgrade). U ovom slučaju DVF može da ima ulogu:
 - 2.1 predgrejača svežeg vazduha;
 - 2.2 kanala za vazduh;
 - 2.3 prethladnjaka (pre svega pri noćnoj ventilaciji);
3. nema klimatizacionog sistema. DVF ispunjava sve zahteve koje bi trebalo da zadovolji klimatizacioni sistem. Ovo je idealan slučaj, koji dovodi do niske potrošnje energije.

Tokom grejne sezone, moguće je uvođenje svežeg vazduha kroz niže delove fasade i njegovo predgrevanje u međuprostoru (Slika 1.30). Spoljašnji otvori kontrolišu protok vazduha, a time i temperaturu predgrevanog vazduha. Vazduh se potom putem centralnog klimatizacionog sistema, na odgovarajućoj temperaturi, uvodi u zgradu. Na ovaj način se predgreva vazduh koji ulazi u klimatizacioni sistem, kojim se postiže veća efikasnost sistema. Mogućnost da se vazduh predgreje može se opisati pomoću tzv. efikasnosti predgrevanja. Formula 1.3 prikazuje ovu efikasnost. Na ovakav način, definisana efikasnost je uporediva sa efikasnošću sistema za rekuperaciju toplote [54]:

$$\eta_t = \frac{T_m - T_p}{T_p - T_s} \quad (1.3)$$

gde su:

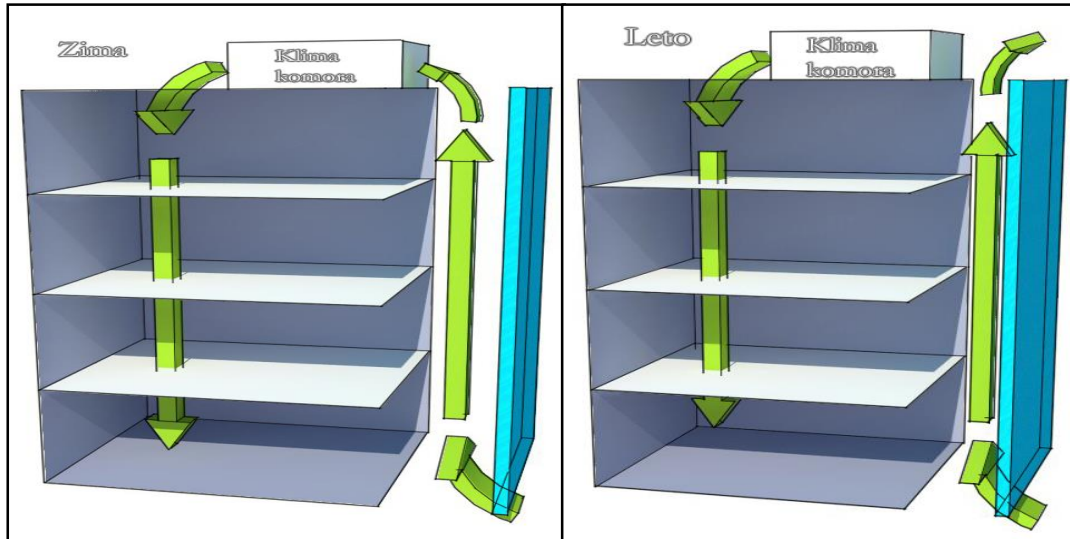
- η_t - efikasnost predgrevanja [-];
- T_p - temperatura vazduha u prostoriji [K];
- T_m - temperatura vazduha u međuprostoru DVF [K];
- T_s - temperatura spoljašnjeg vazduha [K].

Efikasnost pregrevanja η se reflektuje na mogućnost fasade da predgreva vazduh za ventilaciju (misli se i na prirodnu i na ventilaciju putem klima komora)[54]:

1. $\eta < 0$; slučaj kada je $T_m < T_p$. Tada postoji mogućnost, da otvaranjem prozora fasada hladi vazduh u prostoriji (noćna ventilacija);
2. $0 < \eta < 1$; slučaj kada će vazduh biti predgrevan do nivoa koji je niži od temperature prostorije. Zahteva se dodatno zagrevanje u klima komori. Efikasnost grejanja se povećava, jer je temperatura međuprostora fasade viša od temperature spoljašnjeg vazduha;

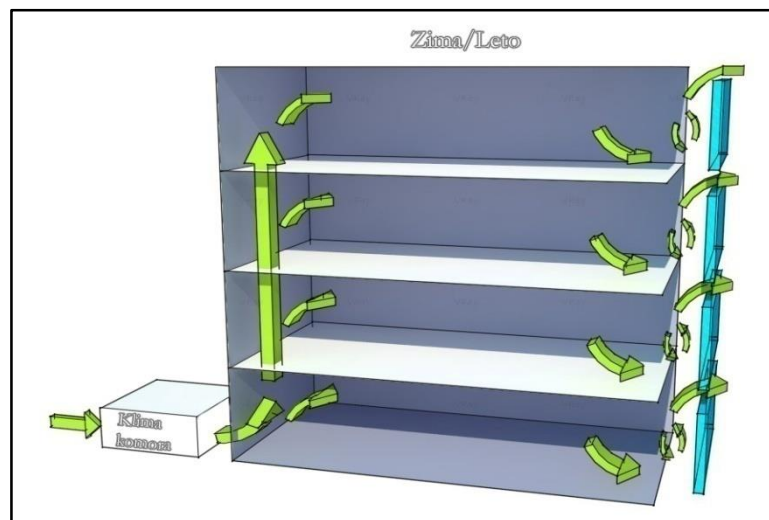
3. $\eta=1$; slučaj kada fasada u potpunosti predgreva vazduh i anulira gubitke. Prirodnom ventilacijom se podmiruju gubici. Potrebno je obratiti pažnju na kvalitet vazduha;
4. $\eta>1$; slučaj kada može doći i do pregrevanja vazduha u prostoriji.

Tokom leta [54], vazduh se potiskuje u atmosferu kroz otvore na višim delovima fasade. Ovakav pristup se primenjuje kod višespratnih DVF pošto leti postoji povećan rizik od pregrevanja vazduha u međuprostoru (viši spratovi).



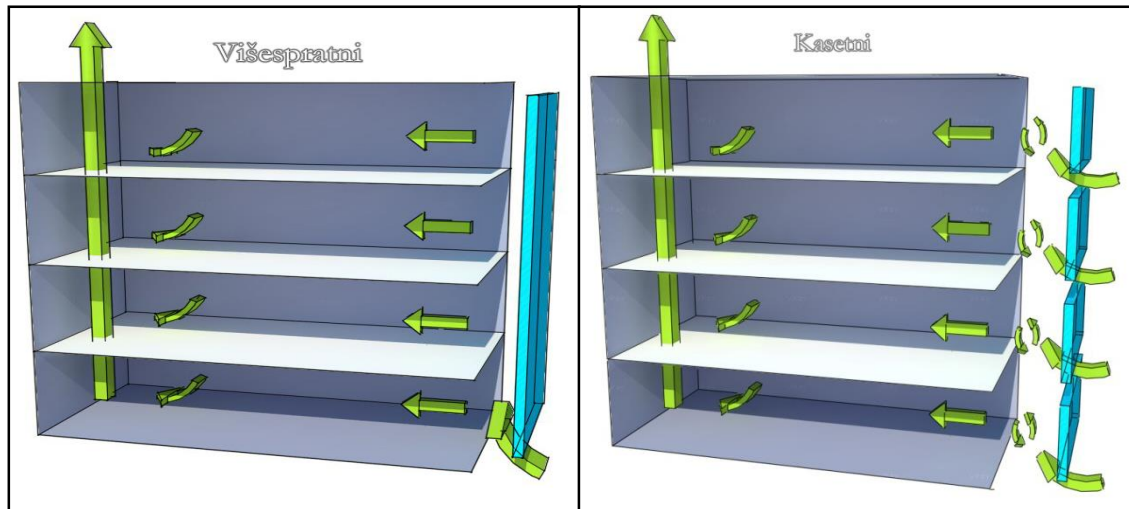
Slika 1.30: Korišćenje DVF fasade za predgrevanje vazduha (zima) i njeno provetranje (leto)

Tokom cele godine [54], međuprostor DVF može da se koristi kao vod za otpadni vazduh, bez mogućnosti regeneracije toplote (Slika 1.31). Može se na isti način primenjivati i zimi i leti. Suština ovakvog rešenja je da se smanje gubici zimi, a da se leti umanje dobici od sunčevog zračenja. Ne postoje ograničenja u pogledu individualne kontrole otvaranja prozora.



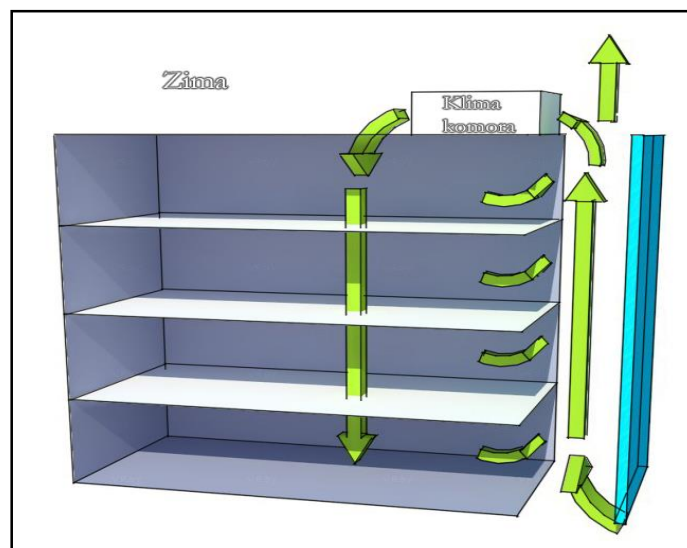
Slika 1.31: Korišćenje DVF za izbacivanje otpadnog vazduha

Moguće je koristiti DVF za distribuciju predgrejanog vazduha u pojedine zone (Slika 1.32) [54]. Ovakav pristup je moguć i kod višespratnih i kod kasetnih DVF. Vazduh struji iz međuprostora, kroz prostorije, ka kanalu kojim se izbacije napolje. Dodatno grejanje radiatorima ili na neki drugi način je neophodno u svakoj prostoriji. Ovakvo rešenje nije primenljivo leti, s obzirom da je vazduh u međuprostoru isuviše topao. Ni u ovom slučaju ne postoje ograničenja u pogledu individualne kontrole otvaranja prozora.



Slika 1.32: Korišćenje DVF za distribuciju predgrijanog vazduha u željene zone (zima)

Na kraju, DVF može da se koristi kao glavni kanal za izbacivanje otpadnog vazduha (Slika 1.33) [54]. Vazduh u međuprostor ulazi iz zgrade na svakom spratu i kroz niže delove fasade spolja. Sistem za snabdevanje vazduhom pospešuje strujanje kroz međuprostor. Rekuperacija toplote iz vazduha je moguća pomoću toplotnih pumpi, ili regeneracijom na vrhu međuprostora. Prozori ne mogu da se otvaraju, s obzirom na to da kroz međuprostor ne struji svež, već otpadni vazduh.



Slika 1.33: DVF kao glavni vazdušni kanal za otpadni vazduh

DVF koje se koriste za uvođenje svežeg vazduha u objekat, bolje funkcionišu u grejnom periodu, kada ih je moguće koristiti za predgrevanje vazduha. Fasade preko kojih se odstranjuje otpadni vazduh su bolje u periodu kada je potrebno hlađenje. Problem je što je neophodno ostvariti takvo konstrkciono rešenje, koje bi se pokazalo kao dobro u oba perioda [67].

Prema rezultatima studija koje uključuju merenja i kalibraciju modela (danas najprecizniji model za ocenu performansi DVF) [12, 33], pokazuju da se pravilnom integracijom DVF sa KGH sistemom objekta postižu najveće uštede. Ove studije su pokazale da se u slučaju povezivanja fasade i klimatizacionog sistema u toku zimskog režima ostvaruju uštede od 39,5% u poređenju sa tradicionalnom fasadom i 28,2% u poređenju sa DVF koja nije regulisana. Što se tiče letnjeg režima, uštede su niže i iznose 9,3, 4,5 i 2,3% u zavisnosti od primenjene operativne strategije u poređenju sa tradicionalnom fasadom.

1.5 OSTALE KARAKTERISTIKE DVF

Dinamička izolacija η_d (procena efikasnosti)

Sa fenomenološkog stanovišta, efikasnost dinamičke izolacije DVF predstavlja iznos ukupnog toplotnog opterećenja fasade koji je uklonjen ventilacijom međuprostora fasade. Efikasnost dinamičke izolacije je reprezentativni parametar koji opisuje performansu fasade za letnji i prelazni režim (režim kada je neophodna klimatizacija).

Kako bi procenili performansu DVF u smislu smanjenja toplotnih dobitaka, definiše se parametar η_d , efikasnost dinamičke izolacije [54]. Navedeni parametar može se opisati kao:

$$\eta_d = \frac{Q_v}{Q_u} \quad (1.4)$$

gde su:

- η_d - efikasnost dinamičke izolacije [-];
- Q_v - toplotni fluks koji je uklonjen vazduhom, koji cirkuliše u međuprostoru fasade [W];
- Q_u - ukupan toplotni fluks koji prolazi kroz spoljašnji sloj fasade [W].

1.5.1 TROŠKOVI

Neobično je to, što po ovom pitanju postoje potpuno oprečna mišljenja različitih autora. U nekim izvorima DVF se pominju kao fasade koje štede energiju, a u drugom se potrošnja energije smatra za najveću manu DVF. Autori [2, 13, 24, 31, 54], izražavaju opravdanost viših troškova DVF zbog smanjenja energetske potrebe u toku eksploatacije objekta sa DVF.

Bez ikakve sumnje, investicioni troškovi i troškovi održavanja su znatno veći kod DVF nego kod tradicionalnih – jednostrukih fasada. Ipak, ako je fasada dobro projektovana, moguće je smanjiti potrošnju energije za grejanje, hlađenje i ventilaciju, te na taj način smanjiti eksploatacione troškove. Do sada smo istakli da je, da bi fasada bila dobro konstruisana, neophodno uzeti u obzir niz faktora, koji se tiču samog objekta (šema zgrade, orijentacija, raspored korišćenja, ponašanje korisnika...) i njegove lokacije (podneblje, dnevna svetlost, klimatski parametri...).

Direktni troškovi vezani za DVF zavise od velikog broja faktora koji mogu uključivati sledeće:

- tip i debljina stakla (ukoliko se koriste sigurnosna laminarna stakla cene su 40-60 €/m², dok za standardna 12 mm stakla 25-40 €/m² [49]);
- dimenzije (visina i širina) pojedinačnih staklenih panela;
- tip i veličina otvora (fiksni ili prilagodljivi otvori sa krilcima, automatski pokretne rešetke čija cena ide i do 1000 €/m²);
- tip opreme za montiranje stakla;
- tip sistema za zaštitu od Sunca (standardni venecijaneri 75-100 €/m², venecijaneri sa kontrolom dnevnog osvetljenja 200-375 €/m²);
- tip zaštitnog materijala za buku;
- u kojoj meri se mogu fabrički elementi direktno ugrađivati bez dodatnog sklapanja na licu mesta;
- broj različitih fasada koji projekat obuhvata;
- veličina objekta;

Prema Jager-u [32] prikaz investicionih i eksploatacionih troškova za klasične i DVF su:

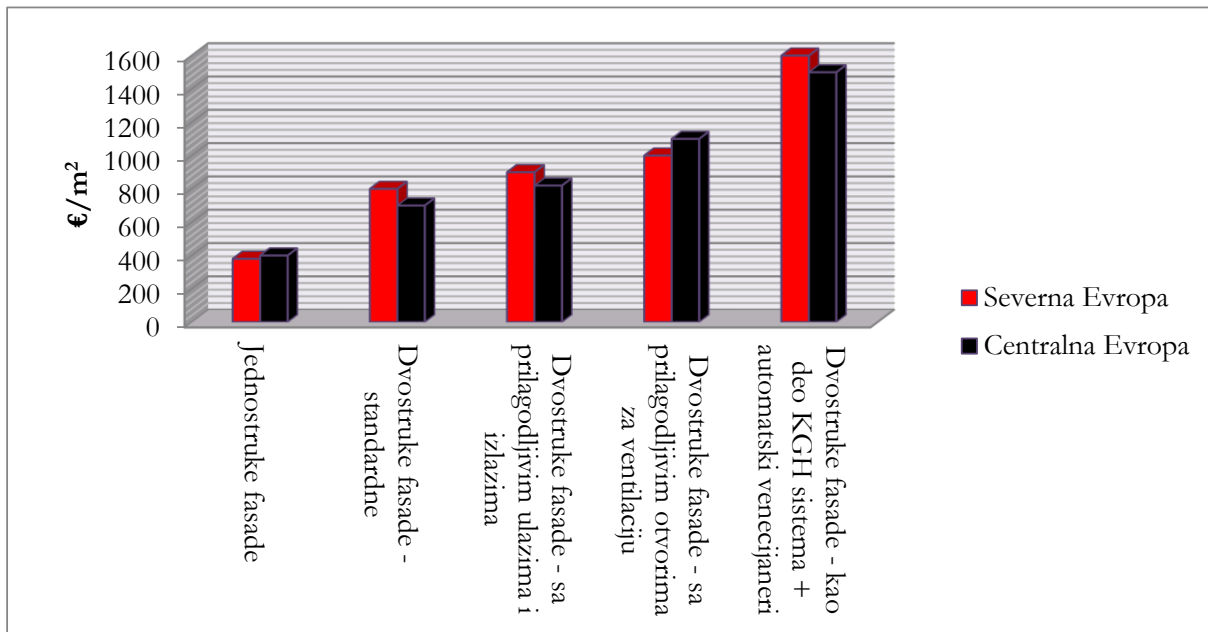
investicioni troškovi (za centralnu Evropu):

- tradicionalna fasada 300 do 500 €/m²;
- obična dvostruka fasada 600 do 800 €/m²;
- DVF sa podesivim otvorima za vazduh 700 do 1000 €/m²;
- DVF sa mogućnošću otvaranja prozora 800 do 1300 €/m²;

eksploatacioni troškovi (za centralnu Evropu):

- tradicionalna fasada 2,5 do 3,5 €/m²;
- DVF 4 do 7,5 €/m².

Oesterle [49], smatra da su ukupni troškovi DVF, uključujući i sistem za zaštitu do sunčevog zračenja u razmaku od 650-1500 €/m², sa dodatnim troškovima od 175-750 €/m². Postoji velika verovatnoća greške u proceni paušalnih troškova, koji su određeni bez detaljne analize ili preuzeti iz prethodnih projekata. Razlika može ići i do 50%. Prema [40], ukupni troškovi za DVF su duplo veći u poređenju sa tradicionalnim fasadama za evropske uslove (dobra praksa i iskustvo), dok su u Americi troškovi i do pet puta veći (nedovoljna praksa i iskustvo). Grut [25], je analizirao objekat Daimler Chrysler-a u Berlinu i kao zaključak je naveden da je trošak za DVF veći za 20% u poređenju sa tradicionalnom fasadom. Procenat učešća fasade u ukupnom trošku za objekat je bio 9%. Upporedni pregled investicionih i dodatnih troškova za evropske uslove prikazan je na slici 1.34.



Slika 1.34: Upporedna analiza investicionih troškova za evropske uslove

Prilikom svake finansijske analize DVF, mora se dobro obratiti pažnja na procenat ušteda u energetsom smislu. Takođe, analiza mora obuhvatiti i sve neenergetske koristi upotrebe DVF.

Ipak, prema [49], još uvek ne postoje opšte primenljivi i sveobuhvatni metodi za proračun ili procenu troškova. Pri planiranju objekta, moguće je primeniti metod koji se sastoji iz osam koraka:

1. određivanje cilja studije;
2. sastavljanje spiska alternativnih rešenja;
3. određivanje investicionih troškova;

4. određivanje eksploatacionih troškova;
5. određivanje efektivnih troškova korišćenja objekta;
6. određivanje i analiza troškova koji nisu zajednički za sva rešenja;
7. rangiranje rešenja i preporuke;
8. dodatna analiza troškova i prednosti;

Postoje tri metode za proračun troškova objekta:

- pojednostavljen računski metod;
- proračun na osnovu anuiteta;
- dinamička analiza troškova;

Ako se vrši poređenje alternativnih rešenja, nije od značaja koji će metod biti primenjen, što znači da je razvrstavanje različitih rešenja prema troškovima nezavisno od metoda koji je primenjen. U suštini prema [49], prilikom svake ekonomske analize DVF u obračun se moraju uzeti investicioni, operativni i troškovi održavanja. Troškovi čišćenja se kreću razmeri od 0,3-0,6 €/m²god. Smatra se, da se troškovi održavanja klimatizacione opreme smanjuju zbog smanjenog broja radnih sati (pozitivan uticaj DVF na potrošnu energije u objektu).

Stec i van Paassen su uradili uporednu analizu troškova različitih tipova fasade i KGH sistema u Holandiji, uključujući i DVF. U obzir su uzeti i kapitalni troškovi i troškovi energije na godišnjem nivou. DVF sa mogućnošću otvaranja prozora koštaju duplo više od tradicionalne fasade sa dvostrukim prozorima i unutrašnjim venecijanerima. Trošak za KGH sisteme se smanjio samo za 10%. Daljim unapređenjem, koristeći kontrole predviđanja i korišćenja DVF kao dela sistema za klimatizaciju (usis vazduha se uzima iz međuprostora fasade), povećava se ovaj procenat, ali se i dodatni troškovi instalacije povećavaju. Koristeći analizu prostog perioda otplate, autori su dobili rezultate u razmeri od 0 do 85 godina.

1.5.2 RIZIK OD POJAVE KONDENZACIJE

Kondenzacija se može pojaviti na površinama fasade objekta, ako njihova temperatura padne ispod temperature rose okolnog vazduha. Ovakva situacija se može pojaviti na staklenim površinama objekta sa DVF. Rizik od najčešćeg pojavljivanja je na drugom sloju fasade, a u slučaju da se pojavi, potrebno je uložiti dosta energije da bi se fasada isušila [61].

Pojava kondenzacije na objektima sa DVF može se dogoditi na dva mesta:

1. na spoljašnjoj površini drugog sloja fasade pod uticajem spoljašnjeg vazduha;
2. u unutrašnjosti međuprostora pod uticajem vazduha koji cirkuliše.

Kod prvog slučaja, kondenzacija može nastati usled gubitka toplote kroz staklo na okolni vazduh zračenjem. Temperatura atmosfere na većim visinama ima nižu temperaturu (10-20 K) od vazduha koji okružuje zgradu. Da bi se sprečio ovaj tip kondenzacije, preporučuje se da se vazduh u međuprostoru dogreva sa unutrašnjim vazduhom, kako bi se nadoknadio ovaj gubitak. Ipak, ovo je jako retka pojava.

Drugi slučaj podrazumeva pojavu kondenzacije na unutrašnjoj površini drugog sloja fasade. Ovo se može dogoditi ako se vlažan vazduh kreće u međuprostoru i dođe u dodir sa hladnim površinama drugog sloja fasade. Da bi se sprečio i u potpunosti eliminisao ovaj vid kondenzacije, potrebno je obrati pažnju na toplotne mostove i termičku izolaciju spoljašnjeg sloja fasade. Stakleni paneli sa kvalitetnim termičkim karakteristikama, izolovani ramovi i distanceri koji

omogućuju termičke prekide u velikoj meri smanjuju ovaj rizik. Takođe, rizik se smanjuje ako se međuprostor provetrava spoljašnjim vazduhom, pošto je vazduh u međuprostoru uvek topliji. Infiltraciju i prodor unutrašnjeg vazduha u međuprostor treba u najvećoj meri smanjiti. Ovo je tipičan problem koji se događa kod DVF koje dozvoljavaju prirodnu ventilaciju prostorija. Pored toga, u slučaju hladnih noći, otvori na fasadi bi trebali biti zatvoreni, kako bi se sprečio ulazak vlažnog vazduha u međuprostor fasade.

Studija [79], prikazuje analizu problema kondenzacije u DVF u toplim i vlažnim klimatskim zonama, primer Singapura. Računarske simulacije su bile alat kojima se određivala potrošnja energije, termički komfor i rizik od pojave kondenzacije u objektu sa 6 spratova. Ustanovljeno je da razlika između temperature prostorije i temperature površine stakla predstavlja najveći problem od pojave kondenzacije u toku noći, kada je visoka vlažnost. Preporuka je bila da se upotrebljava ventilator, kako bi se uklonila kondenzacija sa fasade u toplim i vlažnim klimatskim podnebljima. Takođe, zaključeno je da istočna i zapadna fasada ima potencijalno najveći rizik od pojave kondenzacije, dok južna ima najmanji. Što se tiče spratnosti, pokazano je da niži spratovi imaju manji rizik od pojave kondenzacije.

1.5.3 ODRŽIVOST

Kako bi se smanjio negativan uticaj objekta na njegovu okolinu, pored ocene energetske performansi objekta, mora se uzeti u obzir i korišćenje ostalih resursa (vode, konstruktivnih materijala...). Takođe, mora se obratiti pažnja i na sve vidove emisija kako u vazduh, tako i u vodu i zemljište.

Osnova procene održivosti, kao indikatora performanse, je analiza životnog veka objekta ("Life Cycle Assessment"-LCA). Ovaj indikator je povezan sa ulazom energije u objekat i sa izračunatim (izmerenim) izlazima u ukupnom životnom veku. Proces izračunavanja LCA indikatora se najčešće sastoji iz četiri faze: nastanak i proizvodnja svih materijala koji učestvuju u izgradnji; konstrukcija objekta; potrebe objekta; rušenje i odlaganje materijala. Kada se posmatraju DVF, one zahtevaju veći prostor, više materijala, vremena izgradnje, energije, znanja i novca u odnosu na klasične fasade. Veće potrebe u toku pripremnih i faza izgradnje, potrebno je kompenzovati u toku faza korišćenja i odlaganja. Ovo se odnosi pre svega na uštede energije za potrebe grejanja, hlađenja, osvetljenja i sistema za zaštitu od sunčevog zračenja. Za fazu odlaganja materijala, potrebno je proceniti potencijal za reciklažu i ponovno korišćenje stakla i aluminijuma kao dominantnog materijala u konstrukciji fasade.

Specifičnost konstrukcije DVF je da se ona pretežno sastoji od stakla i aluminijuma. Ti materijali se mogu reciklirati, ali sadrže veliku količinu tzv. "pripadajuće energije". To znači, da je velika količina energije potrošena, kako bi se ovi materijali proizveli. Za recikliranje aluminijuma potrebna je velika količina energije zbog zagrevanja. Tako dobijen aluminijum nije uvek pogodan za proizvodnju novih ramova, zbog kvaliteta površine. Što se tiče stakla, ono sa dodatnim premazima sadrži slojeve oksidiranih metala, što predstavlja opasnost za okolinu, tako da je potrebna veća pažnja prilikom ovog procesa. U analizama životnog veka DVF, preporučeno je da se zamena fasade vrši svakih trideset godina.

Kao glavni doprinos DVF održivosti se smatra sledeće:

- integracija sistema i korišćenje obnovljivih izvora energije (pre svega solarne energije);
- smanjenje zahteva za energijom za grejanje;
- smanjenje zahteva za energijom za hlađenje;
- unapređenje termičkog i vizuelnog komfora u objektu;

- unapređenje unutrašnjeg komfora zbog mogućnosti upotrebe prirodne ventilacije;
- smanjenje zahteva za hlađenjem zbog upotrebe noćne ventilacije;
- unapređenje zaštite od buke;
- mogućnost integracije DVF sa sistemom za klimatizaciju;
- mogućnost korišćenja materijala i elemenata koji se mogu reciklirati.

1.5.4 ANALIZA RIZIKA U PROCESU IZGRADNJE OBJEKTA SA DVF

Projektanti i inženjeri se mogu suočiti sa poteškoćama, pokušavajući da pretoče svoje ideje i projektantska rešenja u realan objekat. Posebno za objekte sa DVF, veza između projektnih rešenja i performansi, nije uvek očigledna. Iako možda imamo propise i standarde na raspolaganju, postavlja se pitanje njihove primene i ocenjivanja. Uobičajena je praksa, da modeli i postupci ispitivanja za nove razvojne projekte nisu dostupni. Prikupljanje znanja i iskustva je dugotrajan i skup proces, međutim, povećani troškovi u ovoj oblasti nastaju usled propusta i grešaka, koje su mogle biti izbegnute. Identifikacija i procena rizika u ranim fazama treba da spreče projektante da naprave očigledne greške i da se smanji rizik povećanja troškova u izgradnji i kasnijoj eksploataciji objekta.

Izabrano rešenje omotača objekta, pored toga što treba da obezbedi zahtevane performanse, treba i da smanji rizike od potencijalnih nedostataka [61]. DVF kao fasadni sistemi imaju visok nivo složenosti, koji se pre svega ogleda u ispunjavanju željenih dizajnerskih rešenja, gde pojedini specijalni delovi tek treba da budu napravljeni. Pored čestih mana prilikom izrade, treba se suočiti i sa netačnim modelima, nedostatkom procedura testiranja i manjkom znanja i iskustva. Takođe, kvalifikovanost i iskustvo radnika pri izgradnji je važan preduslov da posao bude urađen na pravilan način. Izbor DVF za objekte uključuje veći rizik, kako u fazi projektovanja, tako i u fazama izgradnje i eksploatacije (Tabela 1.1).

Tabela 1.1: Identifikacija rizika prilikom izgradnje objekta sa DVF

Faza	Potencijalni rizici	Opis
Priprema i projektovanje objekta	<ol style="list-style-type: none"> 1. Nepostojanje potrebne regulative i pravilnika o izgradnji 2. Nedovoljna informisanost, znanje i iskustvo projekatnata 3. Loša i nedovoljna komunikacija između projekatnata različitih struka 	Navedeni rizici pre svega za posledicu imaju loše projektno rešenje. Ako ne postoji odgovarajuća regulativa, to još više otežava posao projektantima. U tom slučaju znanje i iskustvo igra važnu ulogu prilikom izbora idejnog rešenja. Loša komunikacija između projekatnata, implicira neusaglašenost u procesu projektovanja, što produžava vreme i povećava troškove ove faze.
Izgradnja objekta	<ol style="list-style-type: none"> 1. Loše projektno rešenje 2. Neusklađen proces izgradnje između izvođača radova 3. Nekvalifikovanost i nedovoljno iskustvo radnika 	Identifikovani rizici dovode do nefunkcionalnog, komplikovanog rešenja koje, ako se uzme u obzir loša organizacija radova i nekvalifikovanost radnika, produžava vreme i povećava troškove izgradnje objekta.

Operativne strategije i korišćenje objekta	1. Nedostaci i komplikovanost softvera za upravljanje, kontrolu i automatiku 2. Neadekvatne operativne strategije (dnevne i sezonske) vezane za maksimalno iskorišćenje potencijala DVF 3. Informisanost i ponašanje korisnika objekta	Kada je objekat u fazi eksploatacije, praktično svi prethodno navedeni rizici se kumulativno dodaju. Softver, operativne strategije i ponašanje korisnika čine ključnu ulogu u budućim uštedama, što opravdava izbor DVF.
--	--	---

Kao praktična ilustracija posledica gore navedenih rizika, može se navesti sledeće:

- loš i nefunkcionalan dizajn fasade i KGH sistema, dovodi do potencijalno ozbiljnih problema sa kondenzacijom. Mora se predvideti ravnomerna distribucija vazduha u međuprostoru, kako bi se izbegla kondenzacija na kritičnim mestima;
- pošto vazduh ima nizak toplotni kapacitet, idealna toplotna izolacija je od suštinskog značaja. Takođe, infiltracija vazduha i postojanje toplotnih mostova je neprihvatljiva. Ovo takođe pripada riziku od lošeg projektnog rešenja fasade;
- mehanički kvarovi i buduće održavanje elemenata fasade i KGH opreme zavise od idejnog rešenja projektanta. Nepotrebni elementi fasade i komplikovano rešenje za KGH sisteme u objektu povećavaju rizik od kvarova i skupljeg održavanja;
- prilikom upravljanja i kontrole, kako elemenata fasade tako i sistema za KGH, obično je potreban složen softver. Pored softverskih kvarova zbog programskih rešenja, greške mogu izazvati i pogrešno uneti parametri i podaci. Takođe, integracija elemenata fasade i KGH sistema u cilju formiranja pravilnih operativnih strategija, zahteva visok nivo znanja. U skladu sa tim, visoko stručan kadar je neophodan, kako bi se obezbedio ispravan rad. Ovaj rizik se odnosi na fazu eksploatacije objekta.

Kako bi se potencijalni rizici sveli na minimum i kako bi DVF dobro funkcionisala, pregledom dosadašnje prakse i literature zaključuje se da procedura projektovanja objekata sa DVF treba da sadrži:

1. adekvatnu selekciju tipa fasade, materijala, dimenzija i ostalih elemenata u skladu sa ciljanim zahtevima;
2. definisanje funkcije DVF prema zahtevima protoka vazduha, termičkih performansi, integracije sa KGH sistemom, buke i kontrolnih strategija;
3. pravilnu selekciju kontrolnih i operativnih strategija, kao i nadzor i upravljanje;
4. optimizaciju KGH sistema, kako bi se pravilno povezao sa DVF.

1.6 PREGLED LITERATURE VEZANO ZA MODELIRANJE I OCENU ENERGETSKIH PERFORMANSI DVF

Primena i termičko ponašanje DVF u sektoru zgradarstva proučava se širom sveta u poslednjih 20-tak godina. Istraživanje u ovom polju razvija se u skladu sa razvojem softverskih paketa i računara. Samo modeliranje, prema dostupnoj literaturi, može se podeliti na sledeće celine:

1. analitički i parametarski modeli, obezbeđuju korisne informacije u početnoj fazi projektovanja DVF, bez velikog utroška tzv. računarskog vremena. Takođe, nije potrebna računarska oprema visokog kapaciteta i performansi. Kod rešavanja analitičkih modela moraju se usvojiti određene hipoteze, dok se kod rešavanja parametarskih

modela pretpostavlja da je konstantna temperatura u posmatranom delu fasade. U početku, analitički modeli su se bavili jednodimenzionim slučajevima ponašanja DVF. U ove slučajeve ubrajaju se Trombeov zid [48], prirodno ventilisana staklena fasada [31], solarni dimnjak [76]. Ciampi [15], je formirao model prema električnoj analogiji, kako bi izračunao uštede električne energije u objektu sa DVF. Parametarskom analizom se bavio Park [50, 51], kako bi optimizovao energetske performanse, vizuelni i termički komfor DVF u laboratorijskim uslovima. Koristio je dvodimenzionu analizu, koja je bila kalibrisana sa izmerenim vrednostima;

2. modeli zasnovani na bez-dimenzionoj analizi, predstavljaju osnovni alat za određivanje prenosa toplote kroz DVF [2]. Za ovu namenu koriste se programi za energetske simulacije, koji mogu biti podržani i sa eksperimentalnim rezultatima;
3. mrežni modeli protoka vazduha, su često primenjivani u slučajevima kada nam je za kratko vreme potrebna procena zapreminskog protoka vazduha. Metod koristi podatke o razlici pritiska i koeficijentu pražnjenja, kako bi se pojednostavio protok vazduha u posmatranom čvoru (nodu). Metod tretira svaki element objekta kao mrežu čvorova sačinjenih od fasade, soba, delova soba, sistemskih komponenti, povezanih sa međučvornim vezama, koje predstavljaju otvore, vrata, prozore i elemente ventilacionog sistema. Zakon o održanju mase za protoke vazduha svih čvorova čini set nelinearnih jednačina, koje opisuju traženi protok. Utrošak vremena za simulaciju je mali i nije potrebna računarska oprema visokih performansi. Ovi modeli se najčešće integrišu u termičke mrežne modele ili sa programima za energetske simulacije objekata. Stec i Van Passen su u nekoliko radova opisali mogućnosti za ovu integraciju, kako bi rešili problem optimizacije KGH sistema i njegovog povezivanja sa fasadom [67, 68, 69]. Gratia [21, 22, 23, 24], koristeći program TAS, proučavala je efekte prirodne ventilacije, optimalne pozicije venecijanera, širine međuprostora i ostalih termičkih svojstava DVF. Haase [26], je koristio kombinaciju programa za energetske simulacije TRNSYS i mrežnog modela COMIS, kako bi odredio termičke performanse DVF za tople i vlažne klimatske uslove. U poslednje vreme, veliki broj autora [12, 23, 33], koristi kombinaciju programa za energetske simulacije EnergyPlus i mrežnog modela AirFlow Network. U kombinaciji sa merenjem, praksa je pokazala da je ovo najbolja metoda za određivanje svih potrebnih karakteristika DVF;
4. modeli kontrolne zapremine, zasnovani su na jednodimenzionoj diskretizaciji. DVF je podeljena na kontrolne zapremine (oko 1m visine), koje su spojene iz razloga postojanja jedinstvenog ventilacionog kanala (međuprostor fasade). Maseni protok u svakoj zapremini je jednak protoku na ulazu u fasadu. Takođe, u ovoj metodi uzima se u obzir i termički gradijent promene temperature. Saelens [62, 63, 64], koristeći program TRNSYS, ovom metodom proučavao je godišnje performanse poslovnog objekta,. Modeli su obezbeđivali dobar odnos između tačnosti i vremena potrebnog za simulaciju;
5. zonski modeli, mogu da obezbede informacije koje nisu dostupne u parametarskom ili modelu kontrolne zapremine. Razvili su ga Jiru i Haghightat [35], kako bi odredili energetske performanse DVF sa integrisanim venecijanerima;
6. modeli računarske dinamike fluida – CFD modeli, predstavljaju jedinstven način da se reše problemi vezani za projektovanje DVF, uzimajući u obzir strujanje vazduha oko objekta, venecijanera, svih otvora kao i temperaturno polje u međuprostoru. Softver numerički rešava problem parcijalnih diferencijalnih jednačina. Problemi su vezani za određivanje graničnih uslova, vreme trajanja simulacije i snagu računarske opreme.

Pretežno se analiziraju pikovi opterećenja u kratkom vremenskom intervalu, kako bi se smanjilo vreme potrebno za simulaciju. Preporučeno je da se koristi k-ε model turbulencije sa 1 ili 2-D modelima. Ji [34], je uradio istraživanje prirodno ventilisane dvostruke fasade, integrisane sa venecijanerima. Rezultati 2d CFD simulacije su upoređeni sa eksperimentalnim rezultatima na test laboratorijskoj fasadi. Pokazano je, kako komercijalni CFD programi (ANSYS) mogu dati dobro predviđanje kompleksnog prenosa toplote i strujanja u DVF. U svom modelu, autor je koristio k-ω model turbulencije;

7. integrisani modeli – kombinacija više pristupa modeliranju, nastali su kao potreba za boljom tačnošću rezultata dobijenih simulacijom. Na ovaj način, povezuju se energetske simulacije objekta sa mrežnim modelima protoka vazduha izvedenih iz CFD-a. Metode povezivanja se dele na statičke i virtuelno dinamičke [80]. Provera rezultata se upoređuje sa izvršenim merenjem. Primere dobro urađenih modela dali su Manz [46] i Zhai [81].

Prilikom izbora modela, pažnju treba pre svega obratiti na rezultat koji želimo da dobijemo. To se odnosi na očekivani nivo tačnosti rezultata, vreme potrebno za izvršenje simulacije, složenost i kompleksnost modela, kao i nivo znanja budućeg korisnika.

Dosadašnje iskustvo u primeni DVF ukazuje nam, da su različite termičke karakteristike fasade osetljive na promenljive spoljašnje uslove i operativne strategije. To se pre svega odnosi na region gde se nalazi objekat, njegovo okruženje, klimatsku zonu i trenutne vremenske prilike. Sa druge strane, operativne strategije zavise od načina kontrole, upravljanja i integracije fasade sa objektom. Ova osetljivost se direktno preslikava na energetske zahteve i potrošnju objekta.

Tabela 1.2, prikazuje pregled urađenih istraživanja uticaja DVF na energetske zahteve objekta. Analizirani su različiti tipovi objekata u različitim klimatskim uslovima i način na koji su dobijeni rezultati (simulacije i merenje). Dobijeni rezultati pokazuju oprečne analize uticaja DVF na energetske potrebe objekata. Različiti zaključci dovode u sumnju opravdanost primene ovog koncepta. Međutim, najnovije studije pokazuju da ako su dobro primenjene operativne strategije i ako je dizajn adekvatan za klimatske uslove gde se nalazi objekat, uštede su neminovne i za zimski i za letnji režim [12, 33].

Tabela 1.2: Pregled istraživanja uticaja DVF na energetske zahteve objekta

Autor	Godina	Mesto	Merenje			Simulacija	Uticaj		Tip objekta		
			T	v	M		Grejanje	Hlađenje	Laboratorija	Deo objekta	Višespratnica
Cho [11]	1995	Seul, Južna Koreja				DA	P	P		DA	
Bourgedis [5]	1998	Kanada				DA	P	P		DA	
Todorović [72]	1999	Beograd, Srbija				DA	P	P		DA	
Jones [36]	2000	Frankfurt, Nemačka	DA			DA		P		DA	
Di Mario [20]	2001	Palermo, Italija	DA	DA		DA	P	P	DA		
Hensen [29]	2002	Prag, Češka				DA		P		DA	
Saelens [61]	2002	Leuven, Belgija	DA	DA		DA	P	N	DA	DA	
Stec i van Paassen [67, 69, 70]	2003, 2005 i 2006	Delft, Holandija	DA	DA	DA	DA	P	P	DA	DA	
Gratia [21, 24]	2004, 2007	Belgija				DA	P	N			DA
Wong [79]	2004	Singapur				DA		P			DA
Ballestini [1]	2005	Italija				DA	P				DA
Høseggen [31]	2008	Norveška				DA	P				DA
Haase [26]	2009	Hong Kong	DA			DA		P			DA
Hashemi [28]	2010	Iran	DA			DA	P	P			DA
Kim [38]	2011	Južna Koreja	DA			DA	P				DA
Choi i Joe [12], [33]	2012, 2013	Yongin, Južna Koreja	DA	DA	DA	DA	P	P			DA

Legenda:

T – merenje temperature vazduha u međuprostoru DVF; v – merenje brzine strujanja vazduha u međuprostoru DVF; M – merenje svih meteoroloških parametara; P – pozitivan uticaj DVF; N – negativan uticaj DVF

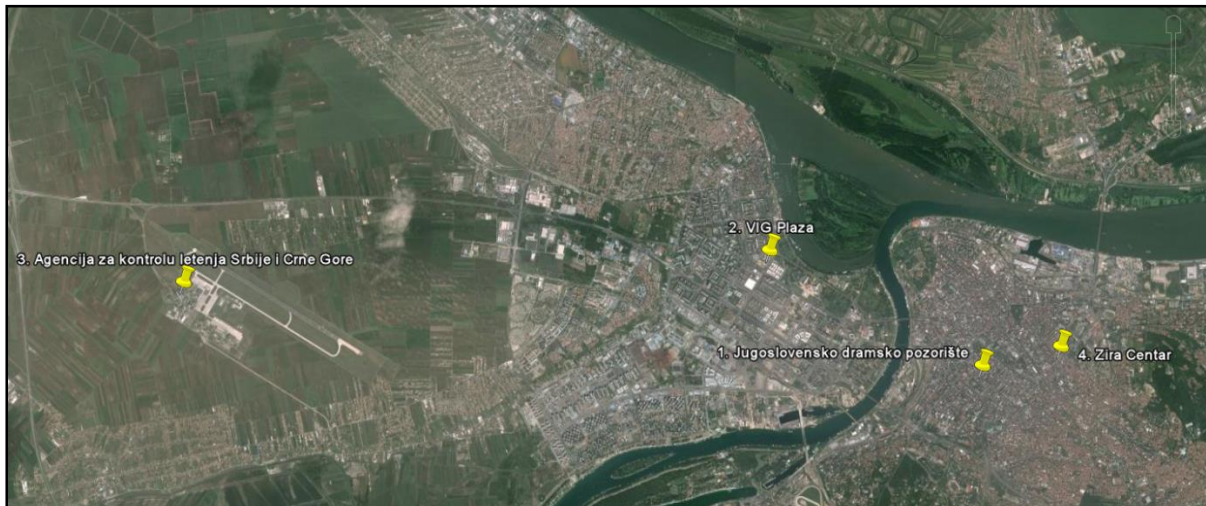
1.7 PREGLED POSTOJEĆE PRAKSE I OBJEKATA SA DVF U SRBIJI

Geografska rasprostranjenost objekata sa DVF pokazuje da se dominantan broj zgrada nalazi u evropskim zemljama kontinentalnog i severnog dela (preko 50% od ukupnog broja objekata). Japan, kao predstavnik Azije, takođe učestvuje sa velikim procentom, oko 13%. U tim zemljama klimatski uslovi su pogodniji za pravilnu adaptaciju i primenu DVF zbog hladnih zima, i leta koja nisu isuviše topla.

Što se tiče zemalja, Nemačka ima najveći procenat oko 20% objekata sa DVF, a zatim sledi Japan sa 13%. Dominantno prisustvo DVF u Nemačkoj se može povezati i sa činjenicom, da je Nemačka jedna od prvih zemalja koja je počela da razvija ovaj koncept.

S druge strane, veoma mali broj objekata je identifikovan u Kanadi, SAD, Australiji i drugim delovima sveta.

Iako su klimatski uslovi povoljni, u Srbiji nije zastupljen koncept gradnje objekata sa DVF (slika 1.35). Osnovni razlozi su, pre svega, nerazvijenost građevinske industrije, loši ekonomski uslovi i nedovoljno znanje o mogućim prednostima, koje mogu proisteći ovim načinom formiranja omotača objekta. Pored toga, nedovoljan je nivo istraživanja i komunikacije između ciljnih grupa istraživača, inženjera, arhitekata, projektnih i građevinskih firmi, kao i referentnih državnih tela.



Slika 1.35: Pregled postojećih objekata u Srbiji (Beograd) sa DVF (Izvor: Google Earth)

Takođe, ne postoji standard ili pravilnik koji bi regulisao način projektovanja i gradnje ovakvih objekata u Srbiji. Znanje i informacije o ovom pristupu projektovanju fasada su na jako niskom nivou.

Sledeći problem je to, što država svojim mehanizmima ne pomaže i ne vrši promociju i razvoj inovativnih rešenja u smislu primene adaptivnih fasada. Na ovaj način, zasigurno bi se povećao nivo energetske efikasnosti poslovnih objekata. Primer ovoga je postupak računanja bruto građevinske površine objekta, za čiju vrednost se plaća naknada za gradsko građevinsko zemljište. U Srbiji se za ovaj obračun primenjuje standard JUS_U.C2.100.2002 (Izračunavanje površina objekata u oblasti visokogradnje), po kojem građevinska bruto površina predstavlja površinu prostora koji je određen spoljašnjim merama finalno obrađenih građevinskih elemenata (fasadni zidovi, ograda i sl.). Dakle, kod objekata sa DVF dodatna površina (međuprostor fasade) je uključen u ovu površinu i značajno utiče na visinu naknade. Takođe, kod objekata čiji spoljašnji zidovi imaju izolaciju, moraju platiti veću naknadu. Smisao ovakvih fasada je da se povećá

efikasnost objekata i smanji potrošnja što država treba da podrži, a ne da za to naplaćuje veći iznos naknade za gradsko građevinsko zemljište.

Usvajanjem pravilnika o energetskej efikasnosti zgrada (stupio na snagu 30.09.2012. godine), ovaj problem je trebao da se prevaziđe. Dakle, u članu 2. stav 3 ovog pravilnika, definiše se bruto razvijena građevinska površina, kao zbir površina svih nadzemnih etaža zgrade, mereni u nivou podova svih delova objekta - spoljne mere obodnih zidova (sa oblogama, parapetima i ogradama). *U bruto građevinsku površinu ne računaju se površine u okviru sistema dvostrukih fasada, staklenika, površine koje čine termički omotač zgrade u bruto razvijenu građevinsku površinu ne obračunava se kod heterogenih zidova debljina termoizolacije preko 5 cm, a kod homogenih zidova debljina zida veća od 30 cm uz postizanje, ovim pravilnikom propisanih uslova energetske efikasnosti zgrada.* Na ovaj način država je prepoznala problem i pokušala da ga reši. Međutim, praksa je pokazala da primena ovog pravilnika nije u svim opštinama ista tj. da se u nekim slučajevima i dalje koristi stari JUS standard.

Cene naknade za gradsko građevinsko zemljište u gradu Beogradu se kreću od 15 do 400 €/m² bruto građevinske površine u zavisnosti od gradske zone (od I/1 do VIII). Pošto se poslovni objekti pretežno nalaze u užem gradskom jezgru, visina troškova za ovu naknadu nije mala. Na primeru poslovnog objekta VIG Plaza u Beogradu, može se izračunati da je bruto građevinska površina zbog prisustva DVF povećana za oko 50 m². Kada se sračuna visina naknade za gradsko građevinsko zemljište (objekat je završen 2011. godine), investitor je morao da plati cirka 12.000 € više.

Pregled srpskih građevinskih objekata koji za svoj omotač imaju DVF čine:

1. Zgrada Jugoslovenskog dramskog pozorišta

Jugoslovensko dramsko pozorište (Slika 1.36) je osnovano 1948. godine. Za vreme svog poluvekovnog trajanja ugostilo je najveće umetnike sa naših i svetskih prostora. U požaru 1997. godine potpuno je uništena Velika scena. Prilikom obnove morao se zadržati izgled spoljašnje fasade, koja je spomenik srpske kulture. Zbog toga, realizovana je ideja da se korišćenjem koncepta dvostruke fasade zaštiti originalni izgled objekta. Koncept nije u potpunosti ispoštovan, pošto provetranje fasade nije kontrolisano. Širina međuprostora je oko 1 m. Obnovljeno Jugoslovensko dramsko pozorište otvoreno je 2003. godine.



Slika 1.36: Jugoslovensko dramsko pozorište (Izvor: Google Earth)

2. Poslovni objekat VIG Plaza

Vienna Insurance Group je investitor poslovne zgrade "VIG Plaza", koja se nalazi na Novom Beogradu (Slika 1.37). Radovi na prvoj zgradi koja će u Srbiji biti urađena po konceptu DVF, počeli su 2008. godine. Zgrada je zvanično otvorena i puštena u rad 2011. godine. Dve fasade objekta (jugo-istočna i severo-istočna) su potpuno urađene po konceptu DVF, dok su preostale

dve fasade urađene na tradicionalan način, zbog okruženja zgrade. Energetski sistem objekta projektovan je da se praktično 75% potreba za grejanjem i hlađenjem obezbeđuje iz obnovljivih izvora tj. toplotnom pumpom voda-voda. Ostatak se nadomešćuje iz sistema daljinskog grejanja i sopstvenih visko efikasnih čilera. Detaljan opis zgrade biće urađen u narednim poglavljima.



Slika 1.37: Poslovni objekat VIG Plaza (Izvor: projektna dokumentacija objekta)

3. Zgrada Agencije za kontrolu letenja Srbije i Crne Gore

Izgradnja objekta Agencije za kontrolu letenja Srbije i Crne Gore (SCG) započeta je 2009. godine i danas se nalazi u vlasništvu je Republike Srbije (95%) i republike Crne Gore (5%). Novi objekat urađen je po svim principima energetske efikasne zgrade. Zgrada ima tri nivoa i podrumске prostorije, u kojima su smeštena dva sistema za napajanje strujom i potpuno nezavisni sistemi za grejanje i hlađenje prostorija. Površina objekta je oko 1.000 m², dok je vrednost investicije oko 90 miliona evra. Objekat je nepravilnog oblika (slika 1.38), a deo fasade urađen po principu Trombeovog zida, sa mogućnošću provetravanja (pasivni tip DVF). Ti delovi objekta imaju orijentaciju severo-zapad, severo-istok i jugo-zapad. Zgrada je zvanično otvorena u oktobru 2010. godine na stogodišnjicu vazduhoplovstva u Srbiji.



Slika 1.38: Zgrada Agencije za kontrolu letenja SCG (Izvor: projektna dokumentacija)

4. Objekat višestruke namene "Zira"

Svojom arhitekturom, inženjerskim rešenjima i sadržajem ovaj objekat ispunjava najviše zahteve savremenog čoveka. Sastoji se iz:

- tržnog centra, 7.000 m²;
- poslovnog prostora, preko 3.000 m²;

1. DVOSTRUKE VENTILISANE FASADE - PREGLED LITERATURE

- hotela kapaciteta 144 sobe;
- podzemne garaže na pet nivoa, sa 450 parking mesta.

Prostor najsavremenije arhitekture i poslovne funkcionalnosti, urađen je po svim principima energetske efikasnosti. Obuhvata ukupnu površinu od oko 40.000 m² i koncipiran je kao savremeno arhitektonsko rešenje u obliku slova "Z", koje se potpuno uklapa u postojeće pravce pešačkih i saobraćajnih tokova (Slika 1.39). Deo fasade koji je orijentisan prema jugo-zapadu izveden je kao Trombeov zid, sa mogućnošću provetranja (pasivni tip DVF). Objekat je zvanično otvoren 2007. godine.



Slika 1.39: Zira Centar (Izvor: projektna dokumentacija objekta)

Analizirajući dosadašnji pregled prakse DVF u svetu, većina istraživača je donela zaključak da ovaj pristup projektovanja omotača objekta donosi energetske uštede. Međutim, postoje i zaključci koji govore o negativnim posledicama primene ovog koncepta, pogotovo u letnjem periodu (problem pregrevanja). Različita iskustva i mišljenja proizvode sumnju, što izaziva nesigurnost kod projektanata prilikom izbora ovog koncepta. Gledano lokalno i globalno, generalni zaključak je da buduća pozitivna promocija koncepta DVF mora sadržati sledeće korake:

- neophodnost donošenja adekvatnih standarda, jedinstvene metodologije proračuna i uputstava za projektovanje;
- kroz međusobnu komunikaciju između ciljnih grupa neophodno je podići nivo znanja, iskustva i prakse, kako u projektnoj tako i u operativnoj fazi objekta;
- informacije o trenutnoj efikasnosti rezultuju obavezom kontinualnog energetskog monitoringa objekata sa DVF;
- formiranje sistematsko organizovane baze podataka o svim postojećim objektima sa DVF podeljenu prema tipičnim klimatskim uslovima.

1.8 LITERATURA

- [1] Ballestini, G., Carli, M.D., Masiero, N., Tombola, G., Possibilities and limitations of natural ventilation in restored industrial archaeology buildings with a double skin facade in Mediterranean climates, *Building and Environment* 2005; 40; p.p. 983-995
- [2] Balocco C., Colombari. M., Thermal behaviour of interactive mechanically ventilated double glazed facade: non-dimensional analysis, *Energy and Buildings* 2006; 38; p.p. 1-7.
- [3] Besset, M., *Who Was: Le Corbusier*, (edited by Leymarie), Cleveland, Ohio, USA, 1968

1. DVOSTRUKE VENTILISANE FASADE - PREGLED LITERATURE

- [4] Blasco, M., Double ventilated glass facades - acoustical performances, in Actieve en interactive dubbeschalige glasgevels: top of flop? Delft, Netherlands, 2004
- [5] Bourgeois, D., et al., An integrated approach to the design of double facades in Canadian non - domestic buildings: a case study, 1998
- [6] Brandle, K., Boehm, R.F., Airflow windows: performance and applications, Proceedings of the ASHRAE/DOE conference: Thermal Performance of the Exterior Envelopes of the Building II, p.p. 361-379, 1982
- [7] Buchli, V., Moisei Ginzburg's Narkomfin Communal House in Moscow, Journal of the Society of Architectural Historians, 1998
- [8] CEN, prEN 13119 – Curtain walling – terminology, Octobre 2004
- [9] Chan A. L. S., Chow, T. T., Fong, K. F., Lin, Z., Investigation on energy performance of double skin facade in Hong Kong, Energy and Buildings 2009; 41; p.p. 1135-1142
- [10] Charron, R., Athienitis, A., K., Optimization of the performance of double-facades with integrated photovoltaic panels and motorized blinds, Solar Energy 2006; 80; p.p. 482-491
- [11] Cho, S. H., Shin, K.S., Zaheer-Uddin, M., The Effect of Slat Angle of Windows with Venetian Blinds on Heating and Cooling Loads of Buildings in South Korea, Energy 1995; 20; p.p. 1225-1236
- [12] Choi, W., et al., Operation and control strategies for multi-storey double skin facades during the heating season, Energy and Buildings 2012; 49; p.p. 454-465
- [13] Chow W.K., Hung W.Y., Effect of cavity depth on smoke spreading of double-skin facade, Building and Environment 2006; 41; p.p. 970-979
- [14] Chow W.K., Hung W.Y., Gao Y., Zou G., Dong H., Experimental study on smoke movement leading to glass damages in double-skinned facade, Construction and Building Materials 2007; 21; p.p. 556-566
- [15] Ciampi, M., Leccese F., Tuoni G., Ventilated facades energy performance in summer cooling of buildings, Solar Energy 2003; 75; p.p. 491-502
- [16] Claessens, J., De Herte, A., Active Solar Heating and Photovoltaics, Solar Energy in European Office Buildings, University College of Dublin, Ireland.
- [17] Compagno, A., Intelligent Glass Facades, 5th revised and updated ed. 2002
- [18] Corbusier, L., The Sun-break, in Besset, M., Who was Le Corbusier, 1933
- [19] De Ruiter, P., Moderne Klimaatgevel, “The chameleon skin” (in Dutch), Proceedings of Facade en Klimaat Delft, p.p. 6.1-6.12, 1998
- [20] Di Maio, F., Integration of double facades and ventilation systems in buildings, PhD thesis, TU Palermo, 2001
- [21] Gratia E., De Herde, A., Natural ventilation in a double-skin facade, Energy and Buildings 2004; 36; p.p.137-146
- [22] Gratia E., De Herde, A., Natural cooling strategies efficiency in an office building with a double-skin facade, Energy and Buildings 2004; 36; p.p.1139-1152
- [23] Gratia E., De Herde, A., The most efficient position of shading devices in a double-skin facade, Energy and Buildings 2007; 39; p.p. 364-373
- [24] Gratia, E., De Herde A., Are energy consumptions decreased with the addition of a double-skin? Energy and Buildings 2007; 39; p.p.605-619
- [25] Grut, L., Daimler Chrysler Building, (edited by Edwards) Green Buildings Pay, Spon Press, London, p.p. 86-93
- [26] Haase, M., Marques da Silva, F., Amato, A., Simulation of ventilated facades in hot and humid climates, Energy and Buildings 2009; 41; p.p. 361-373
- [27] Harrison, K., Meyer-Boake, T., Tectonics of Environmental Skins: The Occidental Chemical Centre, School of Architecture, University of Waterloo, p.p. 6, 2003
- [28] Hashemi, N., Fayaz, R., Sarshar, M., Thermal behavior of a ventilated double skin facade in hot arid climate, Energy and Buildings 2010; 42; 1823-1832

- [29] Hensen, J., Bartak, M., Drkal, F., Modeling simulation of a double-skin facade system, ASHRAE Transactions 2002; p.p. 1251-1259
- [30] Holmes, M.J., Optimisation of the thermal performance of mechanically and naturally ventilated glazed facades, Renewable Energy 1994; 5; p.p. 1091-1098
- [31] Høseggen R., Wachenfeldt B. J., Hanssen S. O., Building simulation as an assisting tool in decision making, case study: with or without a double-skin facade? Energy and Buildings 2008; 40; p.p. 821-827
- [32] Jager, W., Double Skin Facades – Sustainable Concepts, Malmo, Sweden, 2003
- [33] Jaewan, J., et al., Load Characteristics and Operation Strategies of Building Integrated with Multi story Double Skin Facade, Energy and Buildings 2013; 60; p.p. 185-198
- [34] Ji, Y., Cook, M. J., Hanby, V., Infield, D. G., Loveday, D. L., Mei, L., CFD modelling of naturally ventilated double-skin facades with Venetian blinds, Journal of Building Performance Simulation 2008; 1; p.p. 185-196
- [35] Jiru, T.E., Haghghat, F., Modeling ventilated double skin facade - A zonal approach, Energy and Buildings 2008; 40; p.p. 1567-1576
- [36] Jones, J., T. Messadi, S. Li., Experimental study of the cooling season performance of ventilated double glass envelope cavities, International Building Physics Conference, Eindhoven, Netherlands, 2000
- [37] Kim S.Y., Song K.D., Determining photosensor conditions of a daylight dimming control system using different double-skin envelope configurations, Indoor and Built Environment, 2007; 16; p.p. 411-425
- [38] Kim, Y.M., et al., Effects of double skin envelopes on natural ventilation and heating loads in office buildings, Energy and Buildings 2011; 43; p.p. 2118-2126
- [39] Kragh, M., Building Envelopes and Environmental Systems, Conference Modern Facades of Office Buildings 2000, Delft Technical University, Netherlands
- [40] Land, W., Herzog, T., Using multiple glass skins to clad buildings; they are sophisticated, energy-efficient, and often sparkingly beautiful, but widely used only in Europe – at least for now, Architectural Record, Vol. 188, No. 7, p.p. 171-176
- [41] Lang, W., Zur typology mehrschaliger Gebäudehüllen aus glass (in German), Detail, pp. 1125-1232, 1998
- [42] Lee, E., et al., High-Performance Commercial Building Facades, University of California, Berkeley, USA, 2002
- [43] Leon, A. M., History of Double Skin Facades, Graduate School of Design, Harvard University, Cambridge, 1999, USA, p.p. 3
- [44] Letter from Le Corbusier to Senator Warren Austin, published in the Architectural Review, 1950, p.p. 69-71
- [45] Manz, H., Total solar energy transmittance of glass double facades with free convection, Energy and Buildings, 2004; 36; p.p. 127-136
- [46] Manz, H., Frank, T., Thermal simulation of buildings with double-skin facades, Energy and Buildings 2005; 37; p.p. 1114-1121
- [47] Mootz, F., Bezián, J.J., Numerical study of a ventilated facade panel, Solar Energy 1996; 57; p.p. 29-36
- [48] Nasri, K., A model of a Trombe wall, Renewable Energy 1991; 1; p.p. 533-541
- [49] Oesterle, E., et al., Double-Skin Facades: Integrated Planning, Munich, Germany, 2001, published by Prestel
- [50] Park, C., Augenbroe, G., Messadi, T., Thitisawat, M., Sadegh, N., Calibration of a lumped simulation model for double-skin facade systems, Energy and Buildings 2004; 36; p.p. 1117-30
- [51] Park, C., Augenbroe, G., Sadegh, N., Thitisawat, M., Messadi, T., Real-time optimization of a double-skin facade based on lumped modeling and occupant preference, Energy and Buildings 2004; 3; p.p. 939-948.

- [52] Park, S.D., Suh, H.S., Cho, S.H., The Analysis of Thermal Performance in an Airflow Window System Model, Proceedings of the ASHRAE/DOE/BTECC/CIBSE Conference 1989, Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings IV, p.p. 361-375
- [53] Pasquay, T., Natural ventilation in high-rise buildings with double facades, saving or waste of energy, Proceedings of the 18th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Brazil, 2001
- [54] Poirazis, H., Double Skin Façades for Office Buildings – Literature Review, Division of Energy and Building Design, Department of Construction and Architecture, Lund Institute of Technology, Lund University, Report EBD-R--04/3, 2004
- [55] Renckens, J., Facades in glas en aluminium - Gevels & Architectuur (in Dutch), Nieuwegein: VRMG, 1996
- [56] Renckens, J., Technologie en organisatie van Alu-glasfacades, Delft: Publikatieburo Bouwkunde, p.p. 252, 1997
- [57] Ripatti, H., Airflow window system – Making the fenestration the solution rather than the problem in energy use, Proceedings of the ASHRAE Winter Meeting 1984, Atlanta.
- [58] Roth, K., et al., Double skin facades. ASHRAE Journal October 2007; p.p. 70-73
- [59] Safer, N., et al., Three-dimensional simulation with a CFD tool of the airflow phenomena in single floor double-skin facade equipped with a Venetian blind, Solar Energy 2005; 79; p.p. 193-203
- [60] Saelens, D., Hens, P. H., Active Envelopes. The future for low-energy office design, International Building Physics Conference Eindhoven, Netherlands, 2000
- [61] Saelens, D., Energy performance assessment of multiple-skin facades, PhD Dissertation, Katholieke Universiteit Leuven, 2002
- [62] Saelens, D., Carmeliet, J., Hens, H., Energy performance assessment of multiple- skin facades, HVAC&R Research 2003; 9; p.p. 167–185
- [63] Saelens, D., Roels, S., Hens, H., The inlet temperature as a boundary condition for multiple-skin facade modeling, Energy and Buildings 2004; 36; p.p. 825–835
- [64] Saelens, D., Roels, S., Hens, H., Strategies to improve the energy performance of multiple-skin facades, Building and Environment 2008; 43; p.p. 638–650
- [65] Scheerbart, P., Glasarchitektur 1914 (in German), republished as: Helmut Geisert H., and Neumeyer, F., Paul Scheerbart, Glasarchitektur, Mit einem Nachwort zur Neuausgabe von Mechthild Rausch, Edition Ars et Architectura, Berlin: Gebr. Mann, 2000
- [66] Stec, W., Van Paassen, A.H.C., Double skin facade as a part of the HVAC system, report KK-322, TU Delft, 2002
- [67] Stec, W., Van Paassen, A.H.C., Defining the Performance of the Double Skin Facade with the Use of the Simulation Model, Proceedings of Building Simulation, Netherlands, 2003, p.p. 1243-1250
- [68] Stec, W.J., Van Paassen, A.H.C., Maziarz, A., Modelling the double skin facade with plants, Energy and Buildings 2005; 37; p.p. 419-427
- [69] Stec, W.J., Van Paassen, A.H.C., Symbiosis of the double skin façade with HVAC system, Energy and Buildings 2005; 37; p.p. 461-469
- [70] Stec, J.C., Symbiosis of Double skin Facades and Indoor Climate Installation, PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2006
- [71] Taylor, B., Le Corbusier, the city of Refuge, Paris, The University of Chicago Press, 1987
- [72] Todorović, B., B. Marić., The influence of double facades on building heat losses and cooling loads, 20th International Congress of Refrigeration, Sydney, Australia, 1999
- [73] Van Paassen, A.H.C., Van Galen, P.J.M., Rules for cooling through motorized vent windows, 19th International Congress of Refrigeration, Delft, Netherlands, 1995
- [74] Van Paassen, A.H.C., Liem, S.H., Gröninger, B., Control of the night cooling with natural ventilation, 19th Annual AIVC Conference, Oslo, Norway, 1998

1. DVOSTRUKE VENTILISANE FASADE - PREGLED LITERATURE

- [75] Wang P.C., Natural Ventilation in Double-Skin Facade Design for Office Buildings in Hot and Humid Climate, PhD Thesis, University of New South Wales, Australia, December, 2008
- [76] Wenting, D., et al., Natural ventilation performance of a double-skin facade with a solar chimney, *Energy and Buildings* 2005; 37; p.p.411-8
- [77] Wenting D., Yuji, H., Smoke control through a double-skin facade used for natural ventilation 2006. *ASHRAE Journal* 2006; 112; p.p. 181-188
- [78] Wigginton, M., *Glass in Architecture*, New York, Phaidon Press Inc. p.p. 320, 2003
- [79] Wong, N.H., Wang, L, Aida, NC., Effects of double glazed facade on energy consumption, thermal comfort and condensation for a typical office building in Singapore, *Energy and Buildings*, 2005; 37; p.p. 563-572
- [80] Zhai, Z., Chen, Q., Haves, P., Klems, J.H., On approaches to couple energy simulation and computational fluid dynamics programs, *Building and Environment* 2002; 37; p.p. 857-864
- [81] Zhai, Z., Chen, Q., Performance of coupled building energy and CFD simulations, *Energy and Buildings* 2005; 37; p.p. 333-344
- [82] Zöllner, A., Experimentelle und theoretische Untersuchung des kombinierten Wärmetransports in Doppelfassaden. PhD thesis, Technischen Universität München, 2001

2. OPIS IZABRANOG OBJEKTA I POSTAVKA EKSPERIMENTA

Ne možete upravljati nečim ako ga ne možete izmeriti;
Ako merimo previše, imamo više nerazumevanja;
Budi siguran da meriš samo ono što je potrebno kako bi imao tačne procene
["You cannot manage what you cannot measure;
Too often we measure everything, and understand nothing;
Be sure to measure what you need so that you can correctly verify the estimates"]
(Jack Welch)

Uloga merenja u oceni energetskih performansi objekata je značajna. Kontinualnim praćenjem utvrđuje se pravo stanje i na koji način se objekat ponaša u zavisnosti od promene spoljašnjih i unutrašnjih uslova. Pravilnim izborom mernih mesta i parametara koji se prate, pronalazimo gde se mogu ostvariti najveće uštede i smanjiti gubici.

Sledeća, vrlo važna uloga merenja jeste u okviru detaljnog energetskog modeliranja objekta. Rezultati dobijeni merenjem sadrže veoma bitne informacije o realnom ponašanju objekta, koji su dinamični po svojoj prirodi. Ovi podaci se koriste da bi se proverilo, da li je i u kojoj meri model zapravo virtuelna reprezentacija realne zgrade.

Za većinu postojećih objekata, jedini izvor merenjem dostupnih informacija su na mesečnom ili polumesečnom nivou (pre svega se misli na potrošnju energije). Za detaljno energetsko modeliranje objekta ovaj interval merenja donosi i nedostatke, koji se pre svega ogledaju da se ne mogu identifikovati greške na dnevnom i/ili časovnom nivou, kao i dinamičko ponašanje promene posmatranog parametra merenja. Važnost časovnog ili učestalijeg vremenskog intervala merenja, ogleda se u dinamičkoj prirodi promene većine termičkih parametara objekta, kao i meteoroloških uslova koji vladaju u okolini njega.

Kod analize DVF, autori su najčešće proučavali karakteristike jednospratnih fasada [1, 6, 15, 17, 18, 19]. Manji broj analiza je urađen za višespratne objekte [7, 8, 10, 12]. Osnovni nedostatak svih ovih analiza je nepostojanje merenja i provere primenjenih modela. Dosadašnja merenja su bila jedino sprovedena na laboratorijskim uzorcima fasada. Najnovija istraživanja uključuju merenje na poslovnim objektima sa DVF, gde se na takav način vrši potvrđivanje definisanih modela [3, 13]. Međutim, pomenutih istraživanja je jako malo. Sve ovo ukazuje na neophodnost ovakvog pristupa pri oceni energetskih performansi izvedenih objekata sa DVF, kako bi se dobili objektivni rezultati.

2.1 OPIS KLIMATSKIH USLOVA SRBIJE I BEOGRADA¹

Klima Srbije se može opisati kao umereno-kontinentalna, sa manje ili više izraženim lokalnim karakteristikama. Prostorna raspodela parametara klime uslovljena je geografskim položajem, reljefom i lokalnim uticajem, kao rezultatom kombinacije reljefa, raspodele vazdušnog pritiska većih razmera, ekspozicijom terena, prisustvom rečnih sistema, vegetacijom, urbanizacijom... Najveći deo teritorije Srbije pripada klimi umerenog pojasa. Jugozapadni deo Republike nalazi se na granici sredozemne subtropske i kontinentalne klime.

Prosečna godišnja temperatura vazduha u periodu od 1961. do 1990. godine, za područja sa nadmorskom visinom do 300 m iznosi 10,9°C. Područja sa nadmorskom visinom od 300 do 500 m imaju prosečnu godišnju temperaturu oko 10°C. U planinskim predelima sa preko 1000 m nadmorske visine, srednje godišnje temperature variraju oko 6°C, dok su na visinama preko 1500 m oko 3°C. Jesen je toplija od proleća. Najtopliji mesec je jul, sa srednjom mesečnom temperaturom u intervalu od 11 do 22°C. Apsolutni maksimum temperature u periodu od 1961. do 1990. godine, izmereni su u julu i kreću se u intervalu od 37,1 do 42,3°C u nižim predelima, dok se u planinskim područjima kreću od 27,6 do 34°C. U avgustu je takođe veoma toplo, sa izmerenim maksimalnim temperaturama u intervalu od 37,4 do 40,3°C. Najhladniji mesec je januar, sa srednjom mesečnom temperaturom oko -6°C u planinskim predelima, do 0°C u ravničarskim delovima zemlje. Najvišu srednju januarsku temperaturu od 0,4°C ima Beograd, zbog izraženog urbanog uticaja. Apsolutne minimalne temperature registrovane su u januaru, u opsegu od -30,7 do -21,0°C u nižim predelima, dok se u planinskim područjima kreću od -35,6 do -20,6°C. Na slici 2.1 prikazana je srednja godišnja temperatura za Beograd, preko odstupanja

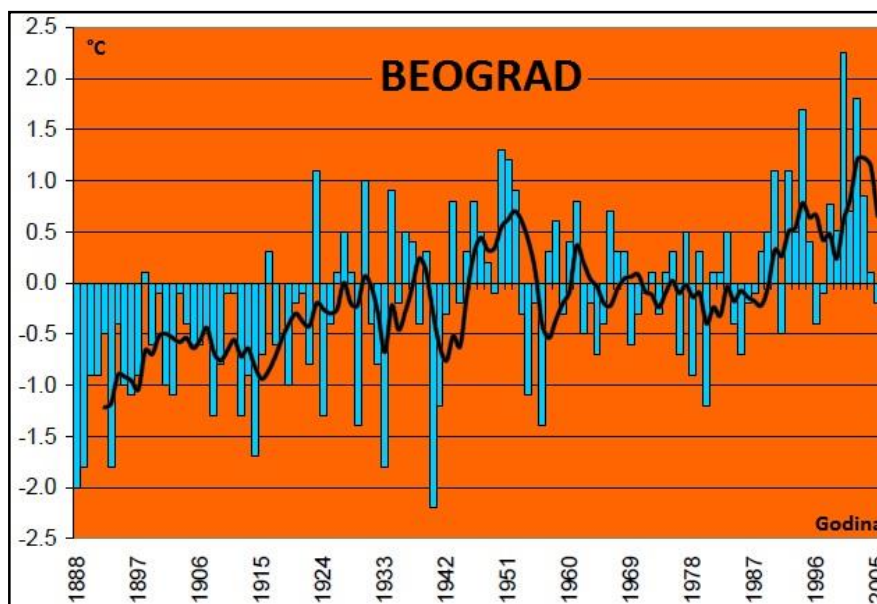
¹ Podaci preuzeti od RHMZ

2. OPIS IZABRANOG OBJEKTA I POSTAVKA EKSPERIMENTA

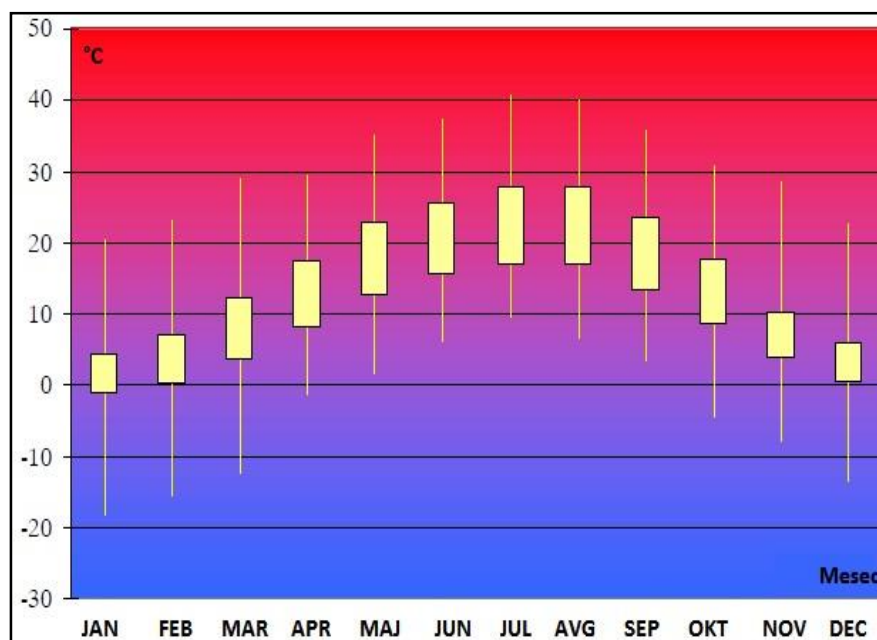
iste od normale. Na slici 2.2 prikazane su razlike između srednjih maksimalnih i minimalnih temperatura za svaki mesec (obojeni stubići), dok tanke linije daju opseg apsolutnih maksimalnih i minimalnih temperatura po mesecima za tridesetogodišnji period. Slika je urađena na osnovu dnevnih izveštaja sa Beograd, iz perioda od 1971. do 2000. godine [14].

Godišnje sume trajanja insolacije, kreću se u intervalu od 1.500 do 2.200 sati godišnje. Maksimalno ukupno sunčevo zračenje u letnjem periodu, kreće se oko 1.000 W/m^2 .

Prizemna vazдушna strujanja su u velikoj meri uslovljena ortografijom. U toplijem delu godine preovlađuju vetrovi sa severozapada i zapada. Tokom hladnijeg dela godine dominira istočni i jugoistočni vetar - košava. U planinskim oblastima na jugozapadu Srbije preovlađuju vetrovi sa jugozapada.



Slika 2.1: Odstupanje od normale srednje godišnje temperature za grad Beograd u periodu od 1888. do 2005. godine [14]



Slika 2.2: Opseg srednjih i apsolutnih mesečnih temperatura u Beogradu [14]

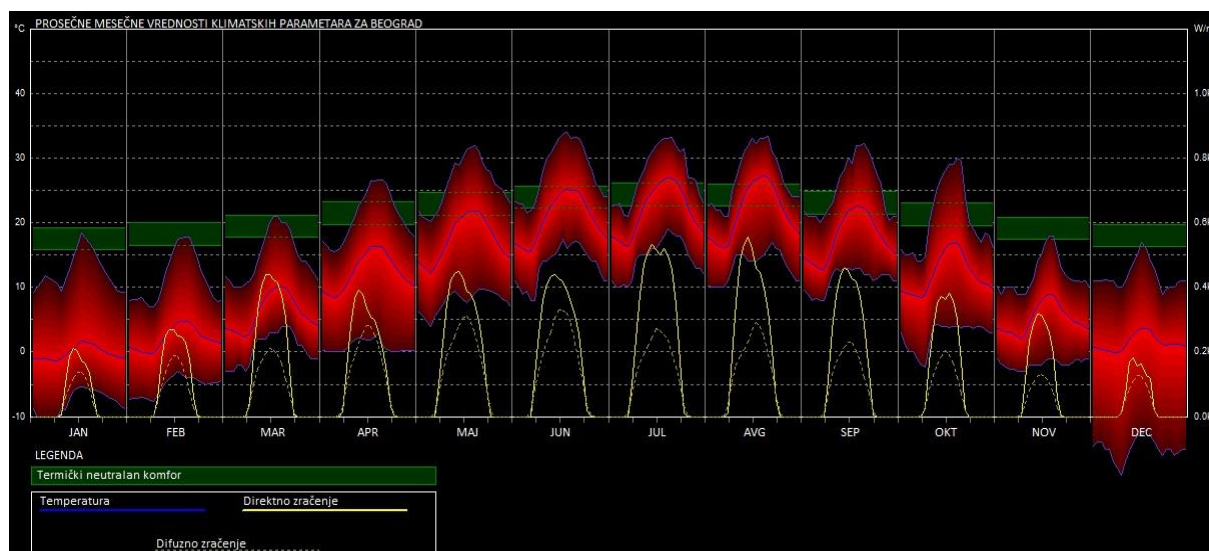
2. OPIS IZABRANOG OBJEKTA I POSTAVKA EKSPERIMENTA

Što se tiče Beograda, u prethodnih petnaestak godina zabeleženo je osetno povećanje temperature. To potvrđuje tabela 2.1.

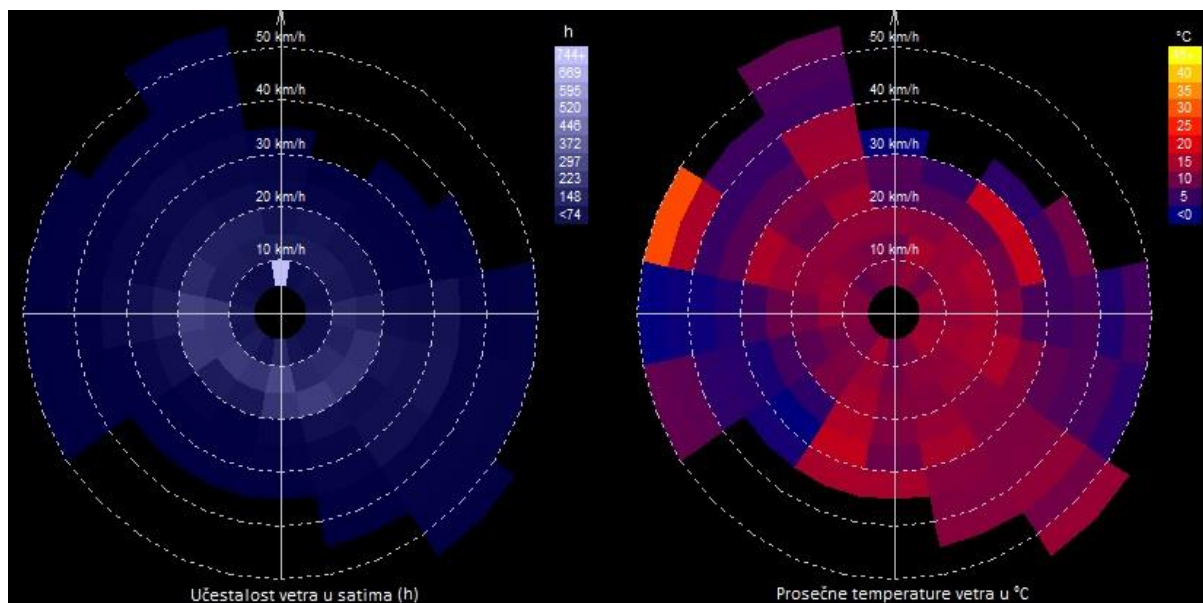
Tabela 2.1: Značajni toplotni rekordi u Beogradu u prethodnih 15 godina

OPIS	PERIOD	TEMPERATURA (°C)	REFERENTNI TEMPERATURNI PERIOD 1887-2006 (°C)
Najtoplija godina 1	2000.	14,1	Srednja temperatura 11,7
Najtoplija godina 2	2007.	13,9	
Najtoplija godina 3	2002.	13,6	
Najtoplija zima 1	2006/2007.	6,2	Srednja zimska temperatura 1,4
Najtoplija zima 2	1997/1998.	5,2	
Najtoplija zima 3	2000/2001.	4,9	
Najtoplije leto	2003.	24,5	Srednja letnja temperatura 21,4
Apsolutno najtopliji dan	24.07.2007.	43,6	Prethodni rekord 41,8

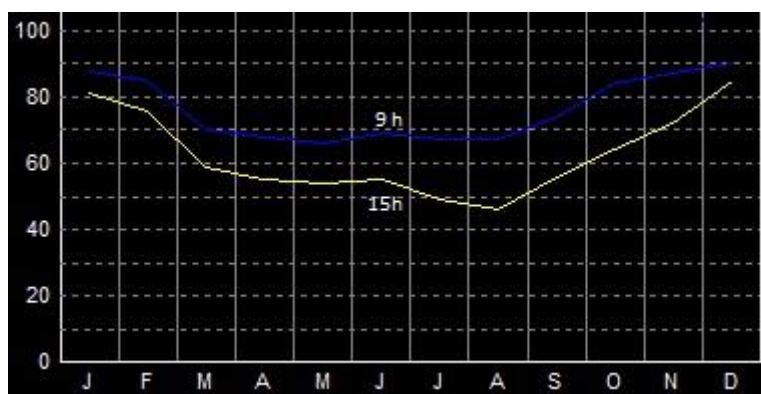
Kako bi se bolje upoznali sa klimatskim uslovima Beograda, slike 2.3, 2.4 i 2.5 prikazuju statističke mesečne vrednosti klimatskih parametara dobijenih iz tipične meteorološke godine ("EPW EnergyPlus Weather File" za Beograd). Na slici 2.3 prikazane su mesečne vrednosti temperatura (minimalna, prosečna i maksimalna), vrednosti direktnog i difuznog sunčevog zračenja, kao i uslova neutralnog termičkog komfora. Slika 2.4 opisuje karakteristike vetrova koji se pojavljuju na teritoriji Beograda. Vrednosti relativne vlažnosti vazduha u 9 i 15h časova prikazane su na slici 2.5.



Slika 2.3: Prosečne vrednosti temperature i sunčevog zračenja za Beograd



Slika 2.4: Učestalost i prosečna temperatura vetra u Beogradu



Slika 2.5: Procenat vlage u 9 i 15h u Beogradu

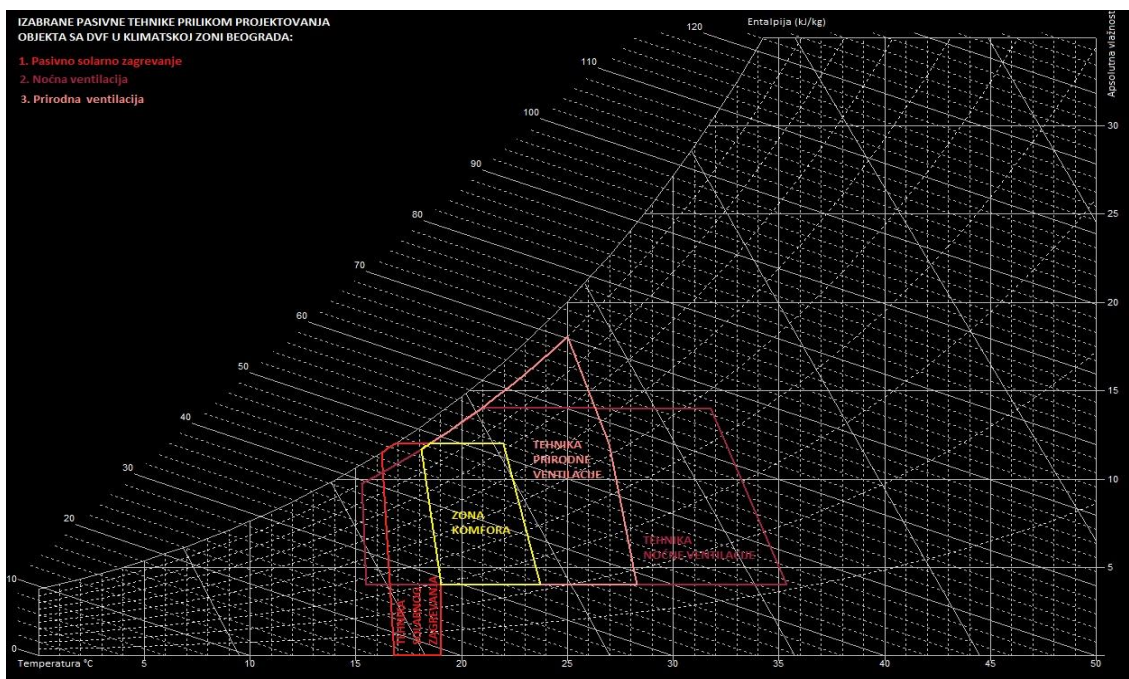
Ovi podaci pokazuju da grad ima odlike umereno kontinentalne klime, sa postepenim prelazom između godišnjih doba (zima, proleće, leto i jesen). Međutim, kako globalno zagrevanje Zemlje uzima sve veći uticaj na klimu, u poslednjih nekoliko godina ovaj prelaz između godišnjih doba se izgubio. Leta postaju sve toplija sa temperaturama preko 35°C, dok u toku zime, koje su inače snežne, temperature padaju ispod -18°C.

Analizom gore navedenih klimatskih i uslova unutrašnjeg komfora, a sa naglaskom na projektovanje objekata sa DVF, mogu se usvojiti sledeće preporuke za tzv. "pasivni dizajn":

1. pasivno solarno zagrevanje objekta;
2. noćna ventilacija;
3. prirodna ventilacija.

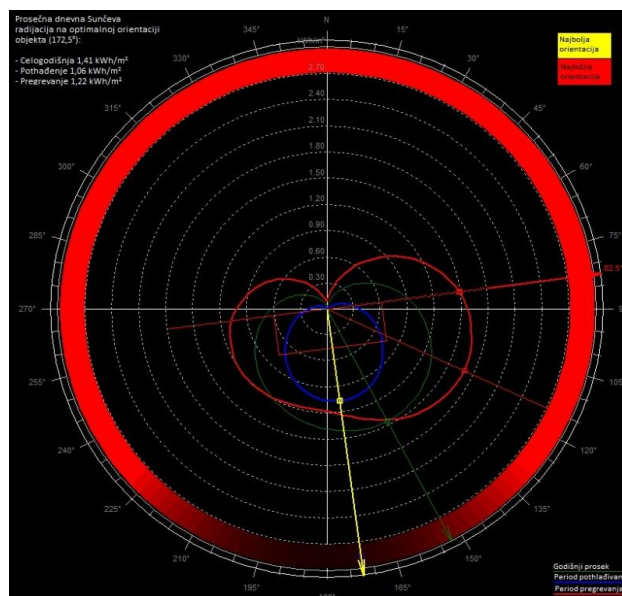
Ovim izborom mera, može se proširiti zona neutralnog termičkog komfora u unutrašnjosti objekta (slika 2.6).

2. OPIS IZABRANOG OBJEKTA I POSTAVKA EKSPERIMENTA



Slika 2.6: Psihometrijski dijagram sa izabranim pasivnim tehnikama

Takođe, prilikom projektovanja i planiranja izgradnje objekata sa DVF mora se obratiti pažnja i na orijentaciju zgrade. U skladu sa tim i sa opisanim klimatskim uslovima Beograda, optimalna orijentacija budućeg objekta bi bila (slika 2.7):



Slika 2.7: Optimalna orijentacija objekta za klimatske uslove Beograda

Optimalna orijentacija objekta je formirana na osnovu prosečnih dnevnih vrednosti sunčevog zračenja na vertikalnu površinu. Slika 2.7, pokazuje optimalne orijentacije objekta koji se nalazi na teritoriji Beograda, na osnovu sunčevog zračenja dobijenih za tri najhladnija meseca (plava kriva), tri najtoplija meseca (crvena kriva) i tokom cele godine (zelena kriva).

Najpovoljnija orijentacija je kada je količina zračenja u toku zime najveća moguća u odnosu na zračenje u toku leta, za isti ugao orijentacije (gde se plava linija proteže iznad ili je najbliža crvenoj liniji).

Međutim, takođe je poželjno da se obezbedi što bolja zaštita od maksimalnog letnjeg zračenja. Cilj optimalne orijentacije je da ovo izbalansira. Dobijena optimalna orijentacija predstavlja ugao kompromisa (ne nalazi se u trenutku maksimalne zimske sunčeve kolekcije, već je malo okrenuta prema istoku, kako bi se blago pomerili iz zone toplog letnjeg popodnevnog Sunca). Na ovaj način, izabran je najbolji položaj objekta za iskorišćenje sunčevog zračenja, kako leti tako i zimi.

2.2 OPIS IZABRANOG OBJEKTA

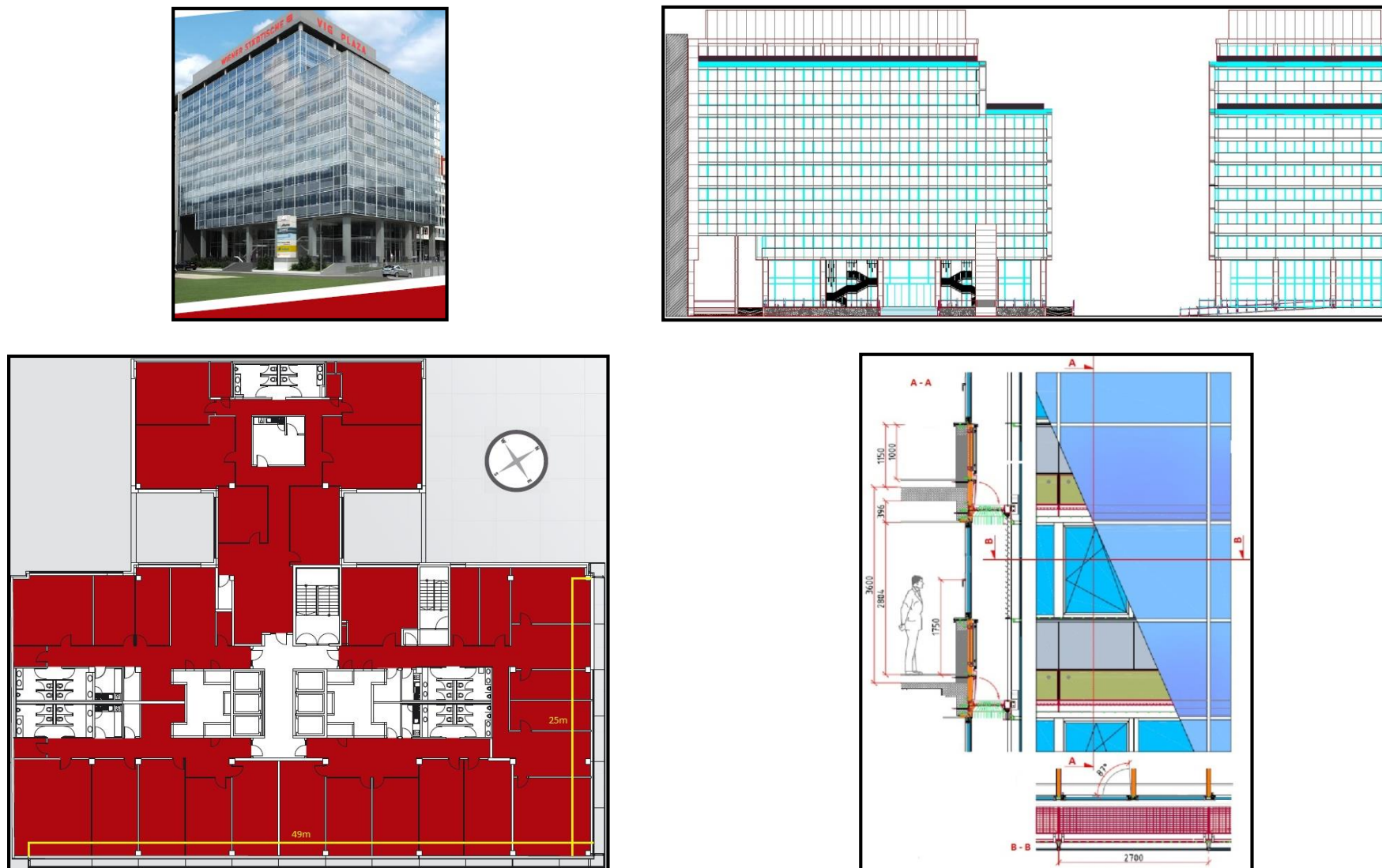
Poslovni objekat "VIG Plaza" nalazi se u Beogradu, a njegove geografske koordinate su 44,5° severne geografske širine, 20,3° istočne geografske dužine i vremenske zone +1h GMT. Na slici 2.8 je prikazan izgled objekta sa neophodnim dimenzijama, tipična osnova, poprečni presek i spoljašnji izgled dela fasade koji je urađen po principu DVF. Širina DVF (parapet osnovnog sloja fasade - spoljašnje staklo pridodatog sloja fasade) iznosi 0,63 m, dok je širina DVF (dvostruki prozor osnovnog sloja fasade - spoljašnje staklo pridodatog sloja fasade) 0,78 m. Širina rešetke je 0,34 m, a rastojanje od spoljašnjeg stakla pridodatog sloja fasade do ose venecijanera je 0,23 m. Otvori na rešetkama su kvadratnog oblika, dimenzija 0,02 x 0,02 m. Na ulazu u DVF (I sprat objekta) nalazi se zaštitna mreža koja štiti prostor fasade od ulaska insekata i nečistoća, čiji otvori su kružnog poprečnog preseka prečnika 0,001 m. Na vrhu fasade (VI sprat), na izlazu, nalaze se aluminijumske žaluzine.

Zgrada je završena i zvanično otvorena 2011. godine. Objekat ima oko 12.800 m² grejne (korisne) površine i oko 5.000 m² garažnog prostora (bruto površina 21.625 m²). U zgradi trenutno radi oko 600 ljudi, a prosečan dnevni broj posetilaca je oko 100. Jugo-istočna i severo-istočna fasada objekta su u potpunosti urađene po konceptu DVF, dok su preostale dve fasade konstruisane na tradicionalan način zbog okruženja zgrade. DVF je tipa višespratne kontinualne fasade, sa prirodnom ventilacijom međuprostora. U međuprostoru se nalaze venecijaneri, širine 0,1 m, za zaštitu objekta od sunčevog zračenja. Međuprostor ne poseduje regulacione klapne, tako da se ne može vršiti regulacija strujanja vazduha u zavisnosti od zahtevanog režima. Fasada se na jugo-istoku prostire od prvog do osmog, dok na severo-istoku zauzima prostor od prvog do šestog sprata. Na svim spratovima se nalaze metalne rešetke i protivpožarne klapne koje u svakom trenutku mogu, po potrebi, odvojiti pojedine delove fasade. Prvi (osnovni) deo fasade je urađen na principu tradicionalne fasade, sa parapetnim delom i dvostrukim prozorima. Prozori se mogu ručno otvarati u svakom trenutku i omogućiti prirodnu ventilaciju. Drugi (pridodati) deo fasade je jednostruko ojačano staklo. Sastav staklo paketa oba sloja fasade je sledeći:

1. pridodati (drugi) sloj fasade - Guardian jednostruko staklo izrađeno od dva termički obrađena (ESG-HST) stakla, ojačano sa PVB folijom: **Float Glass Extra Clear (6 mm) + PVB folija (0,76 mm) + Float Glass Extra Clear (6 mm)**;
2. osnovni (prvi sloj) fasade, unutrašnje staklo dvostrukog prozora - Guardian jednostruko ekstra providno staklo sa termoizolacijom : **Float Glass Extra Clear + Clima Guard Premium premaz (6 mm)**;
3. osnovni (prvi sloj) fasade, spoljašnje staklo dvostrukog prozora - Guardian jednostruko staklo izrađeno od dva providna stakla sa dodatkom folije za redukciju buke: **Float Glass Clear (4 mm) + PVB SR (0,5 mm) + Float Glass Clear (4 mm)**;

Karakteristike prvog i drugog sloja fasade date su tabelama 2.2, 2.3 i 2.4 i na slikama 2.9, 2.10, 2.11 i 2.12, koje predstavljaju spektralnu analizu urađenu u programu "Optics 6 - Lawrence Berkeley National Laboratory".

2. OPIS IZABRANOG OBJEKTA I POSTAVKA EKSPERIMENTA



Slika 2.8: Prikaz objekta "VIG Plaza" (izgled, orijentacija, fasada, tipična osnova i preseći fasade)

Tabela 2.2: Karakteristike staklo paketa prvog i drugog dela fasade

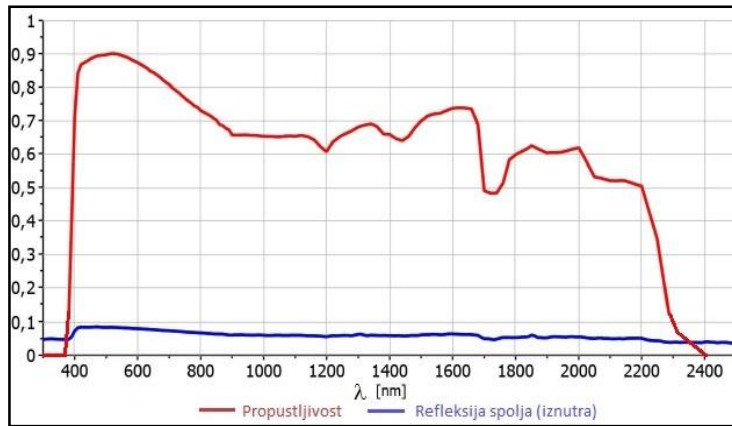
KARAKTERISTIKE		STAKLO PAKET DRUGOG DELA FASADE	STAKLO PRVOG DELA FASADE (dvostruki prozor) - SPOLJAŠNJE STAKLO	STAKLO PRVOG DELA FASADE (dvostruki prozor) - UNUTRAŠNJE STAKLO
Svedost (EN 410 - 2011)	τ_v - koeficijent propustljivosti (%)	88,7	87,5	89,5
	r_{vp} - koeficijent refleksije - prednji deo (%)	8,2	9,8	8,3
	r_{vz} - koeficijent refleksije - zadnji deo (%)	8,2	9,7	8,3
Sunčeva energija (EN 410 - 2011)	g_s (solarni faktor) - koeficijent ukupne propuštene sunčeve energije (%)	77,3	79,9	81
	SC (g/0,87) - koeficijent zasenčenja	0,89	0,92	0,93
	τ_s - koeficijent direktne sunčeve propustljivosti (%)	72,4	78	77,4
	τ_{uv} - koeficijent UV propustljivosti (%)	0,9	64,1	3,6
	a_s - koeficijent direktne apsorpcije (%)	20,6	12,2	15,2
	r_{sp} - koeficijent refleksije - prednji deo (%)	7	9,8	7,4
	r_{sz} - koeficijent refleksije - zadnji deo (%)	7	9,9	7,4
	λ (W/mK) - toplotna provodljivost	1	0,748	1
U (W/m ² K)(EN 673 - 2011) - koeficijent prolaza toplote	5,5	3,8	5,6	
R _w (dB) (EN 717 -1)- redukcija buke	35	31	33	

Tabela 2.3: Karakteristike dvostrukog prozora prvog sloja fasade

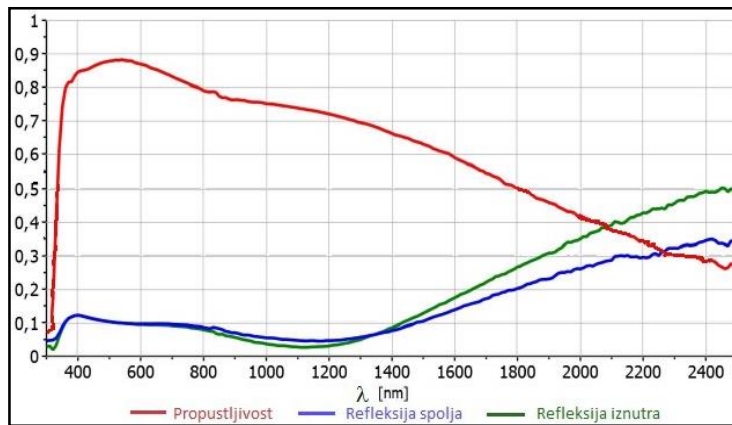
DVOSTRUKI PROZOR (6 mm providno staklo sa Cima Guard premijum folijom + 16 mm međuprostor (10% vazduh + 90% Ar) + 8,5 mm (4 + 0,5 + 4) jednostruko providno staklo sa PVB SR filmom za zaštitu od buke)		
Svetlost (EN 410 - 2011)	τ_v - koeficijent propustljivosti (%)	76,8
	r_{vp} - koeficijent refleksije - prednji deo (%)	11,9
	r_{vz} - koeficijent refleksije - zadnji deo (%)	11,4
Sunčeva energija (EN 410 - 2011)	g_s (solarni faktor) - koeficijent ukupne propuštene sunčeve energije (%)	55,6
	SC (g/0,87) - koeficijent zasenčenja	0,64
	τ_s - koeficijent direktne sunčeve propustljivosti (%)	47,4
	τ_{uv} - koeficijent UV propustljivosti (%)	2,3
	a_s - koeficijent direktne apsorpcije (%)	26,8
	r_{sp} - koeficijent refleksije - prednji deo (%)	25,8
	r_{sz} - koeficijent refleksije - zadnji deo (%)	20,3
	λ (W/mK) - toplotna provodljivost	1
	U (W/m ² K)(EN 673 - 2011) - koeficijent prolaza toplote	1,1
R_w (dB) (EN 717 -1)- redukcija buke	42	

Tabela 2.4: Karakteristike parapetnog dela prvog sloja fasade

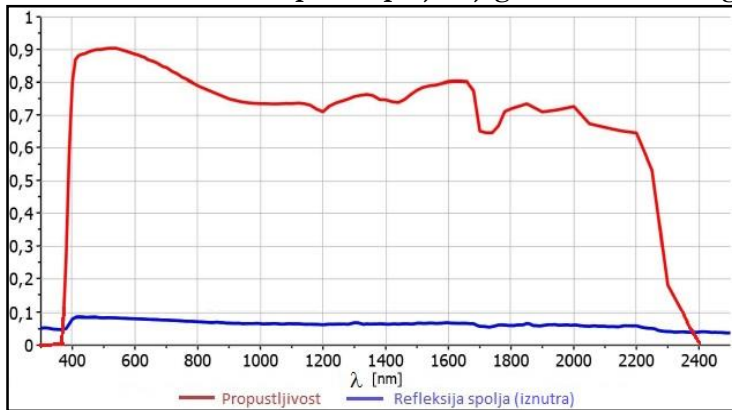
Naziv	d (cm)	ρ (kg/m ³)	c (J/kgK)	λ (W/mK)	d/ λ (m ² K/W)	Otpornost difuziji (-)	Emisivnost ϵ_s
1. Malter	2	1.700	1.050	0,85	0,02	15	-
2. Ytong blok	20	550	1.050	0,155	1,33	3	-
3. Lim - Al	0,08	2.700	940	203	0,000004	800.000	0,3
4. Min. vuna	8	120	840	0,041	1,95	3	-
5. Vazduh	10	1.000	-	-	0,15	1	-
6. Lim -Al	0,08	2.700	940	203	0,000004	800.000	0,3
U=0,28 W/m²K							



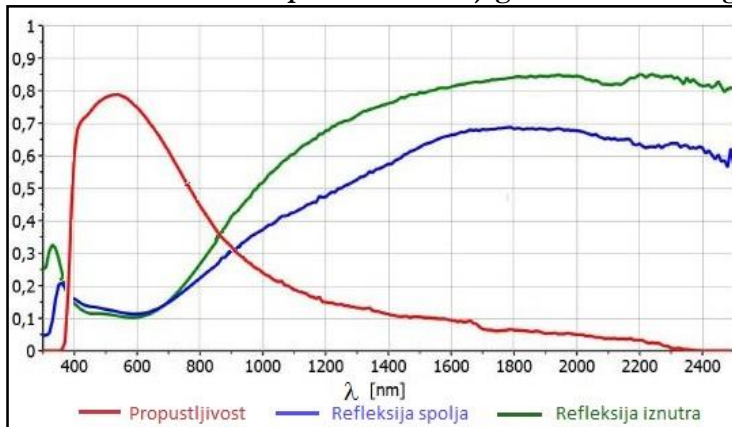
Slika 2.9: Spektralna analiza za staklo paket drugog sloja fasade (6 mm+0,76 mm PVB+6 mm)



Slika 2.10: Spektralna analiza za staklo paket spoljašnjeg stakla dvostrukog prozora (6 mm)



Slika 2.11: Spektralna analiza za staklo paket unutrašnjeg stakla dvostrukog prozora (8,5 mm)



Slika 2.12: Spektralna analiza za dvostruki prozor (6 mm+16 mm+8,5 mm)

2. OPIS IZABRANOG OBJEKTA I POSTAVKA EKSPERIMENTA

U tabeli 2.5 date su proizvođačke karakteristike ugrađenih aluminijumskih venecijanera ("Hunter Douglas 7040 silver cloud") i oni prekrivaju celokupnu površinu prozora prvog sloja fasade.

Tabela 2.5: Proizvođačke karakteristike ugrađenih venecijanera

Venecijaneri "Hunter Douglas 7040 silver cloud"	
Širina venecijanera	100 mm
Debljina venecijanera	0,4 mm
Vertikalni razmak između krilaca venecijanera	5 mm
Boja	"Silver Cloud 7040"
Perforacija	1x4 mm sa delom površine u sredini širine 14 mm bez perforacije
r_s - koeficijent refleksije (prednji i zadnji deo)	0,486/0,486
a_s - koeficijent apsorpcije	0,514
τ_v - koeficijent propustljivosti vidljivog spektra	0,488
a_v - koeficijent apsorpcije vidljivog spektra	0,512

Merenjem su utvrđene sledeće vrednosti solarnog faktora g , za kombinaciju venecijanera (različiti uglovi) i stakla, tabela 2.6:

Tabela 2.6: Vrednosti koeficijenta ukupne solarne propustljivosti dobijene merenjem

U_{gao}	g
45°	0,18
64°	0,06
72°	0,04

2.2.1 OPIS SISTEMA ZA GREJANJE I KLIMATIZACIJU²

Sistemi za grejanje i klimatizaciju u objektu, projektovani su prema sledećim projektnim uslovima (spoljne i unutrašnje projektne temperature su usvojene prema JUS U.J5.600 za drugu klimatsku zonu, a proračun toplotnih gubitaka urađen je prema EN 12831.):

- spoljašnja projektna temperatura zimi: -18°C $\varphi = 85\%$;
- srednje teška masa zgrade;
- visok stepen zasenčenja:
 - dve glavne fasade (JI i SI) su dvostruke, prirodno ventilisane, sa spoljnim motornim venecijanerima kontrolisanim preko BMS;
 - ostale fasade sa dvostrukim (krilo na krilo) prozorima, sa unutrašnjim motornim venecijanerima;
 - spoljašnji stakleni zidovi prizemlja i galerije zastakljeni nisko-emisionim reflektujućim staklom, sa ukupnim koeficijentom propustljivosti manjim od 0,25;
- dužina prekida u grejanju: 8h;
- smanjenje temperature po završenom prekidu u grejanju: 2°C;
- vreme uzgrevanja: 2h;

² Korišćena je projektna dokumentacija objekta VIG PLAZA

Za zimski režim usvojene su sledeće unutrašnje projektne temperature, tabela 2.7:

Tabela 2.7: Unutrašnje projektne temperature u zimskom režimu

Namena prostora	Sprat	Tu (°C)	Sistem grejanja
Kancelarije i javni prostori	Prizemlje	21	Ventilator-konvektori
Kancelarije bez parapeta	Spratovi	21	Niski čelični radijatori iznad poda
Kancelarije	Spratovi	21	Čelični panelni radijatori
Toaleti		20	Čelični panelni radijatori
Tehničke prostorije	Suteren	15	Negrejano ili čelični panelni radijatori
Tehničke prostorije	VIII i X sprat	15	Čelični panelni radijatori
Hodnici i unutrašnje prostorije	Spratovi	20	Negrejane prostorije
Stepeništa	Nadzemna	15	Čelični panelni radijatori
Stepeništa	Podzemna	15	Čelični panelni radijatori

Toplotna energija distribuirana se iz dve mašinske sale i obe se nalaze u sutereu:

- TR1 – primarna toplotna podstanica, sistem za održanje pritiska i glavne pumpe grejanja;
- TR2 – glavni razdelnik tople vode za klima komore i radijatorsko grejanje, toplotna pumpa za korišćenje geotermalne energije, hemijska priprema vode za dopunu sistema, sistem za dopunu rashladne instalacije glikolom i ventilaciona komora.

Zbirna povratna voda se prvo predgreva toplotnom pumpom na 48°C, mešanjem u akumulacionom rezervoaru zapremine 2.500 l, a onda se dogreva u primarnoj podstanici na projektovanih 70°C. Polazna temperatura vode u projektim uslovima je 70°C i menja se u funkciji spoljašnje temperature.

Toplovodni grejači klima komora su projektovani u sledećem režimu:

- radni medijum: voda;
- polazna temperatura vode: 70°C, zajednička za sve sisteme tople vode;
- povratna temperatura vode: 40°C, maksimalna povratna temperatura u projektim uslovima.

Toplovodno grejanje se vrši u sledećem projektom režimu:

- radni medijum: voda;
- polazna temperatura vode: 70°C, zajednička za sve sisteme tople vode;
- povratna temperatura vode: 45°C, regulacija snage preko održavanja povratne temperature.

Za grejanje svih prostorija osim fasadnih zona prizemlja i galerije, predviđen je sistem radijatorskog/konvektorskog grejanja. Na delovima fasade bez parapeta, u prizemlju postavljeni su podni konvektori sa prinudnom konvekcijom, a po spratovima gde su parapeti 30 cm, niski radijatori. Kompletan sistem toplovodnog grejanja je dvocevni, sa promenljivim protokom.

Standardna temperatura svih prostorija je 21°C u radno vreme, 19°C noću i do 17°C praznicima (i vikendom). Mogućnost korisnika je da te temperature menja +/-4°C, s tim da se vrši "reset" lokalnih kontrolera sa BMS-a po zonama i u funkciji definisanog radnog vremena.

2. OPIS IZABRANOG OBJEKTA I POSTAVKA EKSPERIMENTA

Što se tiče letnjeg režima, odnosno za klimatizaciju objekta, predviđene su četiri vazduhom hlađene rashladne mašine, od kojih jedna ima "free-cooling" opciju.

Kao peta rashladna mašina se koristi toplotna pumpa voda-voda, za korišćenje geotermalne energije. Polazni podaci koji su korišćeni za letnji režim su:

- spoljašnja projektna temperatura leti: $+36^{\circ}\text{C}$ $\varphi = 35\%$;
- srednje teška masa zgrade, tamna fasada;
- visok stepen zasenčenja:
 - dve glavne fasade (JI i SI) su dvostruke, prirodno ventilisane, sa spoljnim motornim venecijanerima kontrolisanim preko BMS;
 - ostale fasade sa dvostrukim (krilo na krilo) prozorima, sa unutrašnjim motornim venecijanerima;
 - spoljašnji stakleni zidovi prizemlja i galerije zastakljeni nisko-emisionim reflektujućim staklom, sa ukupnim koeficijentom propustljivosti manjim od 0,25.
- unutrašnje toplotno opterećenje fiksno 50 W/m^2 za male (do 30 m^2) i 44 W/m^2 za velike kancelarije;
- toplotno opterećenje server sobe je 3 kW ;
- toplotno opterećenje centralne server sale na II spratu je 20 kW .

Za letnji režim usvojene su sledeće unutrašnje projektne temperature, tabela 2.8:

Tabela 2.8: Unutrašnje projektne temperature u zimskom režimu

Namena prostora	Sprat	Tu ($^{\circ}\text{C}$)	Sistem grejanja
Kancelarije i javni prostori	Prizemlje	26	Ventilator-konvektori u spušenom plafonu i rashladni plafonski paneli
Sale za sastanke	Spratovi	26	Rashladni plafonski paneli
Kancelarije	Spratovi	26	Rashladni plafonski paneli
Server sobe	Spratovi	22	Ventilator-konvektori
Tehničke prostorije		-	Nehlađene prostorije
Hodnici i unutrašnje prostorije	Spratovi	-	Nehlađene prostorije

Rashladna energija distribuirana se iz centrale na X spratu do potrošača, i to sa:

- ventilator-konvektorima i
- rashladnim gredama.

Temperaturski režim primarnog glikolnog kruga rashladnih mašina je $3/8^{\circ}\text{C}$. Režim sekundarnog kruga hladne vode je $7/13^{\circ}\text{C}$. Polazna temperatura vodi se promenom broja obrtaja cirkulacione pumpe sekundarnog kruga. Ukupan broj mašina u pogonu se određuje u funkciji zbirne povratne temperature hladne vode, koja odlazi u hidrauličku skretnicu.

Rashladne grede ("Child Beam - CB") projektovane su u sledećem režimu:

2. OPIS IZABRANOG OBJEKTA I POSTAVKA EKSPERIMENTA

- radni medijum: voda;
- polazna temperatura: 15°C;
- povratna temperatura: 17,5°C;
- toplotni konzum: 365 kW.

To su indukcioni aparati preko kojih se u prostorije ubacuje potrebna količina svežeg vazduha, primarno ohlađenog na 14°C, kojim se indukuje cirkulacija sobnog vazduha u potrebnoj meri. Sobni vazduh se hladi delom hladnim primarnim vazduhom, a delom rashladnom vodom ulazne temperature 15°C. Ventilator konvektori rade u režimu 7/13°C. Kod server soba, sigurnosti radi, kao rezerva koriste se klima uređaji sa direktnom ekspanzijom.

Standardna temperatura svih prostorija je 26°C u radno vreme, sa mogućnošću akumulacionog pothlađivanja noću do 22°C i porastom temperature do 28°C praznicima (i vikendom). Mogućnost korisnika je da te temperature menja +/-4°C, s tim da se vrši "reset" lokalnih kontrolera sa BMS-a po zonama i u funkciji definisanog radnog vremena.

Objekat poseduje toplotnu pumpu koja koristi bunarsku vodu kao izvor energije. Za korišćenje obnovljivih izvora energije, izbušen je bunar u neposrednoj blizini objekta, konstantne izdašnosti 6 l/s čiste vode, sa male dubine (15-30 m), prosečne godišnje temperature od 15,5°C sa odstupanjem od ±1°C.

Cirkulacija tople vode se vrši pumpom u krugu kondenzatora, akumulacionog rezervoara zapremine 2.500 l i u povratu kroz razmenjivač, preko koga se vrši hlađenje grejanjem bunarske vode. Cirkulacija hladne vode se vrši pumpom u krugu isparivača, kroz razmenjivač preko koga se vrši hlađenje bunarske vode (akumulacioni rezervoar je zapremine 2.000 l). Meri se polazna i povratna temperatura vode na isparivaču i kondenzatoru, povratna temperatura vode na ulazu u rezervoar, na oba kraja oba razmenjivača toplote, kao i diferencijalni pritisci pumpi i filtera. Toplotna pumpa ima dva režima rada u zavisnosti koja je potrošnja dominantna – zimski i letnji.

U zimskom periodu snaga grejanja je 275 kW u temperaturskom režimu 42/48°C, hlađenjem bunarske vode (računski gledano sa 15°C na 7°C) u režimu hladne vode 10/5°C. Ako se deo rashladne snage koristi u objektu (server sobe i sl.) smanjuje se hlađenje bunarske vode.

U letnjem periodu snaga hlađenja je 265 kW u temperaturskom režimu 13/7°C, grejanjem bunarske vode (računski gledano sa 16°C na 30°C) u režimu tople vode 22/35°C.

Zimski režim rada je dominantan i letnji se koristi samo kada se nikako ne očekuje potreba za grejanjem i to, ako iz bilo kog razloga vazduhom hlađenje mašine ne mogu da postignu potreban kapacitet.

Ako su istovremene potrebe objekta za grejanjem i hlađenjem iste ili veće od raspoloživih snaga, toplotna pumpa radi samo interno u kućnoj instalaciji. Kada god se pojavi višak jednog od datih kapaciteta, on se prenosi na bunarsku vodu, s tim da se ne dozvoljava istovremeno hlađenje i grejanje bunarske vode kontrolom položaja regulacionih ventila.

U prelaznom periodu, kada su grejne i rashladne potrebe manje od 25% kapaciteta toplotne pumpe, sistem staje sa radom.

Prema uslovima za korišćenje podzemnih voda na predmetnoj lokaciji, otpadna bunarska voda se prosipa u kanalizaciju, s obzirom da je nadoknadiva iz sistema površinskih voda.

2. OPIS IZABRANOG OBJEKTA I POSTAVKA EKSPERIMENTA

U sistemu toplovodnog grejanja, toplotna pumpa predgreva povratnu vodu iz svih sistema, pre ulaska u razmenjivač toplotne podstanice sistema daljinskog grejanja. Iz tog razloga je neophodno održavati povratnu temperaturu vode u intervalu od 40°C do maksimalno 45°C. U slučaju viših povratnih temperatura, ne može se koristiti toplotna pumpa.

U rashladnom sistemu, toplotna pumpa je povezana paralelno sa vazduhom hlađenim rashladnim agregatima i učestvuje ravnopravno u proizvodnji hladne vode režima 7/13°C.

Snage toplovodnog priključka i glavnih rashladnih agregata definisane su kao da toplotne pumpe nema. Toplotna pumpa se tretira kao rezervni pogon, iako radi i obezbeđuje veći deo potrebne toplote u toku cele godine.

Za slučaj da se obezbedi veća izdašnost bunara (drugog u neposrednoj blizini), predviđeno je mesto za ugradnju još jedne toplotne pumpe istih karakteristika.

Što se tiče ventilacije, svi kancelarijski prostori se ventiliraju prinudnim putem primarnim vazduhom, koji pored osnovne namene služi i kao pogonski medijum za indukcione rashladne grede. Za pripremu primarnog ventilacionog vazduha se koriste 3 centralna ventilaciona sistema. Potrebna ventilacija hodnika i pomoćnih prostorija (server sobe i ostave) se ostvaruje odsisavanjem, sa prestrujavanjem iz kancelarijskog prostora.

U sadašnjoj eksploataciji objekta, prema rečima ljudi i tehničke službe, u toku zimskog režima zahtevana unutrašnja temperatura u kancelarijama je oko 24°C, a u letnjem oko 23°C. Jedino u toku prve godine eksploatacije objekta unutrašnja temperatura je bila limitirana na maksimalnih 21 °C. Nakon toga, usled žalbi korisnika, ta granica je pomerena na 24°C. Usled ovih promena, dešava se da se u određenom broju dana u toku zime (topliji dani), pojavljuju zahtevi za pothlađivanjem vazduha, što negativno utiče na potrošnju energije. Slično se događa i za letnji režim, gde je granica snižena na 21°C. Merenjem će biti utvrđenje tačne vrednosti unutrašnjih temperatura i relativne vlažnosti vazduha za sve režime.

2.3 POSTAVKA EKSPERIMENTA

U cilju eksperimentalne analize termičkog ponašanja DVF, merna oprema je postavljena na prethodno opisan objekat. Dva su ključna razloga ovakvom pristupu problemu, a prvi je da se u realnim vremenskim uslovima sva tri režima (letnji, zimski i prelazni) utvrde i ocene termičke karakteristike DVF. Takođe, potrebno je i kvantitativno odrediti promenu entalpije koja nastaje usled strujanja vazduha u međuprostoru fasade, količinu apsorbovane energije i toplotni potencijal prirodne ventilacije, koji se ostvaruje zbog prisustva DVF. Drugi razlog je prikupljanje podataka neophodnih za fino poešavanje numeričkog modela, bez kojih predviđanje energetskih potreba objekta kao i sugerisane kontrolne operativne strategije ne bi imale odgovarajuću pouzdanost.

2.3.1 PROCEDURA MERENJA

Odgovarajuća procedura merenja mora biti razvijena (osmišljena) pre postavljanja bilo kog mernog uređaja, kako bi se omogućio kredibilitet informacija koje će instrumenti prikupiti. Procedura treba da sadrži:

- naziv mernog mesta;
- tip merenja;
- opis mernog instrumenta;
- način (metod) postavljanja;
- mesto (lokaciju) postavljanja sa opisom pogodnih radnih uslova;
- očekivani opseg vrednosti sa očekivanom nepouzdanošću;
- metodu kalibracije (baždarenja) sa odgovarajućom preciznošću;
- način verifikacije sistema merenja i validacije dobijenih podataka sa odgovarajućim preciznostima;
- informacije koje će biti prikupljane, npr. specifikacije, datum instaliranja, podaci o baždarenju i održavanju...;
- minimalni nivo performansi – koliko netačnih i nepotpunih podataka će biti tolerisano pre kalibracije ili zamene uređaja;
- period ponovnog baždarenja;
- alternativne metode merenja u slučaju kvara ili otkaza uređaja;
- dostupne metode za smanjenje greške u merenju.

2.3.2 TEHNIKE MERENJA

Tehnika merenja zavisi od specifičnih zahteva primenjenog sistema merenja. Ti zahtevi se odnose na:

- raspoloživi budžet za merenja;
- ograničenja nepouzdanosti izmerenih vrednosti;
- vremena za koje je potrebno merenje realizovati.

Vreme potrebno za dobijanje podataka merenjem može biti iz jedne od tri sledeće kategorije:

1. trenutno merenje ("spot measurement");
2. kratkotrajno merenje;
3. dugotrajno merenje.

Trenutna merenja se najčešće izvode ručnim mernim uređajima, u kratkom vremenskom intervalu. Taj interval je kraći od 1h po mernom mestu ili trajanju uslova. Ovaj metod se uglavnom koristi za određivanje trenutnih uslova ili za verifikaciju drugih izmerenih podataka. Najčešće korišćeni instrumenti za ovu vrstu merenja su: amper-klešta, ručni termometri, mobilni merači protoka i/ili energije.

Kratkotrajna merenja se izvode sa privremeno instaliranom mernom opremom u kraćem vremenskom intervalu (od jednog dana do 6 meseci). Kod ovakvih merenja postoji mogućnost da ugrađena merna oprema može uticati na uobičajen način rada sistema u koji se ugrađuje. Tipični uređaji za ovakav način primene su razne vrste "logera" sa internom memorijom i odgovarajućim brojem kanala za prijem signala sa mernih instrumenata.

Dugotrajna merenja (duže od 6 meseci) podrazumevaju da je merna oprema stalno ugrađena u sistem koji se prati, čime su ispoštovani sigurnosni zahtevi i obezbeđena pouzdanost dobijenih podataka. Za ovakva merenja potrebno je predvideti i udaljeni pristup podacima.

2.3.3 MERENJE FIZIČKIH VELIČINA

Merenja na objektu najčešće podrazumevaju praćenje različitih fizičkih veličina i karakteristika ugrađene opreme. Izbor prijemnika signala (senzora) zavisi od kvaliteta (tačnost, preciznost, brzina odziva, opseg, izlaz...), broja, ograničenja ugradnje i potrebne merne metode. Lista potencijalnih mernih instrumenata prema ASHRAE Guideline 14-2002 data je u tabeli 2.9.

Tabela 2.9: Lista mernih uređaja prema ASHRAE Guideline 14-2002

Temperatura	Psihrometrijska svojstva	Protok vazduha
Termometri Termoparovi Otpornički temperaturski senzori Termistori Infracrveni temperaturski senzori Termobaterija	Tačka rose/mraz Psihrometar Tankofilmni polimer Dielektrični kristal Ohlađeno ogledalo	Pitoova cev Anemometar sa užarenom žicom Rotirajući uređaji Mlaznice
Protok tečnosti	Pritisak vazduha	Hidraulični pritisak
Venturi Blenda Mlaznice Turbinski merači Vrtložni merači Magnetni merači Ultrazvučni merači Koriolisovi merači	Manometar Senzor pritiska Transmitter pritiska	Manometar Transmitter pritiska
Električna snaga (energija)	Električna struja	Električni napon
Brojila električne energije Vatmetri	Ampermetri Transformatori struje	Voltmetri Multimetri

Merenje temperature pomoću AMAS (automatsko-merno-akvizicijskog-sistema) danas je postala opšte prihvaćena tehnika merenja. Prema ASHRAE Guideline 14-2002, četiri najčešće korišćene metode merenja temperature koje se primenjuju u oblasti zgradarstva i KGH tehnike su:

- elektrootporni termometri - merenje temperatura putem detekcije promene otpora;
- termoelementi (termoparovi) - merenje temperatura putem termo-električnih senzora;
- elektrootporni poluprovodnički termometri - merenje temperatura putem poluprovodnika (termistora);
- termobaterija - merenje temperatura putem integrisanog kruga termoprijemnika (vrši se osrednjavanje temperature, sa svih tačkastih termoprijemnika u krugu).

Tačnost merenja zavisi od sledećih faktora:

- izbranog tipa mernog uređaja;
- izabrane metode merenja i organizacije merenja;
- opsega temperature koja se meri;

2. OPIS IZABRANOG OBJEKTA I POSTAVKA EKSPERIMENTA

- nivoa poremećaja na mernom mestu (vibracije, prisustvo električnog i magnetnog polja, prašina, vlaga, toplota na uređaju ili vodovima...);
- greške koje mogu nastati zbog uticaja zračenja, provođenja toplote telom termoprijemnika i dopunskog zagrevanja senzora usled brzine strujanja vazduha;
- udaljenosti senzora i uređaja za "logovanje", kao i tehnike kondicioniranja mernog signala.

Merenje temperature tehnikom termopara, predstavlja jednu od najzastupljenijih metoda. Kod primene ovog načina merenja, jačina napona zavisi od tipa materijala od kojeg je sačinjen termopar i temperaturske razlike. Dakle, za izradu termoelemenata najbitnija su termoelektrična svojstva materijala. Termoelementi se označavaju prema ANSI (American National Standards Institute) standardu. Za svaki tip propisani su: dozvoljeno temperatursko područje, radno okruženje, maksimalna temperatura pri kratkotrajnom zagrevanju itd. Prvoimenovani metal (legura) predstavlja pozitivni, a drugoimenovani, negativni priključak. Termoelementi od tanje žice osetljiviji su na difuziju, nečistoće, koroziju i nehomogenost od termoelemenata napravljenih od deblje žice. Zbog cene, termoelementi od plemenitih metala prave se od tanje žice.

Svi termoelementi prave se na isti način: dve žice od termoelektričnog materijala spoje se na toplom kraju i zaštite se keramičkim izolacionim materijalom i metalnim oklopom. Postoji više različitih tehnika spajanja žica:

- žice se zavare topljenjem, tako da se na vrhu spoja formira kuglica;
- žice se zaleme pomoću metala sa nižom tačkom topljenja;
- žice se potope u živu ili u rastopljeni metal;
- žice se zaleme za čvrsti metal;
- žice se pričvrste stezaljkom i trakom.

Upotreba termopar tehnologije je ekonomična i zadovoljavajuće tačna. Osnovni nedostaci su upotreba pojačala zbog slabog izlaznog signala (osetljivi na električni šum) i osetljivost na poremećaje i vibracije na mernom mestu (hemijsko i mehaničko delovanje radne sredine). To dovodi do situacije, da kada se jednom termopar upotrebi, on više neće biti isti i mora se ponovo kalibrisati za svako novo merenje.

Kada su u pitanju merenja temperature površina čvrstih tela, pažnju treba obratiti na greške koje mogu nastati usled narušavanja stvarnog temperaturskog polja tela, zbog provođenja toplote i nedovoljnog kontakta senzora sa površinom tela. Takođe, treba imati u vidu da temperatura sredine u blizini same površine znatno odstupa od temperature površine. U skladu sa tim, prvi uslov tačnog merenja je obezbeđivanje dobrog kontakta senzora sa površinom. Pored dobrog kontakta, treba obratiti pažnju i na kvalitet provođenja toplote sa površine tela na prijemnik. Iz tog razloga se provodnici privaruju na tanku pločicu debljine 1-2 mm, izrađenu od materijala sa visokom vrednošću toplotne provodljivosti (srebro, bakar). Time je provođenje toplote poboljšano i smanjena deformacija temperaturskog polja, od slučaja kada su provodnici zavareni međusobno i normalno postavljeni na površinu.

Što se tiče merenja brzine vazduha, izbor senzora zavisi od toga kakav protok merimo, koje su vrednosti i koji je nivo tačnosti željenog merenja. Pojedini senzori mogu da detektuju smer kretanja vazduha i koriste se u slučajevima kada se na mernom mestu mogu pojaviti nepredvidiva strujanja. Najčešće korišćeni tipovi senzora su: Pitoova cev, turbinski merači i senzori sa užarenom žicom. Kada se mere male brzine strujanja vazduha (prirodna ventilacija) i kada se zahteva visoka tačnost, upotrebljavaju se senzori sa užarenom žicom. Ovaj senzor predstavlja tanku žicu pričvršćenu za nosač, koja se greje električnom strujom. Ukoliko je napon konstantan,

2. OPIS IZABRANOG OBJEKTA I POSTAVKA EKSPERIMENTA

žica će menjati otpor u zavisnosti od intenziteta njenog hlađenja, a intenzitet hlađenja je direktno proporcionalan brzini strujanja vazduha. U slučaju da je napon promenljiv, konstantna temperatura žice se može održavati pomoću promenljivog otpornika.

Merenje meteoroloških parametara je od izuzetne važnosti prilikom detaljnog energetskog modeliranja objekta. Realni klimatski podaci se koriste, kako bi model bio "izložen" istim uslovima u kojima je bila izložena i sama zgrada. Potrebno je koristiti klimatske podatke iz istog perioda iz koga se koriste i podaci o merenom parametru. U idealnom slučaju, klimatski parametri bi trebalo da budu mereni na samoj lokaciji zgrade (posebni senzori za svaki klimatski parametar ili automatska meteorološka stanica). Činjenica je da vrlo mali broj zgrada u Srbiji ima lokalnu meteorološku stanicu, pa je uobičajena praksa da se koriste podaci zvanične službe hidrometeorološkog zavoda. Pri tome, mora se obratiti pažnja da meteorološka stanica nije udaljena više od 10 km, da ne postoji značajna razlika u nadmorskoj visini lokacije posmatrane zgrade i lokacije lokalne meteorološke stanice, i da se klimatski podaci zapisuju u bazu podataka na časovnom nivou ili češće.

Bez obzira na izvor dobijanja klimatskih podataka, potrebni su sledeći podaci:

- temperatura po suvom termometru, sa zahtevanom tačnošću od $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$;
- relativna vlažnost vazduha sa zahtevanom tačnošću od $\pm 2,5\%$;
- brzina vetra sa zahtevanim tačnostima od:
 - $\pm 3\%$ za brzine u granicama 10 – 50 m/s;
 - $\pm 3,5\%$ za brzine veće od 50 m/s;
- pravac vetra sa zahtevanom tačnošću od $\pm 5^{\circ}$;
- ukupno (globalno) sunčevo zračenje sa zahtevanom tačnošću od $\pm 5\%$;
- atmosferski pritisak sa zahtevanom tačnošću od $\pm 2,5\%$.

Postoje i drugi parametri koji se mogu meriti, kao što su:

- merenje padavina i oblačnosti;
- prisustvo i debljina snežnog pokrivača;
- difuzno sunčevo zračenje;
- direktno sunčevo zračenje.

U sklopu sistema automatske regulacije i operativnih strategija svih "inteligentnih" objekata, nalaze se senzori pomoću kojih se mere trenutni klimatski parametri. Broj i vrsta tih senzora u najvećoj meri zavise od instaliranog KGH sistema, kao i od složenosti samog sistema upravljanja. Senzori temperature spoljašnjeg vazduha su neizostavni deo bilo kog sistema automatske regulacije, dok se senzori relativne vlage spoljašnjeg vazduha uglavnom koriste za upravljanje vazdušnim sistemima KGH. Merenja brzine i pravca vetra se mogu naći kod naprednijih sistema automatske regulacije zbog potencijalnog korišćenja prirodne ventilacije, kao i zbog zaštite od jakih vetrova. Merenju sunčevog zračenja mora se pridati velika pažnja zbog njegovog dominantnog uticaja na energetski bilans objekta. Najčešće se meri intenzitet ukupnog zračenja na horizontalnu površinu, pa se kasnije teorijski potvrđenim modelima izračunavanju vrednosti direktnog i difuznog zračenja, kao i vrednosti intenziteta zračenja na vertikalnu površinu. Mogu se koristiti i podaci o intenzitetu zračenja dobijeni iz lokalne meteorološke stanice hidrometeorološkog zavoda, pod pretpostavkom da su ispunjeni uslovi definisani na početku ovog poglavlja. U suprotnom, potrebno je realizovati merenja intenziteta zračenja na samom objektu.

2.4 IZBOR MERNIH MESTA I PARAMETARA KOJI SE MERE

Izabrano mesto za postavku merne opreme je severo-istočna fasada objekta. Razlog je njena kompaktnost i nezavisnost u odnosu na jugo-istočnu fasadu. Ona uključuje šest spratova sa otvorima na prvom (ulaz vazduha u DVF) i na šestom (izlaz vazduha iz DVF). Ideja je da se višespratna fasada podeli na tri dela, tri merna mesta, kako bi imali kompletnu sliku o ponašanju fasade pri realnim meteorološkim uslovima letnjeg, zimskog i prelaznog režima. Merna oprema je postavljena na prvom, četvrtom i šestom spratu (Slika 2.13). Parametri koji se prate na svim mernim mestima su:

1. temperatura prostorije ($^{\circ}\text{C}$);
2. temperatura površine parapetnog dela prvog sloja fasade ($^{\circ}\text{C}$);
3. temperatura površine spoljašnjeg stakla dvostrukog prozora prvog sloja fasade ($^{\circ}\text{C}$);
4. temperatura vazduha u međuprostoru fasade, dve pozicije po širini fasade ($^{\circ}\text{C}$);
5. temperatura unutrašnje površine drugog sloja fasade ($^{\circ}\text{C}$);
6. brzina strujanja vazduha (m/s);
7. relativna vlažnost vazduha u prostoriji i međuprostoru fasade (%).

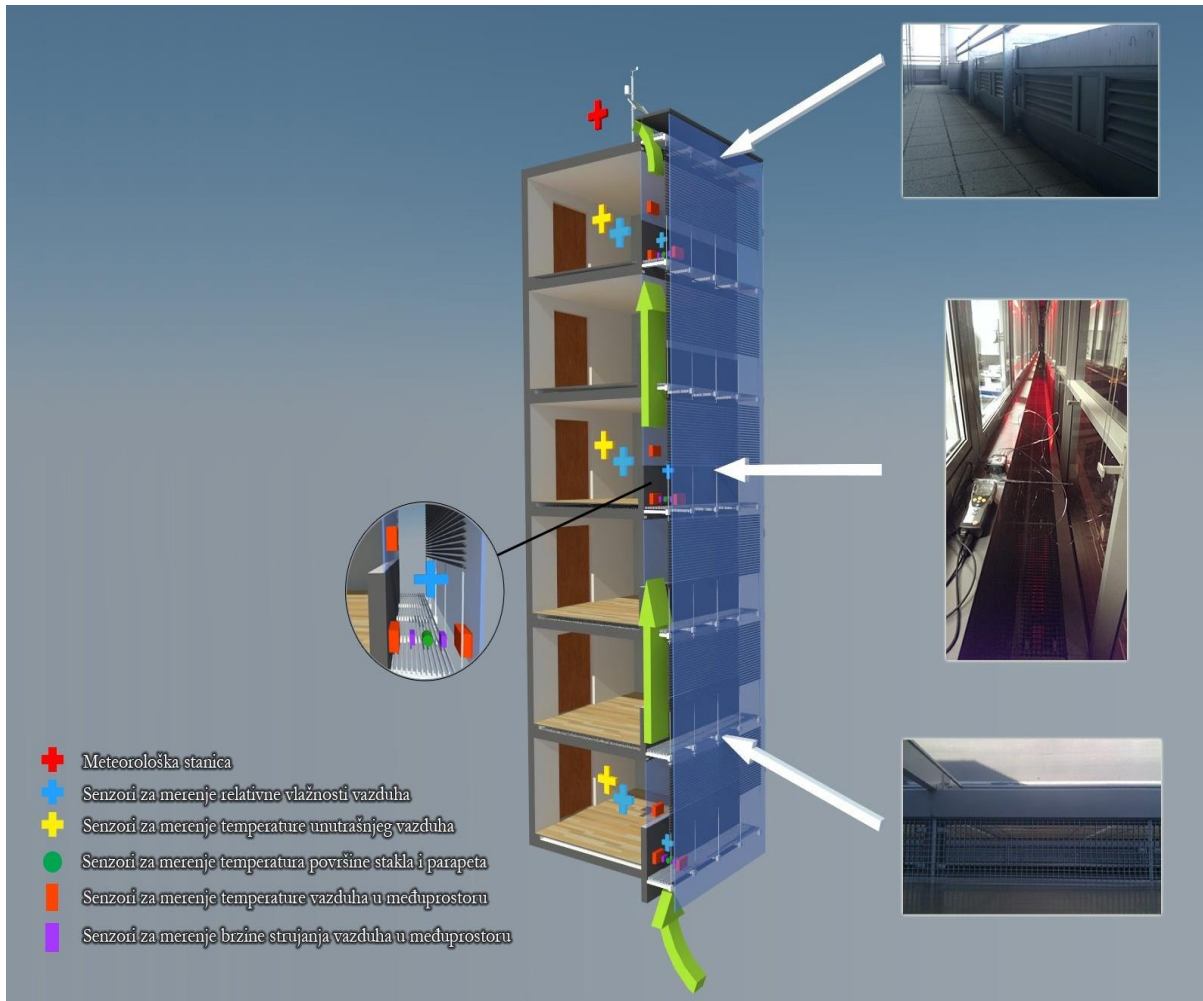
Usled otežanog pristupa, neće se meriti temperatura spoljašnje površine drugog sloja fasade. Izabrani parametri u potpunosti mogu da odrede termičko ponašanje DVF. Njihove vrednosti najviše zavise od trenutnih meteoroloških uslova koji vladaju na objektu. Iz tog razloga, kako bi utvrdili međusobnu zavisnost, meriće se svi potrebni meteorološki parametri na objektu. To su:

1. temperatura vazduha ($^{\circ}\text{C}$);
2. relativna vlažnost vazduha (%);
3. atmosferski pritisak (Pa);
4. brzina vetra (m/s);
5. smer strujanja vetra ($^{\circ}$);
6. prosečno globalno sunčevo zračenje (W/m^2);
7. maksimalno globalno sunčevo zračenje u posmatranom satu (W/m^2).

Meteorološka stanica sa svim svojim pripadajućim sensorima je postavljena na vrhu objekta. Svi termoparovi koji mere temperature staklenih površina su zaštićeni aluminijumskom folijom, kako bi se sprečio uticaj direktnog sunčevog zračenja. Termoparovi koji mere temperaturu površine stakla i parapeta, pričvršćeni su na podlogu sa specijalnom super provodnom silikonskom masom. Svi senzori, pre postavljanja na objekat, su provereni i kalibrisani po standardnoj proceduri.

U toku zimskog režima obaviće se snimanje celokupne fasade putem termovizijske kamere, kako bi se utvrdile kritične tačke (ako postoje) na DVF i ostalim delovima omotača objekta. Analizom dobijenih snimaka, sa aspekta gubitaka toplote, upoređiće se delovi fasade sa jednostrukom "zid zavesom" sa delovima omotača objekta sa DVF. Takođe, ovim merenjem moguće je odrediti i promenu temperature dela omotača objekta sa DVF po visini i širini, odnosno da li se trend temperature po površini ovog omotača u značajnoj meri menja.

2. OPIS IZABRANOG OBJEKTA I POSTAVKA EKSPERIMENTA



Slika 2.13: Postavka eksperimenta i merne opreme

Pored utvrđivanja međusobne zavisnosti sa izbranim parametrima DVF, meteorološki uslovi su takođe važni za formiranje meteorološke datoteke, koja se koristi prilikom finog podešavanja i simulacije numeričkog modela objekta. Ovi podaci će biti pripremljeni i upisani u klimatsku datoteku "EnergyPlus Weather File (CSV Comma File)" kao što je prikazano na slici 2.14.

1	Location Title	Latitude [N+/-S]	Longitude [E+/-W]	TimeZone [+/- GMT]	Elevation [m]																	
2	LOCATION BELGRADE SERBIA	44.82	20.28	1	99																	
3	Date	MM-MM	DataSource	DryBulb [C]	DewPoint [C]	RelHum [%]	Ateos Pressure [Pa]	ExtHorzRad [Wh/m2]	ExtDirRad [Wh/m2]	HorzIRsky [Wh/m2]	GloHorzRad [Wh/m2]	DirNormRad [Wh/m2]	DIHorzRad [Wh/m2]	GloHorzIllum [lux]	DirNormIllum [lux]	DIHorzIllum [lux]	ZenLum [cd/m2]	WindDir [deg]	WindSpd [m/s]	TotSkyCvr [%]		
4	1/1/1995	1:00	C9C9C9B8*O*9	0.7	-0.3	92	99200	0	1415	266	0	0	0	0	0	0	0	120	3	5		
5	1/1/1995	2:00	C9C9C9B8*O*9	1.6	0.4	92	99200	0	1415	270	0	0	0	0	0	0	0	120	4.1	5		
6	1/1/1995	3:00	C9C9C9B8*O*9	2.5	1.2	91	99200	0	1415	277	0	0	0	0	0	0	0	130	3.6	6		
7	1/1/1995	4:00	C9C9C9B8*O*9	3.2	1.9	91	99200	0	1415	280	0	0	0	0	0	0	0	150	4	6		
8	1/1/1995	5:00	C9C9C9B8*O*9	3.8	2.4	91	98900	0	1415	283	0	0	0	0	0	0	0	150	5.7	7		
9	1/1/1995	6:00	C9C9C9B8*O*9	4.2	2.9	91	98900	0	1415	283	0	0	0	0	0	0	0	150	3.3	9		
10	1/1/1995	7:00	A7A7E8B8*O*9	4.8	3.6	93	98800	0	1415	286	0	0	0	0	0	0	0	160	3	10		
11	1/1/1995	8:00	B8C8E8B8*O*9	4.5	3.8	95	98700	43	1415	285	5	0	0	600	0	600	180	160	3.3	10		
12	1/1/1995	9:00	B8C8E8B8*O*9	4.1	3.8	98	98600	226	1415	286	33	0	33	3900	0	3800	1270	160	3.7	10		
13	1/1/1995	10:00	A7A7E8B8*O*9	3.8	3.8	100	98500	382	1415	284	68	0	68	7800	0	7900	2660	20	4	10		
14	1/1/1995	11:00	B8C8E8B8*O*9	4	3.9	99	98500	485	1415	285	93	0	93	10700	0	10800	3780	20	4.7	10		
15	1/1/1995	12:00	B8C8E8B8*O*9	4.2	3.9	98	98400	529	1415	286	104	0	104	12000	0	12100	4280	20	5.3	10		
16	1/1/1995	13:00	A7A7E8B8*O*9	4.4	4	97	98300	510	1415	287	100	0	100	11500	0	11500	4060	30	6	10		
17	1/1/1995	14:00	A7A7E8B8*O*9	4	4	100	98400	429	1415	285	10	0	80	9100	0	9200	3170	360	4.6	10		
18	1/1/1995	15:00	B8C8E8B8*O*9	4.2	4	99	98300	293	1415	286	46	0	46	5500	0	5500	1830	360	5.8	10		
19	1/1/1995	16:00	A7A7E8B8*O*9	4.4	4	97	98800	110	1415	287	13	0	13	1400	0	1400	470	340	7	10		
20	1/1/1995	17:00	B8C8E8B8*O*9	3.7	3.3	97	98700	0	1415	283	0	0	0	0	0	0	0	340	6.3	10		
21	1/1/1995	18:00	B8C8E8B8*O*9	3.1	2.6	97	98700	0	1415	280	0	0	0	0	0	0	0	340	5.7	10		
22	1/1/1995	19:00	A7A7E8B8*O*9	2.4	1.8	96	98800	0	1415	277	0	0	0	0	0	0	0	320	5	10		
23	1/1/1995	20:00	A7A7E8B8*O*9	0	0	100	98900	0	1415	266	0	0	0	0	0	0	0	260	4.1	10		
24	1/1/1995	21:00	B8C8E8B8*O*9	0.1	0.1	100	99000	0	1415	266	0	0	0	0	0	0	0	260	4.6	10		
25	1/1/1995	22:00	A7A7E8B8*O*9	0.2	0.2	100	99100	0	1415	266	0	0	0	0	0	0	0	260	5	10		
26	1/1/1995	23:00	B8C8E8B8*O*9	0.3	0.2	100	99100	0	1415	267	0	0	0	0	0	0	0	260	5	10		
27	1/1/1995	24:00	B8C8E8B8*O*9	0.3	0.3	100	99200	0	1415	267	0	0	0	0	0	0	0	260	5	10		
28	LEGENDA																					
29	Vrednosti izmerene na objektu																					
30	Vrednosti iz Energy Plus Weather File																					

Slika 2.14: Upisivanje meteoroloških podataka u klimatsku datoteku "EnergyPlus"

Da bi se obavila energetska simulacija za celu kalendarsku godinu, ulazni podaci o vremenskim uslovima treba da budu dostupni u formatu sa 8.760 (8.784 prestupna godina) časovnih vrednosti, za neophodne meteorološke parametre. Strukturalni elementi objekta generalno imaju relativno duže vreme odziva tako da su rezultati dobri kada se koriste časovne simulacije. Međutim, drugi elementi objekta, kao što je KGH oprema, kontrola osvetljenja i slično, reaguju mnogo brže. U tom smislu, potrebno je da se vremenski korak smanji na pola ili četvrtinu sata, što danas omogućavaju novi programi za energetska simulaciju. Za naš slučaj gde se analizira model u smislu finog podešavanja, kontrole, optimizacije i utvrđivanje stvarnih ušteda, neophodni su časovni meteorološki podaci na objektu u toku celokupnog perioda istraživanja [2]. Tipična meteorološka godina se kasnije može koristiti za procenu energetskih potreba objekata, kada su primenjene nove operativne strategije.

Postoje mnoge metode za obradu meteoroloških parametara da bi se dobili skupovi časovnih meteoroloških podataka, kao što su referentna godina (TRY po evropskom standardu EN 15243:2007), tipična meteorološka godina (TMY, po Wilcox [20], za 1.020 lokacija u SAD), meteorološka godina za proračun energije (IWEC po ASHRAE za 227 lokaciju van SAD). Danas su najprisutniji formati EPW (EnergyPlus, 2010.) i TMY3 (Wilcox, 2008.). EPW format je posebno dobar i bogat izbor meteoroloških podataka. Ove datoteke su veoma dobro organizovane i pružaju podršku energetskom projektovanju i analizi objekta. Same datoteke su sačinjene od meteoroloških podataka iz različitih perioda, npr. TMY3 od 1976. do 2005. ili IWEC od 1982. do 1999.

Postoji nekoliko značajnih ograničenja za korišćenje tipične godine u primenama za proračun energije osetljivih na vreme:

1. nisu prikazani ekstremni meteorološki uslovi;
2. s obzirom na to da se tipična godina formira iz odvojenih najtipičnijih meseci, na primer 10 ili 30 prethodnih godina, ona predstavlja prosečne meteorološke uslove u prošlosti, koji se najverovatnije neće javiti u bliskoj budućnosti, a može da oslikava prosečne karakteristike za period dalje budućnosti;
3. prethodne decenije globalna temperatura je bila za oko 0,8°C viša nego na početku XX veka. Dve trećine zagrevanja desilo se od 1975. godine (Hansen [9]). Bez obzira da li postoji globalno zagrevanje ili ne, klimatske promene se prate tokom poslednjih decenija. Ova pretpostavka možda ne odlikava buduće tipične meteorološke uslove;
4. metodologija za proračun tipične godine je složena i sve je veća mogućnost da se javi nepreciznost ili greška u složenim proračunima;
5. kao što je dokazano ispitivanjem, različite metode za dobijanje tipične godine mogu dati značajna odstupanja u dobijenim rezultatima. Nekoliko studija pokazuje da podaci iz datoteka TMY i IWEC više odgovaraju dugoročnim prosečnim vrednostima, nego datoteke sa podacima o TRY [5, 11];
6. tipične godine su obično napravljene za univerzalnu upotrebu sa određenim merenjem sunčevog zračenja, temperature, vlažnosti, brzine vetra i drugih parametara, međutim za svaku primenu značaj parametara varira, te stoga za konkretne primene tipična godina ne mora da predstavlja tipične uslove.

Međutim, najnovija istraživanja [4, 16] pokazuju da se korišćenjem tipične meteorološke godine dobijaju razumna i objektivna predviđanja, što omogućava dobar put za dobijanje dugoročnih ocena energetskih performansi objekta. Naravno, ostaje problem pikova i nestandardnih uslova koji se mogu rešiti uvođenjem istih u datoteku meteoroloških podataka. Dakle, za konkretni slučaj mora se dobro razmisliti i odrediti pravilan pristup i odabir meteorološke datoteke za

simulaciju. Što se tiče gore navedenog eksperimenta, vremenski korak svih navedenih merenja je 15 minuta. Plan je da se merenja obave u tri intervala (od 24.01.2014. do 31.07.2014.) i to:

1. letnji režim 41 dan;
2. prelazni režim 94 dana;
3. zimski režim 50 dana.

2.5 KORIŠĆENA MERNA OPREMA

Oprema koja je upotrebljena u svrhu realizacije eksperimenta prikazana je u tabeli 2.10.

Tabela 2.10: Specifikacija opreme za realizaciju eksperimenta

Merni instrument	Merenje	Specifikacija	
		Opseg	Tačnost
Anemometar	Merenje brzine i smera strujanja vetra	0 - 359° 0,5 - 89 m/s	±3° 1 m/s ili ±3%
Piranometar	Merenje intenziteta ukupnog sunčevog zračenja	0 – 1.800 W/m ² sa korakom od 1 W/m ²	± 5 %
DAVIS meteorološka stanica	Merenje spoljašnje temperature, relativne vlažnosti i atmosferskog pritiska vazduha	-40 - +60 °C 1 - 99% 92.000 – 108.000 Pa Memorija do 1.750 očitavanja. Mogućnost povezivanja na PC i obrada podataka u pripadajućem softveru	± 2,5%
Sonda sa užarenom žicom za merenje brzine, temperature i relativne vlažnosti vazduha (Testo 0635 1535)	Merenje brzine strujanja i temperature vazduha u međuprostoru fasade, 3 pozicije	0-20 m/s -20 - +70°C 0 - 100%	±(0.02 m/s ili 4%) ± 0,3°C ± 2%
Termopar KIMO (Tip - T)	Temperatura (stakla, parapeta i vazduha u međuprostoru), 18 pozicija	-40 - +350°C	± 0,5°C
Multi-funkcionalni aparat Testo 435-2 ("Data logger"), 3 komada	Uređaj za prikupljanje podataka o merenju brzine strujanja i temperature vazduha u međuprostoru fasade	Memorija do 10.000 očitavanja. Mogućnost povezivanja na PC i obrada podataka u pripadajućem softveru	-
Profesionalni "data logger" sa priključcima za četiri spoljašnje temperaturene sonde - Testo 177-T4, 3 komada	Uređaj za prikupljanje podataka o merenju temperatura stakla, parapeta	Memorija do 48.000 očitavanja. Mogućnost povezivanja na PC i obrada podataka u pripadajućem softveru	-

Profesionalni "data logger" za vlagu i temperaturu - Testo 177-H1, 1 komad	Uređaj za prikupljanje podataka o merenju temperature i relativne vlažnosti vazduha u međuprostoru fasade	Memorija do 48.000 očitavanja. Proračun tačke rose -4 do +70°C. Mogućnost povezivanja na PC i obrada podataka u pripadajućem softveru	-
Termovizijska kamera ThermaCam B20, proizvođač Flir Systems	Bezkontaktno registrovanje emitovanja toplote (infracrvenog zračenja) i formiranje temperaturskog dijagrama omotača objekta	Vidno polje 24° x 18° Prostorna rezolucija 1,3 mrad Rezolucija 320x240 piksela Opseg spektra 7,5 do 13 μm Temperaturni opseg -20 to +150°C	±1 °C ili ±1%

2.6 LITERATURA

- [1] Anđelković, A., et al., Development of Simple Calculation Model for Energy Performace of Double skin facades, Thermal Science 2012; 16; p.p. 251-S267
- [2] Building Performance Simulation for Design and Operation (edited by Jan L.M. Hensen and Roberto Lamberts), Spon Press, Taylor&Francis Group, Oxford, UK, 2011
- [3] Choi, W., et al., Operation and control strategies for multi-storey double skin facades during the heating season, Energy and Buildings 2012; 49; p.p. 454-465
- [4] Crawley, D.B., Building Performance Simulation A Tool for Policymaking, PhD Thesis, University of Strathclyde, Glasgow, 2008
- [5] Crawley, D. B., Huang, Y. J., Does It Matter Which Weather Data You Use in Energy Simulations? Building Energy Simulation User News, 1997
- [6] Fallahi, A., Haghghat, F., Elsadi, H., Energy performance assessment of double skin facade with thermal mass, Energy and Buildings 2010; 42; p.p. 1499-1509
- [7] Gratia E., De Herde, A., Natural ventilation in a double-skin facade, Energy and Buildings 2004; 36; p.p.137-146
- [8] Gratia E., De Herde, A., Natural cooling strategies efficiency in an office building with a double-skin facade, Energy and Buildings 2004; 36; p.p.1139-1152
- [9] Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M., Lo, K., Global Surface Temperature Change, NASA Goddard Institute for Space Studies, New York, USA, 2010
- [10] Hensen, J., Bartak, M., Drkal, F., Modeling simulation of a double-skin facade system, ASHRAE Transactions 2002; p.p. 1251-1259
- [11] Huang, J., The impact of different weather data on simulated residential heating and cooling loads, ASHRAE, 1998
- [12] Ignjatović, M., Blagojević, B., Stojiljković, M., Stojiljković, M., Anđelković, A., Primary Energy Consumption During Heating Season of an Office Building With Attached Double Skin Facade, 11th International Conference DEMI 2013, University of Banja Luka, BIH; p.p. 765-774
- [13] Jaewan, J., et al., Load Characteristics and Operation Strategies of Building Integrated with Multi story Double Skin Facade, Energy and Buildings 2013; 60; p.p. 185-198
- [14] Podaci Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije
- [15] Saelens, D., Energy performance assessment of multiple-skin facades, PhD Dissertation, Katholieke Universiteit Leuven, 2002
- [16] Seo, D., Huang, J., Krarti, M., Evaluation of Typical Weather Year Selection Approaches for Energy Analysis of Buildings," ASHRAE Transactions 2009; 115; p.p. 654-667

- [17] Stec, J.C., Symbiosis of Double skin Facades and Indoor Climate Installation, PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2006
- [18] Todorović, B., Marić, B., The influence of double facades on building heat losses and cooling loads, 20th International Congress of Refrigeration, Sydney, Australia, 1999
- [19] Todorović, B., Cvjetković, T., Double Building Envelope - Consequences on Energy Demand for Heating and Cooling, IV International Building Installation Science and Technology Symposium, Istanbul, Turkey, 2000
- [20] Wilcox, S., et al., Users Manual for TMY3 Data Sets, National Renewable Energy Laboratory, 2008

3. ANALIZA IZMERENIH REZULTATA

Kada možete da merite ono o čemu govorite,
tada znate nešto o tome;
ako ne možete da merite,
tada vaše mišljenje je oskudno i nezadovoljavajuće
["When you can measure what you are speaking about,
and express it in numbers,
you know something about it,
but when you cannot measure it,
when you cannot express it in numbers,
your knowledge is of a meager and unsatisfactory kind"]
(Lord William Thomson Kelvin)

Tipični rezultati prethodno opisanog eksperimenta analizirajuće se u cilju dobijanja realne slike i ponašanja DVF u zavisnosti od trenutnih meteoroloških uslova. Cilj merenja, pored sagledavanja uticaja DVF objekta u realnom vremenu, jeste i pribavljanje podataka neophodnih za fino podešavanje budućeg energetskeg modela zgrade. Veliki broj postavljenih senzora, kao i dug vremenski period samog merenja, omogućava detaljnu analizu distribucije temperature i brzine vazduha unutar posmatranog dela omotača objekta. Na taj način, mogu se kreirati dijagrami vertikalnog gradijenta i horizontalnog trenda temperature za sve režime i delove dana, dijagrami zavisnosti brzine strujanja vazduha u međuprostoru od sunčevog zračenja, spoljašnje temperature, brzine i smera vetra. Pošto je DVF uvek otvorena (bez mogućnosti kontrolisanog zatvaranja i otvaranja klapni na ulazu i izlazu), shodno merenjem temperature, vlažnosti i protoka vazduha u međuprostoru, može se odrediti količina toplote koja je apsorbirana. Ovaj podatak predstavlja jednu od glavnih karakteristika energetske performanse DVF.

Kao što je i navedeno, eksperimentalno istraživanje je izvršeno za sva tri režima u toku kalendarske 2014. godine. Cilj je bio da se u toku prve polovine godine, kontinualnim merenjem snime sve promene i kvantifikuje na koji način se ponašaju posmatrane osobine DVF.

Početak merenja označila je pojava prvih niskih temperatura krajem meseca januara. Do tada su preovladavale visoke temperature za ovaj deo godine. Sa aspekta spoljašnjih uslova, zimski režim oslikavaju blago povišene temperature, čiji trend se nastavlja već od druge polovine meseca februara. Takođe, ono što je bila karakteristika zimskog režima je prisustvo izuzetno jakih vetrova, blizu 20 m/s (košava), krajem januara i početkom februara.

Što se tiče prelaznog režima (proleće), 2014. godina je bila relativno standardna sa aspekta meteoroloških uslova koji su preovladavali. Spoljašnje temperature su se kretale u intervalu od 5°C (početkom aprila) do 33°C (početkom juna). U tom smislu, prelazni režim se odlikovao periodima u kojem je bilo neophodno grejanje i periodi sa potrebom za klimatizacijom. Udari vetra nisu bili tako intenzivni kao u zimskom periodu. Najjači vetrovi prostirali su se iz pravca jugo-istok i jugo-zapad, sa maksimalnim vrednostima do 8 m/s. Najučestaliji vetar u ovom periodu je bio iz pravca zapada, prosečnih vrednosti od 1,5 do 2 m/s.

Što se tiče letnjeg režima, 2014. godina je bila umereno topla sa maksimalnim temperaturama do 36°C. Prethodnih godina, maksimalne temperature su u pojedinim danima su prelazile i 40°C, tako da ove godine nije postojala mogućnost da se analizira maksimalni temperaturski pik. Minimalne temperature bile su u intervalu od 15-20°C (noćni režim), što omogućava visok potencijal za pothlađivanje objekta u toku noći. Zbog klimatskih promena i zbog blizine reke Dunav (oko 400 m), u pojedinim danima zabeležene su izuzetno visoke vrednosti relativne vlažnosti (70-90%), što izaziva visok procenat vlage vazduha u prostorijama i probleme na klimatizacionom postrojenju u smislu pojave kondenzata na rashladnim gredama. Vetar je bio umerenog intenziteta do 3 m/s, najčešće iz pravca zapada.

3.1 OPIS GRANIČNIH USLOVA KOJI SE PRATE

Svi senzori i merni uređaji su provereni i kalibrisani standardnim procedurama u laboratorijskim uslovima. Takođe, nakon postavljanja na objekat, provereni su prvi rezultati svih merenja sa dodatnom (ručnom) opremom.

3.1.1 TRENUTNI METEOROLOŠKI USLOVI NA OBJEKTU

Kako bi se obezbedili realni uslovi za ocenu ponašanja i uticaja DVF, prate se svi neophodni meteorološki parametri koji se mere na petnaesto-minutnom nivou. To su: temperatura vazduha

(°C), relativna vlažnost vazduha (%), atmosferski pritisak (Pa), brzina vetra (m/s), smer strujanja vetra (°), globalno sunčevo zračenje (W/m²).

Priroda promene brzine i smera vetra varira velikom brzinom u vremenu i prostoru, lokalno zaviseći pre svega od visine i konfiguracije terena. Sam karakter promene, kada je u pitanju vetar je izrazito slučajan, dok je profil strujanja izrazito turbulentan. Istovremeno, brzina vetra je jedan od glavnih činilaca koji podstiče prirodnu ventilaciju i provetravanje, kako objekta, tako i međuprostora fasade.

Varijacije ostalih meteoroloških parametara koji se prate su manje izražene i pre svega se odnose na lokni karakter i karakteristike terena, gde se nalazi zgrada. Zbog limitiranosti potrebne merne opreme, sunčevo zračenje se meri kao globalno, iz kojeg se empirijskim putem izvode direktno i difuzno ("Perez" model pretvaranja zračenja).

Zbog velike važnosti i uticaja navedenih klimatskih parametara na energetske karakteristike DVF, postavljena je lokalna meteorološka stanica za njihovo praćenje.

3.1.2 GRANIČNI USLOVI U DVF

Kao posledica promene klimatskih uslova i uslova koji vladaju u samom objektu, dolazi do promene termičkih i drugih osobina DVF. Kako bi se promene što bolje uočile i kvantifikovao njihov uticaj, fasada je podeljena u tri zone (zona pri ulazu, na sredini i zona na izlazu iz fasade). U svakoj zoni se prate promene temperature površina (°C) prvog i drugog sloja DVF, temperatura vazduha (°C) u dve tačke, brzina strujanja vazduha (m/s) i relativna vlažnost vazduha (%). Površinski termoparovi su za fasadne elemente pričvršćeni specijalnom visoko provodnom masom, koja pored dobrih provodnih osobina štiti senzor od direktnog sunčevog zračenja koje može izazvati grešku prilikom merenja.

Merenje brzine strujanja vazduha u međuprostoru fasade je veoma značajno sa stanovišta performanse i unutrašnjih uslova DVF. Izračunavanje i procena broja izmena vazduha kroz fasadu putem masenog protoka, predstavlja jedan od glavnih ciljeva merenja i simulacija. Samo strujanje vazduha u prirodno ventilisanim fasadama je veoma kompleksno, teško za merenje i određivanje. Stohastička i slabo predvidiva priroda vetra, koja u kombinaciji sa silom uzgona (nastaje usled razlike u gustinama (temperaturama) vazduha), prouzrokuje neuniformno strujanje vazduha u međuprostoru fasade, što predstavlja glavni problem prilikom njegove analize. U okviru ovog eksperimenta, strujanje vazduha je određeno metodom određivanja profila brzina vazduha, postavljanjem anemometara sa užarenom žicom u sve tri zone fasade. Tačnost ove metode pre svega zavisi od broja i pozicije mernih mesta, kao i od uticaja same sile uzgona. Senzori sa užarenom žicom su kalibrisani pre postavke eksperimenta i imaju tačnost ±0,02 m/s. Ostale metode (metod gasa tragača i metod razlike pritisaka) su u praksi pokazale lošiju tačnost i komplikovanost prilikom održavanja eksperimenta.

Kao što je navedeno efekat uzgona ("stack effect"), koji je nastao pod uticajem sile uzgona ("buoyancy force"), predstavlja silu koja generiše strujanje između dve ili više zona sa različitim gustinama vazduha. Ova razlika u gustinama nastaje usled razlike u temperaturama i/ili sadržaju vlage vazduha. Logično je pretpostaviti i zaključiti da je ovaj efekat kod prirodno ventilisanih fasada izražen u letnjem periodu, pogotovo kada je zaštita od Sunca (venecijaneri u međuprostoru fasade) spuštена. Sunčevo zračenje koje prikupe venecijaneri, emituje se u svim pravcima i oslobađa se na okolni vazduh konvekcijom. Na ovaj način se pojačava efekat uzgona.

Kada je u pitanju efekat kinetičke energije vetra, u njenoj prirodi je da se pretvara u potencijalnu energiju kada se susretne sa preprekom (omotač objekta). Delovi fasade koji su u direktnom dodiru sa vetrom, imaju pozitivne predznake pritiska, dok zaklonjeni delovi omotača imaju negativan predznak. Prirodna ventilacija nastala pod uticajem vetra, predstavlja izmenu vazduha između dve zone. Izmena (strujanje) vazduha nastaje usled razlike pritiska na omotaču objekta, koja je uzrokovana strujanjem vetra koji se širi po međuprostoru fasade i unutrašnjosti objekta. Raspored i distribucija pritiska vetra na omotač objekta opisuje se koeficijentom pritiska c_p (vidi poglavlje 4.2.4).

Kada govorimo o tačnosti merenja, može se govoriti samo o tačnosti opreme koja se koristi za merenje (tabela 2.8), jer nije moguće dati tačnu procenu tačnosti za ceo period eksperimenta. Ovo je delimično uslovljeno dinamičkom prirodom strujanja vazduha, gde se tačnost menja zajedno sa promenama graničnih uslova. Drugi razlog je nedostatak informacija i iskustava za ovu vrstu merenja, na realnim višespratnim DVF.

3.1.3 METODOLOGIJA ANALIZE IZMERENIH REZULTATA

Metodološki gledano, analiza merenja započinje posmatranjem trenutnih meteoroloških uslova u toku sva tri režima i kako priroda njenih promena utiče na ponašanje DVF. Na taj način se formiraju dijagrami zavisnosti promena temperatura vazduha u DVF, u odnosu na promenu spoljašnje temperature i intenziteta sunčevog zračenja. Analiza se nastavlja prikazom zavisnosti brzine strujanja vazduha u međuprostoru DVF, u odnosu na uticaj brzine, smera vetra i intenziteta sunčevog zračenja. Metodologija obuhvata i formiranje dijagrama vertikalnog gradijenta i horizontalnog trenda temperatura, za tipične dane svih režima. Ovaj deo eksperimentalnog istraživanja doprinosi boljem razumevanju i analizi transmisionih gubitaka i dobitaka posmatrane fasade.

Provera tačnosti sprovedenih merenja vrši se pomoću uporedne analize proračuna apsolutnih vrednosti vlažnosti vazduha u donjoj i u gornjoj zoni međuprostora DVF. Ove vrednosti se računaju na osnovu izmerenih podataka o temperaturi, relativnoj vlažnosti i atmosferskom pritisku vazduha u DVF. Proračun časovnih vrednosti apsolutne vlažnosti i entalpija vazduha, izvršen je pisanjem programskog koda u MS Excel-u koristeći VBA ("Visual Basic for Application"). Detaljna procedura može se pronaći u [1, 3].

Primenom jednačine stanja idealnog gasa za pregrejanu vodenu paru i suvi vazduh, dobija se izraz za apsolutnu vlažnost nezasićenog vlažnog vazduha kao [1, 3]:

$$X = 0,622 \frac{p_d}{p_{sv}} = 0,622 \frac{\varphi p_{dn}}{p - \varphi p_{dn}} \quad (3.1)$$

gde su:

- X - apsolutna vlažnost vazduha [kg/kg];
- p_d - stvarni parcijalni pritisak vodene pare pri temperaturi tačke rose [Pa];
- p_{sv} - parcijalni pritisak suvog vazduha [Pa];
- p_{dn} - parcijalni pritisak zasićene vodene pare pri temperaturi vlažnog vazduha [Pa];
- p - barometarski pritisak, $p = p_{sv} + p_d$, [Pa];
- φ - relativna vlažnost nezasićenog vazduha [%].

Za slučaj kada je t (temperatura posmatranog vazduha) manja od 0°C, koristi se formula za određivanje vrednosti p_{dn} :

$$p_{dn} = \text{Exp}(-0.000000002465132 * t^6 - 0.0000002733306 * t^5 - 0.0000112064 * t^4 - 0.0002065871 * t^3 - 0.002017579 * t^2 + 0.07729193 * t - 5.101152)$$

U ostalim slučajevima koristi se sledeća formula:

$$p_{dn} = \text{Exp}(-7.789316E-15 * t^6 + 7.363934E-12 * t^5 - 0.000000003381446 * t^4 + 0.000001096061 * t^3 - 0.0002974345 * t^2 + 0.07261845 * t - 5.098158)$$

Izmerene vrednosti razlika temperatura vazduha u prostoriji i u DVF, predstavljaju osnovu za analizu transmisionih gubitaka u zimskom i transmisionih dobitaka u letnjem režimu. Kod prirodno ventilisanih fasada, strujanje vazduha predstavlja jednu od njihovih glavnih karakteristika. Kod višespratnog tipa objekta sa ovakvim tipom fasade, podrazumeva se da je smer strujanja uvek vertikalno na gore. Kada vazduh prolazi kroz međuprostor fasade, on uzrokuje promenu i protok entalpije. Kako bi se u celini procenila energetska performansa DVF, pored analize transmisionih gubitaka i dobitaka toplote, u obzir se mora uzeti i promena entalpije vazduha. Ovu promenu je od izuzetne važnosti kvantifikovati u slučaju kada se analiziraju mogućnosti iskorišćenja DVF za prirodnu i noćnu ventilaciju prostorija, kao i za mogućnost povezivanja fasade sa sistemom za klimatizaciju objekta.

Kao što je pomenuto u poglavlju 1.4.3 neki od autora sugerišu da se vazduh iz DVF može koristiti za snabdevanje klima komora u toku zimskog režima kod višespratnih objekata. Na ovaj način, u toku zime, deo transmisionih gubitaka i deo apsorbirane sunčeve energije se može rekuperirati putem DVF.

Što se tiče letnjeg režima, kako bi se smanjio rizik od potencijalnog pregrevanja međuprostora fasade (čest slučaj kada su višednevne visoke vrednosti temperatura i sunčevog zračenja), koriste se tehnike prirodnog provetravanja kada je to moguće.

Entalpija nezasićenog vlažnog vazduha jednaka je sumi entalpija svih njegovih činitelja, odnosno sumi entalpija suvog vazduha i pridružene vodene pare [1, 3]:

$$h = h_a + X h_v \quad (3.2)$$

gde su:

- h - entalpija vlažnog vazduha [kJ/kg];
- h_a - entalpija suvog vazduha [kJ/kg];
- h_v - entalpija vodene pare [kJ/kg].

Uzimajući u obzir da je vazduh na konstantnom pritisku i da je latentna toplota isparavanja 2.500,84 kJ/kg, specifična toplota suvog vazduha i vodene pare može se opisati sledećim izrazima:

$$c_{pa} = 1,0029 + 5,4 \cdot 10^5 \cdot t \quad (3.3)$$

$$c_{pv} = 1,856 + 2,0 \cdot 10^4 \cdot t \quad (3.4)$$

Entalpija nezasićenog vazduha može prikazati kao:

$$h = (1,0029 + 5,4 \cdot 10^5 \cdot t) \cdot t + X \cdot 2.500,84 + (1,856 + 2,0 \cdot 10^4 \cdot t) \cdot t \quad (3.5)$$

Ova formulacija entalpije pogodna je za korišćenje u temperaturskim opsezima od -40 do 300°C. Što se tiče barometarskog pritiska opseg je od 0,1 do 5 bara. Za vrednosti pritisaka predložena jednačina daje dobre rezultate za većinu tehničkih proračuna.

Specifična i promena entalpije vazduha, kao jedan od najznačajnijih pokazatelja energetske performanse DVF, definiše se kao:

$$E_{h,m2} = \rho(t) \cdot v(\tau') \cdot \left(\int_0^\tau h_I(\tau') d\tau - \int_0^\tau h_{III}(\tau') d\tau \right) \quad (\text{kWh/m}^2) \quad (3.6)$$

$$E_h = A \cdot E_{h,m2} \quad (\text{kWh}) \quad (3.7)$$

$E_{h,m2}$ (3.6), predstavlja časovne vrednosti koje opisuju fluktuaciju energije vazduha u međuprostoru fasade, specificiranu po površini poprečnog preseka (m^2). Ukupna količina apsorbovane energije vazduha u DVF data je sa jednačinom 3.7. Predlozi budućih operativnih i kontrolnih strategija integracije DVF mogu se oceniti preko sledećeg bilansa:

$$E_u = \rho(t) \cdot v(\tau') \cdot \left(\int_0^\tau h_{I-III}(\tau') d\tau - \int_0^\tau h_p(\tau') d\tau \right) \quad (\text{kWh/m}^2) \quad (3.8)$$

gde su:

$E_{h,m2}$ - specifična promena entalpije vazduha apsorbovane u DVF [kWh/m^2];

E_h - toplotna energija vazduha apsorbovana u DVF [kWh];

E_u - specifična promena entalpije vazduha u fasadi i prostoriji (potencijal uštede energije prilikom prirodne ventilacije) [kWh/m^2];

$v(\tau')$ - brzina vazduha u DVF u posmatranom trenutku [m/s];

A - površina poprečnog preseka DVF, $25 \cdot 0,56 = 14$ [m^2];

h_I - entalpija vazduha u donjoj (I zona) zoni DVF [kJ/kg];

h_{I-III} - entalpija vazduha u I, II ili III zoni DVF [kJ/kg];

h_p - entalpija unutrašnjeg vazduha u projektnim uslovima [kJ/kg];

ρ - gustina vazduha [kg/m^3];

τ - vreme [s].

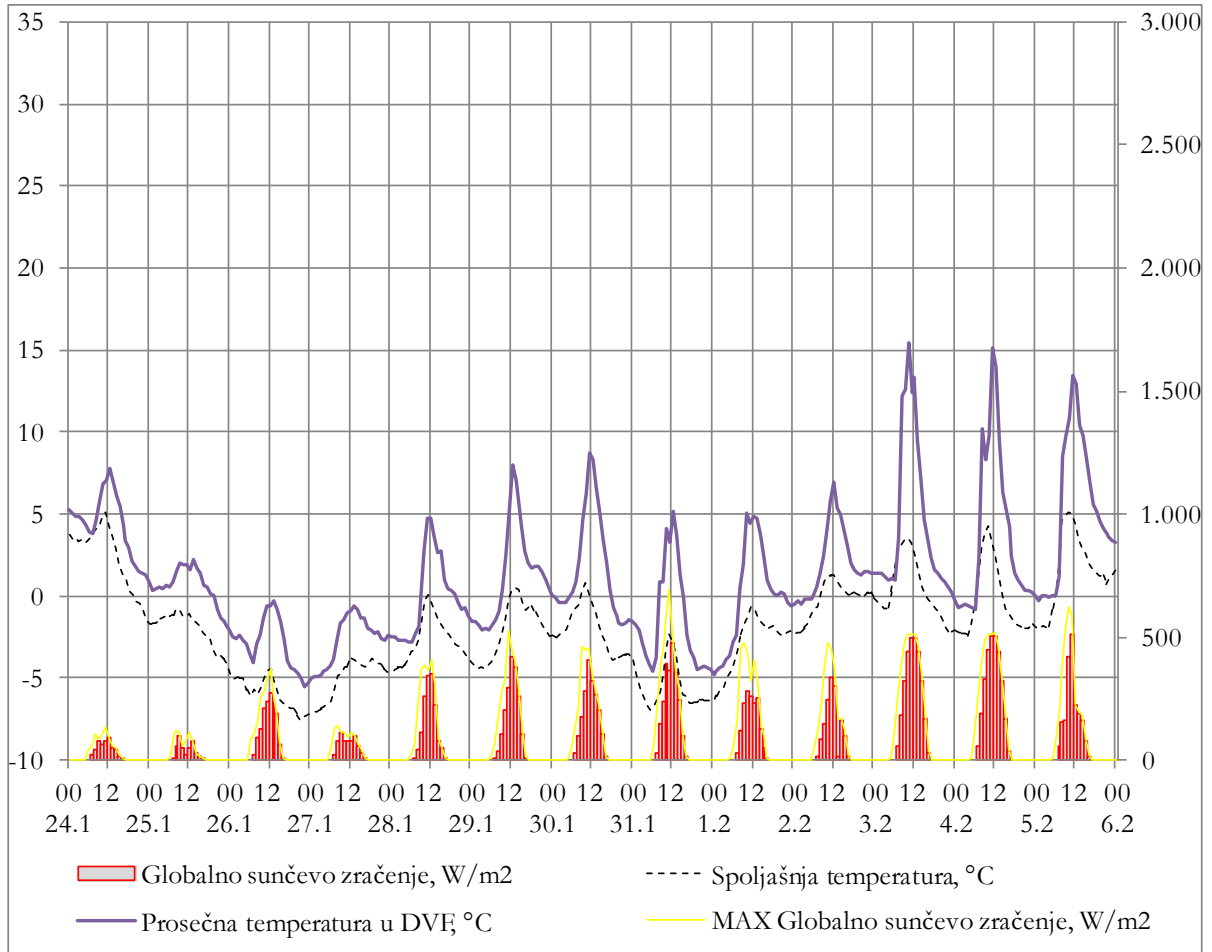
Na osnovu izračunatih časovnih bilansa (3.8) svih posmatranih zona DVF i njihovih referentnih zona u objektu, dobijeni rezultati ocenjuju energetske potencijal prirodne ventilacije objekta. Svi proračuni časovnih vrednosti entalpija i ostalih bilansa urađeni su pisanjem programskog koda u MS Excel-u, koristeći VBA ("Visual Basic for Application"). Numerička integracija u Excel-u rešena je korišćenjem trapezoidnog pravila.

3.2 ANALIZA REZULTATA U ZIMSKOM REŽIMU

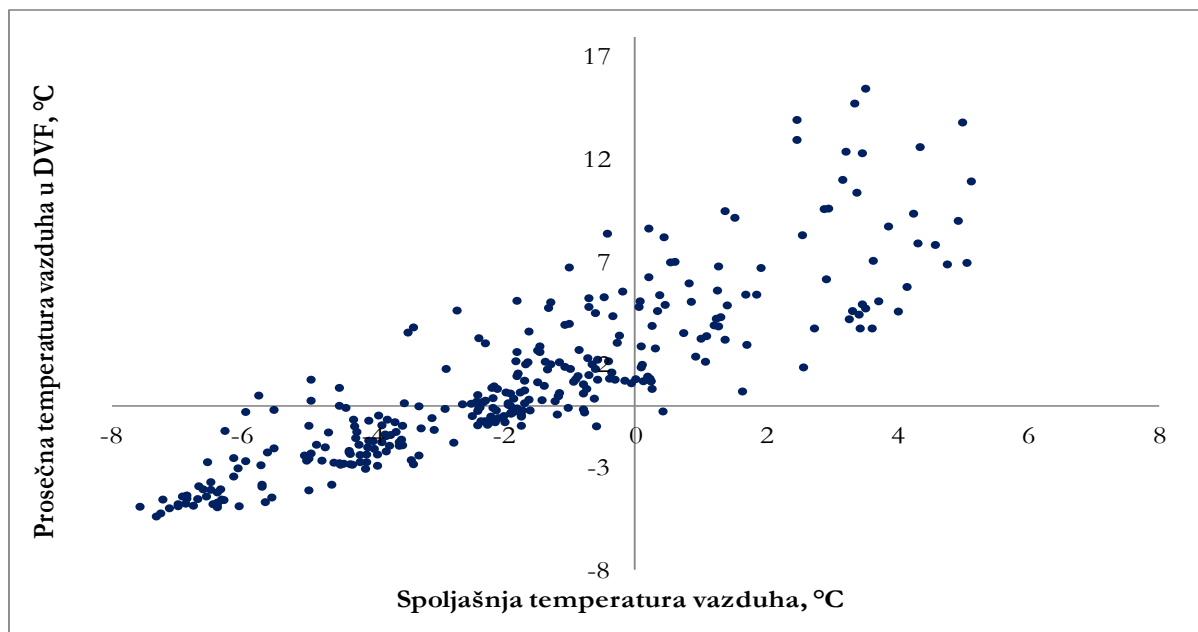
Početak merenja zimskog režima diktirali su trenutni meteorološki uslovi koji nisu dozvolili postavku merne opreme sve do 24.01.2014. godine. Od tog datuma spoljašnje temperature su naglo pale, rezultujući temperature ispod nule, prvo u toku noći, a potom i u toku dana. Slika kalendarske 2014. godine je takva, da su prisutne samo dve nedelje (24.01.-06.02.2014.) sa tipičnim niskim zimskim temperaturama. Venecijaneri u međuprostoru DVF su bili podignuti u toku celog zimskog režima.

Na slici 3.1, prikazana je zavisnost promene temperature vazduha u DVF od spoljašnjih (temperatura i globalno sunčevo zračenje) i unutrašnjih (temperatura u kancelariji) uslova. Slika 3.2 opisuje zavisnost prosečne temperature vazduha u DVF od spoljašnje temperature. Izmerena temperatura u kancelarijama u toku zimskog režima varira u opsegu od $22-25^\circ\text{C}$ (umereno pregrejane prostorije). Pošto DVF fasada na posmatranom objektu nema mogućnost regulacije, odnosno zatvaranja klapni u toku zimskog režima, temperature vazduha unutar fasade su u proseku više od $0,03$ do 4°C . Do veće razlike u temperaturama dolazi kada je prisutan

dominantniji uticaj sunčevog zračenja, tako da porast temperature vazduha u DVF može iznositi i do 10°C. Takođe, uticaj na temperaturu vazduha u DVF ima i brzina i smer vetra koji svojim delovanjem utiče na brzinu vazduha u DVF.

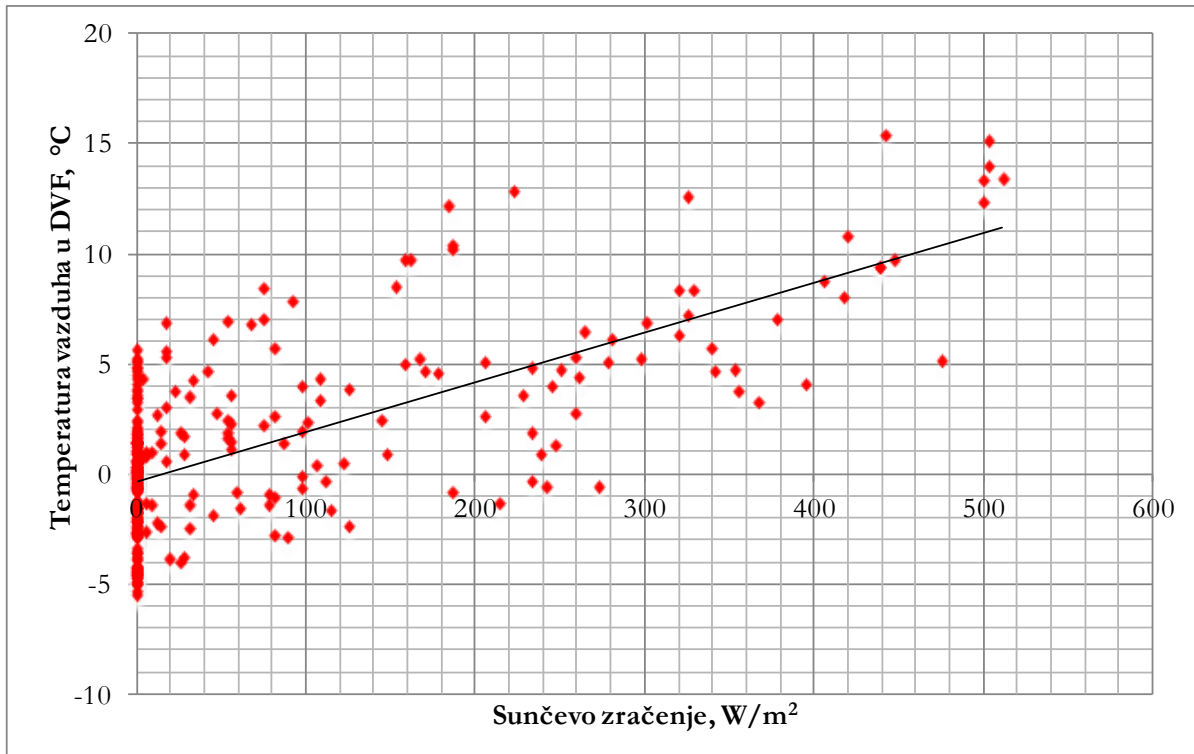


Slika 3.1: Prikaz dela merenja u toku zimskog režima (24.01. - 06.02.2014.)



Slika 3.2: Zavisnost prosečne temperature vazduha u DVF od spoljašnje temperature vazduha (24.01. - 06.02.2014.)

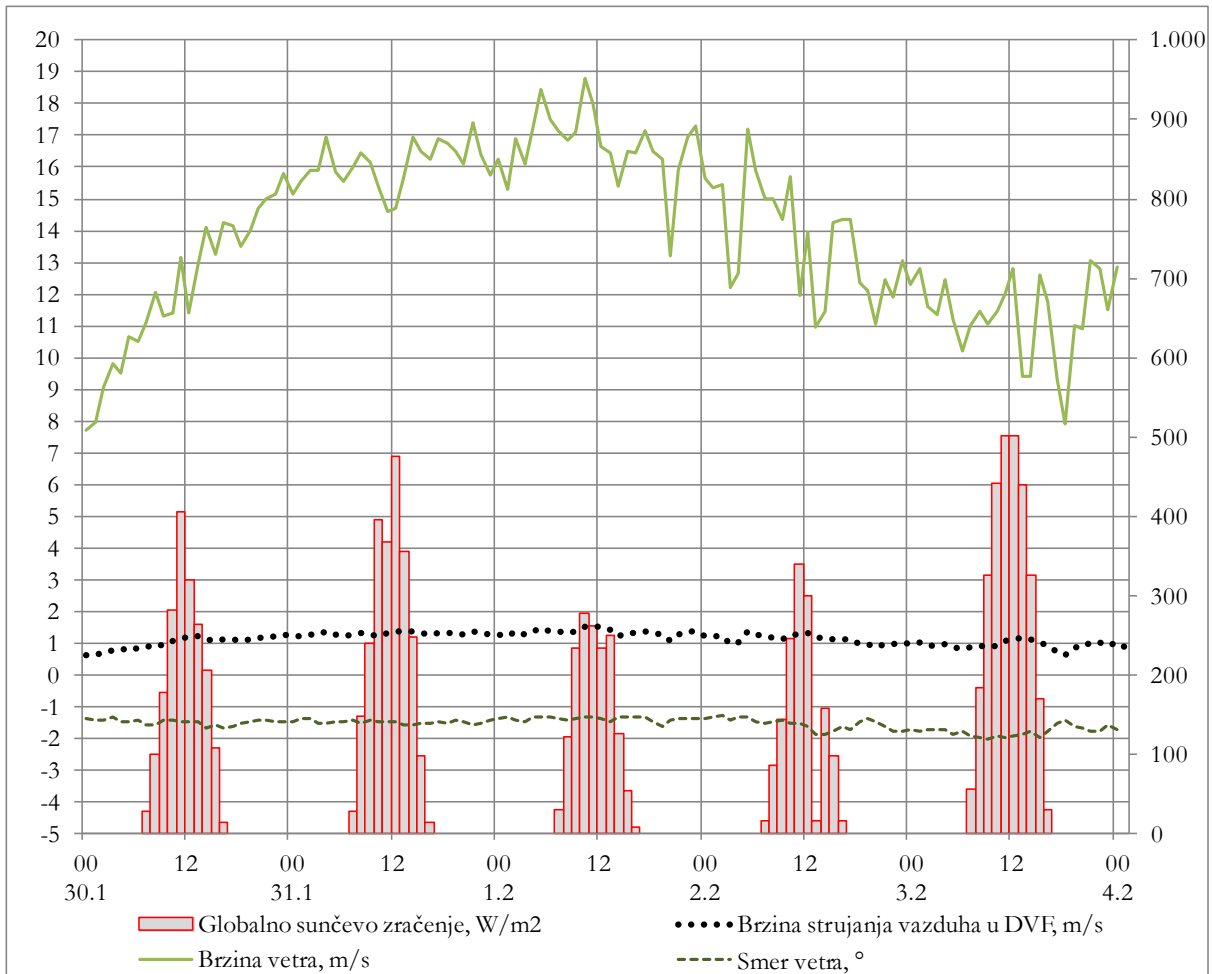
Na slici 3.3, prikazana je međusobna zavisnost (trend) između globalnog sunčevog zračenja i temperature vazduha u DVF. Što je intenzivnije zračenje, to su više i temperature vazduha u DVF. Pored toga, primetno je da se nivo korelacije ovih parametara poboljšava u slučaju viših vrednosti globalnog sunčevog zračenja. Nasuprot tome, za niže vrednosti zračenja ($<250 \text{ W/m}^2$) rasutost vrednosti temperatura vazduha u DVF je veća.



Slika 3.3: Tipičan trend prosečnih vrednosti temperatura vazduha u DVF u funkciji globalnog sunčevog zračenja (24.01. - 06.02.2014.)

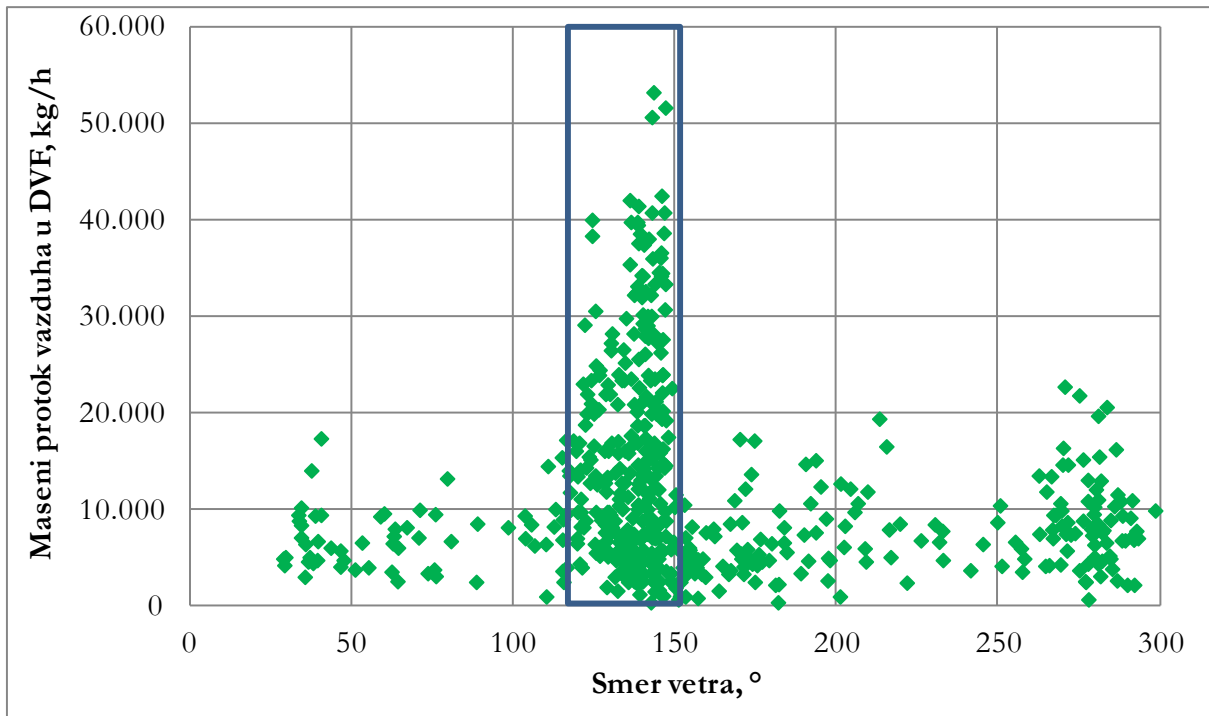
Na slici 3.4, prikazana je zavisnost brzine vazduha u DVF od uticaja vetra i sunčevog zračenja, kada je uticaj vetra bio najizraženiji (30.01.-04.02.2014.). U tom periodu bila je prisutna jaka košava iz pravca istoka i jugo-istoka (od 120 do 155°) jačine do 20 m/s . Kao što se može videti na slici 3.4 dominantan uticaj na brzinu vazduha u DVF ima dejstvo vetra, dok je uticaj sunčevog zračenja mali i primetan je samo u delovima dana sa većom insolacijom. Vrednosti brzina strujanja vazduha u DVF kreću se u intervalu od $0,08$ do $1,52 \text{ m/s}$. Vrednosti od oko 1 m/s i preko javljaju su se izuzetno, zbog jakih udara vetra (preko 10 m/s). Prosečne vrednosti brzina strujanja vazduha na ulazu u fasadu (prva zona) su u intervalu od $0,25$ do $0,33 \text{ m/s}$. Kako vazduh prolazi kroz fasadu, njegovo strujanje se ustaljuje i brzine se smanjuju (zanemariv je uticaj prirodnog uzgona zbog malog intenziteta zračenja u toku zime). Prosečne vrednosti brzine vazduha u sredini (druga zona) i na izlazu (treća zona) su u intervalu od $0,09$ do $0,15 \text{ m/s}$.

Treba naglasiti da je orijentacija posmatrane fasade severo-istok, što dodatno umanjuje uticaj vetra. Takođe, zbog ovakve orijentacije, dobici od sunčevog zračenja će biti intenzivniji u prvom delu dana. Analizom izmerenih rezultata se može konstatovati da konstrukcija DVF značajno štiti objekat od negativnog uticaja snažnog vetra. Na ovaj način uticaj vetra je praktično eliminisan.



Slika 3.4: Prikaz uticaja vetra i sunčevog zračenja na brzinu vazduha u DVF (30.01. - 04.02.2014.)

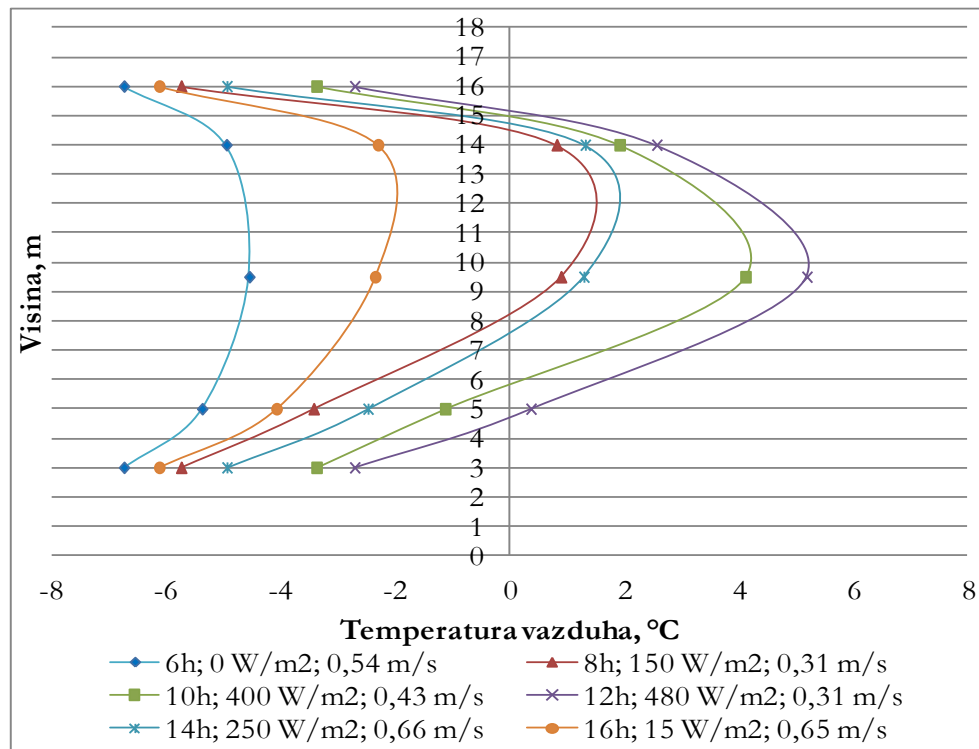
Na slici 3.5, prikazan je uticaj smera vetra na maseni protok vazduha u DVF (kg/h). Primetno je da su najviše vrednosti protoka zabeležene kada je u pitanju najsnažniji vetar u zimskom periodu (košava). Za posledicu imamo više vrednosti protoka kada su u pitanju veće brzine vetra. Upadni uglovi vetra na severo-istočnu fasadu objekta, u toku ove analize, iznosili su od 2° do 42° . Zaključak je da fasada nije bila pod punim i direktnim udarom vetra.



Slika 3.5: Prikaz uticaja vetra na maseni protok vazduha u DVF (zimski režim)

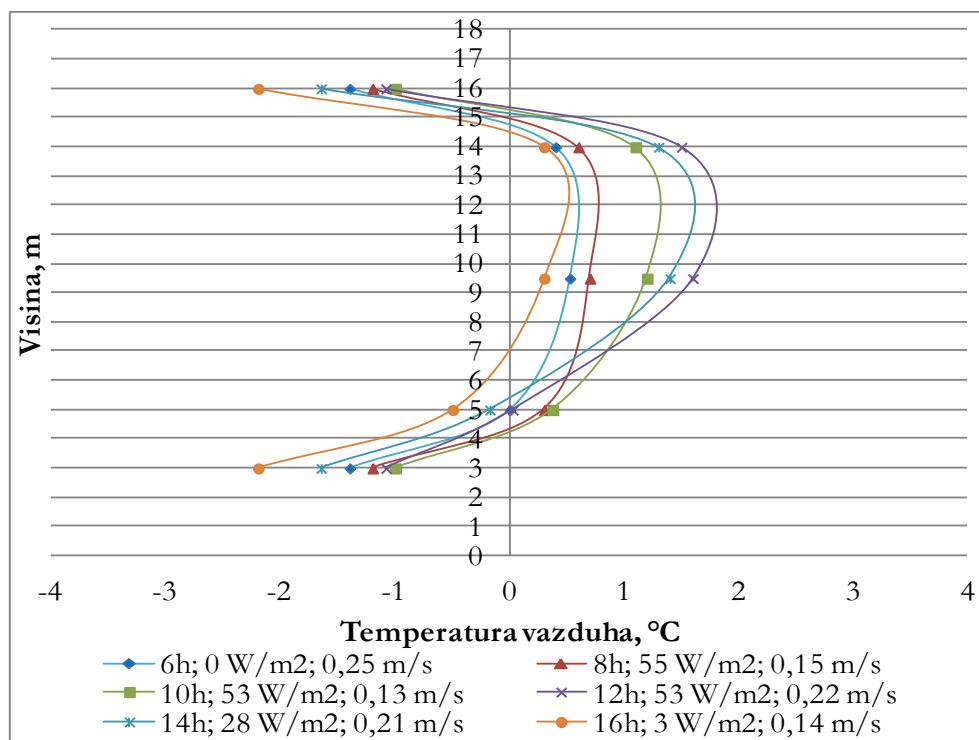
Na slici 3.6, prikazan je vertikalni gradijent temperature DVF za tipičan hladan i sunčan zimski dan. Kao funkcija ove promene u obzir je uzet vremenski period u toku posmatranog dana koga karakterišu dva najuticajnije parametara, spoljašnja temperatura vazduha i globalno sunčevo zračenje. Takođe, na slici 3.4 mogu se videti i trenutne usrednjene vrednosti brzine vazduha u DVF. Temperature vazduha na visini od 3 i od 16 m, predstavljaju temperaturu spoljašnjeg vazduha. Vrednosti temperatura vazduha između 5 i 14 m, predstavljaju temperature u DVF.

Primećuje se da se maksimalne temperature vazduha beleže u gornjoj polovini DVF. Ovaj trend se pomera u smislu povećanja temperature za veće vrednosti trenutnog globalnog sunčevog zračenja. Moguće je primetiti da su najviše temperature vazduha u DVF, kada je intenzitet sunčevog zračenja najjači. Za vrednost maksimalnog dnevnog globalnog sunčevog zračenja od 480 W/m^2 , registrujemo temperature vazduha u DVF od $5,2^\circ\text{C}$, pri spoljašnjoj temperaturi vazduha od $-2,7^\circ\text{C}$. Primetno je, da kako vrednosti zračenja variraju, na taj način se ponašaju i temperature vazduha u DVF. Ovo nam ukazuje da intenzitet sunčevog zračenja predstavlja ključni faktor promene temperature vazduha u DVF u toku zimskog perioda. Takođe, vidi se pad temperature vazduha na izlasku iz DVF, čiji uzrok je otvorena fasada i uticaj hladnog spoljašnjeg vazduha. Može se zaključiti da zbog nemogućnosti regulacije DVF, nemamo potpunu iskorišćenost ovog fasadnog rešenja. Zatvaranjem fasade u toku hladnih i vetrovitih zimskih dana, bili bismo u mogućnosti da još više smanjimo gubitke toplote.



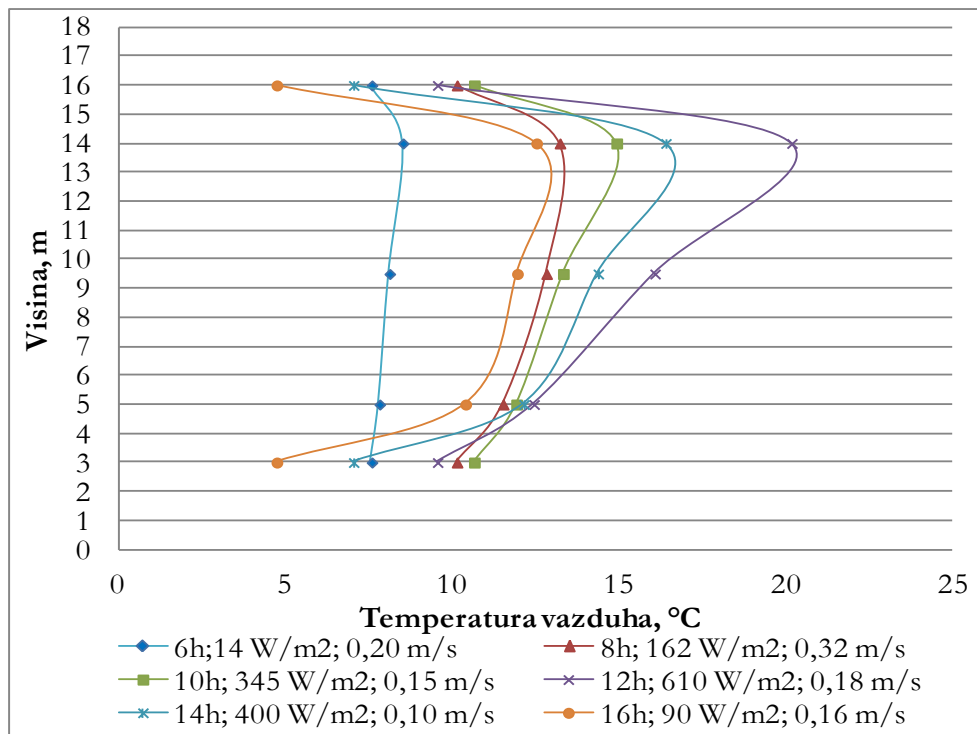
Slika 3.6: Vertikalni gradijent temperature u DVF za tipičan hladan i sunčan zimski dan (31.01.2014.)

Na slikama 3.7, 3.8 i 3.9, vide se promene gradijenta temperature vazduha za tipičan hladan i oblačan zimski dan, za tipičan topao i sunčan zimski dan i za tipičan topao i oblačan zimski dan. Na slici 3.7, vidi se kako dominantan uticaj na temperaturu vazduha u DVF ima spoljašnja i unutrašnja temperatura vazduha, pošto je intenzitet trenutnog globalnog sunčevog zračenja nizak (oblačan dan).

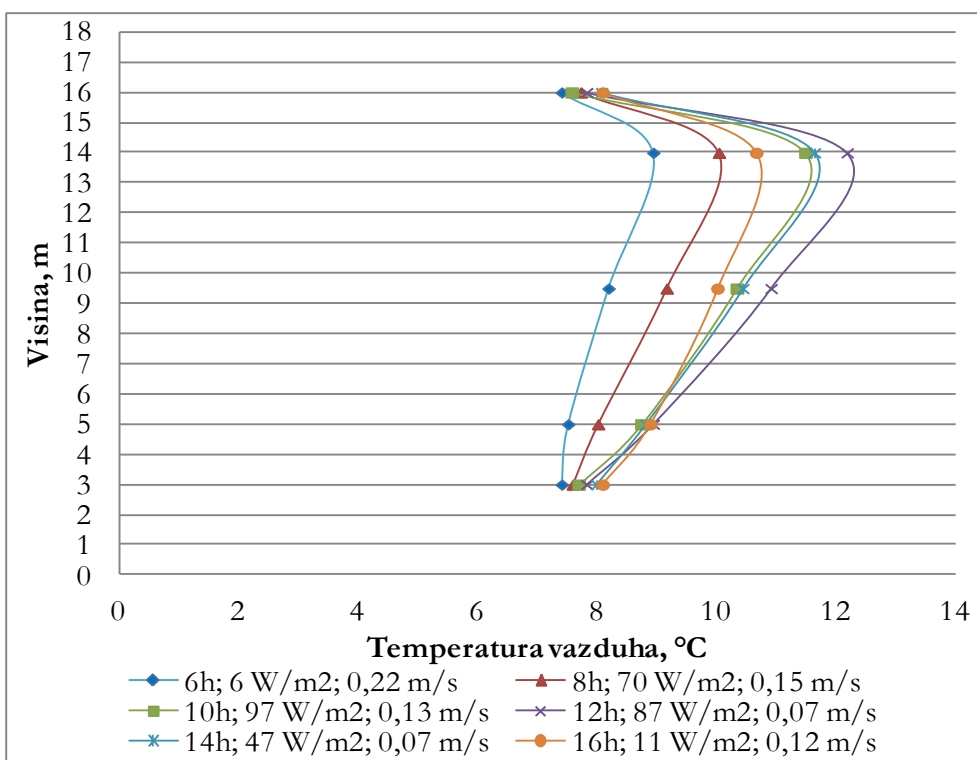


Slika 3.7: Vertikalni gradijent temperature u DVF za tipičan hladan i oblačan zimski dan (25.01.2014.)

Na slici 3.8, vidi se, kada je u pitanju tipičan topao i sunčan zimski dan, da dominantan uticaj na temperaturu vazduha u DVF ima intenzitet trenutnog globalnog sunčevog zračenja (sunčan dan). Viša spoljašnja temperatura vazduha samo doprinosi povećanju temperature vazduha u DVF, tako da i u gornjim delovima DVF imamo povećanje temperature vazduha, što nije slučaj kod 3.6.



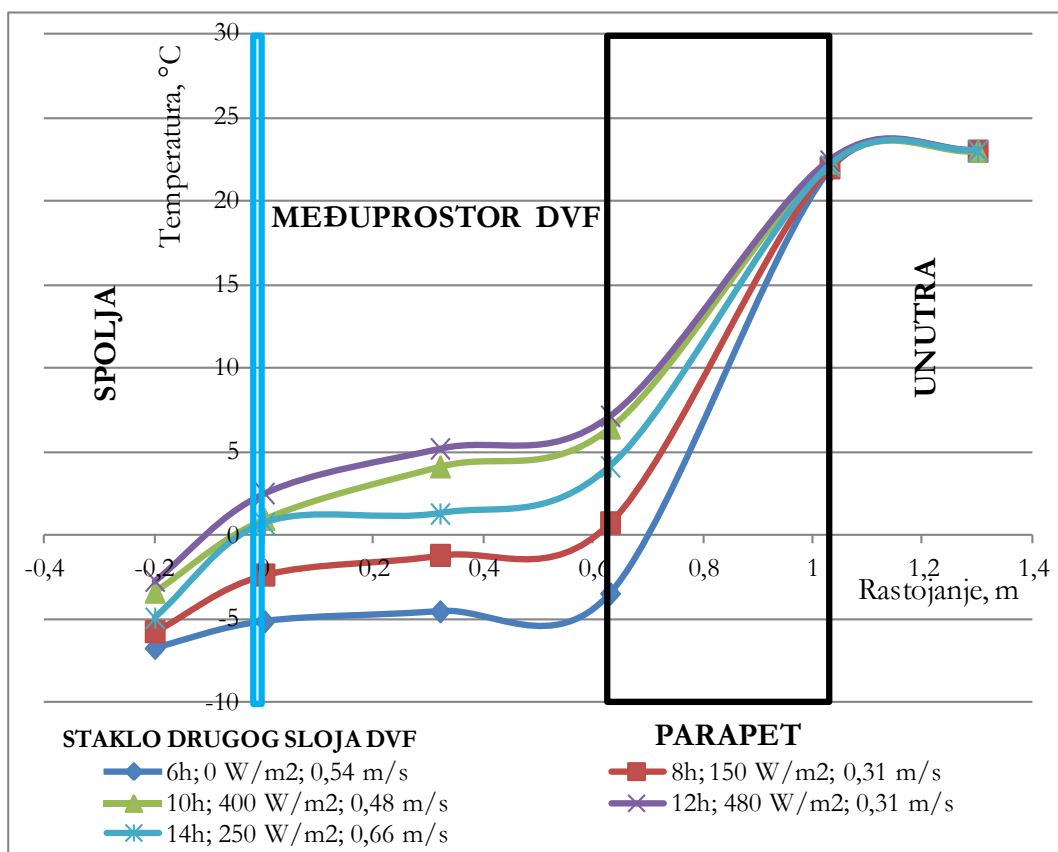
Slika 3.8: Vertikalni gradijent temperature u DVF za tipičan topao i sunčan zimski dan (25.02.2014.)



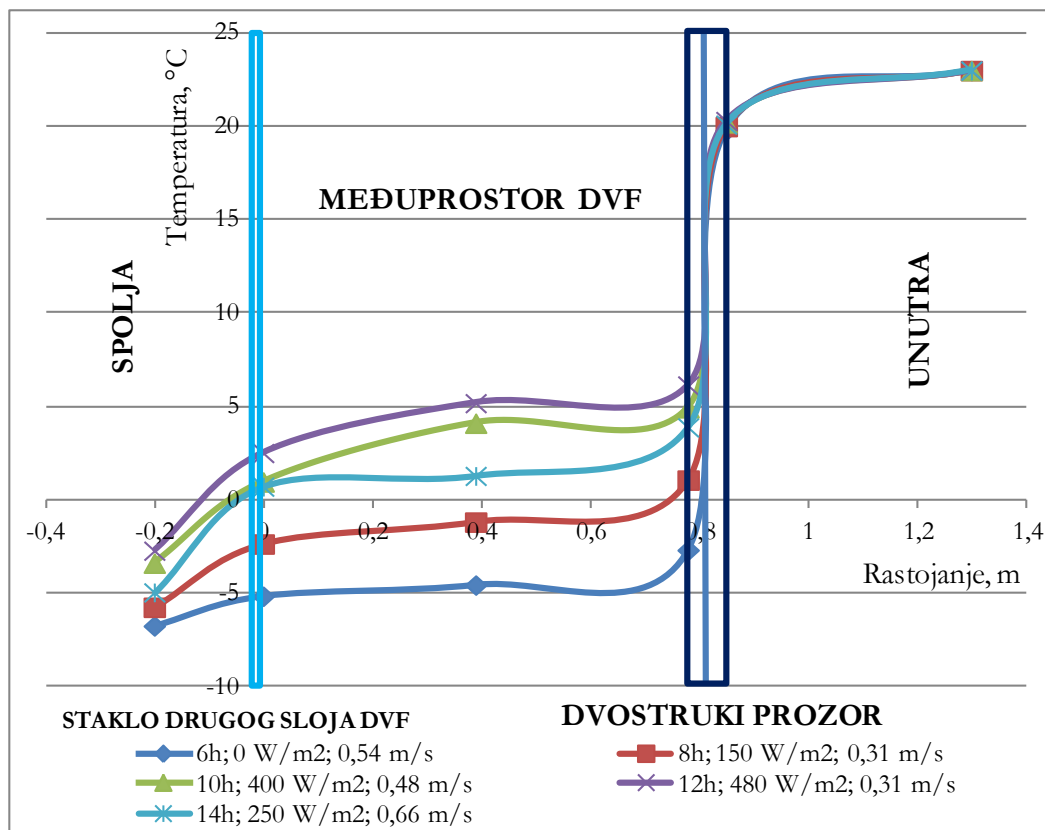
Slika 3.9: Vertikalni gradijent temperature u DVF za tipičan topao i oblačan zimski dan (06.03.2014.)

Na slici 3.9, prikazan je gradijent temperature za tipičan topao i oblačan zimski dan. Zaključak je, da je za ovakav tip dana najuticajniji faktor vrednost spoljašnje temperature vazduha i da je gradijent temperature u međuprostoru DVF uvek u porastu.

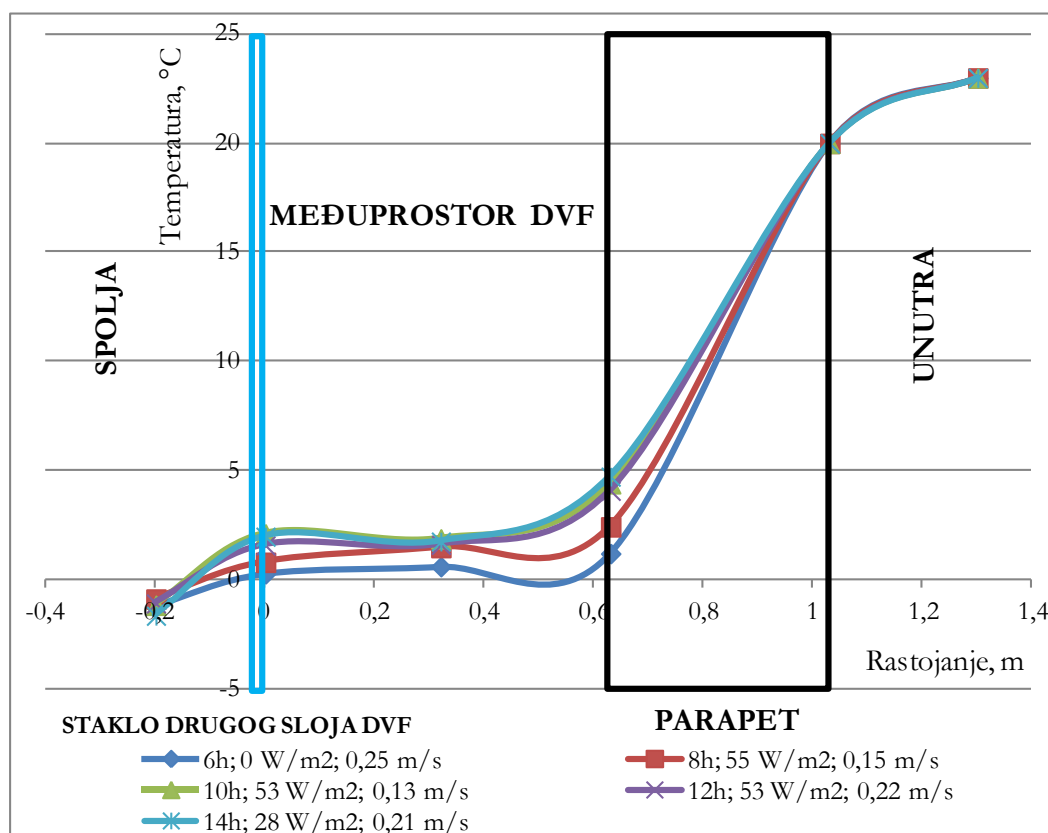
Kako bi još detaljnije utvrdili na koji način DVF utiče na transmisionu i ventilacionu gubitku toplote objekta u toku zimskog režima, na dijagramima su prikazani horizontalni trendovi temperatura za tipične dane u periodu od 24.01. do 21.03.2014. godine. Na slikama (3.10-3.18), prikazane su prosečne časovne vrednosti temperatura vazduha i pregrada. Ovi podaci predstavljaju dnevnu promenu temperature unutrašnjeg dela stakla pridodatog sloja DVF, temperature vazduha u DVF i temperature površine osnovnog sloja DVF (parapet+dvostruki prozor) u zavisnosti od spoljašnjih (temperatura vazduha, sunčevo zračenje i uticaj vetra) i unutrašnjih uslova (temperatura vazduha u prostoriji), za tipične dane u toku zimske sezone.



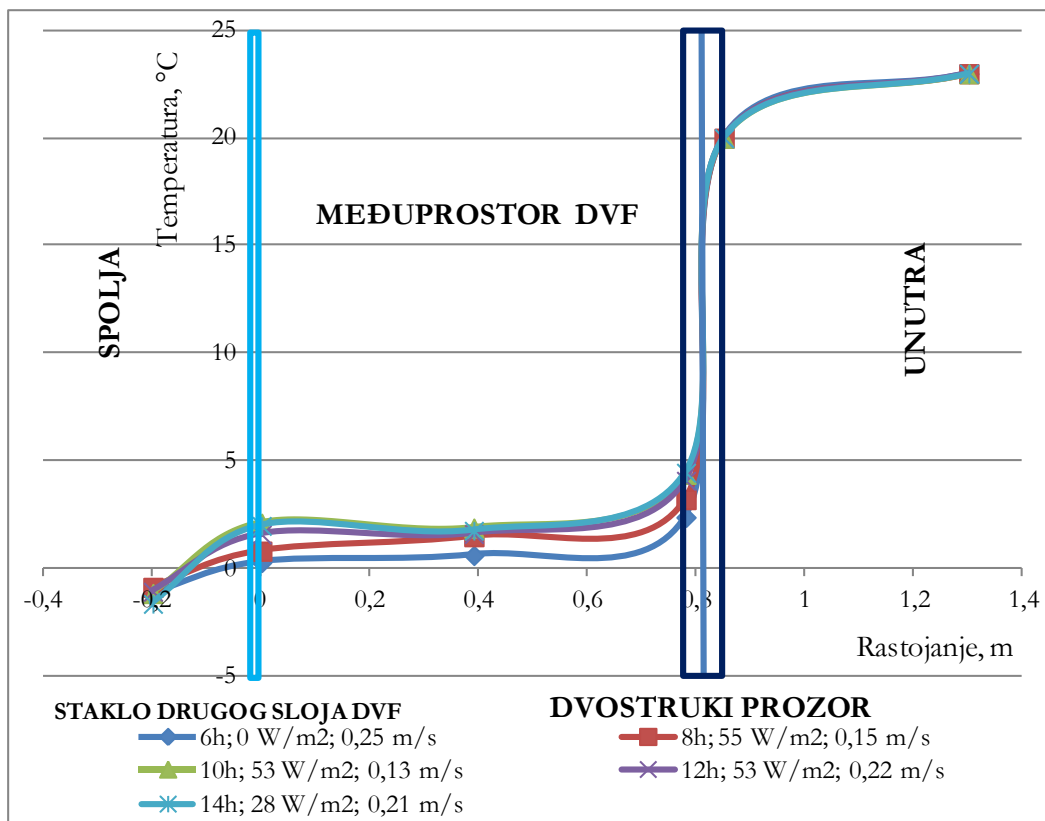
Slika 3.10: Horizontalni trend temperature u DVF (PARAPET) za tipičan hladan i sunčan zimski dan (31.01.2014.)



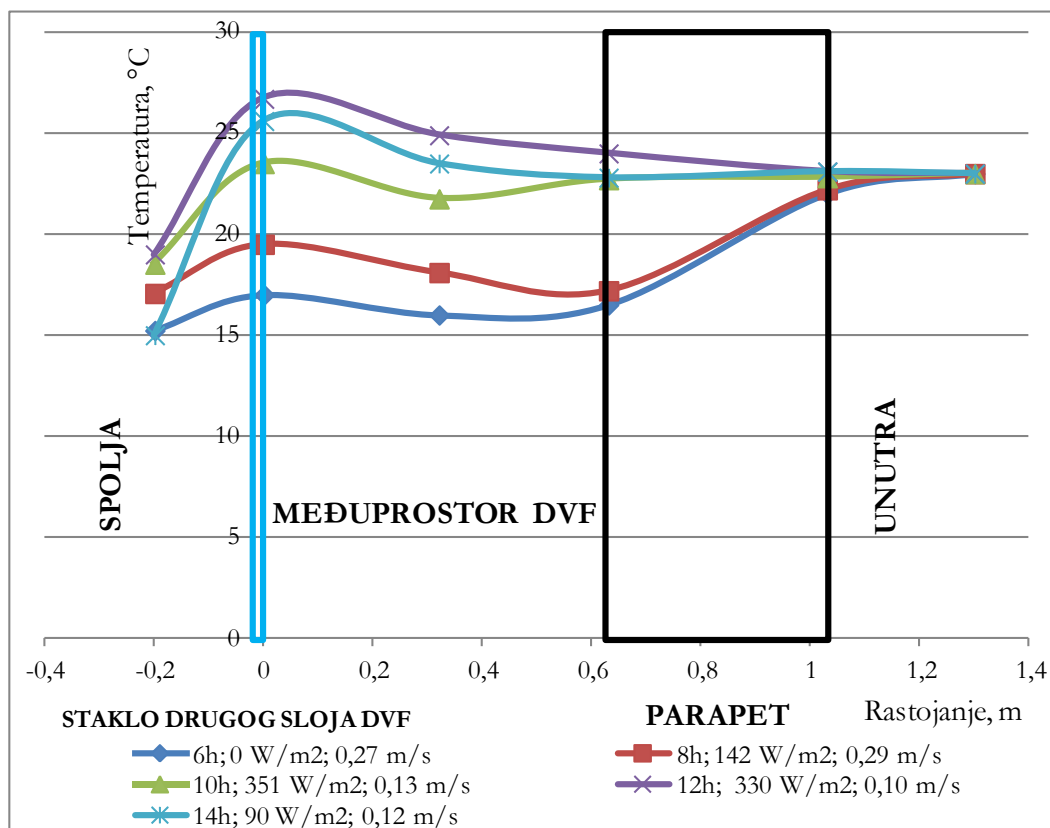
Slika 3.11: Horizontalni trend temperature u DVF (DVOSTRUKI PROZOR) za tipičan hladan i sunčan zimski dan (31.01.2014.)



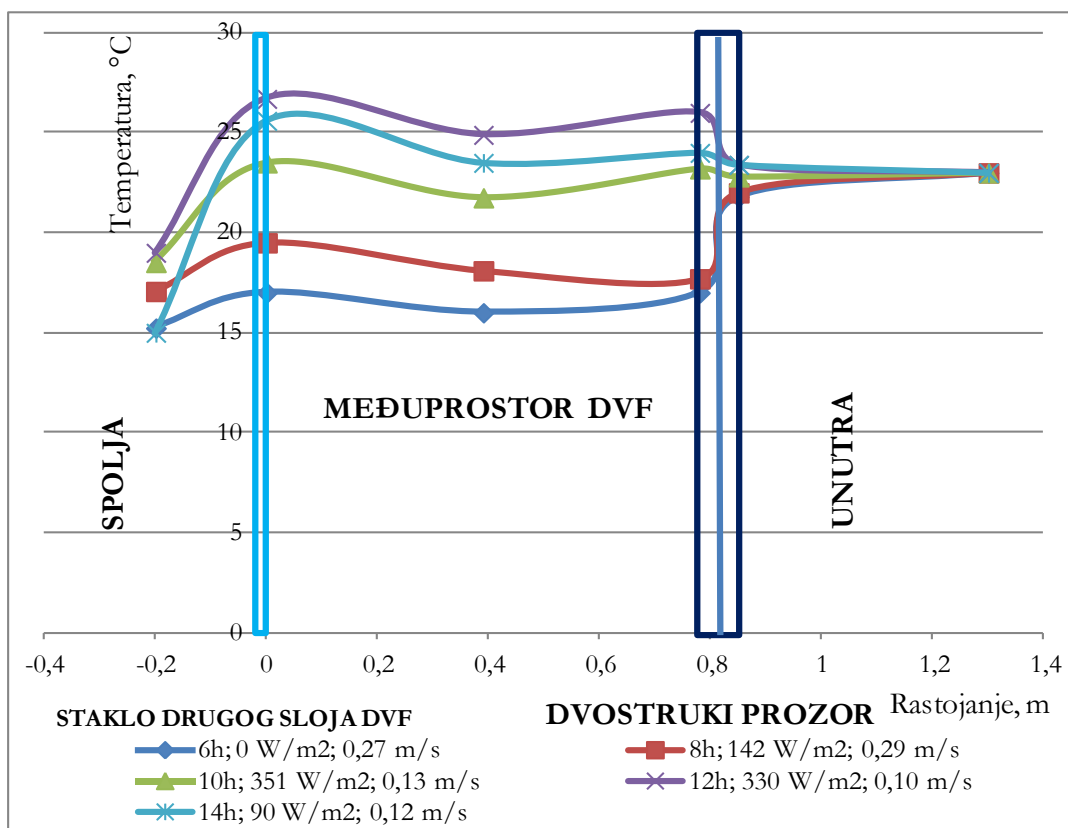
Slika 3.12: Horizontalni trend temperature u DVF (PARAPET) za tipičan hladan i oblačan zimski dan (25.01.2014.)



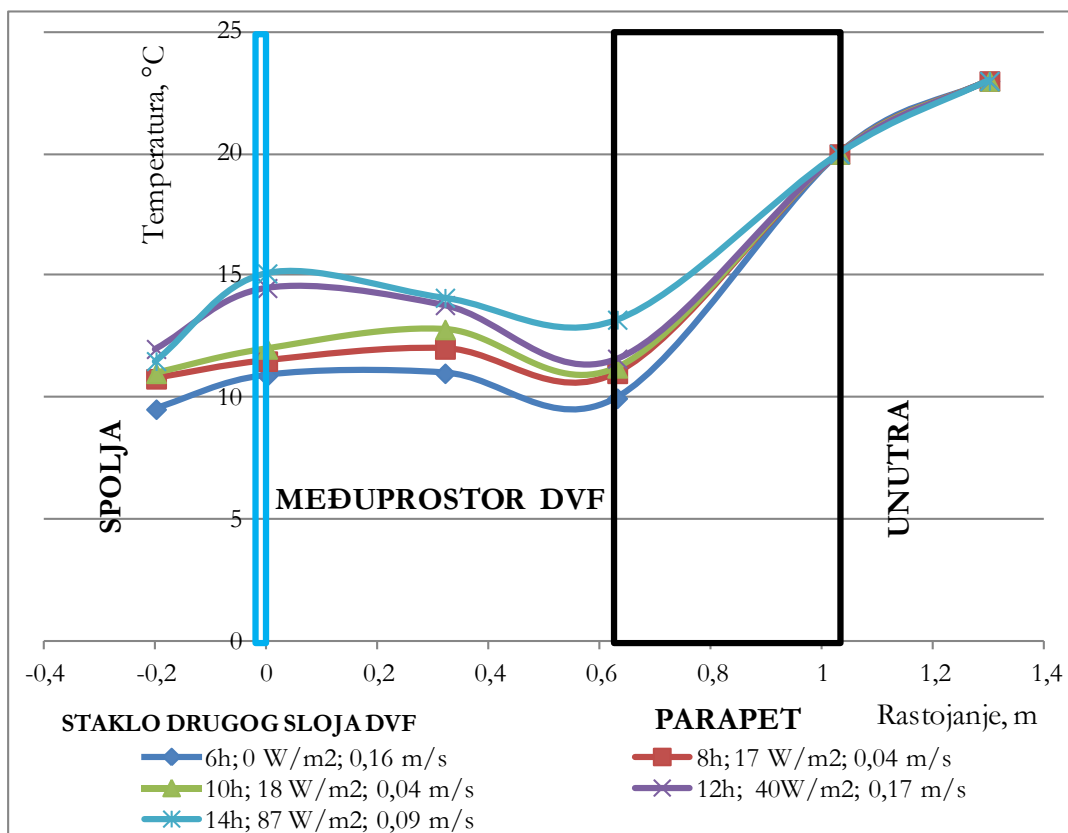
Slika 3.13: Horizontalni trend temperature u DVF (DVOSTRUKI PROZOR) za tipičan hladan i oblačan zimski dan (25.01.2014.)



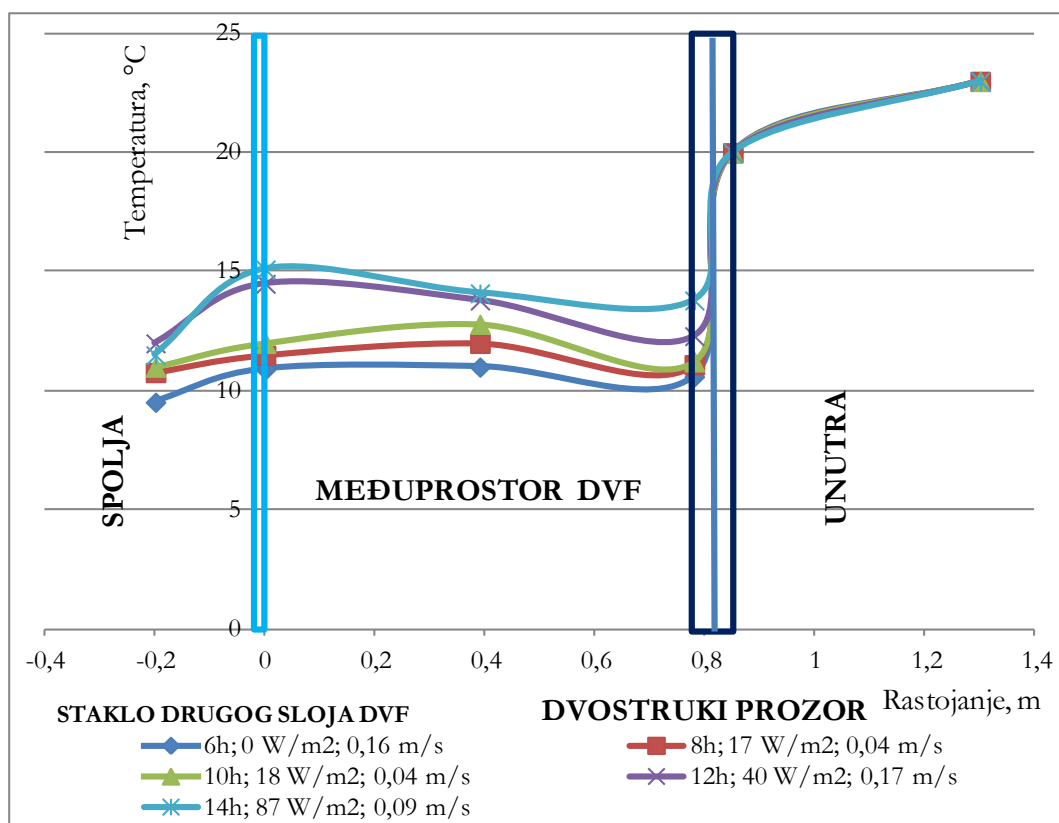
Slika 3.14: Horizontalni trend temperature u DVF (PARAPET) za tipičan topao i sunčan zimski dan (12.02.2014.)



Slika 3.15: Horizontalni trend temperature u DVF (DVOSTRUKI PROZOR) za topao i sunčan zimski dan (12.02.2014.)



Slika 3.16: Horizontalni trend temperature u DVF (PARAPET) za tipičan topao i oblačan zimski dan (20.02.2014.)



Slika 3.17: Horizontalni trend temperature u DVF (DVOSTRUKI PROZOR) za topao i oblačan zimski dan (20.02.2014.)

Analizirajući podatke prikazane na prethodnim slikama, jasno se uočava da je, u toku zimskog režima, zadatak pridodatog sloja DVF da prihvati sunčevo zračenje (kada je to moguće) i u skladu sa tim poveća temperaturu vazduha i ostalih površina fasade. Na ovaj način smanjuju se toplotni gubici objekta i pojačava se uticaj sunčevog zračenja na prosečnu brzinu vazduha u DVF (strujanje usled sile uzgona - "buoyancy effect"). Naravno, na ovu brzinu utiče i vetar, tako da konačna vrednost brzine vazduha u međuprostoru DVF nastaje kao kombinacija ova dva uticaja. Kako se intenzitet sunčevog zračenja povećava (prelazni i letnji režim), uticaj ("buoyancy effect") je intenzivniji. Iz tog razloga na slikama su prikazane i izmerene vrednosti brzina vazduha u međuprostoru DVF.

Evidentno je da i za niske vrednosti spoljašnjih temperatura vazduha (-3°C) pri sunčanom danu (480 W/m^2), temperatura vazduha u međuprostoru DVF ne prelazi 5°C (slike 3.10 i 3.11). Kako se ova temperatura povećava, dolazi do redukcije toplotnog protoka koji se kreće od objekta ka spoljašnjosti. Takođe, ovaj efekat se pojačava kako su vrednosti zračenja više, što rezultuje značajnim smanjenjem toplotnih gubitaka objekta. Zaključak je da, u toku zimskog režima, više brzine strujanja vazduha u međuprostoru nisu poželjne, zato što bi povećan konvektivni prenos toplote između vazduha i elemenata DVF snizio temperature u DVF. Još veće uštede donela bi mogućnost regulacije međuprostora fasade (zatvorena/otvorena).

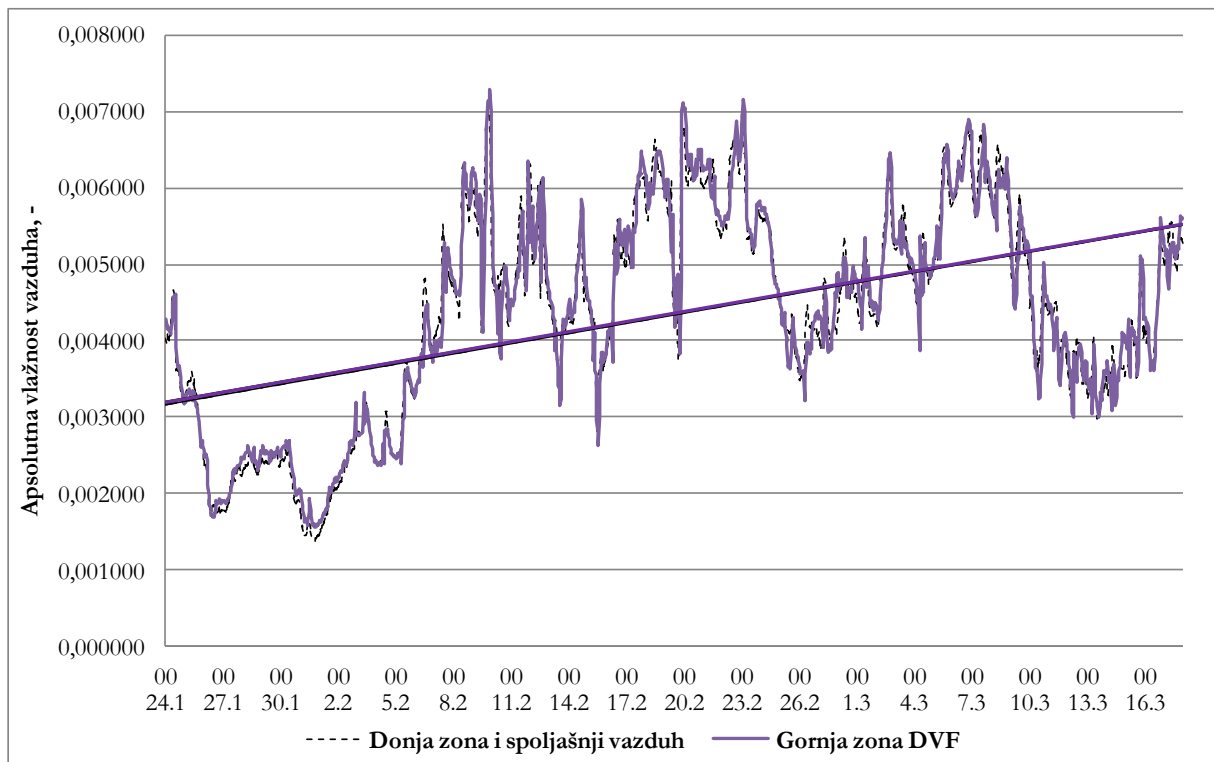
Vrednosti temperatura u DVF su niže u toku oblačnih dana, ili u periodima sa nižim intenzitetom sunčevog zračenja (slike 3.12 i 3.13).

Za slučaj toplog i sunčanog zimskog dana (slike 3.14 i 3.15), primećuje se interesantan profil temperatura (slučaj kada je razlika spoljašnje i unutrašnje temperature u granicama od $4\text{--}7^{\circ}\text{C}$). U toku istog dana pojavljuju se oba smera toplotnog protoka. U 6 i 8h toplotni protok se kreće od objekta ka spoljašnjosti (toplotni gubici), a u 10, 12 i 14h toplotni protok se kreće suprotno tako

da imamo toplotne dobitke od uticaja DVF. Ovaj slučaj suprotnog toplotnog protoka dokazuje pozitivan efekat DVF, kada ona postaje aktivna komponenta zagrevanja objekta. Iz tog razloga, pogotovo u predelima sa umerenom kontinentalnom klimom (visoke vrednosti sunčevog zračenja sa umerenim vetrovima), ovakva konstrukcija fasade može igrati značajnu ulogu u smanjenju potrošnje energije za grejanje.

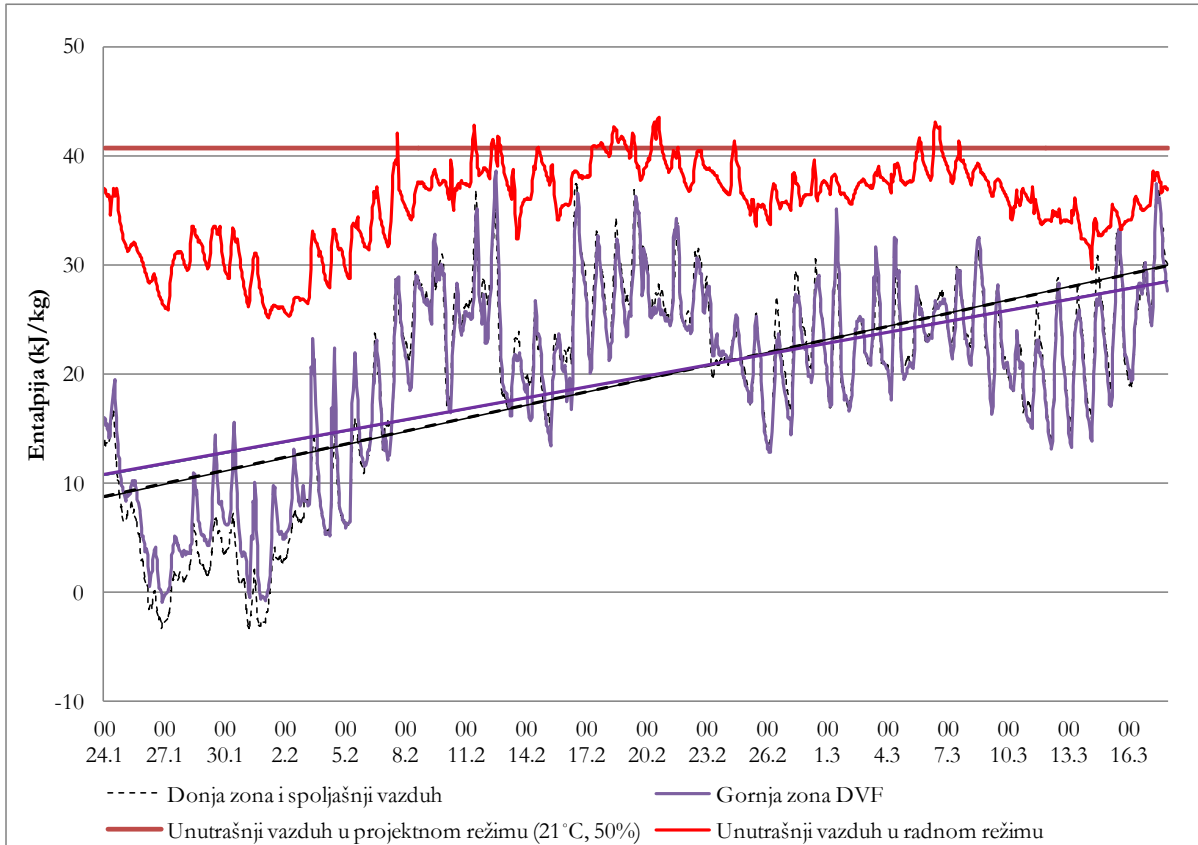
Vrednosti temperatura u DVF su niže u toku oblačnih dana, ili danima sa nižim intenzitetom sunčevog zračenja (slike 3.16 i 3.17) i smer toplotnog protoka ostaje isti.

Na slici 3.18, predstavljene su proračunate vrednosti apsolutne vlažnosti vazduha u donjoj i gornjoj zoni DVF, za ceo zimski režim. Prikazani rezultati potvrđuju tačnost merenja, pošto se trendovi linija ovih rezultata skoro u potpunosti poklapaju. Zaključak je da nema značajnog odstupanja, što predstavlja potvrdu visokog nivoa tačnosti izvršenih merenja.



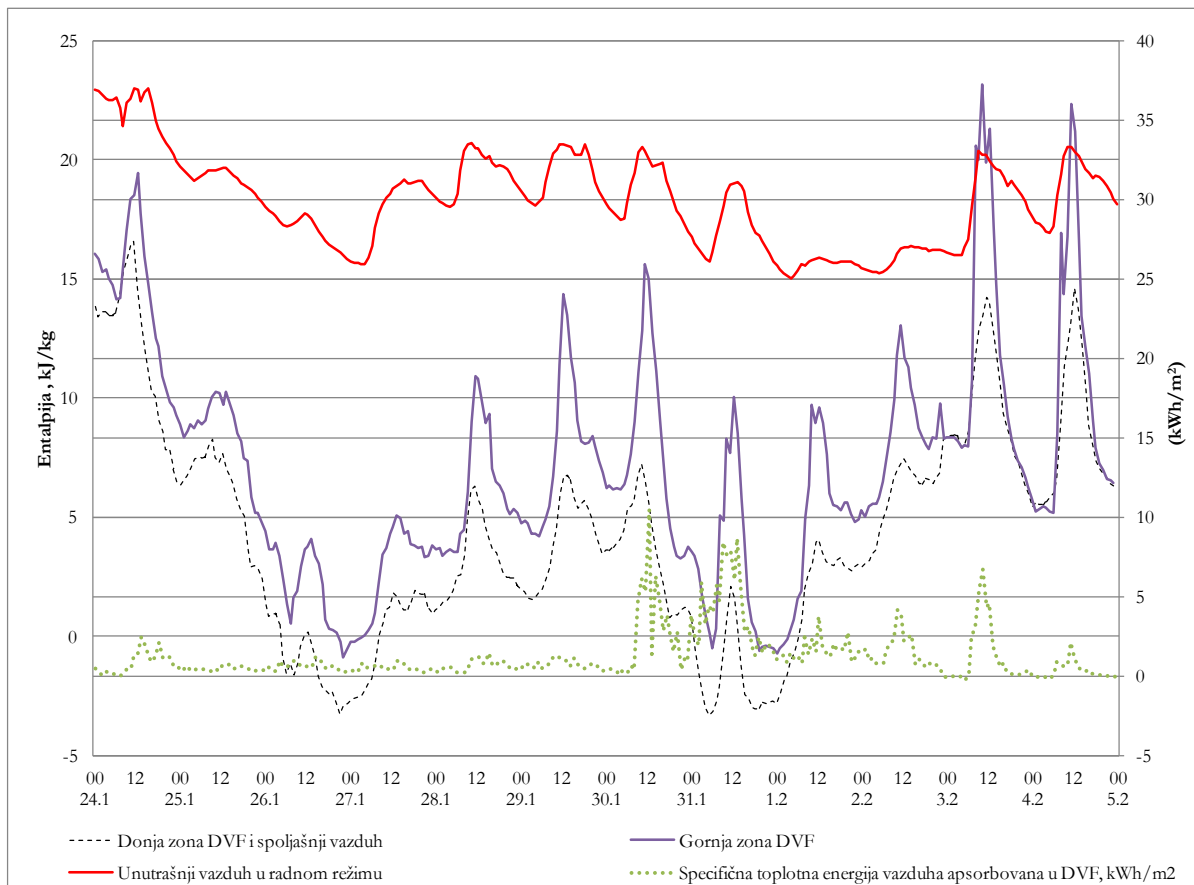
Slika 3.18: Proračunate vrednosti apsolutnih vlažnosti vazduha u donjoj i gornjoj zoni DVF za zimski režim

U skladu sa prethodno navedenom procedurom, prikazana je slika 3.19, na kojoj se vide proračunate vrednosti entalpija unutrašnjeg i vazduha u DVF. Ova slika, takođe, predstavlja i protok entalpije po visini DVF. Ono što treba napomenuti je da su vrednosti spoljašnjeg vazduha veoma bliske vrednostima u donjoj zoni DVF. Posmatrajući linije trendova, primetno je da u slučaju kada su niske temperature spolja, DVF ima funkciju smanjenja gubitaka toplote, jer se vrednosti entalpija u DVF povećavaju. Nasuprot tome, kada su u pitanju topliji i sunčani dani, DVF ima zaštitnu ulogu, pošto se vrednosti entalpija smanjuju. Međutim, pošto su u to vreme relativno niske spoljašnje temperature (ne prelaze 15°C), zaštita koju formira DVF na neki način blokira dobitke toplote, koji bi u tom periodu bili značajni za smanjenje transmisionih gubitaka. Ovaj uticaj DVF biće detaljnije razmatran u prelaznom i letnjem režimu, kada treba smanjiti rizike od pregrevanja.

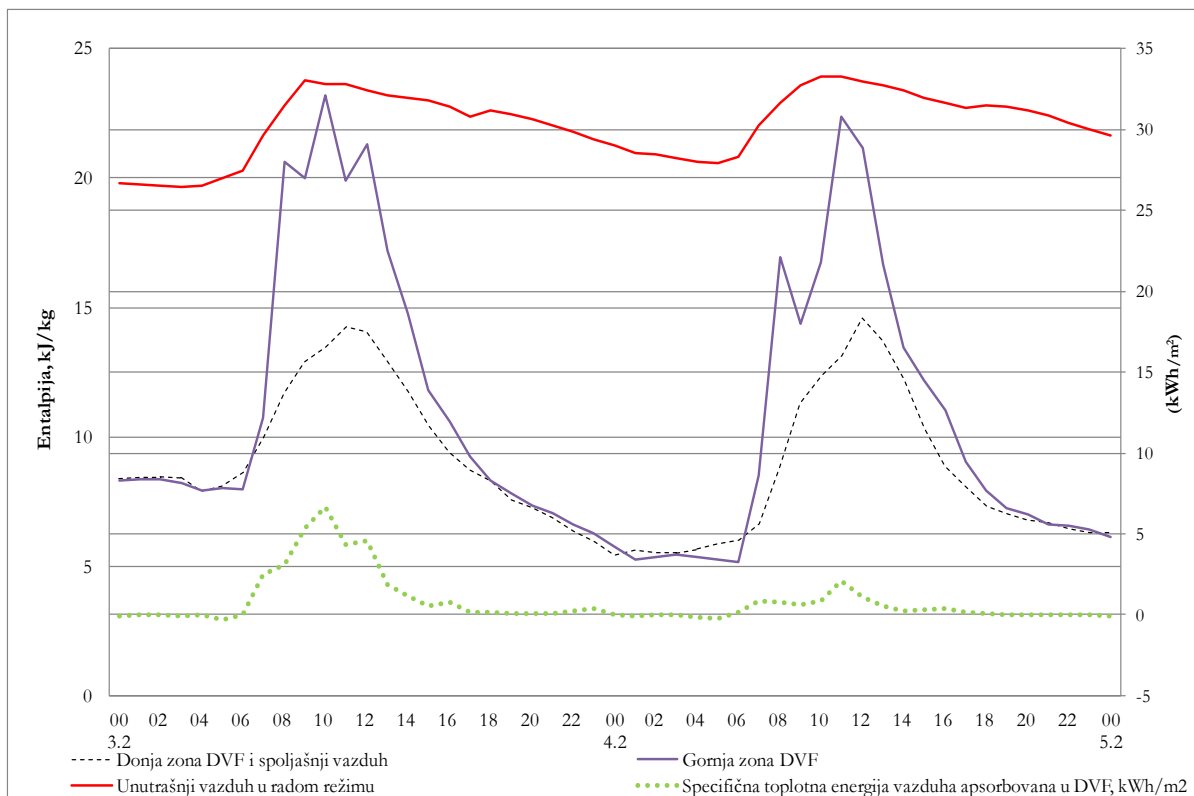


Slika 3.19: Proračunate vrednosti entalpija unutrašnjeg i vazduha u DVF za zimski režim

Dakle, zaključak je da, iako DVF nije regulisana, postoje uštede nastale usled prisustva dodatnog sloja fasade. Na slici 3.20, prikazan je izbrani deo zimskog režima, gde se ostvaruju najveći dobici toplote nastali uticajem DVF. Linija specifične toplotne energije vazduha apsorbovane u fasadi po m^2 otvora (formula 3.7), predstavlja energetska promenu vazduha od njegovog ulaza do izlaza iz fasade. Primećuje se da u velikoj većini vremena, usled pozitivnog uticaja fasade, vazduh apsorbuje energiju koja ima potencijal za smanjenje gubitaka toplote. U okviru ovog perioda, uočen je kontradiktoran interval, gde se pojavljuju negativne vrednosti toplotnog protoka, slika 3.21 (3. i 4. februar od 00 do 07h). Dubljom analizom utvrđeno je, da je razlog negativnih vrednosti nastao usled visokih vrednosti brzina vetra (od 10 - 15 m/s), što je za posledicu imalo više brzine vazduha u međuprostoru DVF (1,2 - 1,5 m/s). Takođe, spoljašnje temperature su bile relativno niske (oko $-1^{\circ}C$), što dovodi do zaključka da DVF nije mogla da u dovoljnoj meri zagreje vazduh. Kasnije, u toku dana, usled visokog intenziteta sunčevog zračenja, specifični protok entalpije vazduha se izrazito povećao. Promena toplotne energije vazduha nastaje i zbog dejstva vetra, odnosno zbog razlike u brzinama strujanja vazduha u međuprostoru DVF.



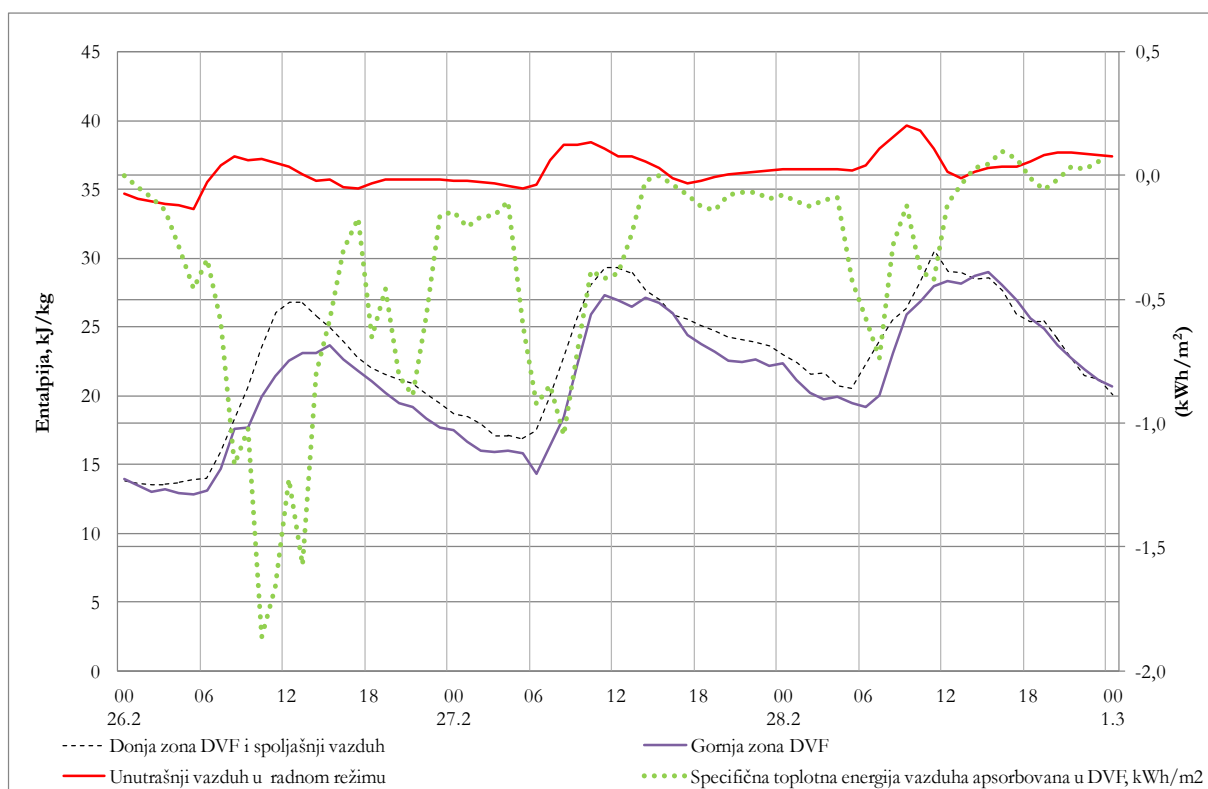
Slika 3.20: Izabrani period zimskog režima - više vrednosti entalpija



Slika 3.21: Izabrani period zimskog režima - delovi sa negativnim vrednostima toplotnog protoka

Zaključak je, da regulacijom otvora fasade u zimskom režimu, treba u što većoj meri eliminisati visoke vrednosti brzine strujanja vazduha. Njihov nastanak u ovom periodu je posledica jakih vetrova.

Za dalju analizu energetske performanse DVF, izabran je period sa sunčanim danima i visokim zimskim temperaturama (oko 15°C). Na slici 3.22, vidi se ponašanje DVF. U ovom slučaju fasada se ponaša kao zaštita, što pokazuju negativne vrednosti toplotnog protoka. Ove vrednosti nisu velike, ali efekat zaštite u ovom slučaju je negativan jer smanjuje dobitke toplote. Intenzitet toplotnog protoka varira i zbog uticaja brzine strujanja vazduha u DVF.



Slika 3.22: Izabrani period zimskog režima sa negativnim vrednostima toplotnog protoka

U toku celog zimskog režima, vrednosti entalpija vazduha u DVF ne prelaze vrednosti od 38 kJ/kg. U skladu sa tim podatkom, ne postoji mogućnost da se direktno vrši ubacivanje vazduha iz fasade u objekat, kako bi se podmirili projektni i radni uslovi komfora (slika 3.19). Kao mera za smanjenje potrošnje energije za grejanje, predlaže se direktno povezivanje DVF sa klima komorama, kako bi se umesto spoljašnjeg vazduha koristio vazduh iz fasade. Takođe, pre sprovođenja ove mere, neophodno je postaviti regulacione klapne, kako bi u ovom periodu, fasada mogla biti zatvorena. Na taj način vazduh iz fasade bi bio na još višem energetskom nivou što bi prouzrokovalo i veće uštede. Takođe, izbegli bi se slučajevi koji su prikazani na slikama 3.21 i 3.22.

Energetski gledano, na osnovu promene entalpije vazduha (formula 3.8), u toku zimskog perioda od 24. januara do 21. marta 2014. može se identifikovati karakter prisustva DVF. Prema prikazanoj metodologiji, dobijeni rezultati se razdvajaju na pozitivne (dobici toplote) i negativne (gubici toplote), gde se na kraju i sumiraju.

Ukupni toplotni dobitci generisani u vazduhu DVF iznose 6.110 kWh, dok sa druge strane, u toku istog perioda pojavljuju se intervali sa negativnim vrednostima, koji u sumi iznose 2.355 kWh. U

ukupnom zbiru dobija se pozitivna vrednost 3.875 kWh. Posmatrajući na prosečnom dnevnom nivou dobitak toplote iznosi 50,5 kWh/dan.

Prikazani rezultati pokazuju da se bez regulacije otvora DVF, mogu pojaviti znatne vrednosti gubitaka toplote. Glavni razlog ove pojave je povećana brzina strujanja vazduha u međuprostoru fasade, što intenzivira razmenu i odvođenje toplote. Na kraju, zaključak je da je i pored određenog smanjenja toplotnih gubitaka, neophodnost regulacije otvora DVF ključna u povećanju energetske efikasnosti fasade.

3.2.1 TERMOVIZIJSKO SNIMANJE OMOTAČA OBJEKTA U TOKU ZIMSKOG REŽIMA

Termovizija je naučna disciplina koja se bavi prikupljanjem i analizom termičkih karakteristika objekata preko slika, odnosno termograma koji nastaju bez uspostavljanja direktnog fizičkog kontakta. Ova tehnika omogućava merenje i vizuelnu prezentaciju temperaturskog polja posmatrane površine. Primena termovizije u sektoru zgradarstva je široka i najčešće se koristi za analizu stanja omotača i termičkih performansi objekata [2]. U ovom slučaju termovizijsko snimanje se koristi kako bi se utvrdile vrednosti temperatura celokupnog omotača objekta.

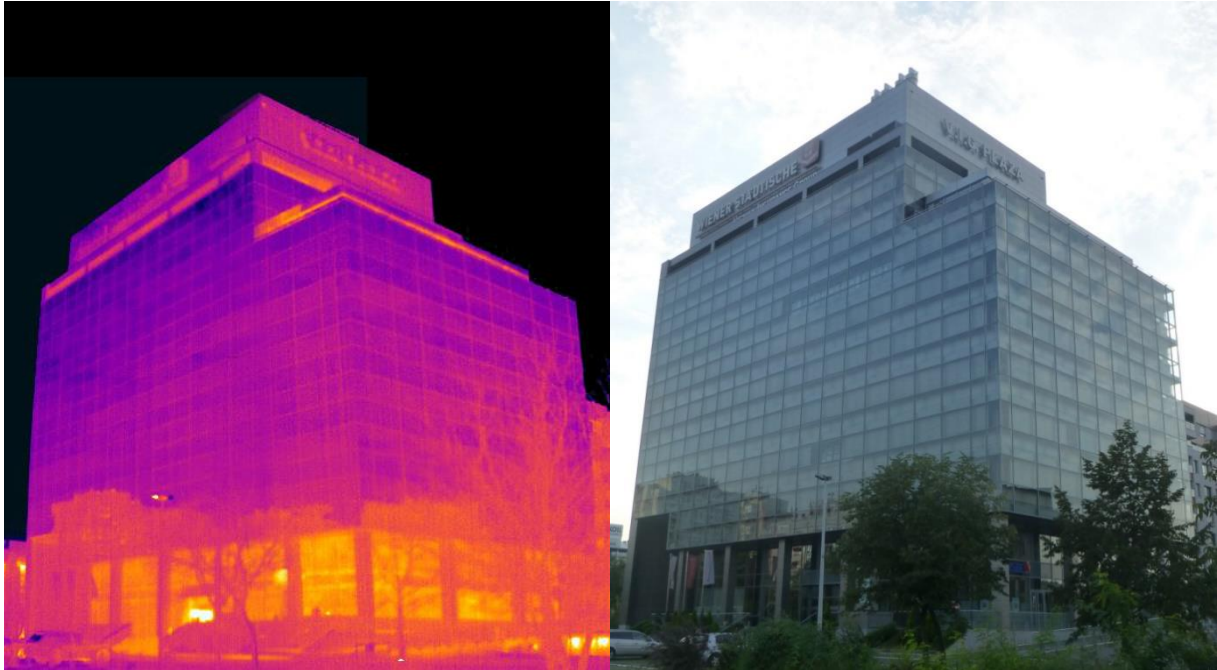
Za potrebe termovizijskog snimanja objekta koristi se kamera proizvođača "Flir", model ThermaCAM B20 [5]. Ona je namenski dizajnirana za primenu snimanja omotača građevinskih objekata. Operativna je u rangu 7,5-13 μm , na temperaturama od -15 do 50°C, sa tačnošću od $\pm 2\%$. Kako bi kamera bila u mogućnosti da registruje infracrveno zračenje koje emituje površina, ona može da meri razlike temperatura ispod 0,08°C. Kamera poseduje standardno sočivo od 24° i omogućava snimanje objekata obradom preko FPA ("Focal Plane Array") mikrobolomera, uz ulaznu digitalnu sliku dimenzija 320/240 piksela. To znači da za svaki od 76.800 izlaznih piksela možemo, u kasnijoj analizi fotografije preko odgovarajućeg softvera (FLIR Tools+, [5]), dobiti informacije o očitanim vrednostima. Koristeći posebne analitičke alate (markirane tačke, regione, izoterme...), podaci se do detalja obrađuju i vrši se njihovo upoređivanje. Oprema korišćena u ovom istraživanju pripada dugotalasnoj klasi, koja se preporučuje za upotrebu na otvorenom prostoru.

U cilju dobijanja adekvatnih rezultata, merenja moraju biti izvršena kada je temperaturska razlika minimalno 15°C. Takođe, neophodno je održavanje stabilne unutrašnje temperature. Pre snimanja kamera je podešena prema trenutnim uslovima. To se odnosi na unos trenutnih vrednosti temperatura i vlažnosti vazduha, kao i rastojanje do objekta. Snimanje se obavlja sa reflektor metodom, faktor emisivnosti je postavljen na 0,93. Kako bi se izbegli problemi sa sunčevim zračenjem, snimanje je obavljeno noću. Unutrašnji i spoljašnji uslovi u toku merenja su pogodovali, da dobijeni rezultati budu pouzdan pokazatelj stanja i uticaja fasade objekta (spoljašnja temperatura oko 0°C, visoka oblačnost, noćni režim i umereno jak vetar oko 3 m/s). Temperatura u objektu je u proseku bila oko 23°C. Sve procedure i radnje prilikom merenja i analize rezultata su u skladu sa standardom EN 13187 [4].

Cilj sprovedenog termovizijskog snimanja je da se utvrdi u kakvom stanju se nalazi omotač objekta, kako bi se pronašle (ako postoje) kritične tačke. Takođe, sa aspekta gubitaka toplote, cilj je da se uporede delovi fasade sa jednostrukom "zid zavesom" i delovi omotača sa DVF. Merenjem se utvrđuje da li i u kojoj meri se menja trend temperature po površini (širini i visini) DVF.

Osnovni deo konstrukcije posmatranog objekta je armirano-betonski skeletni sistem sa zidanom ispunom. Parapetni sloj izrađen je od "Yutong" bloka koji je obložen mineralnom vunom. Na

izolaciju su postavljeni aluminijumski "Alukobond" profili sa vazдушnim međuprostorom od 10 cm. Osnovni sloj fasade, pored parapeta, čine i visokokvalitetni aluminijumski prozori. Na delovima fasade objekta orijentisanim severo i jugo-istok, postavljen je dodatni stakleni omotač koji formira prirodno ventilisanu dvostruku fasadu. Prizemlje objekta urađeno je po principu "zid zavese". Termovizijska i digitalna slika kompletnog objekta prikazana je na slici 3.23. Svi detalji o karakteristikama omotača zgrade mogu se pronaći u poglavlju 2.2.

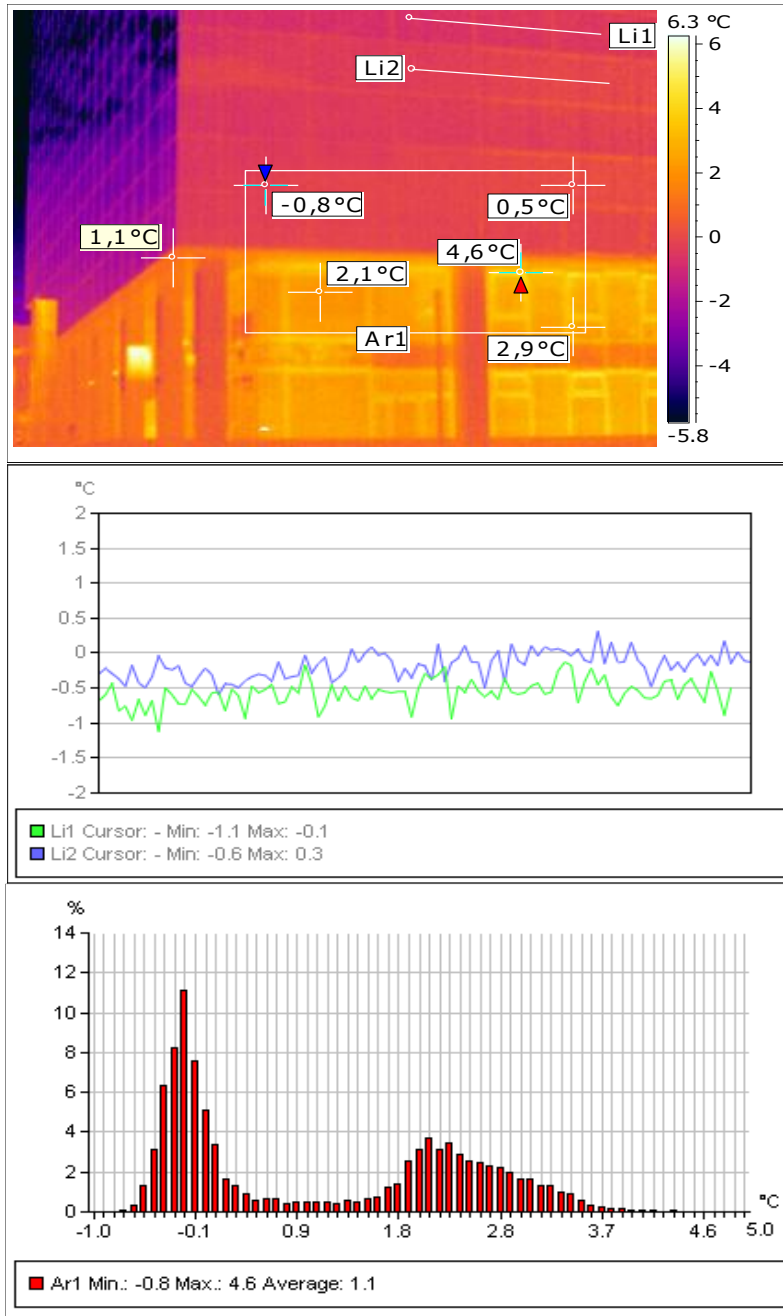


Slika 3.23: Termovizijska i digitalna slika objekta VIG Plaza

Termovizijskim snimanjem iz različitih udaljenosti i iz više uglova, zabeležena je celokupna kontura objekta. Na snimcima se može primetiti nekoliko termičkih pozicija, koje predstavljaju refleksiju na staklenu površinu od susednih objekata i dekorativne rasvete. Sama kamera, na većim daljinama teže kompenzuje refleksiju sa nisko-emisivnih površina, kao što je posmatrana staklena fasada, što svakako utiče na kvalitet rezultata. Temperature koje se mogu očitati sa termograma, a koje su niže od temperature spoljašnjeg vazduha, nastale su usled efekta refleksije i ne predstavljaju relevantan podatak za termičku sliku fasade.

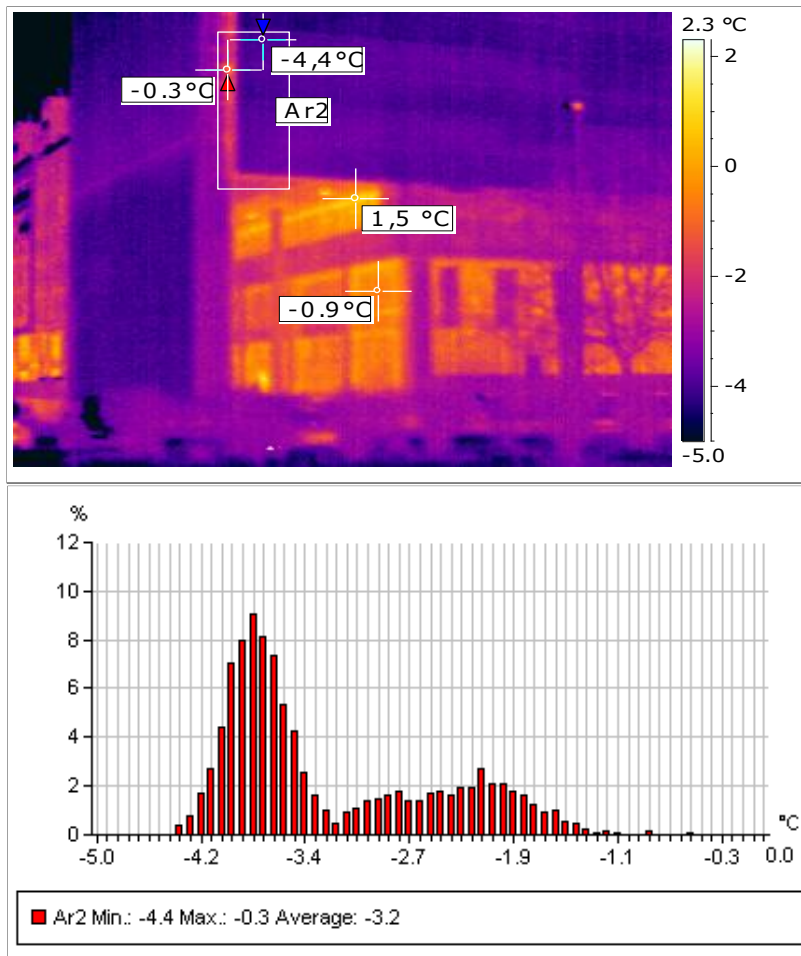
Termovizijski snimak objekta prikazuje kvalitetno izrađenju DVF, gde se praktično ne vide nikakvi gubici, kao i deo omotača prizemlja koji predstavlja transparentnu "zid zavesu". Kod DVF, gubici se praktično i ne vide, pre svega što se međuprostor fasade može posmatrati kao negrejani deo. U toku termovizijskog snimanja, temperature vazduha u međuprostoru su se kretale u intervalu od 4-5°C. Vrednost temperature spoljašnjeg vazduha je bila oko 0°C. Detaljne vrednosti meteoroloških parametara, kao i temperatura svih pregrada i vazduha u toku merenja, mogu se videti u poglavlju 3.2. Po visini i širini DVF, slika 3.24, postoje samo minimalna odstupanja temperatura, koja nastaju usled nehomogenosti osnovnog sloja fasade (parapet+dvostruki prozor). Razlike u temperaturama su u intervalu od 0,1 do 0,9°C. Takođe, promena temperature nastaje i usled prisutnog vertikalnog temperaturskog gradijenta vazduha u međuprostoru. Najviše vrednosti temperatura vazduha su u središnjoj zoni fasade (detaljnije u poglavlju 3.2).

U prizemlju, u slučaju dela omotača sa "zid zavesom", i pored korišćenja visoko kvalitetnih tehničkih rešenja, mogu se primetiti gubici, uglavnom na mestima spajanja sa drugim elementima obloge. Takođe, primećuje se da su gubici veći u odnosu na deo omotača sa DVF (slika 3.24).



Slika 3.24: Detalj i analiza termograma severo-istočne fasade objekta

Doprinos DVF u smanjenu gubitaka toplote objekta primećuje se na detalju (slika 3.25). Povećani gubici toplote se uočavaju zbog razlike u karakteristikama materijala (lim i staklo).



Slika 3.25: Detalj i analiza termograma jugo-istočne fasade objekta

Detaljni snimci (slike 3.24 i 3.25) jasnije pokazuju razlike u termičkim karakteristikama dvostruke i "zid zavesa" fasade. U uokvirenom polju Ar1, detektuju se temperature od $-0,8$ do $4,6^{\circ}\text{C}$. Najveći gubici (linijski) se primećuju na spojevima stakla i aluminijuma, na prizemlju objekta. Što se tiče uokvirenog polja Ar2, više temperature (oko $-0,3^{\circ}\text{C}$) su zabeležene na mestu gde se završava DVF (lim), dok se niže temperature (oko $-4,4^{\circ}\text{C}$) primećuju na spoljašnjem staklu dodatnog sloja fasade. Temperature koje su zabeležene na termogramu su niže od temperature spoljašnjeg vazduha, zbog problema sa refleksijom.

Ono što treba naglasiti je da ventilisana fasada nije pogodna za termografske analize. Glavni razlog je to, što u sklopu fasade postoji vazdušni međuprostor koji proizvodi efekat da nema kontinualnog prenosa toplote kondukcijom do završnog sloja DVF.

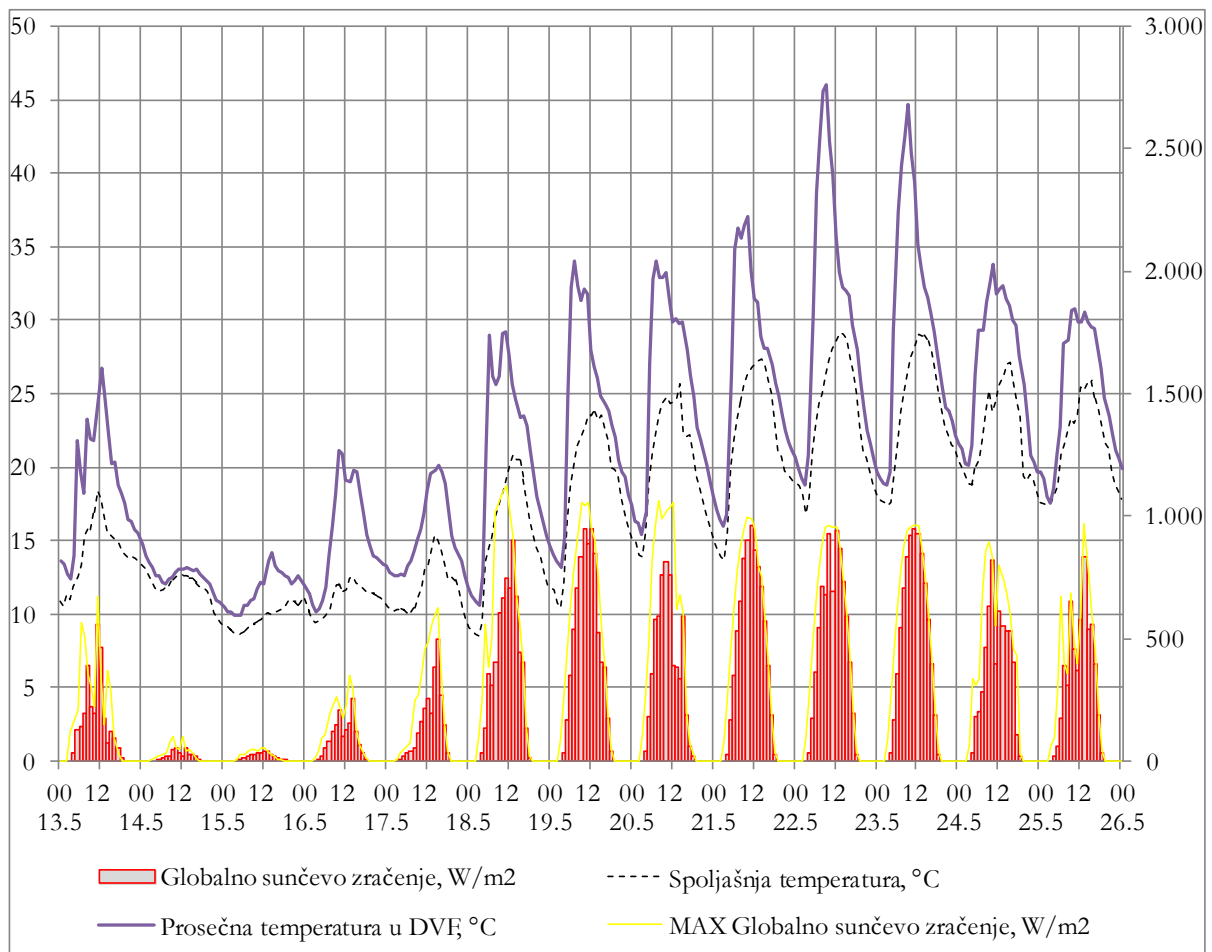
3.3 ANALIZA REZULTATA U PRELAZNOM REŽIMU

Prelazni režim podrazumeva kalendarsko trajanje proleća (21.03-21.06.2014.). U okviru ovog intervala, sa aspekta spoljašnjih temperatura (interval od 5 do 32°C), u samom objektu bili su periodi sa grejanjem i periodi sa klimatizacijom. Izmerena temperatura u kancelarijama u toku prelaznog režima varira u opsegu od 22 - 26°C . Venecijaneri u DVF su lokalno regulisani, u zavisnosti od spoljašnjih uslova.

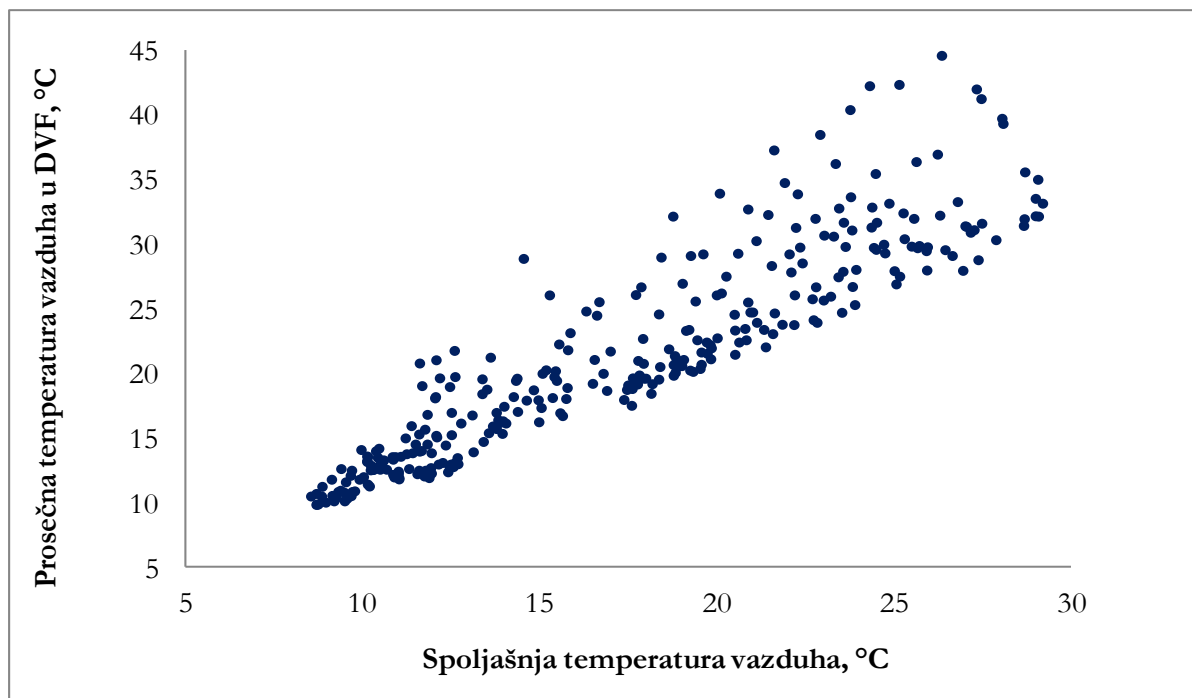
Na slici 3.26, prikazan je izabrani period koji oslikava prosečne i ekstremne karakteristike prelaznog režima. Može se uočiti zavisnost promene temperature vazduha u DVF od spoljašnjih (temperatura i globalno sunčevo zračenje) i unutrašnjih (temperatura u kancelariji) uslova.

Primećuje se, da je pri niskim spoljašnjim temperatura i slabijem intenzitetu sunčevog zračenja, razlika između spoljašnje i temperature u fasadi mala (od 0,3 do 5,1°C). U slučajevima kada imamo više spoljašnje temperature i veće vrednosti insolacije, ova razlika dostiže i 12°C. U periodu od 22.05. do 24.05.2014. godine, dogodio se specijalan slučaj, kada su zbog kvara bile spuštene protivpožarne klapne. Kao posledica, nastalo je dodatno zagrevanje međuprostora fasade i taj porast je iznosio skoro 20°C u odnosu na temperaturu spoljašnjeg vazduha. Ovaj podatak nam potvrđuje činjenicu da je neophodno, u skladu sa trenutnim spoljašnjim uslovima, regulisati otvorenost fasade kako bi se izbegli problemi pregrevanja ili pothlađivanja vazduha.

Slika 3.27, opisuje zavisnost temperature vazduha u DVF i spoljašnje temperature, gde se još preciznije mogu uočiti prethodno navedene razlike koje su u znatnoj meri veće nego u zimskom režimu.

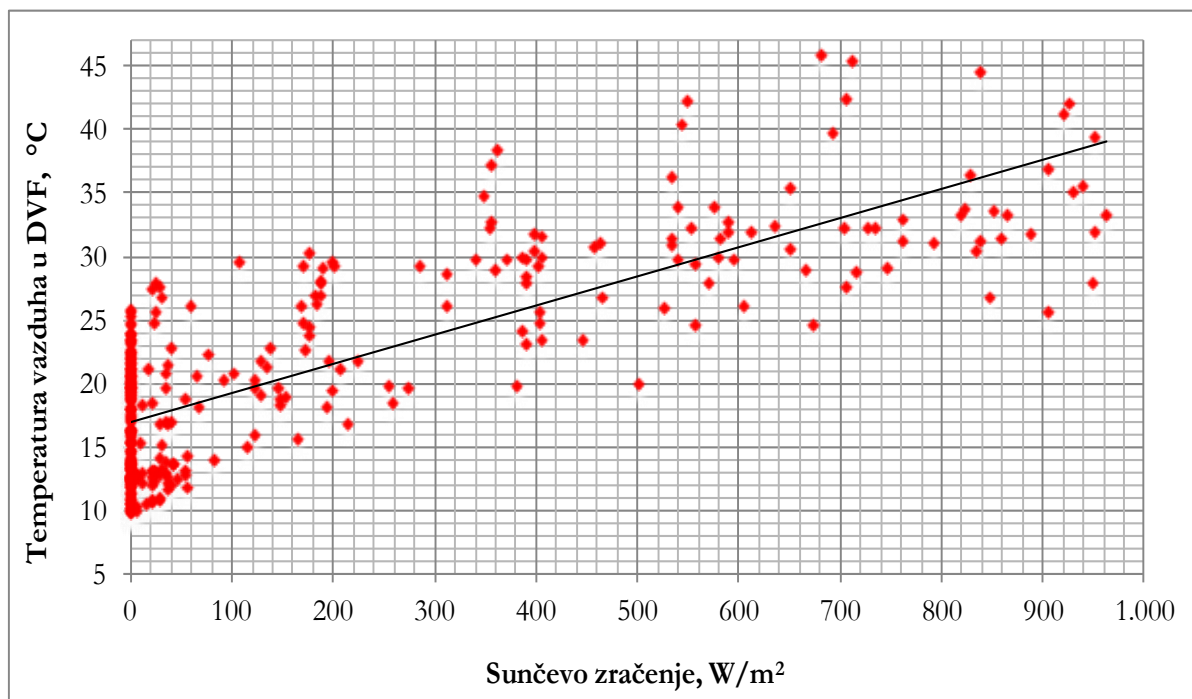


Slika 3.26: Prikaz dela merenja u toku prelaznog režima (13.05. - 26.05.2014.)



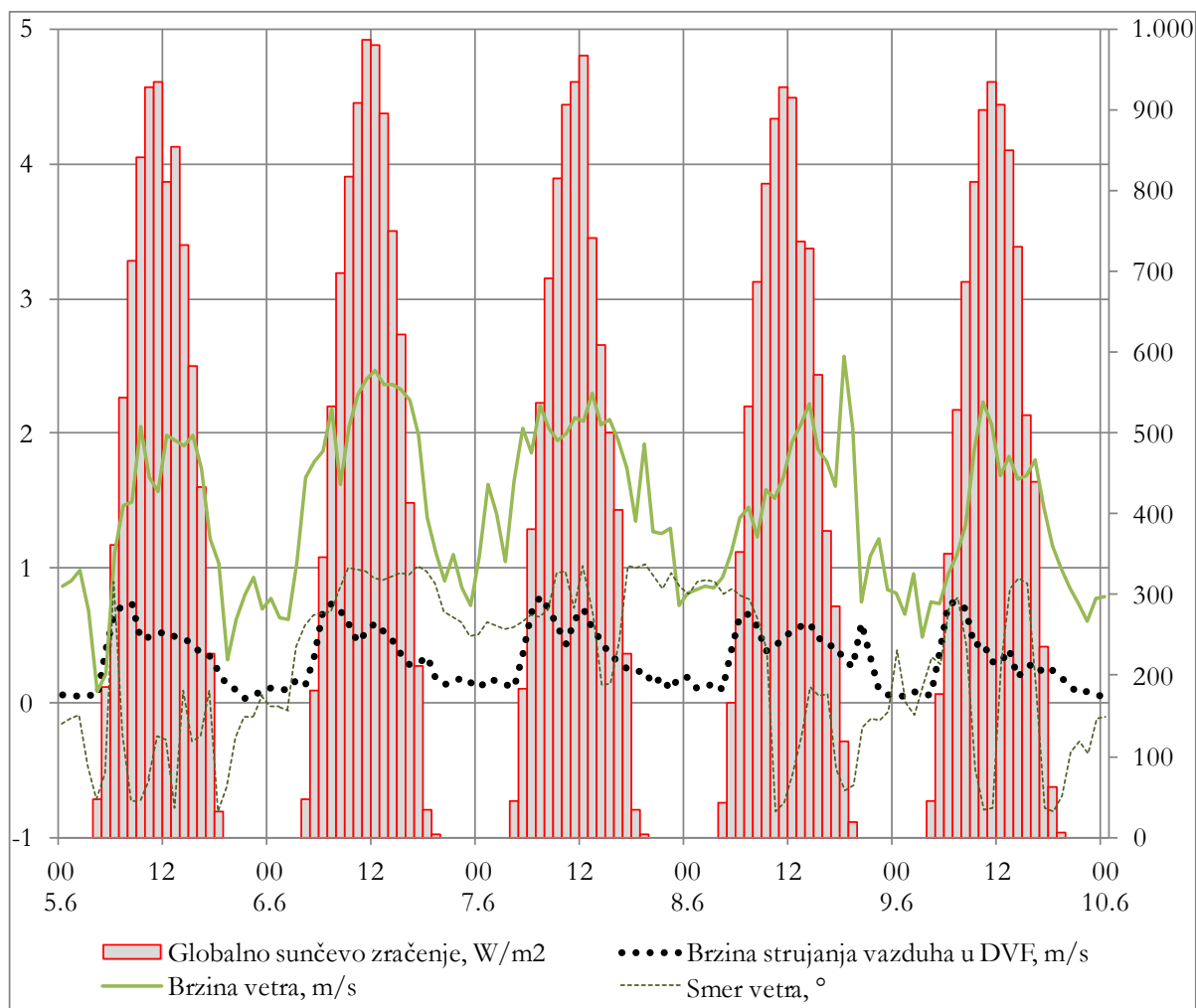
Slika 3.27: Zavisnost prosečne temperature vazduha u DVF od spoljašnje temperature vazduha (13.05. - 26.05.2014.)

Na slici 3.28, prikazana je međusobna zavisnost (trend) između globalnog sunčevog zračenja i temperature vazduha u DVF. Što je intenzivnije zračenje, to su više i temperature vazduha u DVF. Izuzetak predstavlja slučaj kada su protivpožarne klapne bile spuštene. Pored toga, primetno je da se nivo korelacije ovih parametara poboljšava u slučaju viših vrednosti globalnog sunčevog zračenja. Nasuprot tome, za niže vrednosti zračenja ($<300 \text{ W/m}^2$) rasutost vrednosti temperatura vazduha u DVF je veća.



Slika 3.28: Tipičan trend prosečnih vrednosti temperatura vazduha u DVF u funkciji globalnog sunčevog zračenja (13.05. - 26.05.2014.)

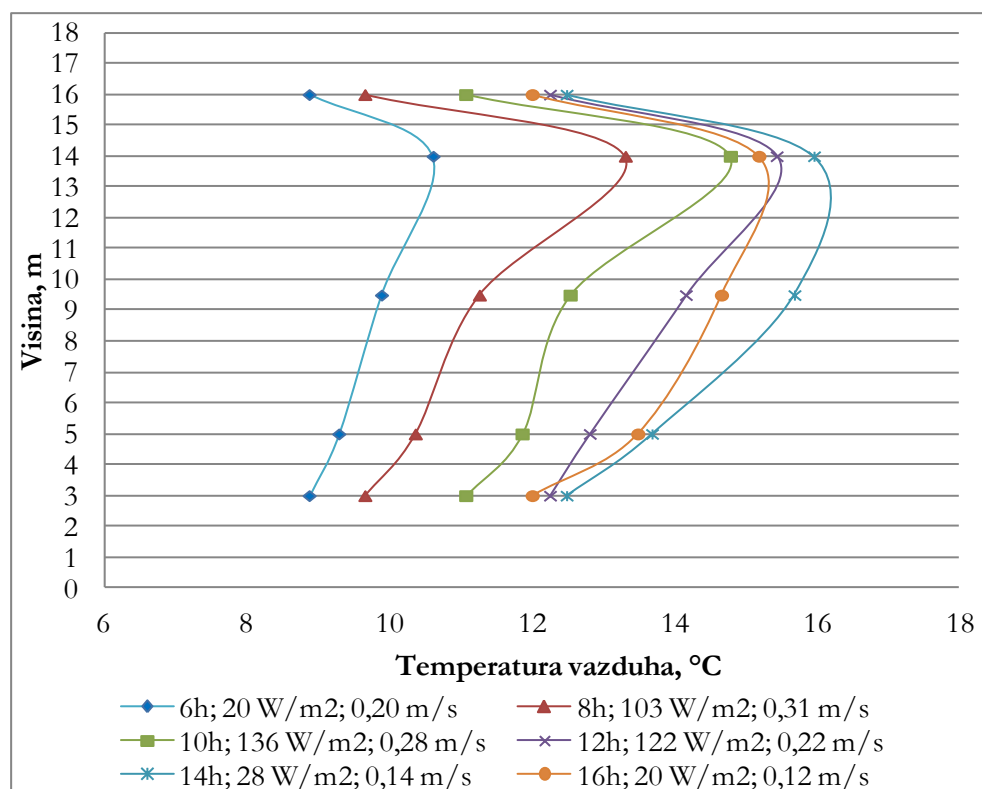
Na slici 3.29, prikazana je zavisnost brzine vazduha u DVF od uticaja vetra i sunčevog zračenja (30.01.-04.02.2014.). U ovom periodu prisutne su prosečne vrednosti brzina vetra, od minimalnih do 2,5 m/s. Vrednosti zračenja su visoke i cilj je bio da se prikaže uticaj prirodnog uzgona na brzinu vazduha u DVF. Vidi se da i dalje dominantan uticaj ima brzina vetra, međutim u poređenju sa zimskim režimom, postoji veći uticaj intenziteta sunčevog zračenja. Taj uticaj je приметniji u prepodnevnim periodima zbog jugo-istočne orijentacije fasade. Brzine vazduha ne prelaze vrednosti više od 0,7 m/s. Vrednosti brzina strujanja vazduha na ulazu u DVF kreću se u intervalu od 0,04 do 0,68 m/s. U proseku najčešće su vrednosti od 0,24 do 0,29 m/s. Vrednosti u drugoj i trećoj zoni fasade su niže i u proseku se kreću u intervalu od 0,09 - 0,22 m/s. Vrednosti brzina u ovim zonama odstupaju u veoma malim granicama (do 0,04 m/s u korist treće zone). U poređenju sa vrednostima iz zimskog režima, analiza nam govori da su brzine više u gornjim zonama fasade zbog većeg uticaja prirodnog uzgona, nastalog usled povećane razlike u temperaturama.



Slika 3.29: Prikaz uticaja vetra i sunčevog zračenja na brzinu vazduha u DVF (05.06. - 10.06.2014.)

Na slici 3.30, prikazan je vertikalni gradijent temperature DVF za tipičan hladan i oblačan prolećni dan. Kao funkcija ove promene u obzir je uzet vremenski period u toku posmatranog dana, koga karakterišu dva najuticajnija parametara, spoljašnja temperatura vazduha i globalno sunčevo zračenje. Takođe, na slici 3.30, mogu se videti i trenutne, usrednjene vrednosti brzine vazduha u DVF. Temperature vazduha na visini od 3 i od 16 m, predstavljaju temperaturu spoljašnjeg vazduha. Vrednosti temperatura vazduha između 5 i 14 m, predstavljaju gradijent temperature u DVF.

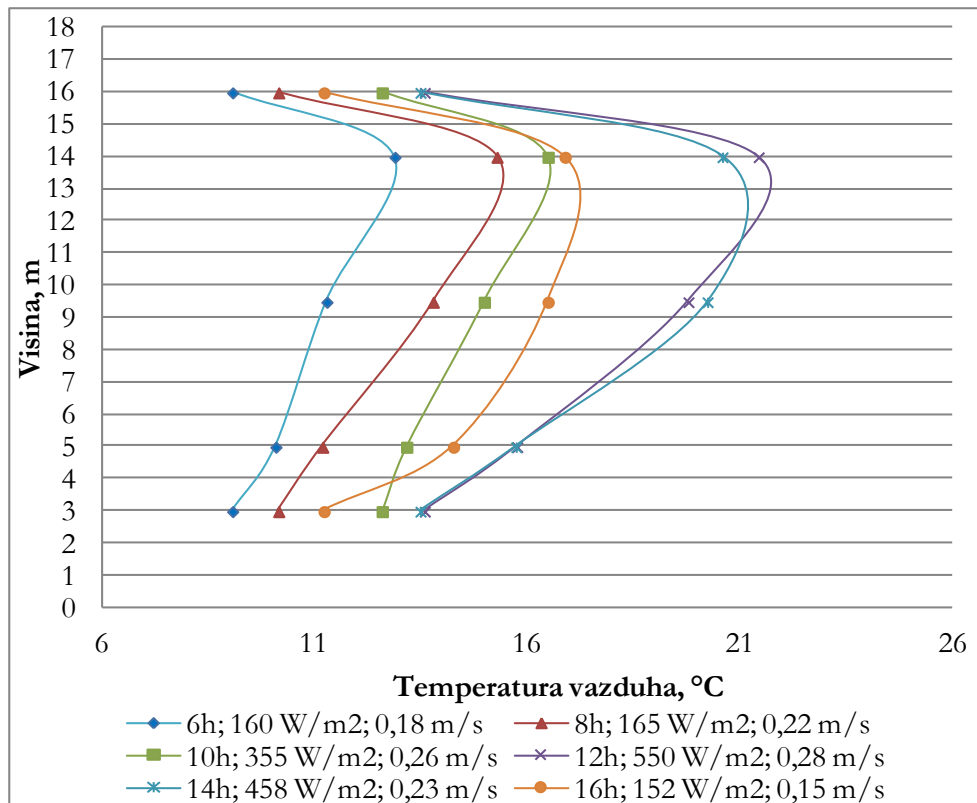
Primećuje se, da se maksimalne temperature vazduha beleže u gornjoj polovini DVF. Ovaj trend se pomera u smislu povećanja temperature za veće vrednosti trenutnog globalnog sunčevog zračenja. Moguće je primetiti da su najviše temperature vazduha u DVF kada je intenzitet sunčevog zračenja najjači, što je zabeleženo u prepodnevnim satima. Za ovaj rezultat pogoduje i orijentacija fasade. Najveći skok temperature se beleži u 10 i 12h (intenzitet zračenja je oko 125 W/m^2). Nakon toga, rast temperatura je usporen, ali dalje postoji pozitivan gradijent po visini fasade. Maksimalna razlika je iznosila $2,6^\circ\text{C}$, pri spoljašnjoj temperaturi od $12,3^\circ\text{C}$. Ovo nam ukazuje da, iako je mali, intenzitet sunčevog zračenja predstavlja ključni faktor promene temperature vazduha u DVF u toku ovog tipičnog dana. U ovom periodu je još uvek prisutna grejna sezona, tako da zbog nemogućnosti regulacije DVF, nemamo potpunu iskorišćenost ovog fasadnog rešenja, čijim zatvaranjem bismo smanjili potrebe za grejanjem. Uticaj brzine vazduha u fasadi je zanemariv. Ovakvih dana nije bilo puno, nekoliko u martu, aprilu i maju.



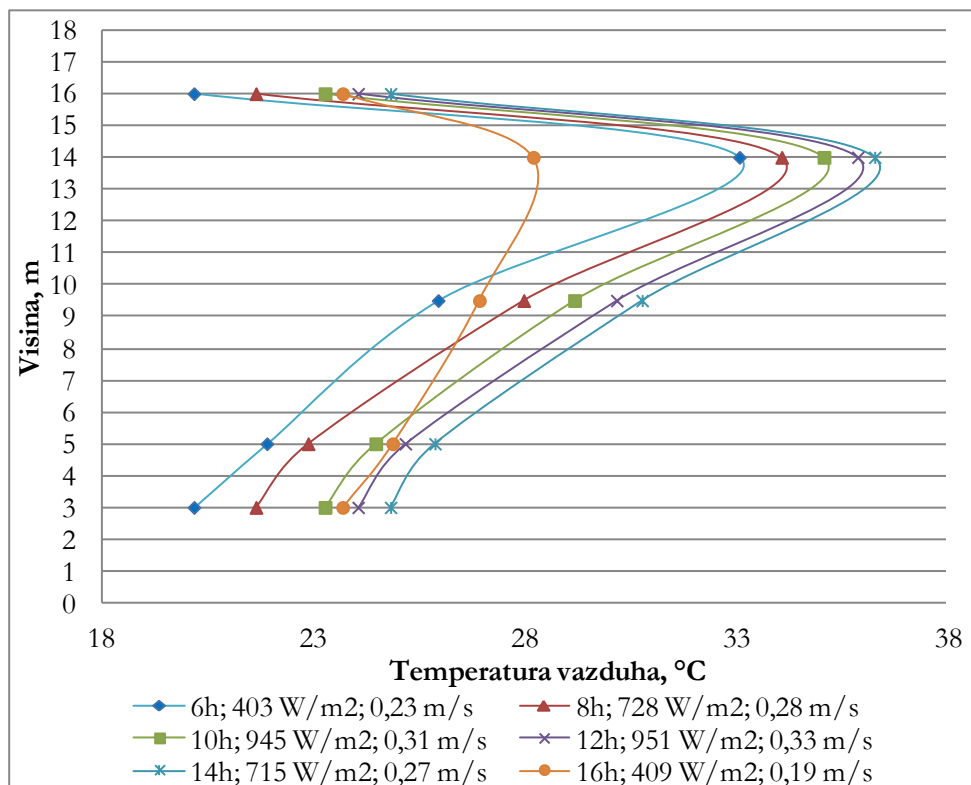
Slika 3.30: Vertikalni gradijent temperature u DVF za tipičan hladan i oblačan prolećni dan (18.04.2014.)

U slučaju kada imamo hladan i sunčan prolećni dan, primećuje se osetno povećanje vertikalnog gradijenta temperature (slika 3.31). Razlog je veći intenzitet sunčevog zračenja, koji rezultuje razliku u temperaturama i do 6°C . Najveća razlika se dešava u 12h kada je insolacija i najintenzivnija, pri spoljašnjoj temperaturi od $13,6^\circ\text{C}$. Profili promena gradijenta temperatura su slični kao i kod oblačnog dana, samo su razlike u temperaturama izraženije.

Na slici 3.32, prikazan je tipičan sunčan prolećni dan. Spoljašnje temperature su između 15 i 25°C i prisutan je visok intenzitet sunčevog zračenja. Kao posledica toga, javlja se još intenzivniji vertikalni gradijent i razlike temperatura idu i do 15°C . U ovom slučaju značajno se primećuje uticaj orijentacije fasade, gde se vidi, da posle 14h gradijent u značajnoj meri opada.



Slika 3.31: Vertikalni gradijent temperature u DVF za tipičan hladan i sunčan prolećni dan (6.04.2014.)

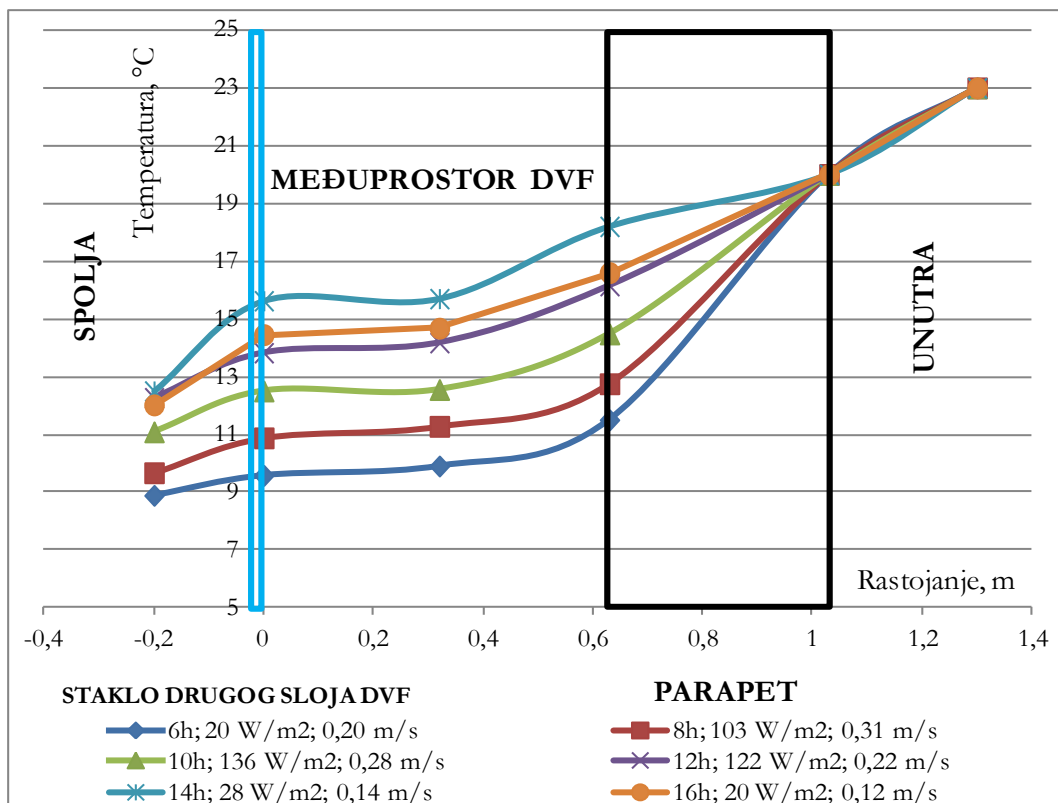


Slika 3.32: Vertikalni gradijent temperature u DVF za tipičan prolećni dan (28.05.2014.)

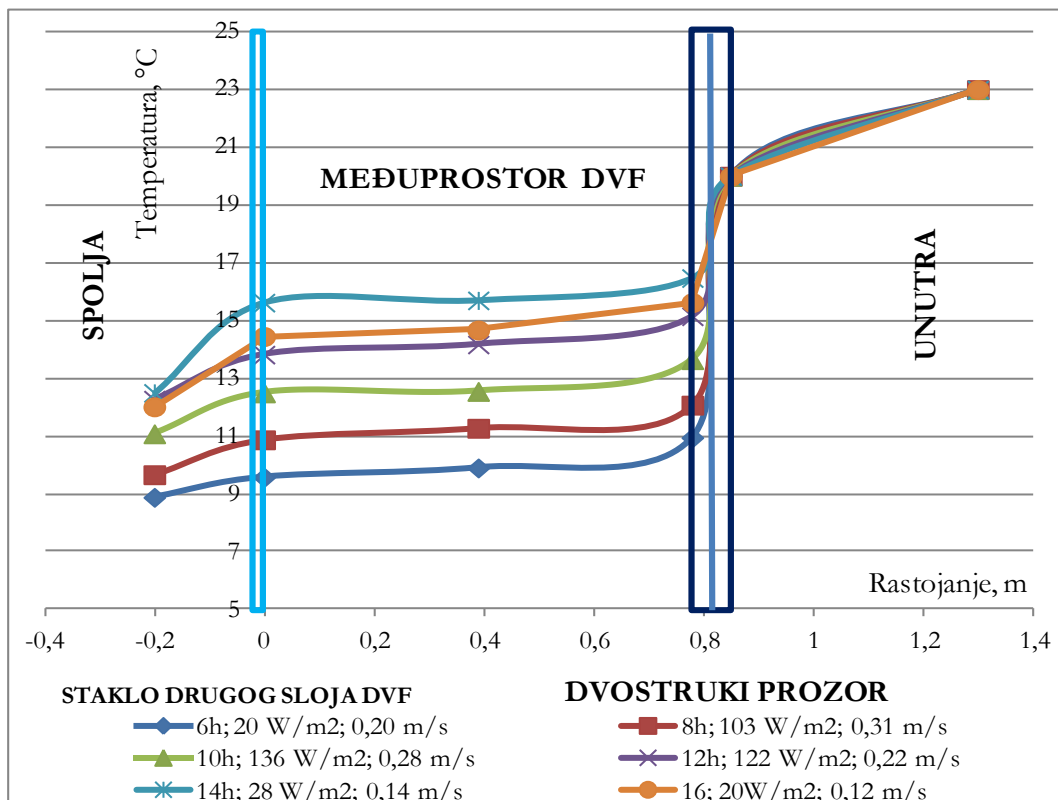
Analiza horizontalnih trendova temperatura za tipične dane prelaznog režima, predstavljena je na slikama 3.33 - 3.36. Slike prikazuju prosečne časovne vrednosti temperatura vazduha i pregrada. Ovi podaci predstavljaju dnevnu promenu temperature unutrašnjeg dela stakla pridodatog sloja DVF, temperature vazduha u DVF i temperature površine osnovnog sloja DVF (parapet+dvostruki prozor) u zavisnosti od spoljašnjih (temperatura vazduha, sunčevo zračenje i uticaj vetra) i unutrašnjih uslova (temperatura vazduha u prostoriji) za tipične dane u toku prolećne sezone. Analizom podataka može se utvrditi ponašanje DVF, koje u značajnoj meri utiče na transmisione gubitke ili dobitke toplote objekta.

Što se tiče prelaznog režima, za intervale sa niskim sezonskim temperaturama (do 13°C) i periodima sa visokim oblačnostima, fasada se ponaša slično kao i u klasičnom zimskom režimu (slike 3.33 i 3.34). Kako se spoljašnje temperature povećavaju, tako se povećavaju i temperature pregrada i vazduha u fasadi. Temperature su u proseku više za 3-5°C. To se odnosi i za slučaj parapeta i dvostrukog prozora, s tim što su vrednosti temperatura prozora nešto više. Venecijaneri su podignuti, kako bi se apsorbovala što veća količina difuznog zračenja. U slučaju kada imamo niske temperature i malu količinu oblačnosti, vrednosti temperatura pregrada i vazduha u fasadi su više u poređenju sa prethodnim slučajem. Razlika između spoljašnjeg i vazduha u fasadi je maksimalno do 9°C i još uvek nema rizika od pregrevanja.

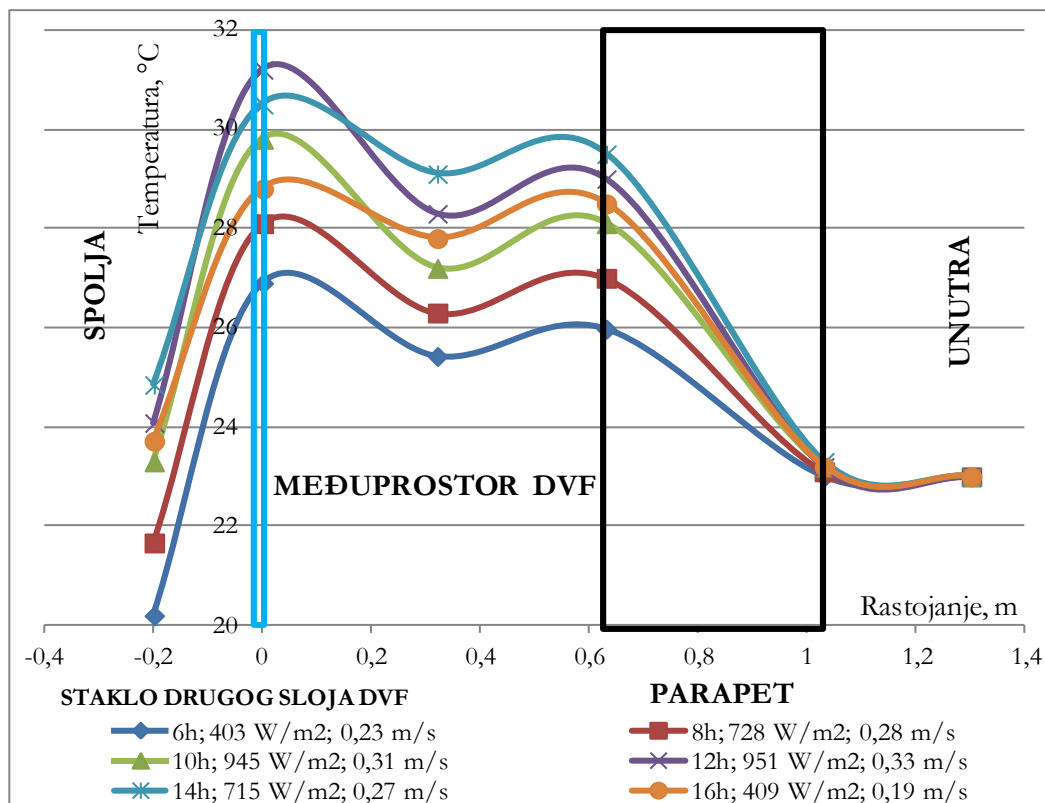
Za slučaj prosečnog toplog (temperature do 26°C) i sunčanog prolećnog dana (slike 3.35 i 3.36), po prvi put se primećuju temperature u fasadi koje su više od radnih temperatura u prostoriji. Doprinos ovome, u najvećoj meri daju visoke vrednosti sunčevog zračenja (do 950 W/m²). Iz tog razloga venecijaneri se spuštaju, kako bi se sprečio prodor direktnog zračenja u prostoriju. U tom smislu, u ovim periodima, povećani su transmisioni dobici toplote, ali su smanjeni dobici usled zračenja. Primećuje se da su i temperature parapeta više u odnosu na temperature stakla dvostrukog prozora. Razlog je to, što parapetni deo omotača nije zaštićen površinom venecijanera od direktnog sunčevog zračenja. Slučaj ekstremno toplog (temperature iznad 30°C) i sunčanog prolećnog dana nije analiziran iz razloga što ovaj tipičan dan pripada klasičnom letnjem režimu.



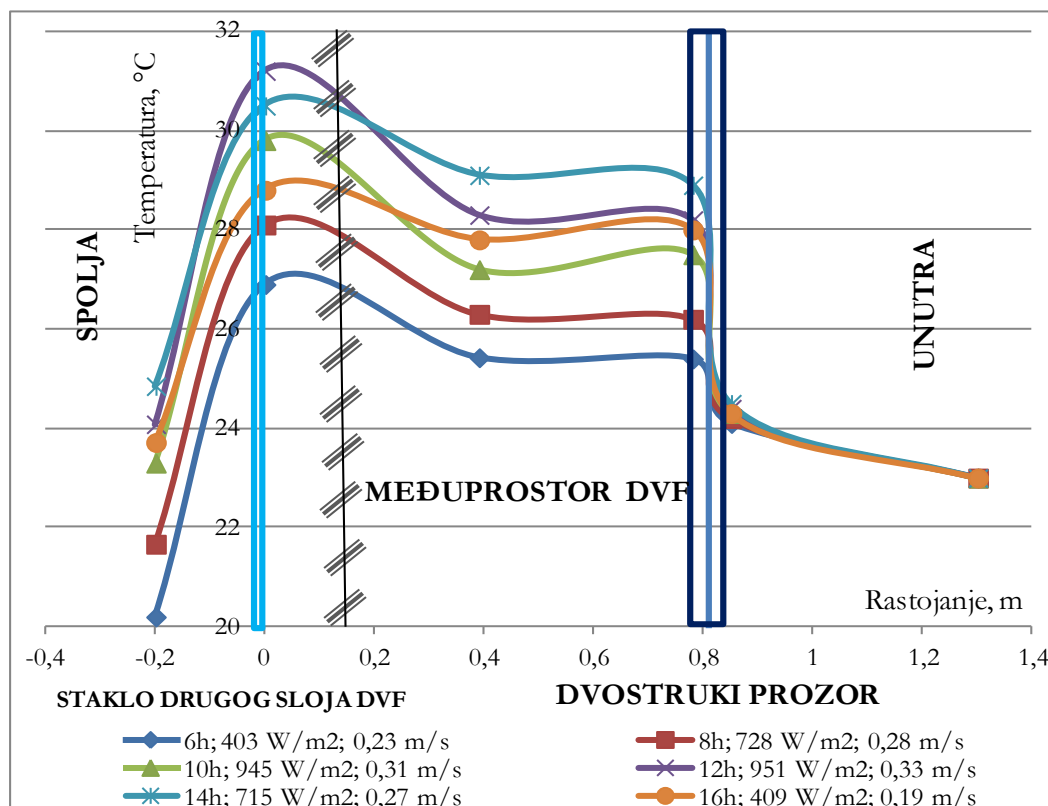
Slika 3.33: Horizontalni trend temperature u DVF (PARAPET) za tipičan hladan i oblačan prolećni dan (18.04.2014.)



Slika 3.34: Horizontalni trend temperature u DVF (DVOSTRUKI PROZOR) za tipičan hladan i oblačan prolećni dan (18.04.2014.)

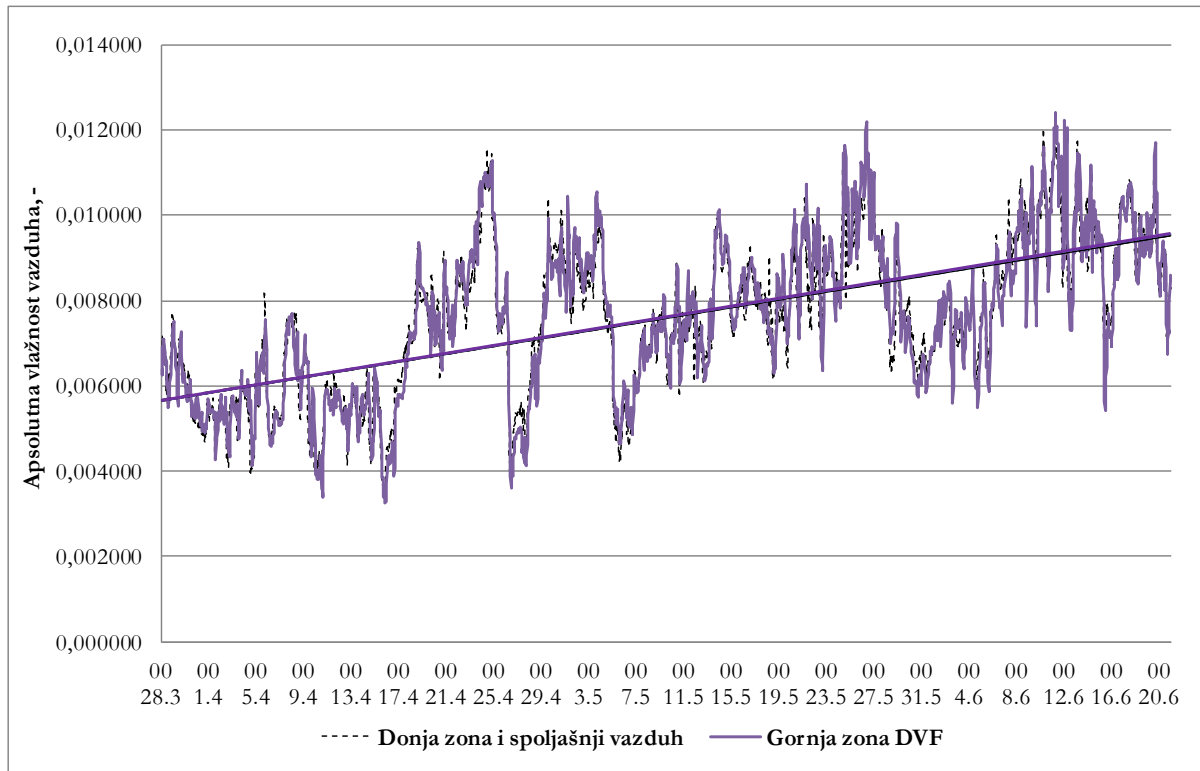


Slika 3.35: Horizontalni trend temperature u DVF (PARAPET) za tipičan prolećni dan (28.05.2014.)



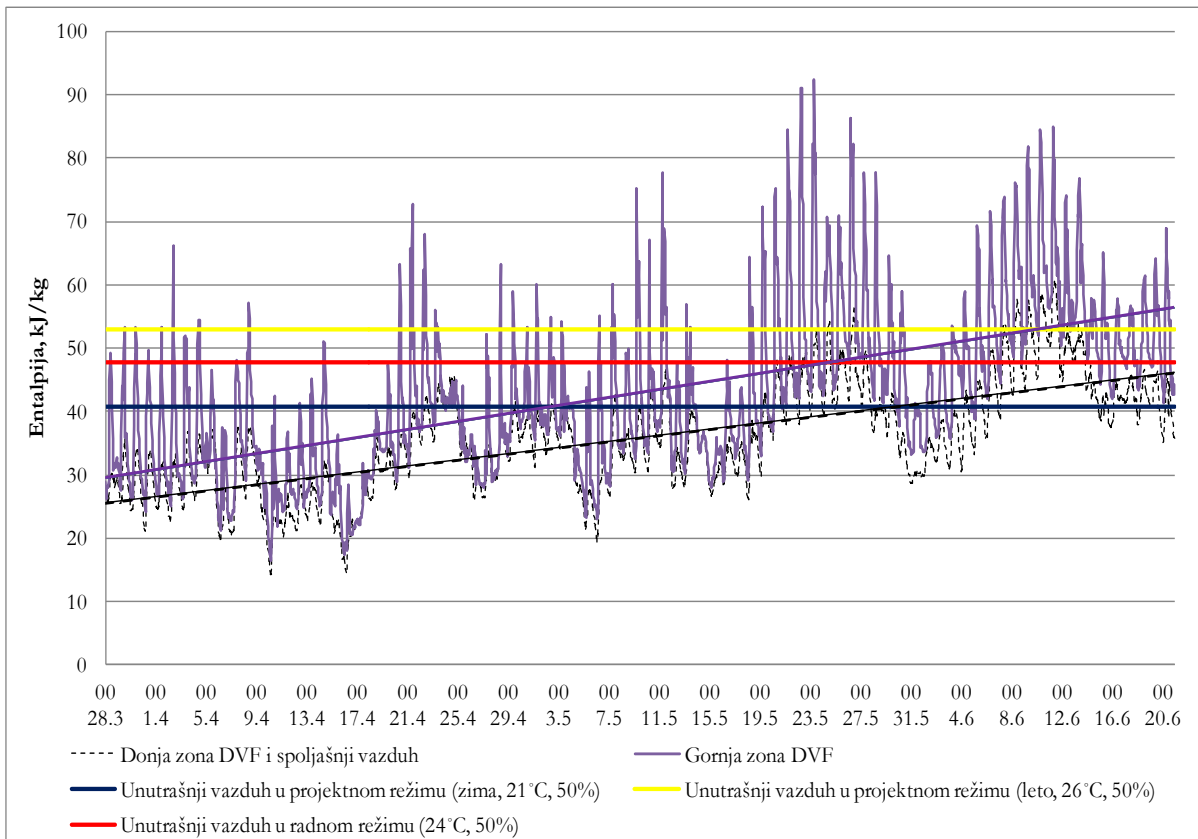
Slika 3.36: Horizontalni trend temperature u DVF (DVOSTRUKI PROZOR) za tipičan prolećni dan (28.05.2014.)

Provera tačnosti izvršenih merenja prikazana je na slici 3.37 gde su predstavljene proračunate vrednosti apsolutne vlažnosti vazduha u donjoj i gornjoj zoni DVF za ceo prelazni režim. Trendovi ovih linija nemaju velika odstupanja, što predstavlja potvrdu visokog nivoa tačnosti izvršenih merenja u ovom režimu.

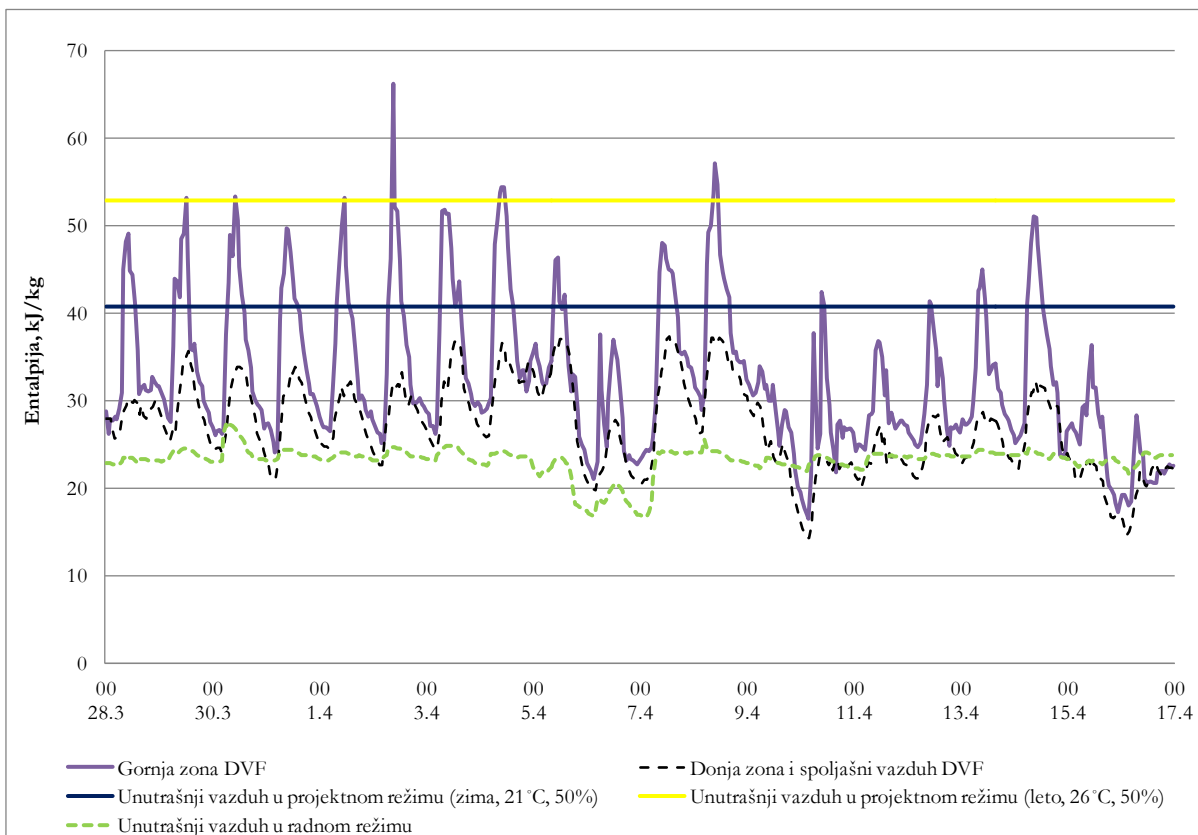


Slika 3.37: Proračunate vrednosti apsolutnih vlažnosti vazduha u donjoj i gornjoj zoni DVF za prelazni režim

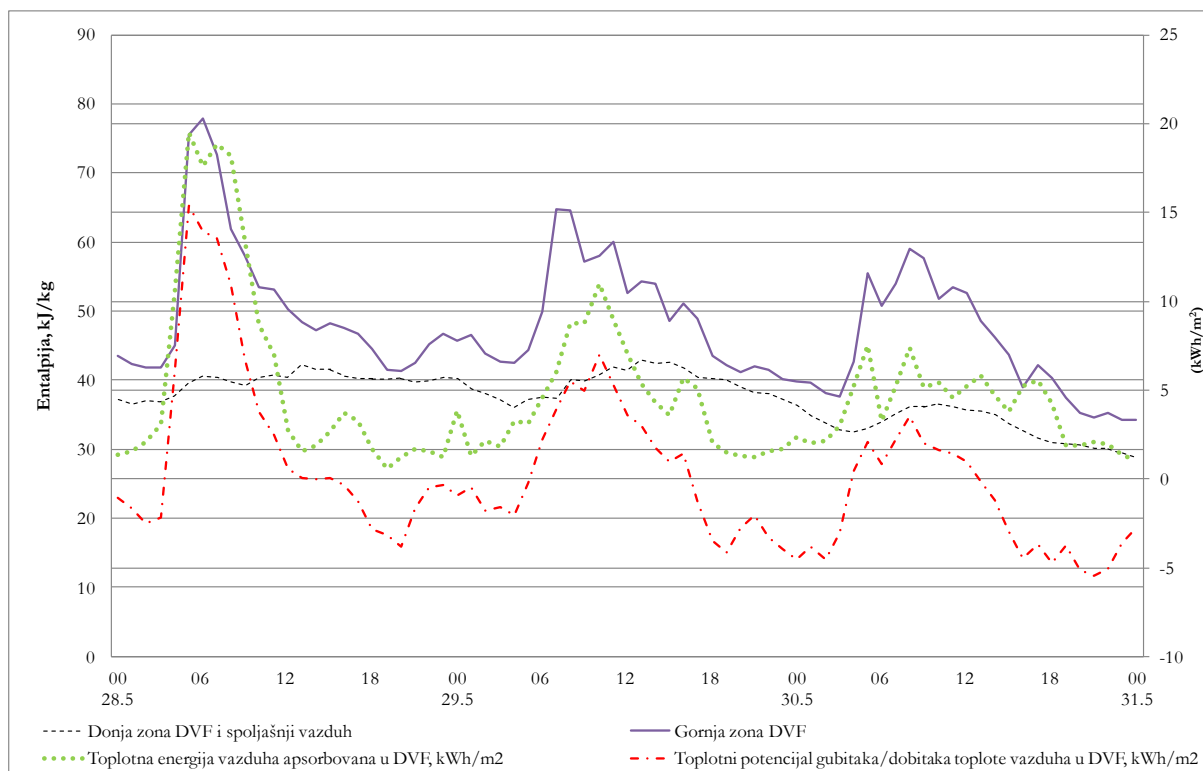
Slika 3.38, prikazuje proračunate vrednosti entalpija unutrašnjeg i vazduha u DVF. Ova slika predstavlja i protok entalpije po visini DVF. Takođe, ono što treba napomenuti je da su vrednosti spoljašnjeg vazduha veoma bliske vrednostima u donjoj zoni DVF. Posmatrajući linije trendova, primećuje se da kako se približavamo letu, razlike entalpija postaju sve veće. U pojedinim vremenskim intervalima postoji problem pregrevanja, posebno u središnjoj i gornjoj zoni fasade. Donja zona, predstavlja stanje vazduha koje je praktično identično stanju spoljašnjeg vazduha. Primetno je, da u hladnim danima nedostaje mogućnost regulacije otvorenosti fasade, koji bi doprineo još većim uštedama. U proseku kada se pogleda celokupan prelazni režim, zaključak je da DVF u velikoj meri može predstavljati dobar izvor ušteda kada se posmatra transmisija i ventilacija. Kada su temperature niže, fasada dodatno zagreva vazduh koji se može direktno ubacivati u prostorije ili preko sistema za klimatizaciju. Pregrevanje je očigledno u nekoliko toplih intervala, a cilj nekih budućih operativnih strategija je da temperatura vazduha po celoj visini fasade bude približna spoljašnjoj. Problemi sa pregrevanjem mogu se rešavati adekvatnim operativnim strategijama. One mogu obuhvatiti postavljanje ventilatora, kojima bi se povećao protok vazduha u fasadi (intenzivnije odvođenje akumulisane toplote) ili povezivanjem fasade i postojećeg klimatizacionog sistema. Pod povezivanjem podrazumeva se ispuštanje otpadnog vazduha u međuprostor fasade, kako bi se izvršilo njegovo pothlađenje. Takođe, u zavisnosti od trenutnih uslova, tehnike noćne ventilacije mogu biti efikasne u eliminisanju akumuliranih dobitaka toplote u objektu.



Slika 3.38: Proračunate vrednosti entalpija unutrašnjeg i vazduha u DVF za prelazni režim



Slika 3.39: Izabrani tipični period prelaznog režima



Slika 3.40: Toplotni potencijal u prelaznom režimu

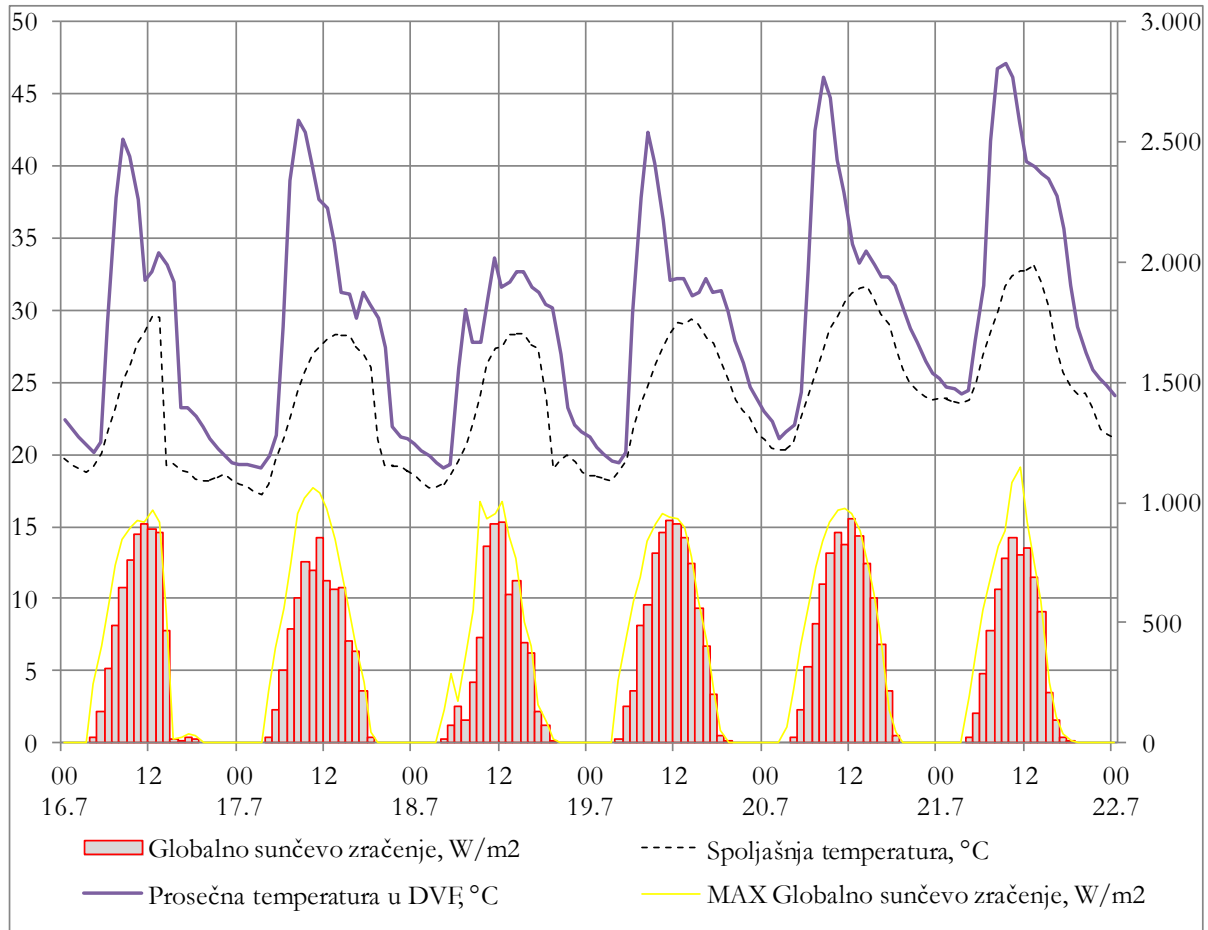
Slika 3.39, prikazuje tipičan period prelaznog režima kada su spoljašnje temperature u proseku od 12 do 26°C, sa periodima visoke insolacije (do 900 W/m²). U toku dana, kada imamo intenzivno sunčevo zračenje, pojavljuje se rizik od pregrevanja u središnjoj i gornjoj zoni fasade, dok su vrednosti entalpija dosta više (do 80 kJ/kg) u odnosu na projektno ili radno stanje unutrašnjeg vazduha. Ove vrednosti su najintenzivnije u prvom delu dana zbog orijentacije objekta i tada postoji opasnost od pregrevanja. Slika 3.40 prikazuje toplotni potencijal DVF u periodu tipičnog prelaznog režima. Linija toplotne energije vazduha generisane u DVF (formula 3.8) predstavlja promenu stanja vazduha od njegovog ulaza do izlaza iz fasade. Ove vrednosti dramatično rastu u prepodnevnom satima izazivajući probleme pregrevanja. Međutim, u toku drugog dela dana i u toku noći postoji visok nivo potencijala, koji bi u dobroj meri eliminisao kasnije pregrevanje. Linija toplotnog potencijala (formula 3.9), predstavlja trenutni energetske odnos između stanja vazduha u DVF i vazduha u prostoriji specificiran po m² površine otvora fasade. Na taj način se, trenutno energetske kvantifikuju posledice korišćenja vazduha iz DVF za prirodnu ventilaciju prostorija.

3.4 ANALIZA REZULTATA U LETNJEM REŽIMU

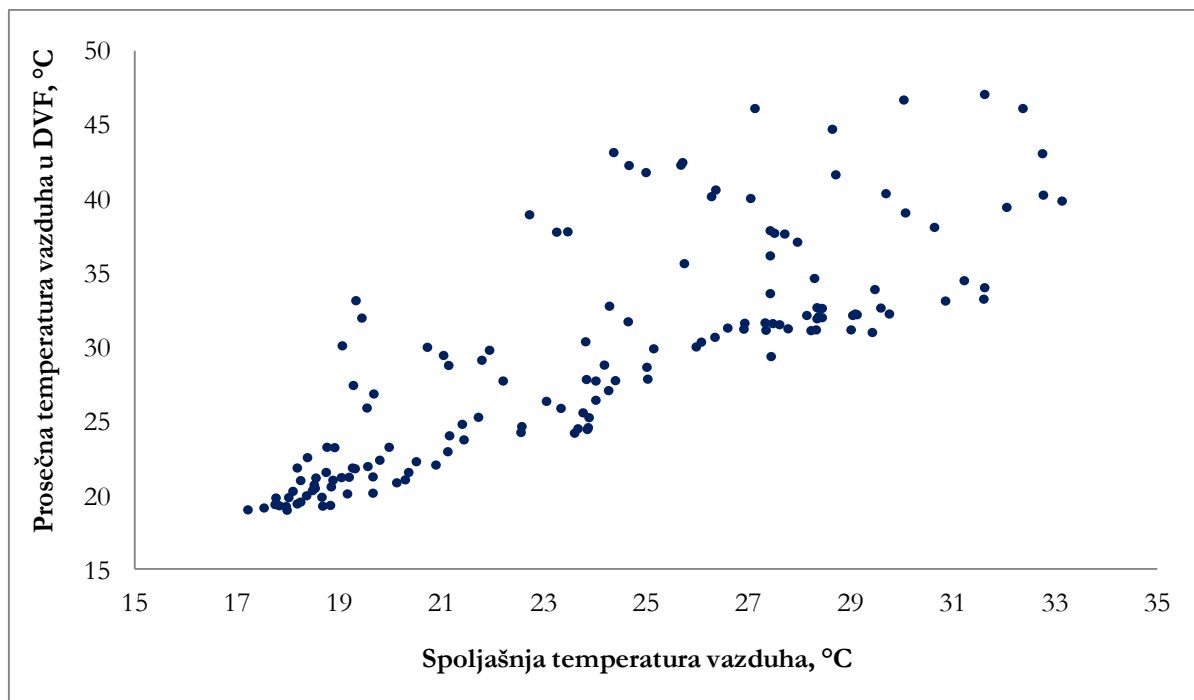
U okviru letnjeg režima, za analizu je izabran najtopliji period u toku kalendarske 2014. godine. Cilj ove analize je da se ustanovi ponašanje DVF u toku perioda sa visokim intenzitetom zračenja, kada su zabeležene i najviše spoljašnje temperature. Generalno posmatrajući ceo letnji režim, spoljašnje temperature su bile u intervalu od 17 do 36°C, dok su izmerene temperature u kancelarijama varirale od 22,3-25,6°C. Kao napomena, može se spomenuti da je u prethodnim godinama temperaturski pik prelazio i 40°C. Venecijaneri u DVF su lokalno regulisani u zavisnosti od trenutnih spoljašnjih uslova.

Na slici 3.41, prikazan je period koji oslikava ekstremne karakteristike letnjeg režima. Uočava se zavisnost promene temperature vazduha u DVF od spoljašnjih (temperatura i globalno sunčevo zračenje) i unutrašnjih (temperatura u kancelariji) uslova. Dana 18.07.2014. godine, primećuje se

da su temperature u fasadi niže, iako su spoljašnje temperature i intenzitet zračenja slični kao prethodnih dana. Razlog tome su više brzine strujanja u fasadi, izazvane jačim vetrom. Slika prikazuje dobru vezu između temperature vazduha u fasadi i trenutnih spoljašnjih uslova. Najniža razlika između spoljašnje i temperature u fasadi je u noćnom periodu od 01 do 05h. U toku prepodneva, kad sunčevo zračenje direktno deluje na posmatranu severo-istočnu fasadu, vazduh se ubrzano zagreva i razlika između ovih temperatura može dostići i 17°C. To rezultuje temperaturama vazduha u fasadi koje lako prelaze i 45°C. Ova pojava implicira veliku količinu indirektnih solarnih dobitaka toplote. U toku noći, temperature opadaju, što otvara mogućnost za pothlađivanje i provetravanje, kako fasade tako i samog objekta. Slika 3.42, prikazuje vezu između spoljašnje i temperature vazduha u fasadi.

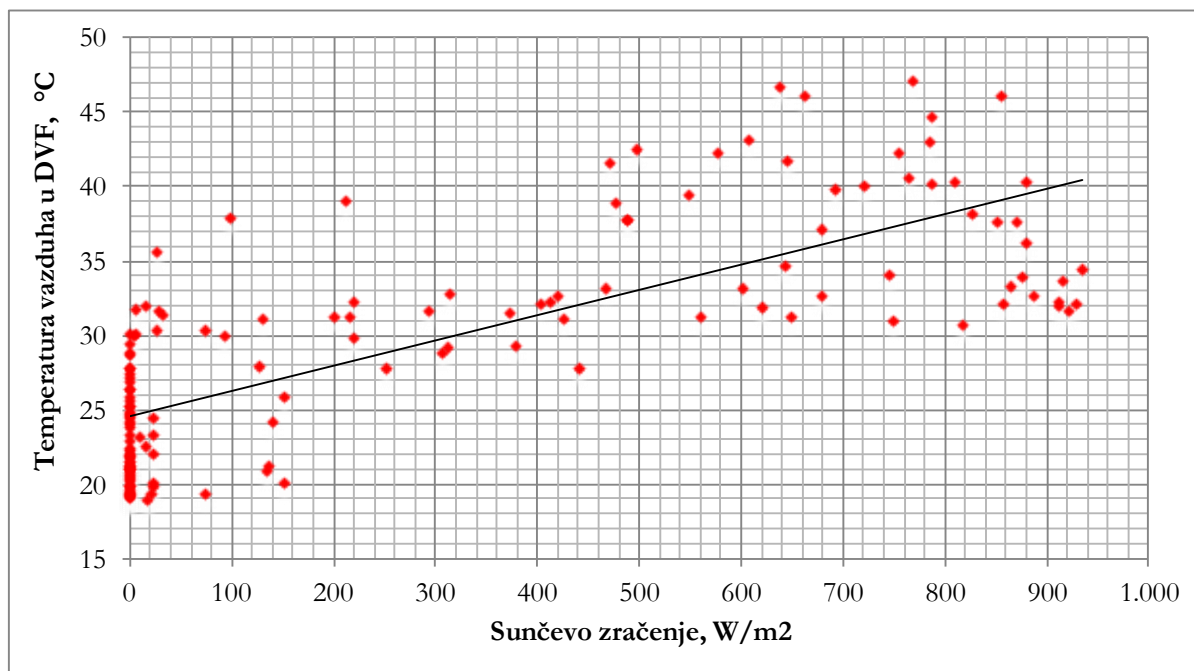


Slika 3.41: Prikaz dela merenja u toku letnjeg režima (16.07. - 22.07.2014.)



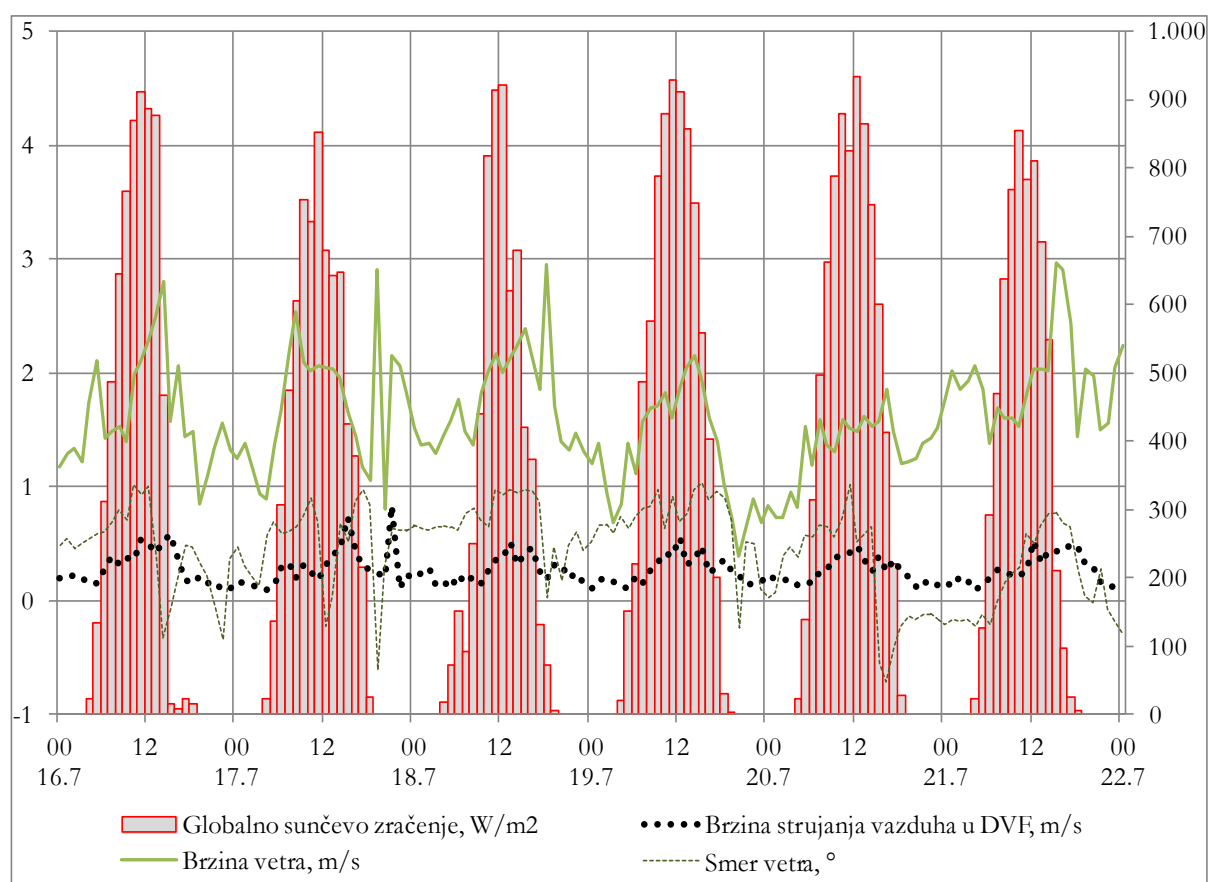
Slika 3.42: Zavisnost prosečne temperature vazduha u DVF od spoljašnje temperature vazduha (16.07. - 22.07.2014.)

Slika 3.43, prikazuje međusobnu zavisnost (trend) između temperature vazduha u DVF i globalnog sunčevog zračenja za najtopliji period u toku kalendarske 2014. godine. Primećuje se da što je intenzivnije zračenje, to su više i temperature vazduha u DVF. Pored toga, nivo korelacije ovih parametara poboljšava se u slučaju viših vrednosti globalnog sunčevog zračenja. Nasuprot tome, za niže vrednosti zračenja ($<200 \text{ W/m}^2$) rasutost vrednosti temperatura vazduha u DVF je izraženija.



Slika 3.43: Tipičan trend prosečnih vrednosti temperatura vazduha u DVF u funkciji globalnog sunčevog zračenja (16.07. - 22.07.2014.)

Slika 3.44, prikazuje zavisnost brzine vazduha u DVF od uticaja sunčevog zračenja i vetra u najtoplijem periodu od 16.07. do 22.07.2014. Ovaj period karakterišu umerene vrednosti brzina vetra, od minimalnih do 3 m/s. Vrednosti zračenja su visoke (do 1000 W/m²) i osnovni cilj analize je da se prikaže uticaj prirodnog uzgona na brzinu vazduha u DVF. Primetno je, da je i dalje dominantan uticaj ima brzina vetra (pogotovu u donjoj zoni), međutim u poređenju sa zimskim i prelaznim režimom, postoji veći uticaj intenziteta sunčevog zračenja. Taj uticaj je izraženiji u prepodnevnim periodima, zbog jugo-istočne orijentacije fasade. Brzine vazduha ne prelaze vrednosti više od 0,8 m/s. Vrednosti brzina strujanja vazduha na ulazu u DVF kreću se u intervalu od 0,02 do 0,79 m/s. U proseku, najčešće su vrednosti od 0,26 do 0,32 m/s. Vrednosti u drugoj i trećoj zoni fasade su niže i u proseku se kreću u intervalu od 0,11 - 0,29 m/s. Brzine u ovim zonama odstupaju u veoma malim granicama (do 0,06 m/s u korist treće zone). U poređenju sa vrednostima iz zimskog i prelaznog režima, analiza nam govori da su brzine više u gornjim zonama fasade, zbog većeg uticaja prirodnog uzgona nastalog usled povećane razlike u temperaturama.

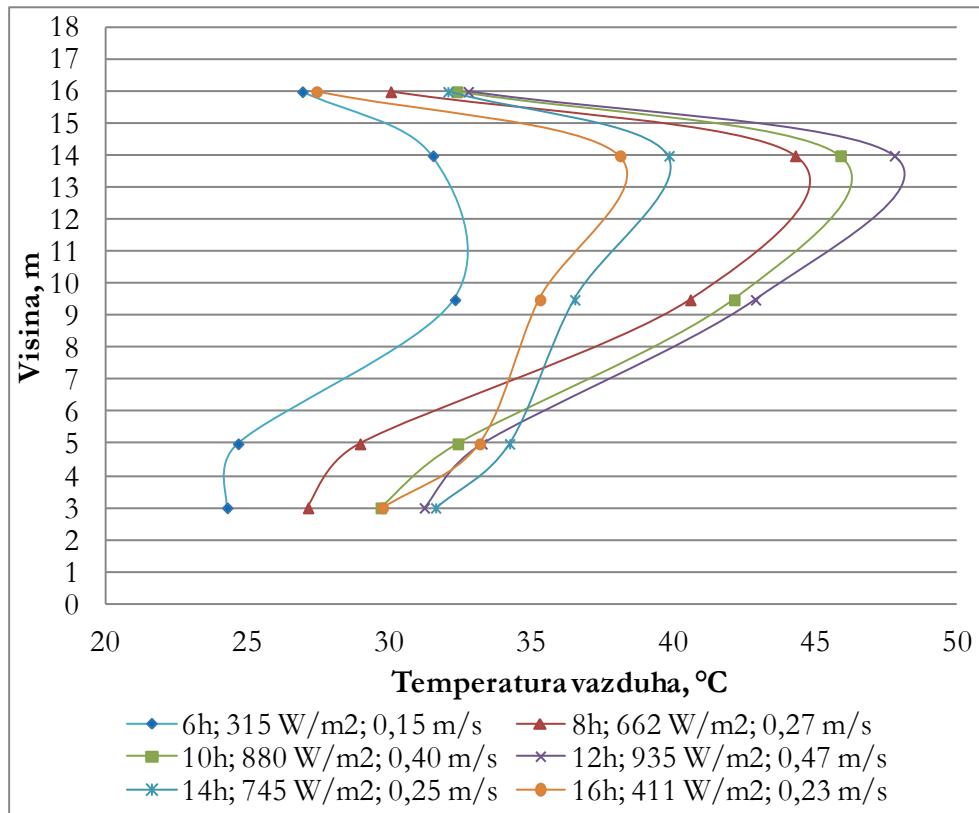


Slika 3.44: Prikaz uticaja vetra i sunčevog zračenja na brzinu vazduha u DVF (16.07. - 22.07.2014.)

Što se tiče analize vertikalnog gradijenta i horizontalnog trenda temperature u DVF, za letnji režim je izabran tipičan topao i sunčan dan. Slika 3.45, prikazuje vertikalni gradijent temperature DVF za izabrani letnji dan. Kao funkcija ove promene u obzir je uzet vremenski period u toku posmatranog dana, koga karakterišu dva najuticajnijih parametara, spoljašnja temperatura vazduha i globalno sunčevo zračenje. Takođe, na slici 3.45, mogu se videti i trenutne usrednjene brzine vazduha u DVF. Temperature vazduha na visini od 3 i od 16 m predstavljaju temperaturu spoljašnjeg vazduha. Vrednosti temperatura vazduha između 5 i 14 m predstavljaju gradijent temperature u DVF.

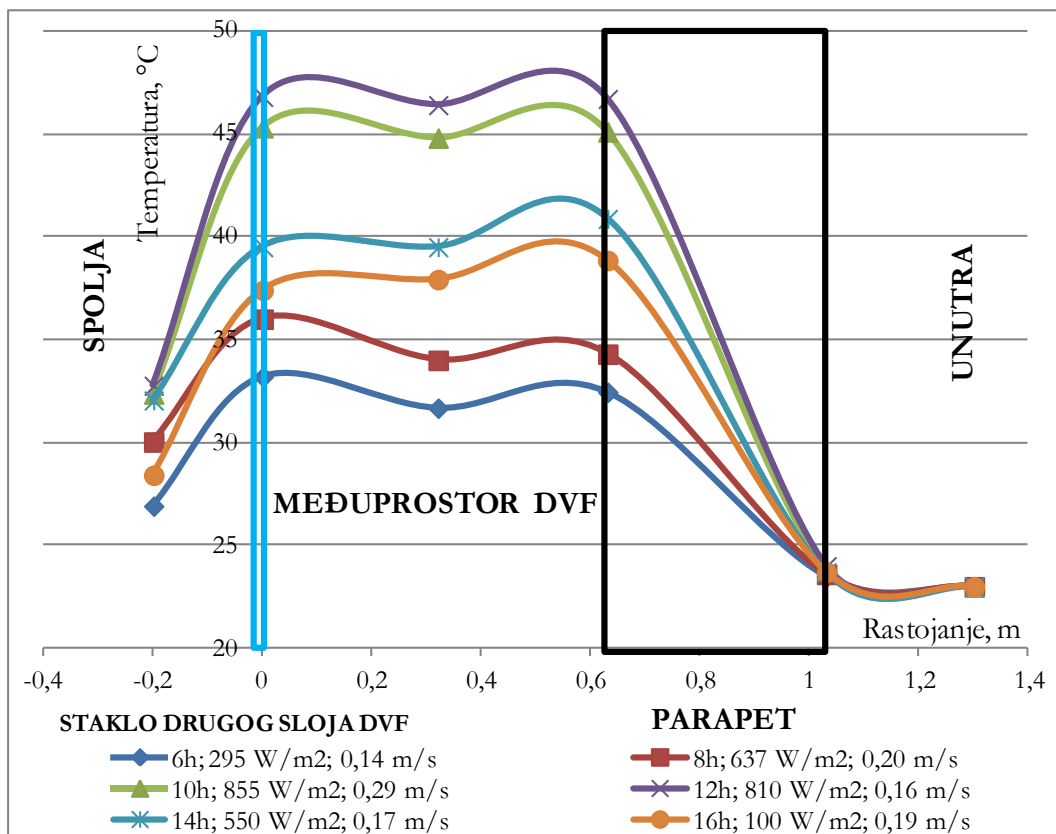
Maksimalne temperature vazduha se beleže u gornjoj polovini DVF, što je slučaj i kod prelaznog režima. Najviše temperature vazduha u DVF su zabeležene kada je intenzitet sunčevog zračenja

najjači, a to je u periodima oko podneva. Maksimalna temperatura u gornjoj zoni je bila 48°C , pri spoljašnjoj temperaturi od $32,3^{\circ}\text{C}$. Brzine vazduha u međuprostoru fasade bile su umerene (prosek $0,24\text{ m/s}$), maksimalno do $0,50\text{ m/s}$. U tom smislu, zaključak je, da je uticaj prirodnog uzgona vazduha na brzinu strujanja značajniji u odnosu na zimski i prelazni režim.

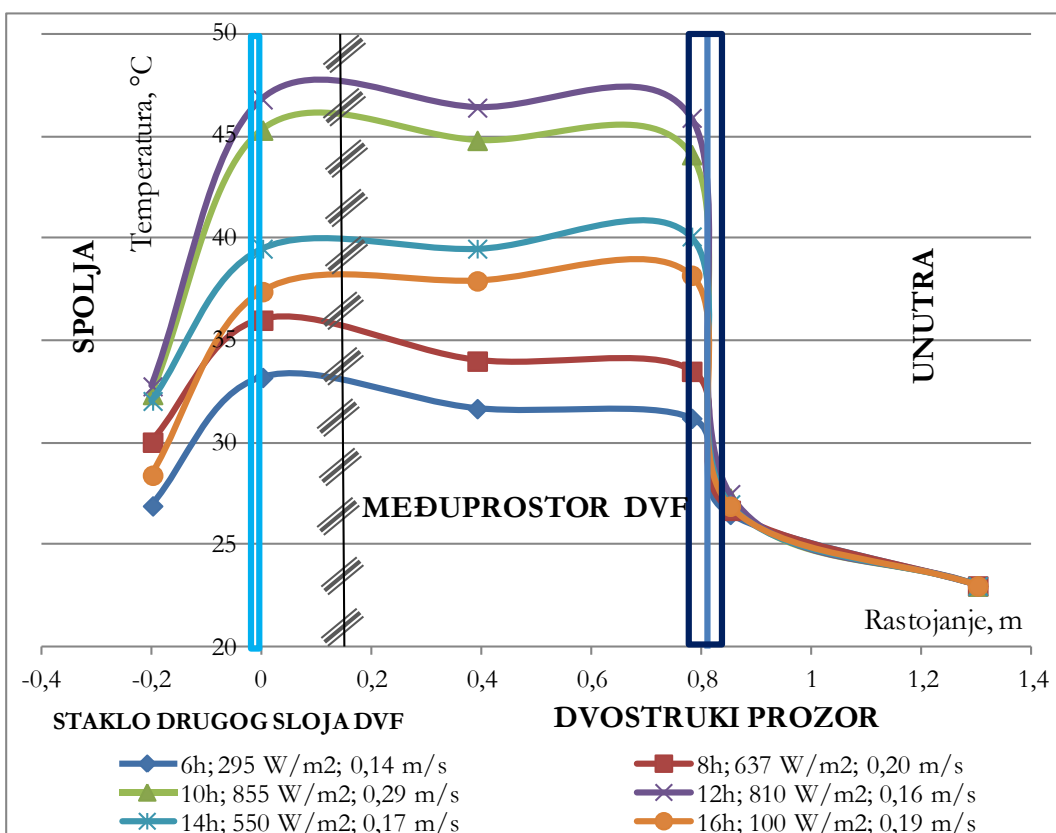


Slika 3.45: Vertikalni gradijent temperature u DVF za tipičan topao i sunčan letnji dan (21.07.2014.)

Za slučaj toplog (temperature do 34°C) i sunčanog letnjeg dana (slike 3.46 i 3.47), primećuju se temperature u fasadi koje su znatno više od radnih temperatura u prostoriji. Doprinos ovome u najvećoj meri daju visoke vrednosti sunčevog zračenja, što uzrokuje velike indirektno solarne dobitke. Iz tog razloga venecijaneri se spuštaju, kako bi se sprečio prodor direktnog zračenja u prostoriju. U tom smislu, u ovim periodima, povećani su transmissioni dobici toplote, ali su smanjeni dobici usled zračenja. Temperature parapeta su više u odnosu na temperature stakla dvostrukog prozora. Razlog je to, što parapetni deo omotača nije zaštićen površinom venecijanera od direktnog sunčevog zračenja.

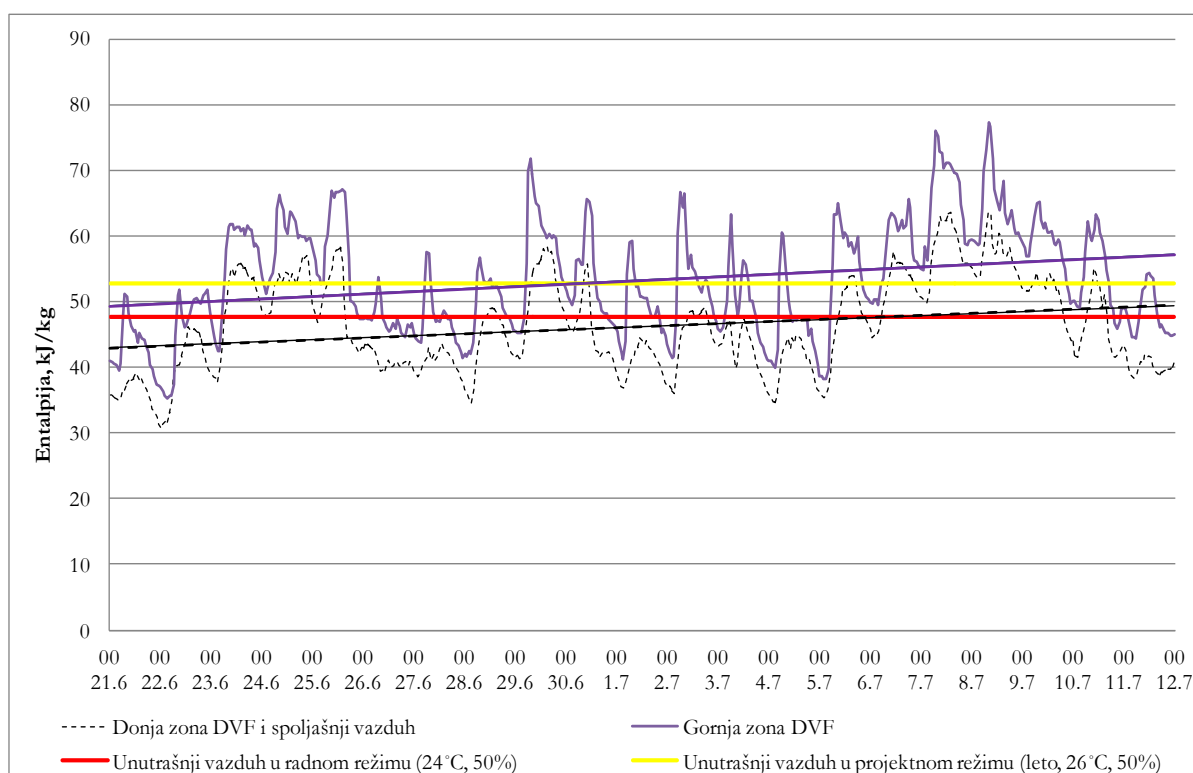


Slika 3.46: Horizontalni trend temperature u DVF (PARAPET) za tipičan letnji dan (22.07.2014.)



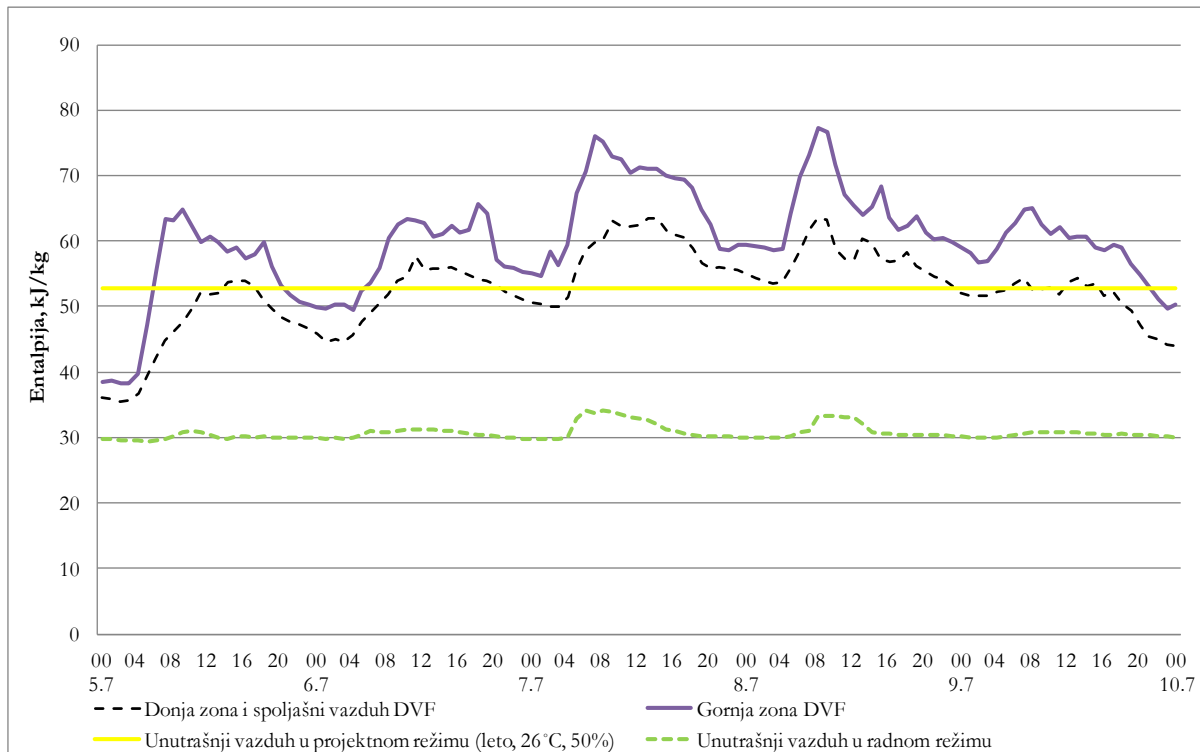
Slika 3.47: Horizontalni trend temperature u DVF (DVOSTRUKI PROZOR) za tipičan letnji dan (22.07.2014.)

Što se tiče energetske analize letnjeg režima, slika 3.48 prikazuje proračunate vrednosti entalpija unutrašnjeg i vazduha u DVF za najtopliji period u kalendarskoj 2014. godini. Slika, takođe, prikazuje promenu i protok entalpije vazduha po visini DVF. Ono što treba napomenuti jeste da su vrednosti spoljašnjeg vazduha veoma bliske vrednostima u donjoj zoni fasade. Posmatrajući linije trendova, očigledno je da su razlike entalpija najizraženije u tom periodu godine. Zabeležene razlike su tolike da, u određenim intervalima postoji problem pregrevanja, posebno u središnjoj i gornjoj zoni. Donja zona, predstavlja stanje vazduha koje je praktično identično stanju spoljašnjeg vazduha. Izuzeci su noćni režimi kada se, sa adekvatnim operativnim strategijama, može ublažiti i delimično eliminisati efekat pregrevanja. U proseku kada se pogleda celokupan letnji režim, zaključak je da se efekat rizika pregrevanja vazduha u DVF mora rešavati adekvatnom noćnom ventilacijom i provetravanjem, sve sa ciljem povećanja brzine strujanja u međuprostoru. Pored toga, strategije mogu obuhvatiti i postavljanje ventilatora, koji bi povećao protok vazduha u fasadi (intenzivnije odvođenje akumulisane toplote) ili povezivanjem fasade i postojećeg klimatizacionog sistema. Pod povezivanjem podrazumeva se ispuštanje otpadnog vazduha u međuprostor fasade, kako bi se izvršilo njegovo pothlađenje.



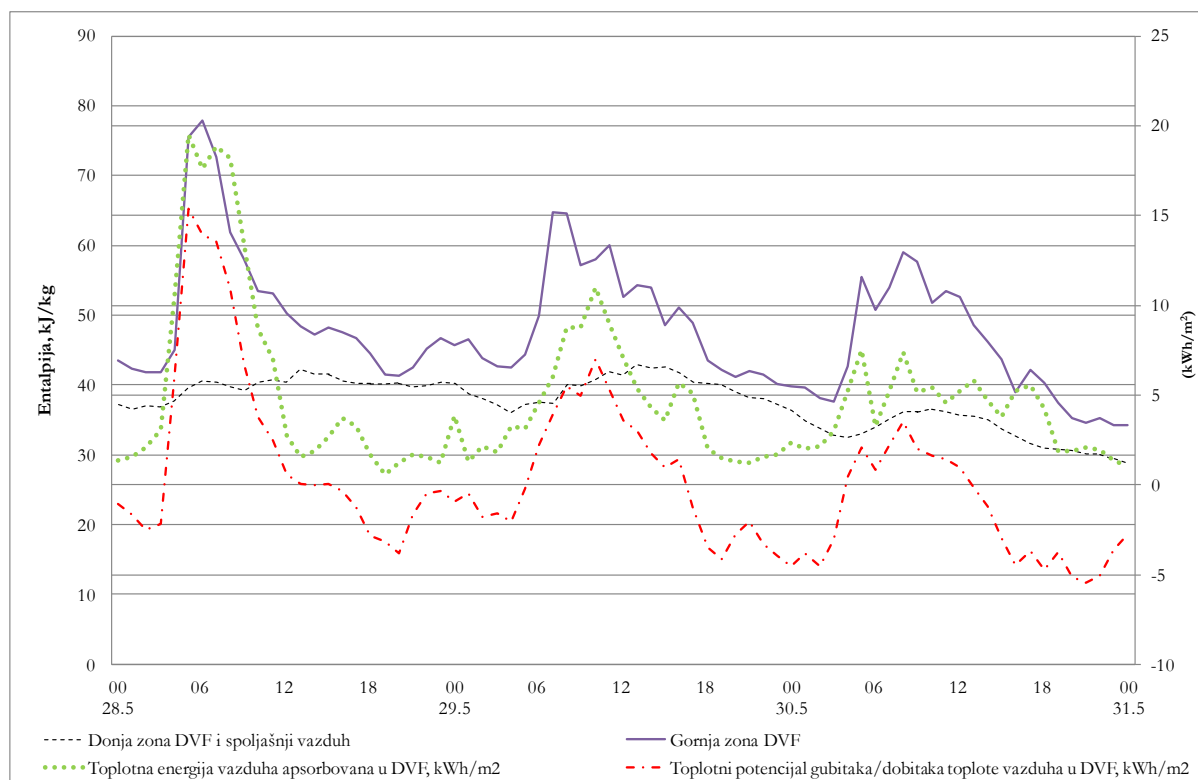
Slika 3.48: Proračunate vrednosti entalpija unutrašnjeg i vazduha u DVF za izabrani deo letnjeg režima (21.06 – 12.07.2014.)

Slika 3.49, prikazuje tipičan period letnjeg režima kada su spoljašnje dnevne temperature u proseku od 25 do 34°C, sa periodima visoke insolacije (do 950 W/m²). Noćni režim se odlikuje temperaturama koje su oko 20°C. U toku dana kada imamo intenzivno sunčevo zračenje, povećava se rizik od pregrevanja u središnjoj i gornjoj zoni fasade. Vrednosti entalpija su visoke (prosečna vrednost 65 kJ/kg) u odnosu na projektno ili radno stanje unutrašnjeg vazduha. Ove vrednosti su intenzivnije u prvom delu dana zbog orijentacije objekta i tada postoji najveća opasnost od pregrevanja. Primećuje se veliko odstupanje između projektnih i radnih vrednosti entalpija unutrašnjeg vazduha. Razlog tome je zahtev korisnika objekta za nižim temperaturama, koje idu i do 22°C. Ovo svakako predstavlja problem i sa aspekta unutrašnjeg termičkog komfora i sa strane povećane potrošnje energije, za dodatno pothlađivanje vazduha.



Slika 3.49: Izabrani tipični period letnjeg režima

Slika 3.50, prikazuje toplotni potencijal DVF u periodu tipičnog letnjeg režima. Linija toplotne energije vazduha generisane u DVF (formula 3.8), predstavlja promenu stanja vazduha od njegovog ulaska do izlaza iz fasade. Vrednosti su uvek pozitivne, što potvrđuje pozitivan vertikalni gradijent u međuprostoru. Dramatičan rast u prepodnevnim satima izaziva probleme pregrevanja. Međutim, u toku drugog dela dana i u toku noći postoji solidan nivo potencijala, koji bi u dobroj meri eliminisao kasnije pregrevanje. Linija toplotnog potencijala (formula 3.9) predstavlja trenutni energetski odnos između stanja vazduha u DVF i vazduha u prostoriji specificiran po m^2 površine otvora fasade. Vrednosti su uvek negativne, što potvrđuje efekat pregrevanja i veliku količinu indirektnih solarnih dobitaka toplote. Rezultat, takođe, pokazuje i solidan potencijal DVF za prirodnu i noćnu ventilaciju.



Slika 3.50: Toplotni potencijal u letnjem režimu

3.5 ZAKLJUČCI IZVRŠENIH MERENJA

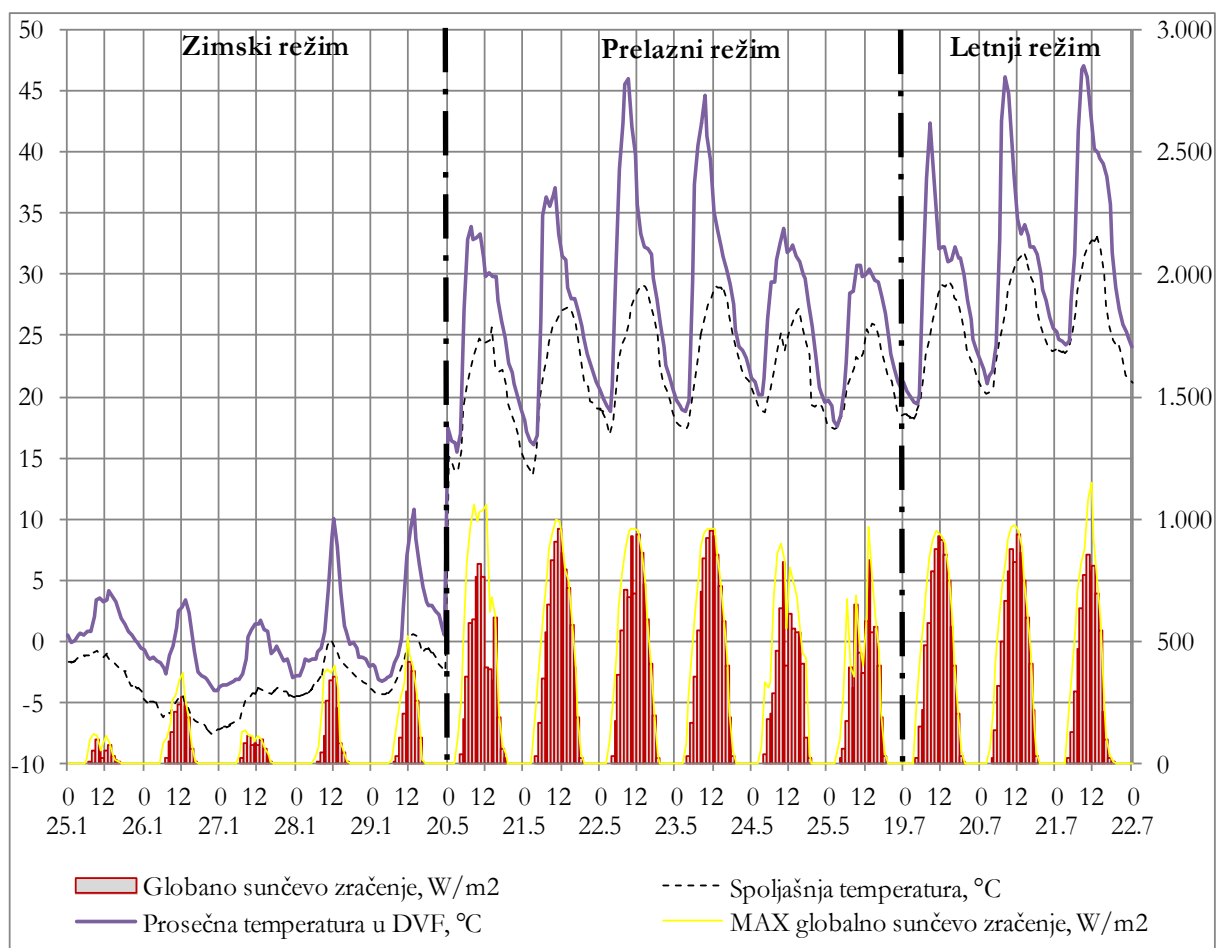
Osnovni zadatak izvršenih merenja je da se utvrdi trenutno stanje izabranog dela omotača objekta sa DVF. Dobijeni rezultati su iskorišćeni kako bi se stepen efektivnosti i kvantifikovao. Eksperimentalni rezultati pokazuju zimski, prelazni i letnji način termičkog ponašanja posmatrane fasade. Kako otvori na ulazu i izlazu fasade nisu regulisani, ponašanje fasade je u tesnoj vezi sa trenutnim spoljašnjim uslovima (unutrašnji uslovi se mogu pretpostaviti da su konstantni u toku posmatranog režima). Iz tog razloga, rezultati pokazuju da energetska efikasnost fasade nije u potpunosti dostignuta. Glavni problemi nastali su prilikom izbora projektnog rešenja, čiji je osnovni cilj bio težnja za estetikom i smanjenjem spoljašnje buke. Kasnije su se konstatovali i problemi sa nerazumevanjem osnovnih radnih principa ovog tipa fasade.

Na osnovu izvršenih merenja na objektu VIG Plaza, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- u toku zime, temperature u međuprostoru fasade su malo više u odnosu na spoljašnje vrednosti. Vertikalni termički gradijent je više naglašen u toku perioda sa intenzivnijim sunčevim zračenjem. Brzina strujanja vazduha u fasadi najviše zavisi od uticaja vetra i za slučaj ekstremnih brzina (20 m/s) dokazano je da fasada u velikom meri eliminiše negativne efekte. Termovizijskim ispitivanjem prikazane su razlike u transmissionim gubicima u odnosu na tip omotača sa "zid zavesom". Analizom su potvrđene niže vrednosti gubitaka kod DVF i veoma male horizontalne i vertikalne devijacije temperatura po površini fasade. Zaključeno je, da je neophodna regulacija otvora fasade u smislu još boljeg "buffer" efekta fasade;
- prelazni (prolećni) režim predstavlja period sa najboljim karakteristikama efektivnosti fasade. Umereni spoljašnji uslovi su glavni razlog tome. U ekstremnim slučajevima (niže

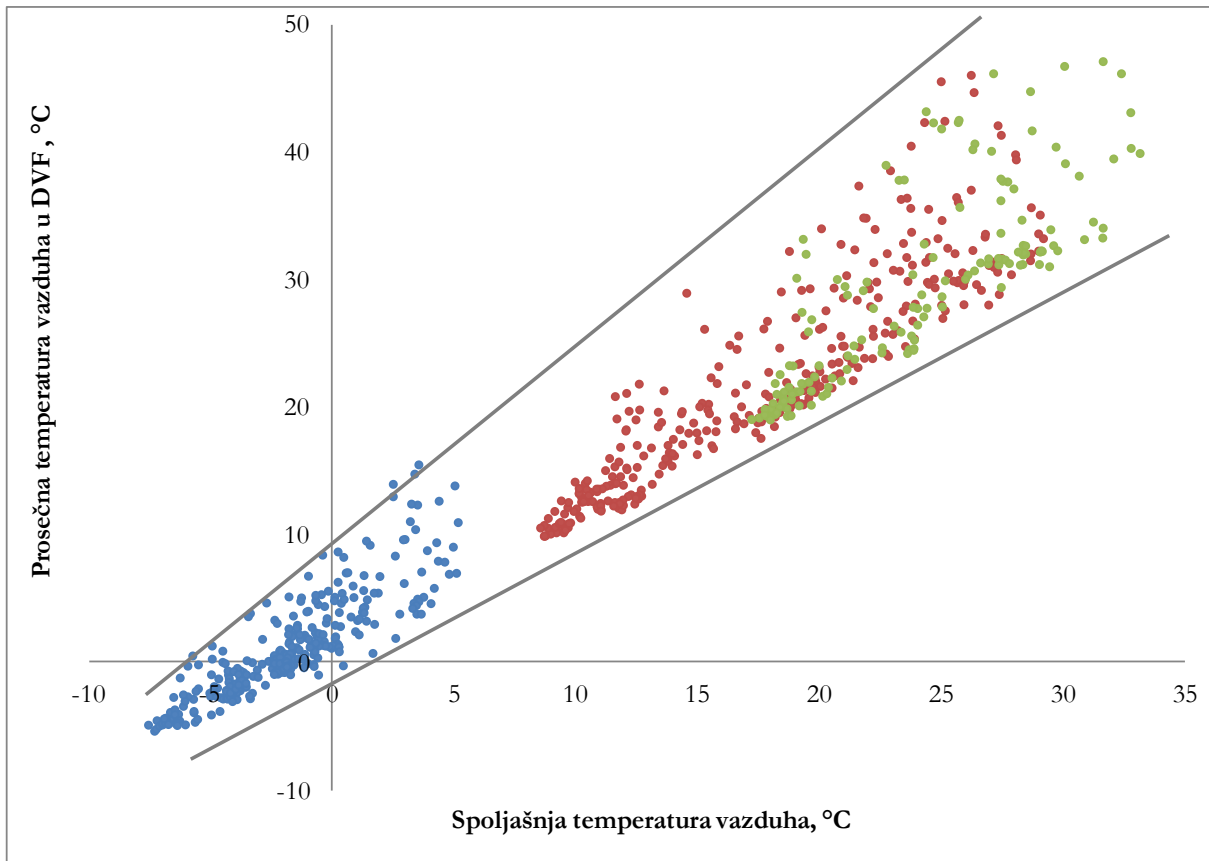
ili više spoljašnje temperature i vrednosti insolacije), regulacija otvora ili prikladna noćna ventilacija su neophodni, kako bi se eliminisali negativni efekti pothlađenja ili pregrevanja vazduha u fasadi;

- u toku leta, međuprostor fasade je u određenim periodima pregrejan. Iz tog razloga, količina indirektnih solarnih dobitaka je povećana, što negativno utiče na termički komfor u blizini prozora. Tokom ovog perioda, neophodno je sniziti vrednosti temperatura u fasadi prikladnim operativnim strategijama. Pod tim se podrazumeva povećanje brzine strujanja vazduha u fasadi (ubrzano odvođenje toplote), noćno provetravanje ili povezivanje sa KGH sistemom. Zaključak je, da za dobre performanse DVF, inženjeri moraju napraviti kompromis i optimizovati prirodne (razlika temperatura između delova DVF) i prinudne (uticaj vetra) efekte konvekcije. Takođe, treba naglasiti, da se u toku leta regulisanim venecijanerima i adekvatnim spoljašnjim zastakljenjem, praktično eliminišu dobitci nastali direktnim prodiranjem sunčevog zračenja. Budućim energetske simulacijama neophodno je formirati bilans energije, koji predstavlja odnos negativnog (pregrevanje vazduha u međuprostoru fasade) i pozitivnog efekta (eliminisanje dobitaka toplote nastalih prodorom sunčevog zračenja) kako bi se doneo zaključak o uticaju DVF u letnjem režimu.



Slika 3.51: Izabrani periodi zimskog, prelaznog i letnjeg režima

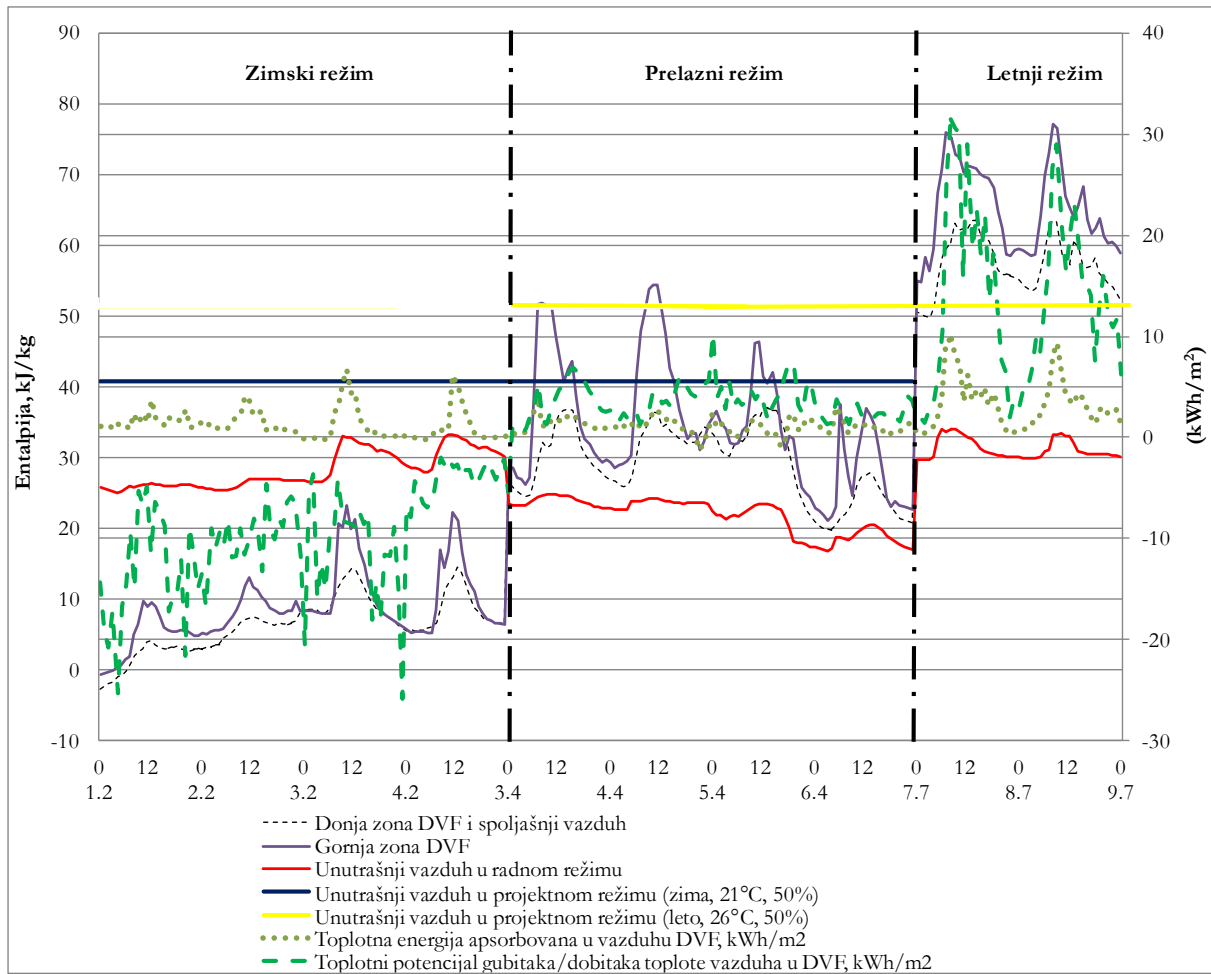
Na slici 3.52, prikazana je detaljnija veza između prosečne temperature vazduha u DVF i spoljašnje temperature za sva tri režima. Plave tačke predstavljaju zimski, crvene prelazni, a zelene letnji režim. Primećuje se, da veće temperaturske razlike nastaju u prelaznom i letnjem režimu. Ove razlike su posledica većih dnevnih temperaturskih fluktuacija u toku proleća i leta.



Slika 3.52: Zavisnost prosečne temperature vazduha u DVF od spoljašnje temperature vazduha za sve režime

Prateći predstavljenu metodologiju, analizom energetske efikasnosti DVF u toku svih režima, može se zaključiti sledeće (slika 3.53):

- za izabrani deo zimske sezone, primećuje se da je apsorbovana energija u većini slučajeva pozitivna, što dovodi do smanjenja toplotnih gubitaka objekta. Časovne vrednosti specifične promene entalpije su u intervalu od 0,9 do 7 kWh/m². Međutim, analizirajući stanje vazduha u međuprostoru i u samom objektu, očigledan je zaključak da ne postoje uslovi za prirodnu ventilaciju. Operativnim strategijama regulacije otvora fasade ili njenim povezivanjem sa KGH sistemom moguće je podići energetske nivo posmatranog vazduha;
- posmatrajući prelazni režim, očigledno je da ovaj period predstavlja deo godine sa najvećim mogućnostima za uštedu ovog fasadnog rešenja. Većinu vremena časovne vrednosti specifične promene entalpije su bliske 0 kWh/m², što oslikava slične uslove vazduha u prostoriji i u fasadi. Kao dodatak mogu se primetiti periodi sa blagim pregrevanjem ili pothlađivanjem, koji se mogu efikasno izbeći regulacijom otvora ili tehnikama noćne ventilacije;
- u toku dela leta sa ekstremno visokim temperaturama i vrednostima insolacije, entalpije vazduha u fasadi su više od vrednosti spoljašnjeg ili vazduha u prostoriji. Časovne vrednosti specifične promene entalpije vazduha u fasadi su u intervalu od 0,2 do 10 kWh/m². U ekstremnim slučajevima, kada se posmatra odnos sa vazduhom u prostoriji, vrednosti su još više i idu i do 32 kWh/m². Rezultati prikazuju veću količinu indirektnih solarnih dobitaka toplote. Takođe, treba napomenuti da zbog primenjenih mera regulacije venecijanera i dobro izabranog spoljašnjeg zastakljenja, direktni solarni dobitci su u velikoj meri eliminisani.



Slika 3.53: Energetske performanse DVF za izabrane periode zimskog, prelaznog i letnjeg režima

Kako bi se procenili trenutni energetske potencijali DVF za prirodnu ventilaciju, formiran je indikator efektivnosti. Za ovaj indikator izabran je parameter E_u , čije vrednosti predstavljaju trenutno energetske stanje vazduha u DVF u odnosu na stanje vazduha u prostoriji. Na ovaj način može se odrediti trenutni energetske potencijal vazduha u fasadi za prirodnu ventilaciju.

Kako bi detaljnije odredili energetske potencijal prirodne ventilacije, vrednosti indikatora su podeljeni u tri grupe:

- $E_u < -4 \text{ kWh/m}^2$, relativno niske vrednosti indikatora i bez potencijala za prirodnu ventilaciju - vazduh u fasadi je pothlađen;
- $-4 \leq E_u \leq 4 \text{ kWh/m}^2$, umerene vrednosti indikatora i visok potencijal prirodne ventilacije;
- $E_u > 4 \text{ kWh/m}^2$, relativno visoke vrednosti indikatora i bez potencijala za prirodnu ventilaciju - vazduh u fasadi je pregrejan.

Na osnovu izračunatih časovnih vrednosti indikatora i podele na predložene grupe, može se zaključiti sledeće:

- u toku zimske sezone, 98% perioda je sa relativno niskim vrednostima indikatora. Samo u nekoliko perioda u toku marta meseca, vrednosti indikatora su umerene. Zaključak je da u toku zime nema energetske potencijala za prirodnu ventilaciju;

- za vreme prelaznog režima, vrednosti indikatora su umerene u 64% ukupnog vremena. Postoje periodi u toku marta i aprila sa relativno niskim vrednostima (15%) i intervali u maju i junu, sa relativno visokim vrednostima (21%). Zaključak je da prelazni režim u većini vremena ima dobar energetske potencijal za prirodnu ventilaciju;
- leto, predstavlja period u kojem su vrednosti indikatora relativno visoke (61% ukupnog perioda). U većini slučajeva u toku noći i u par perioda u junu i julu, vrednosti indikatora su umerene. Zaključak je, da u toku leta postoji rizik od pregrevanja, koji se može umanjiti efektom noćne ventilacije.

Na ovaj način prikazana analiza ukazuje da najveći procenat energetskeg potencijala za prirodnu ventilaciju predstavlja prelazni režim. Neophodnost regulacije otvorenosti fasade i tehnike noćne ventilacije u mnogome mogu doprineti smanjenju gubitaka odnosno rizika od pregrevanja vazduha u DVF. Treba naglasiti da postoji značajna energetska razlika između zona u DVF zbog prisutnog vertikalnog termičkog gradijenta. U tom smislu, prva (donja) zona ima najmanji potencijal u smanjenju zimskih gubitaka toplote, ali sa druge strane ima i najmanji rizik od pregrevanja. Kako se pomeramo naviše, rezultati za drugu (središnju) i treću (gornju) zonu su u suprotnosti sa prvom. Potencijal za smanjenje toplotnih gubitaka i rizik od pregrevanja je sve veći.

Kao zaključak, raznolikost dobijenih rezultata ukazuje da inženjeri moraju prepoznati da prisustvo DVF ne rezultuje uvek smanjenju energetske potrošnje, iako to predstavlja samo jednu, možda i najvažniju, od mnogih projektnih zahteva buduće zgrade.

3.6 LITERATURA

- [1] Bošnjaković, F., Nauka o toplini, II dio, IV izdanje, 1976, Tehnička knjiga, Zagreb, Hrvatska
- [2] Grinzalo, E., Vavilov, V., Kauppinen, T., Quantitative infrared thermography in buildings, Energy and Buildings, 1998, p.p. 1-9
- [3] Morvay, Z., Gvozdenac, D., Applied Industrial Energy and Environmental Management (Toolbox 6), 2008, Wiley-IEEE Press
- [4] Standard EN 13187, Thermal performance of buildings, Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes, Infrared method (ISO 6781:183 modified), November 1998
- [5] ThermaCAM B20 and FLIR Tools+ Software by FLIR Systems, User Guide and Manual

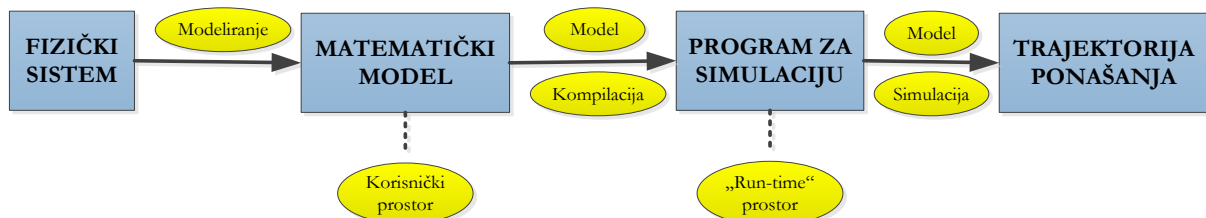
**4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE
NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA**

["A great building must begin with the unmeasurable,
must go through measurable means when it is being designed,
and in the end must be unmeasurable"]
(Louis Kahn)

4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA

Simulacije predstavljaju jedan od najmoćnijih i najvažnijih alata u modernom svetu. Iz kog razloga pravimo modele i vršimo njihove simulacije? Glavni osnov je to, što je jeftinije napraviti virtuelni model koji je zasnovan na poznatim fizičkim procesima, nego realan prototip. Ovo se takođe odnosi i na testiranje potencijalno mogućih alternativnih rešenja. Suština je, da je simulacija jeftinija od proizvodnje pogrešnog ili lošeg finalnog proizvoda. Naravno, uvek se može postaviti pitanje nivoa tačnosti simulacija i kako će se u stvarnosti ponašati prethodno simuliran model.

Definiciju modela (modeliranje) možemo pronaći u rečniku "Oxford English Dictionary", kao uprošćeni matematički opis sistema ili procesa koji se koristi da pomogne prilikom proračuna i predviđanja ponašanja željenog proizvoda. Takođe, u ovom rečniku može se pronaći definicija projekcije (modela) kao procena ili predviđanje ponašanja na osnovu sadašnjih trendova. Howe [21], je dao definiciju simulacije modela kao pokušaj predviđanja aspekata ponašanja nekog sistema putem razvoja približnog matematičkog modela. Cellier i Kofman [8], su na slici 4.1 prikazali vezu između formiranja modela (modeliranja) i simulacije.

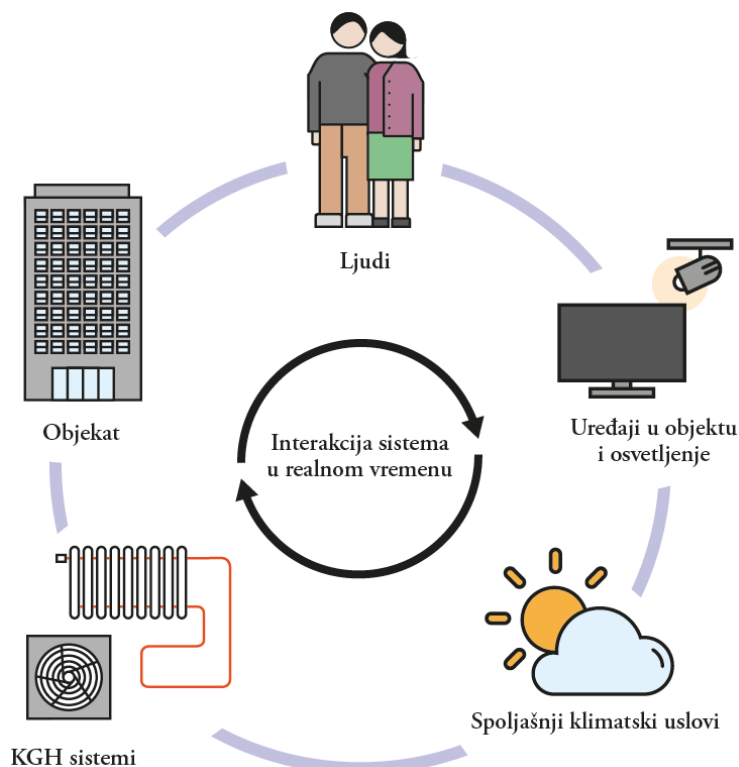


Slika 4.1: Odnos simulacije i formiranja modela [2]

Prema njima, smisao matematičkog modela je, da na što pogodniji način pruži korisniku informacije i saznanja o fizičkom sistemu. To može biti crtež fasade objekta, skica KGH opreme i instalacije, šema automatike i slično. Na taj način matematički model predstavlja korisnički "interface" i on ne zavisi od toga na koji će način biti korišćen u simulacionom programu. Osnovni cilj simulacionog programa je da sračuna odziv sistema, najčešće u formi vremenske putanje. Uslov je, da je veza između matematičkog modela i simulacionog programa takva da su kompatibilni (u računarskom smislu) i da ga program automatski generiše. Program obično pruža "run-time interface" koji korisniku omogućava da kontroliše simulaciju u svakom trenutku. Na ovakav način, formirano razdvajanje između matematičkog modela i simulacionog programa, predstavlja osnovni princip za buduće kreiranje modela i njegovu simulaciju.

Razvoj energetske simulacije termičkih performansi objekata korišćenjem digitalnih računara datira još od 60-tih godina XX veka [4, 13, 33]. Osnovni cilj ovih simulacija bio je da se što tačnije izračunaju toplotna opterećenja (gubici i dobici toplote), kao i celokupna energetska analiza objekta sa aspekta procene potrošnje svih vidova energije. Kako je vreme prolazilo, okvir simulacionih paketa se širio i postajao sve više integralan (slika 4.2). Na ovakav sled događaja, pre svega, uticali su povećani zahtevi objekata za boljim energetskim karakteristikama, pojačani zahtevi korisnika za kvalitetnijim unutrašnjim komforom (povećanje svesti o vezi između kvaliteta unutrašnjeg vazduha i zdravlja/produktivnosti korisnika objekta), kao i smanjenje uticaja na životnu sredinu i ograničenost fosilnih goriva. Na takav način, današnji programi za energetske simulacije omogućavaju razvoj održivog pristupa u projektovanju i radu objekata.

4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA



Slika 4.2: Integralno-dinamički pristup interakcije podsistema objekta

Kako bi proces integralnog projektovanja bio što uspješniji, efikasniji i jeftiniji, korišćenje BIM-a ("Building Information Model") je postalo neizbežno. BIM predstavlja digitalnu reprezentaciju fizičkih i funkcionalnih karakteristika objekta. Kao takav, on služi kao resurs znanja koji nam daje informacije o objektu, formirajući pouzdanu osnovu za donošenje odluka u toku životnog ciklusa objekta³. BIM je najčešće prikazan kao 3D objekat koga čine njegova geometrija, prostorni odnosi, geografske karakteristike, kao i osobine komponenata objekta. Kao glavna prednost BIM-a navodi se podsticaj saradnje svih struka u početnim fazama, što skraćuje vreme i smanjuje troškove projektovanja. Ovaj pristup omogućava i mogućnost optimizacije potencijalnog projektnog rešenja, što smanjuje rizik od promena u fazi izgradnje. Ostali benefiti BIM-a su: mogućnost parametarskog modeliranja, bolji kvalitet modela objekta, manji troškovi projektovanja, povećana efikasnost buduće gradnje i uzimanje u obzir problema održivosti kroz projektovanje i izgradnju.

Na osnovu svega navedenog, današnji softverski paketi su se u toj meri razvili da mogu uključivati sledeće module:

- za integraciju sa BIM-om;
- za integrisane simulacije prenosa toplote u mase u građevinskim elementima;
- za protoke vazduha u i oko objekta (prirodna i mehanička ventilacija);
- za analizu dnevnog i veštačkog osvetljenja;
- za KGH opremu i instalacije koje se ugrađuju u objekat;
- za proračune toplotnog opterećenja i energetske bilansa objekta;
- za integraciju obnovljivih izvora energije, emisiju CO₂ i uticaj na okolinu;
- za automatiku i kontrolu objekta;
- za energetske sertifikacije objekta;

³ National Building Information Modeling Standard Version 1, Part 1, 2007.

4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA

- za povezivanje i kosimulaciju sa drugim softverima, kao i
- za finansijske i LCA analize predloženih rešenja.

U isto vreme, razvijao se i grafički prikaz koji opisuje prethodno navedene module. Današnji izgled većine softverskih paketa je prilagođen potrebama i "prijateljski" nastrojen prema korisnicima.

4.1 UVOD

Beck i Arnold [6], definišu matematički model kao opis ponašanja sistema. On je sačinjen od tri komponente:

1. ulazne promenljive - utiču na ponašanje sistema (kontrolisani (u eksperimentalnim uslovima) i nekontrolisani (npr. meteorološki podaci) podaci);
2. struktura sistema (karakteristike) - fizički opis sistema (npr. termičke osobine elementa);
3. izlazni rezultati (odziv sistema) - opisuju reakciju sistema na ulazne promenljive (npr. potrošnja energije).

Rabl [44], je naveo da postoje dva opšta pristupa modeliranja i to: klasični i inverzni tip. Kod klasičnog tipa suština je da se predviđaju izlazni rezultati na određenom matematičkom modelu poznate strukture, kada su jasno definisane ulazne promenljive. Zbog težnje za što boljom tačnošću, ovi modeli mogu biti kompleksni i zahtevni sa aspekta računarske snage. Ovaj tip zahteva sveobuhvatno znanje o različitim prirodnim pojavama koji utiču na sistem, kao i poznavanje različitih međusobnih odnosa (npr. koeficijenti prenosa toplote i mase). Glavna prednost ovog tipa je to, što model ne mora fizički biti napravljen kako bi se predvidelo ponašanje. Iz tog razloga, ovaj se pristup modeliranju, najčešće koristi kod idejnih rešenja i projekata.

Primena u sektoru zgradarstva započinje fizičkim opisom objekta ili njegovih komponenti (slika 4.3). Ovo se pre svega odnosi na geometriju objekta, fizičke karakteristike (zidovi, prozori...), lokaciju, tipove KGH opreme, načine korišćenja... Kao izlazni rezultati, najčešće se posmatraju projekcije pikova i proseka energetske potrošnje.

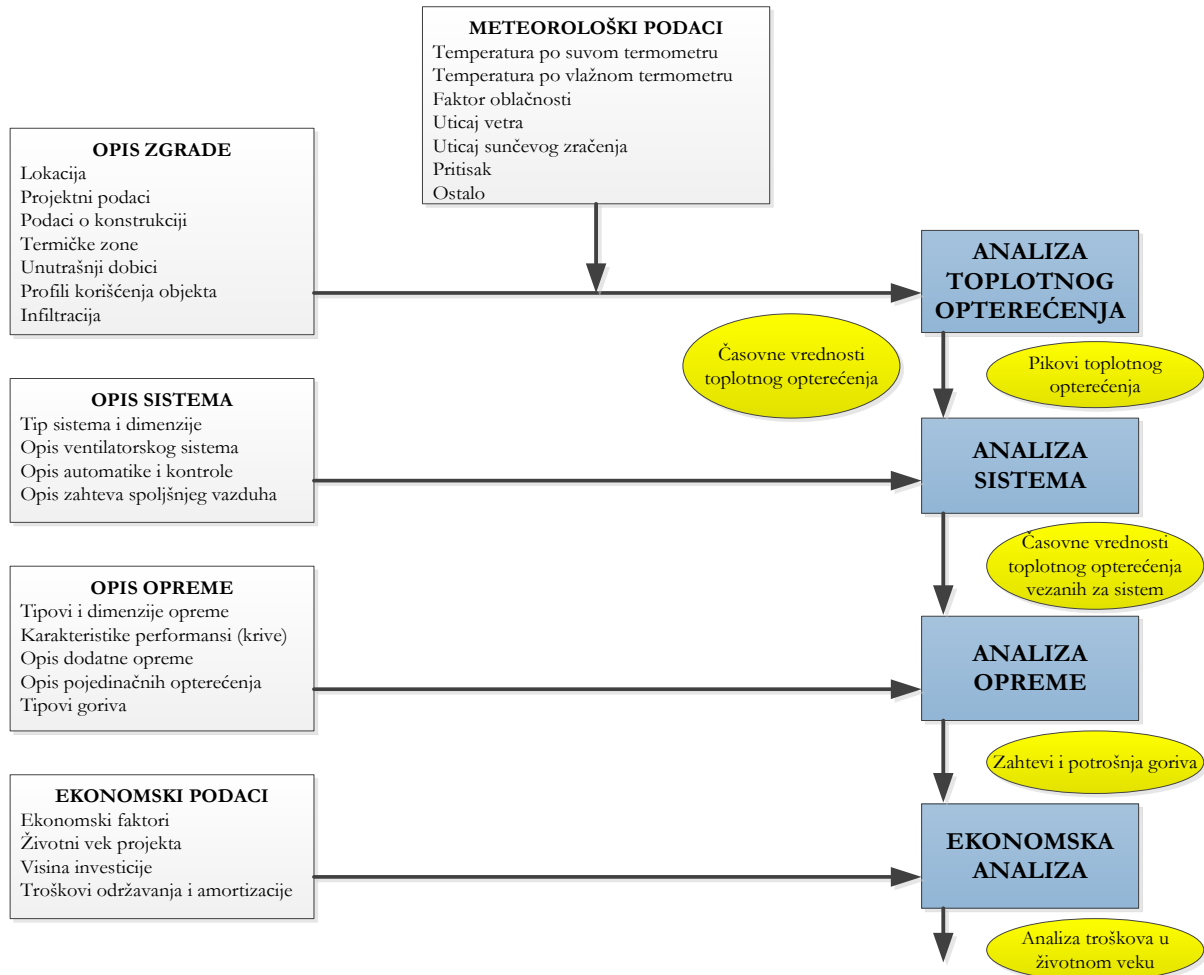
Same procedure za procenu energetske potrošnje objekta mogu se razlikovati, pre svega, po njihovim stepenima složenosti. Međutim, postoje tri zajednička elementa koje sve procedure sadrže i to su: proračun toplotnog opterećenja objekta, proračun mreže koja distribuira toplotu u objektu i proračun izvora toplote (KGH oprema koja snabdeva objekat toplotom). U skladu sa tim postoje i tri koraka prilikom proračuna energetske potrošnje objekta.

Prvi korak predstavlja proračun koji određuje toplotno opterećenje objekta. Kao rezultat dobija se količina toplote koja se mora dodati ili oduzeti od sistema, kako bi se u prostoru održavali propisani uslovi unutrašnjeg komfora. Najjednostavniji način da se proceni ova količina toplote jeste da ona bude samo funkcija od vrednosti spoljašnje toplote (zimski režim). Detaljnije metode uzimaju u obzir uticaj sunčevog zračenja, unutrašnje dobitke, uticaj vetra, senke... Energetski proračuni najčešće koriste prosečne i tipične klimatske podatke, a ne maksimalne vrednosti. Danas, najsofisticiranije procedure za proračun su bazirane na vrednostima tipične meteorološke godine (časovne vrednosti svih klimatskih parametara za datu lokaciju, 8.760h).

Drugi korak, podrazumeva proračun mreže koja je zadužena za distribuciju toplote u objektu. Proračun može biti jednostavan (procenjuje gubitke u razvodnoj mreži vazduha ili vode), ili složen kada su u pitanju sistemi sa varijabilnim protokom vazduha.

4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA

Treći korak obuhvata proračun KGH opreme koja treba da zadovolji potrebe objekta za toplotom. Oprema se bira prema maksimalnim zahtevima koji uključuju stepene efikasnosti, kao i karakteristike rada pri smanjenom opterećenju.



Slika 4.3: Algoritam toka programa za energetske simulacije objekata [3]

Inverzni tip modeliranja je zamišljen tako, da su ulazni i izlazni podaci izmereni i poznati, dok je zadatak da se odredi matematički opis sistema i procene njegovi parametri. Za razliku od klasičnog tipa modeliranja, ovaj pristup zahteva da je sistem već fizički izgrađen i da je moguće izmeriti parametre performansi. Ako sistem omogućava da se tretira pod unapred definisanim i planiranim uslovima, reakcijom sistema dobijaju se podaci o performansama u širem spektru od uobičajenog (nominalnog) režima. Ovi podaci daju mnogo veću tačnost modela. Kada se sistem ne može analizirati u ovakvim uslovima, podaci o performansama se dobijaju iz nominalnog režima. Sistemi koji se modeliraju putem inverznog tipa, su mnogo tačniji i precizniji u budućoj predikciji, od sistema koji se modeliraju na klasičan način.

4.1.1 FINO PODEŠAVANJE MODELA

Energetske simulacije u današnje vreme, u mnogome pomažu istraživačima i inženjerima kako u projektnoj, tako i u fazi eksploatacije objekta. Cilj je, naravno, dobiti tačnu i preciznu procenu potrošnje energije ili uticaja neke od predloženih operativnih strategija. Kvalitet procene najviše zavisi od pouzdanosti samog integrisanog simulacionog modela. Kako bi osigurali i pospešili

4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA

tačnost, mora se izvršiti fino podešavanje primenjenog modela. Opis i razvoj opšte metodologije finog podešavanja energetskih simulacija modela objekata može se pronaći u [37, 45].

Fino podešavanje predstavlja proces povezivanja energetske simulacije sa merenjem na izabranom objektu. Prema Reddy-ju [47], kalibrisana simulacija nastaje kao proces finog podešavanja (kalibracije) modela, kako bi izlazi (potrošnja ili neki drugi izabrani parametar) bili što približniji realnom stanju. Proces kalibracije se obavlja varijacijom različitih (najosetljivijih) ulaznih parametara. Sam model predstavlja virtuelnu prezentaciju realnog objekta i veoma je važno da se u što većoj meri podudara sa njim (oblik i dimenzije, termičke karakteristike materijala, KGH sistemi, ponašanje korisnika...). Osnovni cilj kalibracije je da se što više smanji razlika između rezultata dobijenih simulacijom i rezultata dobijenih merenjem. Uostalom, sama dinamička priroda graničnih uslova (ulazni parametri), navodi nas da neke od najosetljivijih parametara moramo kalibrisati i u više navrata, tako da sam proces ne možemo tretirati kao jednovremenu aktivnost. Tako dobijen kalibrisan model predstavlja suštinski činilac povećanja energetske efikasnosti u operativnoj fazi objekta.

U literaturi i praksi navodi se da se fino podešeni modeli mogu koristiti za sledeće svrhe:

- analizu potrošnje energije u skladu sa primenjenim merama energetske efikasnosti;
- identifikaciju najboljih i najefikasnijih energetskih mera;
- predlaganje budućih investicija zbog povećanja energetske efikasnosti objekta;
- definisanje osnovnog (baznog) modela (početno ili trenutno stanje objekta) kako bi se kvantifikovale mere povećanja energetske efikasnosti (model nakon poboljšanja); mogu se porediti modeli različitih projektnih rešenja (npr. klasične i dvostruke fasade);
- unapređenje tačnosti modela koji se razvija u fazi projektovanja, pružajući smernice za buduće projekte;
- identifikacija često korišćenih pretpostavki u fazi projektovanja, koje ne odgovaraju realnom korišćenju zgrade;
- smanjivanje razlika u znanju i pronalaženje novih oblasti za istraživanje;
- dodatno unapređenje u razvoju simulacionih alata (identifikovanjem netačnosti u modelima simulacionih alata i ostalih mogućnosti).

Kao nedostatak, nije za očekivati da će u skorijoj budućnosti biti moguće kalibrisati model tako da bude identičan realnoj zgradi na svim nivoima rezolucije (časovna, dnevna, mesečna) zbog:

- problema sa neophodnim podacima dobijenih merenjem;
- uprošćenja koja postoje u svim simulacionim alatima;
- činjenice da veliki broj promenljivih stvara širok parametarski prostor, koji ima više jedinstvenih rešenja.

U posmatranom slučaju (primer DVF), proces potvrđivanja modela obavlja se u tri faze, odnosno u tri režima (zimski, prelazni i letnji režim). U tom smislu, proces finog podešavanja se ne posmatra kao jednovremena aktivnost, što dovodi do postizanja preciznijeg i pouzdanijeg modela. Ponašanje modela i odnosi rezultata simulacije i merenja će se posmatrati u tri potpuno različita slučaja. Cilj je dobiti što tačniju vrednost temperatura vazduha i okolnih pregrada koji pripadaju zoni dvostruke fasade. Kako bi bili što bliže cilju, pažnja se mora obratiti na sledeće faze prilikom formiranja EnergyPlus+AirFlow Network modela:

4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA

1. vizuelizacija kreiranog simulacionog modela pomoću grafičkog prikaza programa - na ovaj način moguće je otkloniti svaku sumnju da li model geometrijski reprezentuje razmatrani objekat;
2. analiza meteoroloških podataka (da li se mere ili se preuzimaju iz baze softvera);
3. unos svih poznatih karakteristika objekta (ovo se odnosi na korišćene materijale u konstrukciji, orijentacija, period i način korišćenja, sistemi za KGH...);
4. zoniranje objekta - pravilno podeliti objekat sa istim unutrašnjim projektnim zahtevima;
5. izbor dovoljnog broja čvornih mesta (nodova) kako bi AirFlow Network algoritam dao realnu reprezentaciju protoka vazduha;
6. dobra procena infiltracije - ovaj parametar je veoma teško izmeriti i treba ga tretirati kao nepoznatu, koja će biti iterativno određena simulacijama; Postoje dva načina za simulaciju infiltracije;
7. minimiziranje podrazumevanih ("default") vrednosti - treba proveriti sve podrazumevane ulazne podatke, jer mogu imati malo ili nimalo sličnosti sa realnom zgradom;
8. pravilan izbor distribucije sunčevog zračenja u zavisnosti od postavke venecijanera (5 mogućnosti);
9. pravilan odabir proračuna koeficijenta prolaza (dve mogućnosti) i prelaza (unutrašnji - četrdesetpet mogućnosti i spoljašnji - pet mogućnosti) toplote;
10. pravilno određivanje ostalih značajnih parametara simulacije (koeficijent pritiska vetra na spoljašnje površine fasade, "discharge coefficient" za otvore između spratova, koeficijent i eksponent masenog protoka vazduha na unutrašnjoj i spoljašnjoj površini...).

4.1.2 POTVRĐIVANJE (VALIDACIJA) MODELA

Potvrda ili validacija modela je faza koja sledi nakon obavljenog finog podešavanja modela. Sam proces potvrđivanja treba da kvantifikuje tačnost rezultata dobijenih simulacijom, u poređenju sa rezultatima dobijenim merenjem.

Kako bi se procenio nivo tačnosti rezultata simulacionog modela, najčešće se koriste statističke metode i njihovi indikatori. Na osnovu tri preporuke, ASHRAE Guideline 14-2002, International Performance Measurement and Verification Protocol i M&V Guidelines for Measurement and Verification for Federal Energy Projects, za ocenu nivoa tačnosti koriste se sledeće statističke metode:

1. MBE (Srednja relativna greška "Mean Bias Error")

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)}{n-1} \text{ (K)}$$

2. RMSE (Kvadratni koren srednje kvadratne greške "Root Mean Squared Error")

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{n-1}} \text{ (K)}$$

4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA

3. CV(RMSE) (Koefficient varijacije kvadratnog korena srednje kvadratne greške "Coefficient of Variation of the Root Mean Squared Error")

$$CV(RMSE) = \frac{RMSE}{N} \cdot 100 (\%)$$

4. R^2 (Koefficient determinacije "Coefficient of Determination")

$$R^2 = \left(\frac{(n \sum_{i=1}^n (M_i S_i) - (\sum_{i=1}^n M_i)(\sum_{i=1}^n S_i))^2}{(n \sum_{i=1}^n (M_i^2) - \sum_{i=1}^n (M_i^2))(n \sum_{i=1}^n (S_i^2) - \sum_{i=1}^n (S_i^2))} \right) \cdot 100 (\%)$$

Kod metoda 1 i 2, n je zamenjeno sa $n-1$ (broj stepena slobode). Ovo se dešava u slučajevima kada je broj merenja i simulacija ograničen, odnosno nije beskonačan. Pojam stepena slobode je nastao pri geometrijskom prikazivanju problema u vezi sa određivanjem srednje relativne i srednje kvadratne greške. U ovom slučaju je stepen slobode broj dimenzija geometrijskog prostora, primenjenog za rešavanje problema. Ako se na neki izvor promena procenjuje m parametara na osnovu n nezavisnih rezultata merenja ili simulacija, stepen slobode je $n-m$. Pošto se u ovom slučaju rezultati merenja i simulacija procenjuju njihovom aritmetičkom sredinom ($m=1$), broj stepeni slobode je $n-1$ [18].

Gore navedene preporuke i indikatori su pogodni za energetska analizu na nivou celog objekta, kada su vrednosti konstantno pozitivne (potrošnja energije KGH opreme). U slučaju predikcije temperature, do danas nisu napisane preporuke. Iako preporuke ne postoje, ovi indikatori predstavljaju najčešće korišćene i najpogodnije tehnike kod potvrđivanja simulacionih modela. Pored predložena četiri indikatora, analizi su pridružena još dva, i to:

1. DMIN

$$DMIN = \min(S_i - M_i) (K)$$

2. DMAX

$$DMAX = \max(S_i - M_i) (K)$$

gde su:

M_i – izmerena vrednost u trenutku i ;

S_i – vrednost dobijena simulacijom u trenutku i ;

n – ukupan broj merenja;

N – aritmetička vrednost izmerenih podataka, $N = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i)}{n}$.

MBE je statistički pokazatelj koji ukazuje na prosečno odstupanje (razliku) modelom predviđenih vrednosti od stvarnih (izmerenih vrednosti) posmatrane pojave, odnosno, ukazuje na tendenciju odstupanja jedne grupe podataka od drugih. Pozitivne vrednosti ovog pokazatelja ukazuju da model predviđa iznad stvarnih vrednosti posmatrane pojave (predviđena vrednost je veća od stvarne/izmerene vrednosti), a negativne vrednosti istog ukazuju da model predviđa ispod stvarne vrednosti posmatrane pojave. Niža vrednost MBE je poželjna. Idealna vrednost pomenutog pokazatelja je nula, jer u tom slučaju ne bi bilo razlike između modelom predviđenih vrednosti posmatrane pojave i stvarno izmerenih vrednosti. Ovaj pokazatelj ne može da uključi u obzir i grešku potiranja, kada se zbog pojave pozitivnih i negativnih vrednosti razlike ($S-M$), smanjuje MBE.

4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA

Indikator RMSE se često koristi u praksi za određivanje razlike u rezultatima dobijenih računarskom simulacijom modela i vrednosti dobijenih merenjem. RMSE ukazuje koliko jedna serija podataka fluktuiru (odstupa) u odnosu na drugu seriju podataka. Ovaj pokazatelj ukazuje na veličinu prosečnog odstupanja (greške) i stepen fluktuiranja podataka, ali direktno ne daje nikakve informacije o relativnoj veličini prosečne razlike predviđene i izmerene vrednosti. Na osnovu ovog pokazatelja dobijaju se informacije o performansama modela u određenom vremenskom periodu. Vrednost ovog pokazatelja je uvek pozitivna, a idealna vrednost RMSE je nula.

Koeficijent varijacije RMSE (CV(RMSE)), predstavlja indikator koji pokazuje odnos RMSE i aritmetičke sredine. Najčešće se izražava u procentima i govori nam koliki je udeo RMSE u aritmetičkoj sredini.

Kvadrat koeficijenta korelacije ili koeficijent determinacije je odnos kovarijanse, podeljen predviđenim i izmerenim vrednostima posmatrane pojave. On predstavlja meru sposobnosti predviđanja regresionim modelom.

Koeficijent determinacije pokazuje udeo (procenat) objašnjenog varijabiliteta u ukupnom varijabilitetu. Ovaj pokazatelj kvaliteta regresije daje odgovor na pitanje koji deo varijacija zavisne promenljive (rezultati simulacije) je objašnjen modelom, odnosno varijacijama nezavisne promenljive (rezultati merenja). Ako je koeficijent korelacije $R=0,8$, koeficijent determinacije R^2 je $0,64$, što znači da je udeo objašnjenog varijabiliteta posmatranih pojava u ukupnom varijabilitetu 64% , odnosno 64% rezultata dobijenih simulacijom modela se podudara sa izmerenim vrednostima.

Glavno pitanje potvrđivanja modela je, kada i u kom trenutku se model može smatrati kalibrisanim. Odgovor na ovo pitanje nam daju opšte prihvaćeni i preporučeni kriterijumi, tzv. kriterijumi prihvatljivosti. Na osnovu navedenih standarda i preporuka, preporučena vrednost statističkog parametra R^2 za merenja i simulacije rađene na časovnom nivou, data je u sledećoj granici:

1. $R^2 \geq 75\%$

Za ostale indikatore nisu navedene preporuke, tako da će se njihova analiza bazirati na ličnoj proceni. Ta ocena će se bazirati pre svega na nivou tačnosti i podudaranja rezultata dobijenih simulacijom i rezultata dobijenih merenjem. Ovako dobijen potvrđen model u daljem razvoju može se koristiti za parametarske analize određivanja optimalnih karakteristika stakla (u odnosu na postojeće stanje), optimalne širine fasade (u odnosu na postojeće stanje) ili kakav bi uticaj DVF imala ako bi bila postavljena i na ostalim orijentacijama objekta. Takođe, analizom se mogu obuhvatiti predlozi sezonskih operativnih strategija, kako bi se kvantifikovali efekti energetske uštede predloženih mera.

Tabela 4.1, predstavlja pregled rezultata autora koji su se bavili potvrđivanjem simulacionih modela objekata sa DVF. Rezultati se odnose na prosečna i maksimalna odstupanja (temperatura i brzina strujanja) modela i objekta, kao i vrednosti koeficijenta determinacije R^2 .

Tabela 4.1: Pregled dosadašnjih rezultata vezanih za potvrđivanje modela objekta sa DVF

Tip Objekta	Program za simulaciju	Greška (°C; m/s)		R^2 (%)
		Prosečna	Tipična maksimalna	
Laboratorijski model (26)	EnergyPlus	2,91; 0,99	20,06; 1,16	—
Laboratorijski model (37)	EnergyPlus	0,18; —	0,72; —	—
Laboratorijski model (9)	EnergyPlus	0,27; —	4,91; —	—

4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA

Laboratorijski model (25)	ESP-r	0,85; —	5,22; —	—
Laboratorijski model (38)	ESP-r	0,45; —	15,31; —	90,89
Laboratorijski model (39)	EnergyPlus	1,40; —	2,50; —	92,32
Realan objekat (57)	EnergyPlus	0,37; —	1,4; —	—
Realan objekat (57)	EnergyPlus	2,15; —	4,85; —	—
Realan objekat (27)	TRNSYS	1,87; —	4,17; —	96,58
Realan objekat (10)	EnergyPlus	1,86; —	9,58; —	94,62
Realan objekat (23)	EnergyPlus	2,25; 0,21	8,74; 0,38	90,31
Realan objekat (54)	EnergyPlus	4,56; —	7,12; —	—

Iz pregleda gore navedene literature može se zaključiti da su prosečne greške ispod 5°C, dok se vrednosti grešaka umanjuju kada su u pitanju bolje kontrolisani uslovi (što je veći uticaj prirodnog strujanja veće su i greške). Takođe, logičan je i sled okolnosti, da vrednosti grešaka opadaju u slučajevima gde imamo detaljnija merenja, tačnije ulazne parametre (karakteristike materijala, način korišćenja...) ili kalibrisane simulacije sa analizama osetljivosti ključnih parametara.

4.2 OPŠTI USLOVI ZA IZBOR METODE MODELIRANJA

Prilikom izbora metode putem koje će se izvršiti energetska analiza objekta, najvažniji korak jeste da se mogućnosti izabrane metode podudaraju sa zahtevima projekta. U literaturi se pojavljuju sledeći uticajni faktori [51]:

- tačnost - metod, pre svega, mora imati zadovoljavajući nivo tačnosti. Uzrok da ni jedna računica ne može biti apsolutno tačna jeste to što prilikom procene energetskih potreba objekta učestvuje veliki broj promenljivih parametara. Kako bi se uvelo uporedno testiranje među postojećim metodama usvojen je standard ANSI/ASHRAE Standard 140 (Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs). On je razvijen kako bi se identifikovale razlike u predikciji koje mogu nastati usled algoritamskih razlika, grešaka u kodu ili grešaka u ulaznim podacima;
- osetljivost - metod mora biti osetljiv na sve opcije dizajna koje se razmatraju. Očigledno je da se razlika u upotrebi energije između dva izbora mora adekvatno odraziti i na rezultate korišćene metode;
- raznovrsnost - metod bi trebalo da omogući analizu svih opcija koja se razmatraju;
- uniformnost - metod ne bi trebalo da dozvoli nejasno definisane izbore, što bi eliminisao rizik da različiti korisnici dobijaju različite rezultate;
- brzina i trošak - ukupno vreme (prikupljanje podataka, priprema unosa, izračunavanje i analiza rezultata) za izradu analize treba da bude u skladu sa potencijalnim koristima. Troškovi analize u velikoj meri zavise od ukupnog vremena simulacije;
- jednostavnost korišćenja - najviše utiče na ekonomiju analize i uniformnost rezultata.

Izbor odgovarajućeg programa za energetska analizu objekta najviše zavisi od mogućnosti same aplikacije, načina i vremenskog korišćenja, iskustva i znanja korisnika, kao i kvaliteta samog računara. Najtačniji metodi za proračun potrošnje energije u objektima su najčešće i najskuplji. Međutim, taj trošak u poređenju sa troškom osposobljavanja korisnika za rad u tom programu je relativno mali. U tabeli 4.1 [2], prikazan je pregled i klasifikacija metoda za analizu potrošnje energije u objektima. Ova klasifikacija obuhvata oba tipa modeliranja (klasičan i inverzan), čija logika računanja se bazira na dinamičkoj metodi (kvazi-stacionarni modeli na časovnom ili kraćem nivou). Američko ministarstvo za energetiku redovno održava listu svih programa za energetske simulacije objekata i taj spisak se može pronaći na sledećem linku <http://www.energytoolsdirectory.gov>.

**4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE
NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA**

Tabela 4.2: Klasifikacija analitičkih metoda za analizu potrošnje energije u objektima

Dinamički Metod	Klasični tip	Inverzni tip			Komentari
		Empirijski ("crna kutija")	Kalibrisana simulacija	Fizički ("siva kutija")	
Termička mreža [44, 46, 51]	X	—	—	X	Koristi ekvivalentne termičke parametre
Faktori odziva [32, 40, 41, 52]	X	—	—	—	Podaci su tabelarni ili se koriste kao simulacioni programi
Furijeova analiza [49, 53]	X	—	X	X	Frekvencioni domen analize je konvertibilan u vremenskom domenu
ARMA model [44, 46, 54]	—	—	—	X	Autoregresivno pomeranje proseka ARMA modela
PSTAR [54]	X	—	X	X	Kombinacija Furijeove analize i ARMA modela
Modalna analiza [44, 5]	X	—	—	X	Opis objekta je sistem diferencijalnih jednačina formiran na osnovu nodova
Sistem diferencijalnih jednačina [44]	—	—	—	X	Linearne diferencijalne jednačine
Računarske simulacije DOE-2, BLAST, EnergyPlus [14]	X	—	X	—	Polučasovne i časovne energetske simulacije modela
Računarska imitacija TRNSYS, HVACSIM+ [11, 28]	X	—	—	—	Polučasovne energetske simulacije modela
Veštačke neuronske mreže [30, 31]	—	X	—	—	Neuronski modeli

4.2.2 IZBOR METODE I PROGRAMA ZA ENERGETSKE SIMULACIJE

Veliki broj autora je u svojim radovima, kao što je spomenuto u uvodnom poglavlju, analizirao termičke karakteristike DVF i u nekim od slučajeva rezultati simulacija i merenja se nisu u dovoljnoj meri poklapali. Generalno je teško kvantitativno predvideti termičke osobine DVF zbog toga što su one u tesnoj vezi sa promenljivim spoljašnjim uslovima, načinom strujanja vazduha u međuprostoru, kao i promenljivim prenosom toplote. U skladu sa tim, uticaj ovog dela objekta na unutrašnje uslove i samu potrošnju energije, nije lako predvideti. Glavni razlog tome je kompleksan i nestacionaran protok vazduha u međuprostoru prirodno ventilisane fasade. U stvari, sam protok zavisi od tri faktora, a to su: raspored temperatura u međuprostoru fasade (prirodan uzgon), sama konfiguracija i geometrija fasade, kao i spoljašnji uslovi (misli se na uticaj vetra).

Najznačajniji programi za simulaciju energetske performansi zgrada sa DVF ("Whole-building energy simulation programs") su: EnergyPlus, eQUEST, ESP-r, IES<VE>, TRNSYS, TAS, IDA ICE, VA114, BSim... Međutim, postoji problem odgovornosti, da li takvi alati mogu precizno da opisuju fenomene prenosa toplote koji se javljaju u složenim 3-D geometrijama DVF. Pošto postoji nedostatak konsenzusa u vezi pouzdanosti predviđanja tačnosti ovih simulacionih alata za DVF, dalje istraživanje na realnim objektima je neophodno, kako bi se adekvatno odgovorilo na ovu dilemu.

4.2.3 ENERGYPLUS - PROGRAM ZA ENERGETSKE SIMULACIJE OBJEKTA

Kao rezultat analize metoda i programa za modeliranje DVF, izabran je program EnergyPlus u kombinaciji sa mrežnim modelom AirFlow Network. Razlog je to, što je dosadašnja praksa pokazala da se ovim načinom modeliranja objekata sa DVF, dobija najbolji odnos tačnosti i brzine simulacije. Pored toga, program je prošao kroz međunarodnu uporednu proveru kroz standardne procedure ANSI/ASHRAE Standard 140-2011 i BESTEST (IEA SHC Task 34/Annex 43). Softver je besplatan i u širokoj je akademskoj i inženjerskoj primeni. Što se tiče grafičkog prikaza modela, crtanje se može uraditi u programima poput: Sketchup Open Studio Plug In-a, Design Builder-a, Autodesk Ecotect-a ili Simergy-a. Na ovaj način se procedura crtanja modela olakšava i ubrzava, a izvozom generisanog modela dobija se .idf dokument koji predstavlja programsku datoteku EnergyPlus-a. Takođe, moguće je fino podešavanje modela, promena koda ("open source program") ili povezivanje putem kosimulacije sa nekim drugim programom (npr. Matlab).

EnergyPlus je modularni softverski alat stvoren od strane "Lawrence Berkley" laboratorije u SAD [34]. Njegov razvoj započinje 1996. godine i on unapređuje tadašnja dva najraširenija metoda DOE-2 i BLAST, koji su razvijeni od strane Američkog ministarstva za energetiku. U osnovi predstavlja simulaciono jezgro, dok su programski ulazi i izlazi tekstualni fajlovi. U ovim modelima topotno opterećenje (grejanje i hlađenje) se računa u definisanom (koje zadaje korisnik) vremenskom koraku (najčešće na 15 minuta, a može i kraće) putem "Heat Balance" modula. "Heat Balance" algoritam, danas predstavlja najpotpuniji i najtačniji način za proračun toplotnog opterećenja. Zasniva se na prvom zakonu termodinamike i principima matrice algebre. On omogućava proračun trenutnog osetnog toplotnog opterećenja (grejnog i rashladnog), na posmatrani vazdušni prostor. Generalno, jednačine toplotnog bilansa su napisane za svaku pripadajuću površinu, plus jedna jednačina za vazduh u prostoriji. Na taj način se mogu identifikovati četiri osnovna procesa u ovoj metodi, a to su: spoljašnji bilans toplote, kondukcija u zidovima, unutrašnji bilans toplote i bilans toplote sa strane unutrašnjeg vazduha. Ovim setom jednačina moguće je odrediti nepoznate temperature površina i vazduha. Kada se nepoznate temperature odrede, one se dalje koriste za proračun konvektivnog prenosa toplote. Osnovna

4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA

uprošćenja ove metode su: uniformna temperatura posmatrane površine, uniformno dugotalasno i kratkotalasno zračenje, zračenje površina je radijalno i kondukcija je jednodimenzionalna. Detaljan opis "Heat Balance" metode se može pronaći u [2], poglavlje 18.

Cilj ove metode je da odredi projektno toplotno opterećenje za fiksirane vrednosti temperatura posmatrane zone. Za energetske analize, bolje je znati trenutne vrednosti toplotne ekstrakcije. Ovo se može predstaviti preoblikovanjem formule 4.1, tako da se prenos toplote od KGH sistema određuje istovremeno sa temperaturom vazduha u zoni.

$$q_{sis_j} = \sum_{i=1}^{12} A_i h_{ci} (T_{si,j} - T_{aj}) + q_{CE} + q_{IV} \quad (4.1)$$

gde su:

q_{sis_j} - prenos toplote KGH sistema (toplotno opterećenje), $j=1, 2, \dots, 24$ [W];

q_{CE} - konvektivni delovi unutrašnjih dobitaka toplote [W];

q_{IV} - osetno opterećenje nastalo infiltracijom ili ventilacijom [W];

$T_{si,j}$ - unutrašnja temperatura površine, $i=1, 2, \dots, 12$; $j=1, 2, \dots, 24$ [K];

T_{aj} - zonska temperatura vazduha, $j=1, 2, \dots, 24$ [K];

h_{ci} - koeficijent konvekcije na unutrašnju površinu dobijen iz $q''_{conv} = h_{ci}(T_a - T_{si})$ [W/m²K];

A_i - površina i-te pregrade, $i=1, 2, \dots, 12$ [m²];

i - indeks površine;

j - indeks vremena.

Količina toplote KGH sistema predstavlja energiju, koju je sistem predao prostoru koji se klimatizuje. Iako se ovo može odrediti istovremeno modeliranjem sistema i same zone, pogodan je i jednostavniji način putem prikaza sistema kroz kontrolni profil. Ovaj profil se najčešće dobija iz formule 4.2.

$$q_{sis_j} = a + bt_{aj} \quad (4.2)$$

gde su:

q_{sis_j} - prenos toplote KGH sistema (toplotno opterećenje), $j=1, 2, \dots, 24$ [W];

a, b - koeficijenti koji se primenjuju u određenim intervalima za zonske vrednosti temperatura vazduha [-].

Količina toplote sistema q_{sis_j} ima pozitivan predznak kada je u pitanju grejanje, dok je negativna kada sistem obezbeđuje hlađenje zone. Kada je temperatura zone fiksirana, dobija se ista vrednost samo suprotnog znaka. Zamenom jednačine 4.2 u 4.1 dobija se rešenje za zonsku temperaturu vazduha kao:

$$t_{aj} = \frac{a + \sum_{i=1}^N A_i h_{ci} t_{si,j} + \rho c V_{inf,j} t_{vj} + \rho c V_{vent,j} t_{vj} + q_{c,int,j}}{-b + \sum_{i=1}^N A_i h_{ci} + \rho c V_{inf,j} + \rho c V_{vent,j}} \quad (4.3)$$

gde su:

N - broj površina [-];

t_{aj} - temperatura vazduha u zoni, $j=1, 2, \dots, 24$ [°C];

ρ - gustina [kg/m³];

c - specifična toplota vazduha [J/kgK];

4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA

- V - zapreminski protok vazduha [m^3/h];
- t_{o_j} - temperatura spoljašnjeg vazduha, $j=1, 2, \dots, 24$ [$^{\circ}\text{C}$];
- t_{v_j} - temperatura vazduha za ventilaciju, $j=1, 2, \dots, 24$ [$^{\circ}\text{C}$];
- q_{c,int_j} - suma konvektivnih delova svih unutrašnjih dobitaka toplote [W].

Jednačina 4.3 (bilans toplote vazduha u zoni), mora se istovremeno rešavati sa jednačinama toplotnog bilansa za spoljašnje i unutrašnje površine zone. Ove jednačine i dodatna objašnjenja se mogu pronaći u [2], poglavlje 18.

Formule koje su prikazane, podrazumevaju da je u pitanju proračun za samo jedan projektni dan. U okviru programa za energetske simulacije kao što je EnergyPlus, praksa je da se koriste godišnji vremenski intervali navedeni kao tipične meteorološke godine. U ovom slučaju, prvi dan u godini se više puta simulira sve dok se ne dobije ustaljeno stanje (tzv. konvergencija zagrevanja). Nakon toga se svaki dan simulira zasebno i kada je potrebno, koristeći podatke o temperaturama površina i toplotnim fluksevima iz prethodnih dana. Relativno jednostavni modeli za unutrašnju i spoljašnju konvekciju se mogu koristiti za određivanje projektnog toplotnog opterećenja. Bogatstvo EnergyPlus-a je u tome što sadrži veliki broj složenih i sofisticiranih modela konvekcije, što u mnogome proširuje mogućnosti za simulaciju različitih objekata.

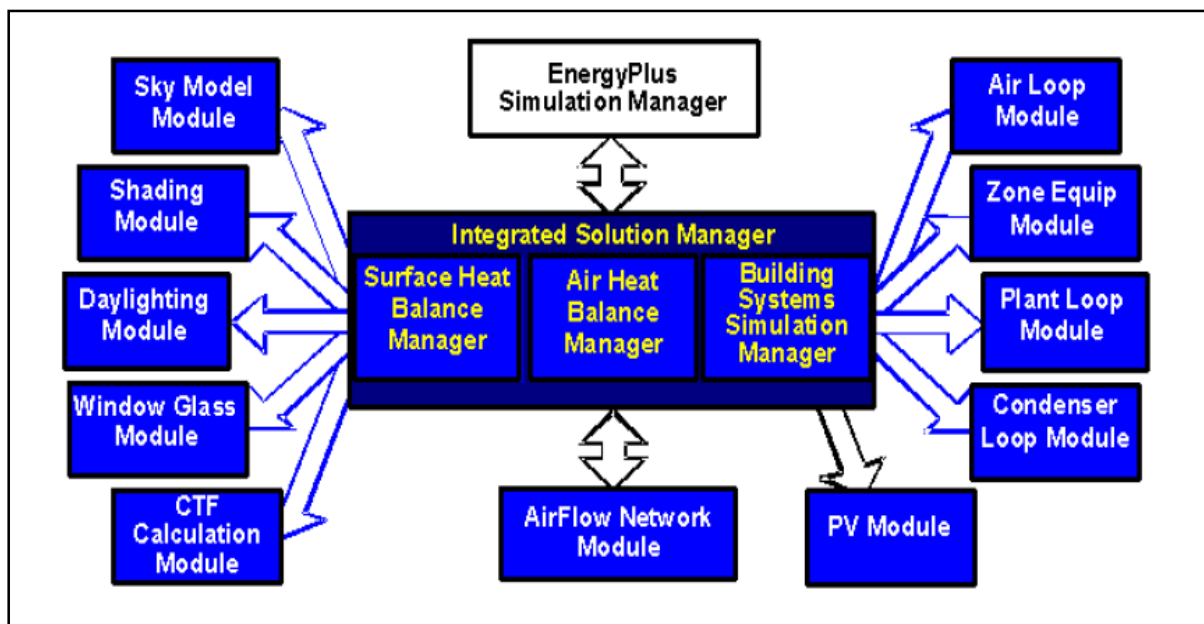
Ovim modulom, EnergyPlus, sa promenljivim vremenskim korakom, izračunava odziv KGH, kao i odziv električnih sistema. Moduli DOE-2 i BLAST bili su uprošćeni, tako da su rezultati modula za KGH sisteme uvek bili u mogućnosti da podmire zahteve toplotnog opterećenja. Ovo je rezultovalo da nije bilo povratne informacije između "Heat Balance" modula i modula za sisteme, u slučaju da zahtevi za opterećenjem nisu podmireni. Nedostatak je popravljen u EnergyPlus-u, gde se rezultati modula za KGH sisteme koriste za proračun promene temperature i relativne vlažnosti vazduha u svakom vremenskom koraku. Ove simulirane vrednosti vazduha na kraju svakog vremenskog koraka, utiču na toplotno opterećenje na početku sledećeg vremenskog intervala [13, 14].

"Heat Balance" modul upravlja modulima toplotnog bilansa okolnih površina i vazduha u zoni i služi kao prikaz ovog i simulacionog modula 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, infiltracija...), uzimajući u obzir uticaj i direktnih konvektivnih dobitka toplote.

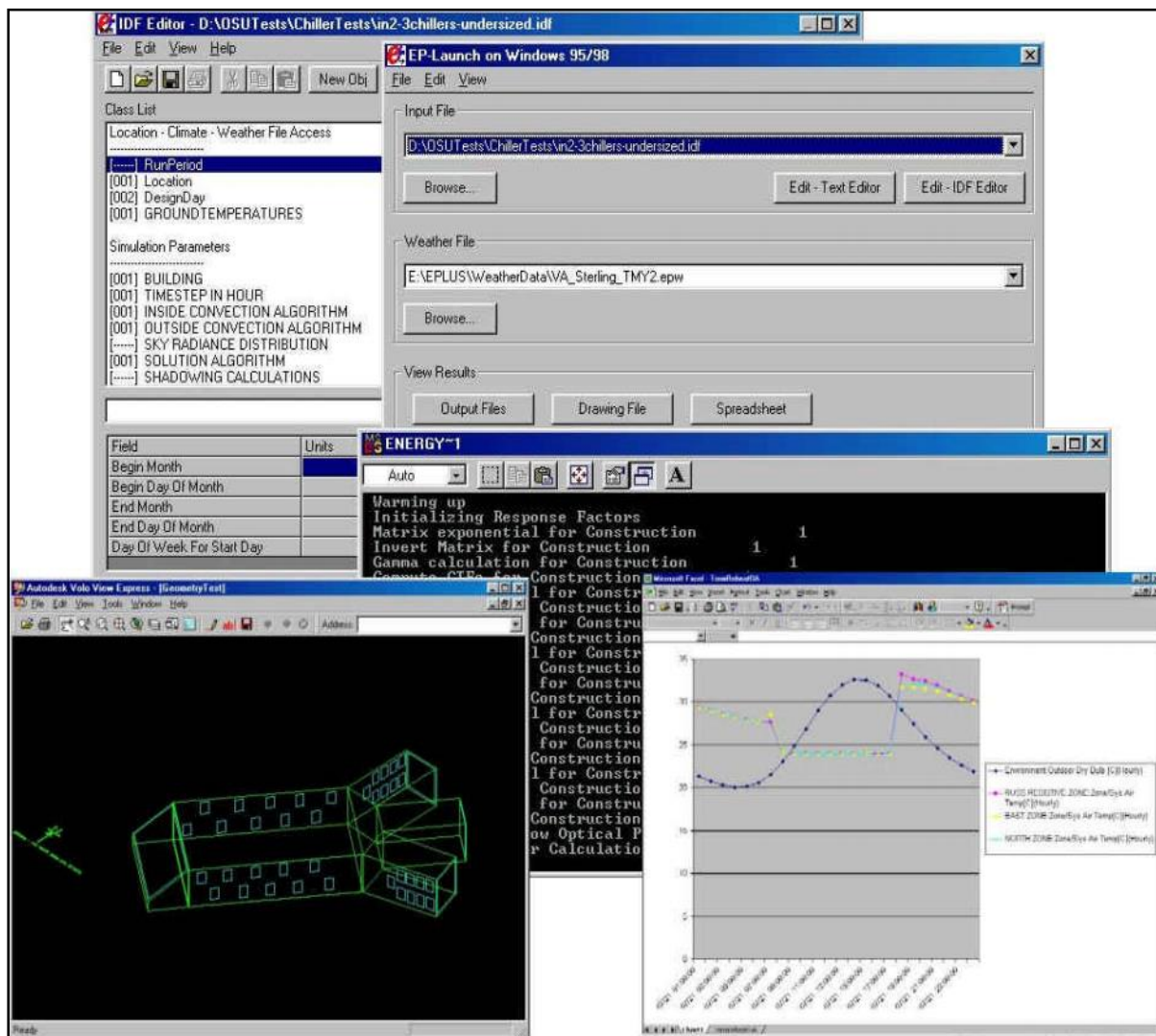
Ovo integrisano, simultano, rešavanje niza jednačina obezbeđuje tačniju predikciju temperatura vazduha i pregrada u prostoru, koja je od ključne važnosti za dimenzionisanje svih KGH sistema. Pored toga, rešavanje sistema jednačina, služi za određivanje parametara unutrašnjeg termičkog komfora. Integrisanom simulacijom, omogućeno je da se definišu realni sistemi regulacije i upravljanja, razmena vazduha između samih zona i ostalo.

EnergyPlus sadrži module za simulaciju protoka vazduha (AirFlow Network) i modul (WINDOW) sa bazom podataka o transparentnim pregradama (staklene površine). Podaci o klimatskim parametrima su besplatni i dostupni za više od 1.200 svetskih lokacija. Na slikama 4.4 i 4.5, prikazana je modularna struktura i grafički prikaz EnergyPlus-a.

4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE
NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA



Slika 4.4: Modularna struktura EnergyPlus-a [34]



Slika 4.5: Grafički prikaz EnergyPlus-a [14]

4.2.4 AIRFLOW NETWORK - MREŽNI MODEL STRUJANJA VAZDUHA

Tokovi vazduha u i oko objekta, imaju veliki uticaj na njegovo toplotno opterećenje, potrošnju energije, kao i na kvalitet i stanje unutrašnjeg komfora. Vazdušne struje mogu biti kontrolisane i nekontrolisane. Pod kontrolisanim podrazumevamo tokove koji su najvećim delom nastali pod uticajem ventilatora. Na nastanak nekontrolisanih tokova naviše utiču meteorološki faktori (najuticajniji je vetar). Nekomontrolisano strujanje se može posmatrati i kao kombinacija uticaja vetra i prinudne ventilacije kroz omotač objekta, ili kroz propustljive i loše izbalansirane vazdušne kanale.

Postoji nekoliko načina za simuliranje uticaja vazdušnih tokova. Najjednostavniji način je da se u model unesu izmerene vrednosti protoka vazduha. Pošto protok vazduha najviše zavisi od uticaja vetra, KGH sistema i infiltracije vazduha kroz procepe omotača objekta, ovaj pojednostavljen metod daje prihvatljive rezultate samo za kontrolisane tokove vazduha (za nekontrolisane ne daje dobre rezultate). Sledeći, precizniji i detaljniji metod, naziva se mrežni model strujanja vazduha. On se sastoji iz seta čvornih mesta (nodova) koji su povezani sa svim pripadajućim elementima protoka. Metod ne može da predvidi cirkulaciju vazduha unutar jedne termičke zone. Treći i najprecizniji metod je metod računarske dinamike fluida (CFD). Problem ove metode je to što je veoma računarski zahtevna (vremenski i zahteva "snažne" računare). Drugi problem je to što ju je teško integrisati u programe za energetske simulacije objekata, kako bi se odredio uticaj protoka vazduha na toplotno opterećenje objekta.

Na osnovu navedenog, sa aspekta tačnosti i brzine simulacije, zaključak je da je najbolje koristiti mrežni model protoka vazduha. Algoritam pod nazivom AIRNET je jedna od najčešće korišćenih metoda za simulaciju vazdušnih tokova. Ovaj model nastao je u Američkom nacionalnom institutu za standarde i tehnologiju, kako bi se predvidelo vazdušno strujanje [56]. Poboljšano predviđanje protoka vazduha je urađeno dodavanjem temperaturskog uticaja, kada je u pitanju određivanje protoka kroz procepe omotača objekta. Takođe, on ima sposobnost da modelira protoke kroz velike vertikalne otvore linearnim variranjem gustine vazduha koja nastaje sa promenom visine. Kao nedostatak se navodi nemogućnost da sam izračuna toplotno opterećenje, tako da je neophodno uspostaviti vezu sa programom za energetske simulacije. EnergyPlus je, kako bi bolje integrisao rezultate simulacije protoka vazduha, formirao modul AirFlow Network koji je baziran na AIRNET metodi. Osnovna razlika je to što se proračun izvodi sa vremenskim korakom KGH sistema, a ne sa vremenskim korakom termičke zone.

AirFlow Network metod reprezentuje objekat i njegove KGH sisteme putem mreže nodova. Konekcija između nodova predstavlja vezu kroz koju vazduh prolazi uzimajući u obzir sve komponente koje čine protok (npr. ventilatori, kanali, pukotine, vrata, prozori, otvori...). Osnovno pojednostavljenje ove metode je to što je odnos protoka i razlike pritisaka između dva noda linearan. Metod se sastoji iz tri sekvencijalna koraka i to:

1. proračun pritiska i protoka;
2. proračun temperature i vlažnosti noda;
3. proračun osetnog i latentnog opterećenja.

Redosled metode je da se prvo računaju pritisci i protoci vazduha za svaki nod. Na osnovu izračunatih vrednosti, metod proračunava temperature i vlažnosti nodova i sa tim rezultatima se određuju temperature i vlažnosti u pripadajućim zonama. Koristeći dobijene vrednosti, metod računa osetno i latentno toplotno opterećenje za svaku zonu. Dobijene vrednosti toplotnih opterećenja se dalje koriste za bilansne jednačine koje određuju opterećenje KGH sistema i vrše proračun finalnih vrednosti temperatura, vlažnosti i pritisaka zone.

4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA

Kako bi se odredile vrednosti pritiska svakog noda koristi se Njutnov metod. Za njega je potreban inicijalni set vrednosti pritiska nodova. Ove vrednosti se mogu dobiti na dva načina. Prvi podrazumeva inicijalnu linearizaciju, uključujući za svaki protok linearno uprošćenje pada pritiska kao:

$$\dot{m}_i = C_i q \left(\frac{\Delta P_i}{\mu} \right) \quad (4.4)$$

gde su:

- \dot{m}_i - maseni protok za svaku i-tu vezu [kg/s];
- C_i - koeficijent masenog protoka [m³];
- ΔP_i - pad pritiska za svaku i-tu vezu [Pa];
- μ - viskoznost vazduha [Pa·s].

Ova inicijalizacija uzima u obzir i silu uzgona ("stack effect"), sa težnjom da uspostavi pravilnu putanju protoka. Linearna aproksimacija je uvek u laminarnom režimu. Drugi način ili drugi metod inicijalizacije, podrazumeva da su početne vrednosti pritiska 0, nakon čega se koristi direktno Njutnov metod.

Što se tiče konvergencije, AirFlow Network metod koristi dva kriterijuma i to: RAT - relativna tolerancija konvergencije protoka (4.5) i AAT - apsolutna tolerancija konvergencije protoka (4.6).

$$RAT = \frac{|\sum \dot{m}_i|}{\sum |\dot{m}_i|} \quad (4.5)$$

$$AAT = |\sum \dot{m}_i| \quad (4.6)$$

RAT predstavlja odnos apsolutne vrednosti suma protoka i sume protoka u mreži. AAT predstavlja sumu apsolutnih vrednosti svih protoka u mreži. Rešenje konvergira kada se oba kriterijuma zadovolje.

Prilikom proračuna za svaki nod se primenjuje zakon o održanju mase, a protok nastaje usled razlike u pritiscima. Pod pretpostavkom da je fluid nestišljiv, Njutnov metod u stabilnom stanju, protok fluida kroz komponentu može se opisati Bernulijevom jednačinom (4.7):

$$\Delta P = \left(P_n + \frac{\rho V_n^2}{2} \right) - \left(P_m + \frac{\rho V_m^2}{2} \right) + \rho g (z_n - z_m) \quad (4.7)$$

gde su:

- ΔP - razlika totalnih pritiska između noda n i m [Pa];
- P_n i P_m - ulazni i izlazni statički pritisak [Pa];
- V_n i V_m - ulazna i izlazna brzina vazduha [m/s];
- g - ubrzanje usled delovanja Zemljine teže [9,81 m/s²];
- z_n i z_m - ulazna i izlazna visina [m].

Kombinacijom povezanih uslova, jednačina 4.7 se može uprostiti i prilagoditi za više zonski objekat. Totalni pritisak P je po definiciji jednak zbiru statičkog i dinamičkog pritiska ($P = p + (\rho v^2 / 2)$). Dodajući uticaj vetra i uticaj sile uzgona, posmatrajući dva noda u mreži n i m, jednačina 4.7 se može predstaviti kao:

$$\Delta P = P_n - P_m + P_s + P_w \quad (4.8)$$

gde su:

- P_n i P_m - totalni pritisci u nodovima n i m [Pa];
- P_s - razlika pritiska usled gustine i razlike u visini ("stack effect") [Pa];
- P_w - razlika pritiska usled dejstva vetra [Pa].

4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA

Prema vezi između nodova, ova jednačina se može modifikovati. Za slučaj kada je u pitanju veza nodova između unutrašnjih zona jednačina je sledeća:

$$\Delta P = P_n - P_m + P_s \quad (4.9)$$

Kada je u pitanju veza između nodova koji su u zonama koje se graniče sa spoljašnjom sredinom, jednačina glasi:

$$\Delta P = P_n - P_m + P_w \quad (4.10)$$

Uzrok nastanka protoka kroz procepe ili zatvorene otvore koji su pod uticajem gustine i viskoznosti vazduha (idealni gas), je samo usled promene temperature i razlike u pritiscima. Empirijska jednačina koja opisuje odnos između razlike pritiska i protoka, može se opisati u sledećoj formi:

$$\dot{m} = C(\Delta P)^n \quad (4.11)$$

gde su:

C - koeficijent protoka koji se odnosi na geometriju procepa;
n - eksponent protoka.

U slučaju kada se određuje protok u zonama koje se graniče sa spoljašnjom sredinom, od izuzetne važnosti je odrediti precizne vrednosti koeficijenta pritiska uticaja vetra na površinu omotača objekta, c_p [15, 16]. Ovaj parametar je jedan od ključnih koji će se detaljno analizirati prilikom finog podešavanja modela DVF.

Koeficijent pritiska vetra na površinu omotača objekta se određuje iz Bernulijeve jednačine, pretpostavljajući da nema promene visine i pada pritiska. C_p je funkcija lokacije i orijentacije omotača objekta, kao i smer strujanja vetra.

$$p - p_\infty = c_p \rho \frac{V_{ref}^2}{2} \quad (4.12)$$

gde su:

p_∞ - referentni statički pritisak neuznemirene struje [Pa];
p - statički pritisak u određenoj tački na omotaču objekta [Pa];
 c_p - koeficijent pritiska vetra na površinu omotača objekta [-];
 V_{ref} - referentna brzina vetra [m/s].

Generalna podela izvora, odakle se mogu dobiti podaci o koeficijentu c_p , je na primarne i sekundarne. Primarni se označavaju kao najpouzdaniji i obuhvataju merenja na realnom objektu i merenja u vazдушnim tunelima. Rezultati dobijeni merenjem na realnim objektima daju najpouzdanije podatke o vrednostima c_p . Dobra tačnost se dobija zato što se ne moraju predviđati početni uslovi, nema problema kada je u pitanju skaliranje i usvajanje modela. Ipak, ovaj način generisanja rezultata je veoma kompleksan, skup i najčešće se koristi za potvrđivanje (validaciju) rezultata. Osnovni problem koji se može javiti kod ovog metoda je tačnost i kvalitet merne opreme i eksperimenta. Što se tiče merenja u vazдушnim tunelima, njihovi podaci se koriste u projektnoj fazi objekta. Limitiranost ove metode je u visini troškova, vremenu i znanju vezanom za sprovođenje eksperimenta. U praksi, što se tiče ovog tipa izvora, najčešće se koriste

4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA

rezultati merenja u vazдушnim tunelima [20, 36, 42, 43, 48]. Kao zamena ovih eksperimenata, danas se najčešće koriste simulacije računarske dinamike fluida (CFD).

Kada su u pitanju sekundarni izvori, ovi rezultati su manje pouzdani, dobijeni sa manjim troškovima i u kraćem vremenskom intervalu. Mogu se podeliti na podatke iz formiranih baza podataka AIVC [1, 35] ili ASHRAE [2] i na rezultate analitičkih modela. Baze podataka predstavljaju rezultate, koji su najčešće dobijeni iz primarnih izvora. Konceptija je takva da su podaci podeljeni u dve grupe, za niske i visoke zgrade. Analitički modeli, Swami and Chandra, CpCal+ i Cp Generator [17, 29, 55], se sastoje iz seta jednačina za proračun c_p formiranih za specifičnu konfiguraciju objekta. Razvijeni su na osnovu rezultata dobijenih na realnim objektima ili merenjem u vazдушnim tunelima. Cilj je, da se programom koji je korisnički orijentisan, da širi obim koji obuhvata veći broj mogućih konfiguracija objekata, uzimajući u obzir uticaj okoline i različitih profila strujanja vetra.

AirFlow Network metod ima mogućnost generisanja c_p i za niske i za visoke objekte. Za visoke objekte, što je i predmet ovog istraživanja, podaci se dobijaju za dvodimenzionalnu površinu na osnovu upadnog ugla vetra i međusobnog odnosa dimenzija širine i visine posmatrane površine. Podaci su dobijeni iz ASHRAE baze za upadne uglove koji se povećavaju za 30° . Odnosi stranica mogu biti 0,25, 1,0 ili 4,0. Program vrši linearnu interpolaciju za proračun željenog koeficijenta pritiska vetra na površinu omotača objekta.

Dalji postupak AirFlow Network metode se zasniva na rešavanju sistema jednačina (veze između pada pritiska i protoka u svakoj komponenti) koju čine kvadratne matrice $n \times n$ (n -broj nodova). Njutnov metod se koristi za iterativno rešavanje pada pritiska u svakom nodu. Novi procenjeni vektor pritiska noda $\{P\}^*$, je sračunat na osnovu trenutno procenjenog vektora pritiska $\{P\}$, jednačinom:

$$\{P\}^* = \{P\} - \{C\} \quad (4.13)$$

gde je $\{C\}$ izračunata matrična veza:

$$[J] \{C\} = \{B\} \quad (4.13)$$

$\{B\}$ predstavlja vektor kolone za svaku komponentu datu kao:

$$B_n = \sum_i \dot{m}_i \quad (4.14)$$

$[J]$ predstavlja kvadratnu Jakobian matricu elemenata datih kao:

$$J_{n,m} = \sum_i \frac{\partial \dot{m}_i}{\partial P_m} \quad (4.15)$$

Proračun temperature vazduha svakog noda računa se po modelu [55] i suština je da se temperaturna distribucija proračunava unutar elementa protoka, za određeni protok i ulaznu vrednost temperature. Jednačina koja to opisuje je data kao:

$$\dot{m} c_p \frac{dT}{dx} = UP(T_\infty - T) \quad (4.16)$$

gde su:

c_p - specifična toplota vazduha [J/kgK];

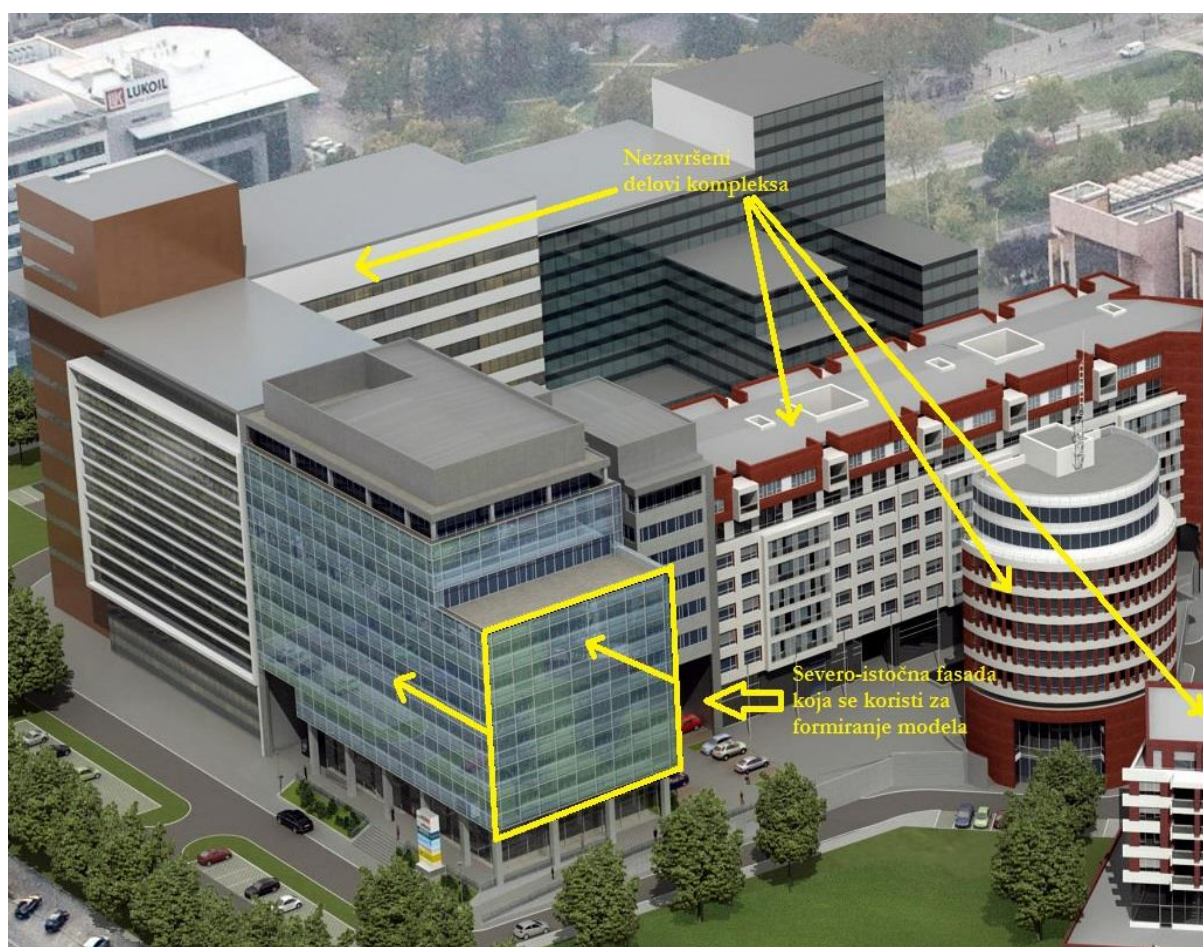
4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA

P - obim elementa gde se obavlja protok [m];
T - promenljiva temperatura [°C];
 T_{∞} - temperatura okruženja [°C];
U - ukupni koeficijent prolaza toplote [W/m²K].

Ostali detalji ove metode se mogu pronaći u [34].

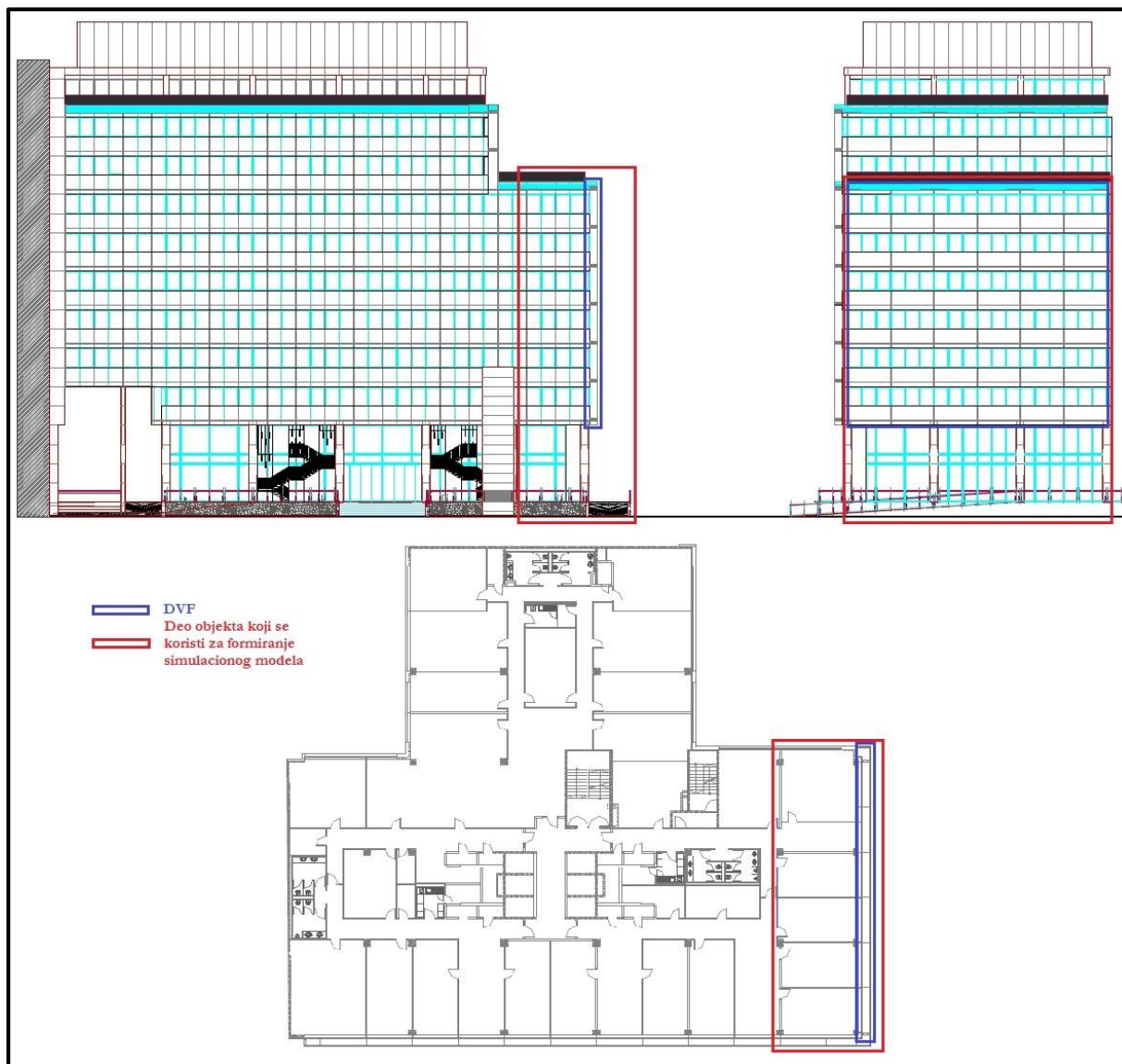
4.3 POSTUPAK FORMIRANJA MODELA OBJEKTA SA DVF

Kao što je navedeno u prethodnim poglavljima, početak kreiranja modela objekta sa DVF odnosi se na njegov grafički prikaz. Predmet istraživanja je modeliranje omotača objekta sa DVF, tako da je taj deo analiziran i predstavljen do detalja. Sama unutrašnjost (zoniranje, KGH sistemi, dobici toplote...) i ostali deo omotača prikazani su u toj meri, da zadovoljavaju projektne i trenutne radne uslove posmatrane zgrade. Deo omotača objekta sa DVF na kojem su izvršena merenja, koristi se za formiranje EnergyPlus simulacionog modela. Orijehtacija izabranog dela fasade je severo-istok. Fasada je otvorena (nema lokalnih spoljašnjih opstrukcija i senki od strane drugih objekata i rastinja) i prirodno ventilisana bez mogućnosti regulacije međuprostora (slika 4.6). Spoljašnje dimenzije posmatrane fasade su 25 x 22 m (širina x visina), dok je korisna površina formiranog simulacionog modela 1.050 m². Na slici 4.7, prikazan je deo objekta i fasade koji se koristiti za generisanje simulacionog modela.



Slika 4.6: Izgled kompleksa i izabrani deo omotača objekta koji se koristi za EnergyPlus model

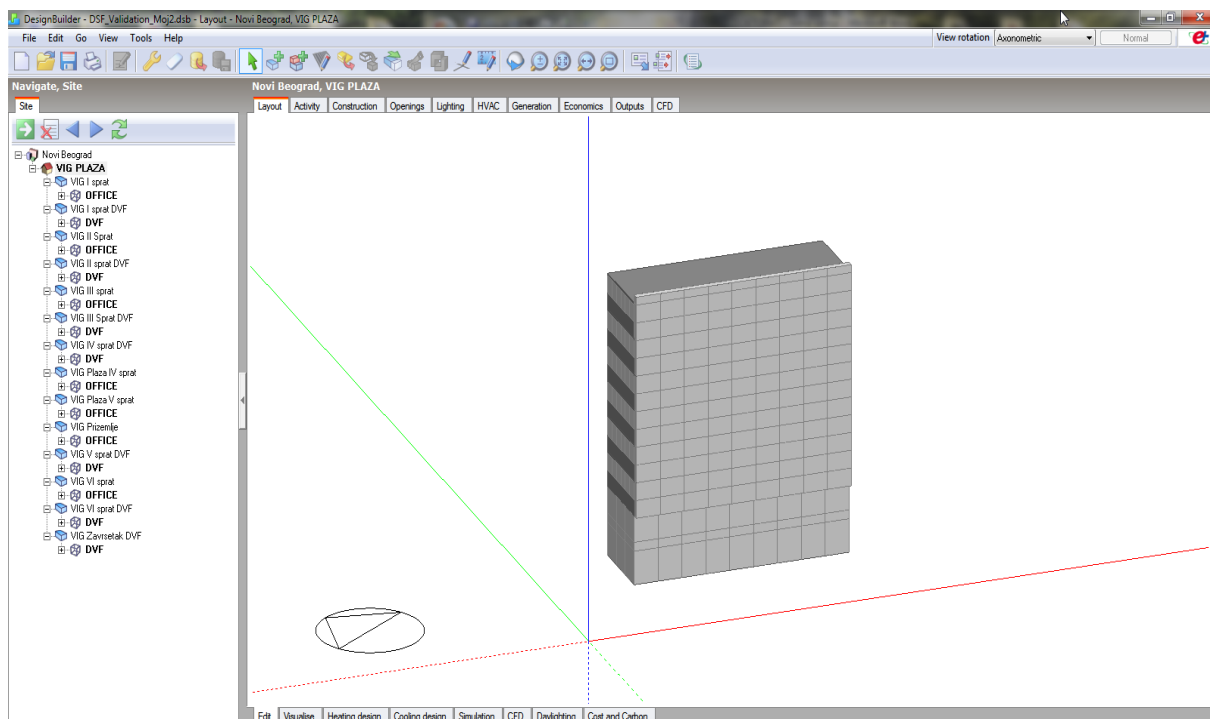
4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA



Slika 4.7: Preseci i tipična osnova objekta sa naglašenim delovima koji se koristi za EnergyPlus model

Za formiranje fizičkog modela dela postojećeg objekta sa izabranom dvostrukom fasadom koristi se programsko okruženje sofisticiranog modularnog softvera "Design Builder" verzija 4.2. Na ovaj način omogućeno je precizno, detaljno i relativno brzo formiranje željenog modela. Softversko grafičko okruženje je naklonjeno korisniku ("user friendly"), dok je "engine" programa EnergyPlus verzija 8.2. Na ovaj način je omogućeno generisanje modela, koji u potpunosti odgovara svim konstruktivnim dimenzijama i termo-fizičkim osobinama korišćenih materijala postojećeg objekta (slika 4.8). Takođe, u ovom programskom okruženju kreirani su svi zonski pripadajući postojeći sistemi za KGH zajedno sa njihovim projektnim i radnim uslovima u toku trenutne eksploatacije objekta. Dalje, detaljnije analize urađene su direktno u programu EnergyPlus, pošto "Design Builder" ima mogućnost izvoza i generisanja .idf datoteke.

4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA



Slika 4.8: Izgled kreiranog modela dela objekta sa izabranom dvostrukom fasadom u programskom okruženju "Design Builder"-a

Kako bi model bio u što većoj meri virtualna prezentacija realnog objekta, koriste se svi dostupni podaci i informacije o objektu i njegovim KGH sistemima (detaljan opis u poglavlju 2.2).

Za postizanje što bolje tačnosti, u procesu potvrđivanja modela, korišćeni su sledeći podaci:

- tačne konstruktivne dimenzije omotača i drugih delova objekta;
- termo-fizičke karakteristike korišćenih materijala omotača i drugih delova objekta;
- postojeći KGH sistemi;
- projektne i radne unutrašnje temperature u objektu;
- broj ljudi po prostorijama, tačne karakteristike unutrašnjih uređaja i sistema za osvetljenje;
- realni podaci o nivoima zasenčenja i količini infiltracije;
- postojeći načini korišćenja objekta;
- podaci o koeficijentima pritiska vetra (c_p), koji su dobijeni putem "G_p-generator"-a, za realnu konfiguraciju posmatranog dela omotača objekta sa DVF [22];
- generisana meteorološka datoteka na časovnom nivou, formirana na osnovu izvršenih merenja.

Za fino podešavanje modela, korišćena su iskustva na sličnim modelima [10, 23, 24, 26, 39], kao i analiza osetljivosti rezultata na primenu različitih algoritama prelaza toplote sa unutrašnje i sa spoljašnje strane pregrada. Simulacioni model predstavlja višespratni tip objekta, koji na svojoj severoistočnoj strani ima prirodno ventilisanu DVF. Svaki sprat predstavlja jednu zonu, kako deo samog objekta, tako i posmatrana DVF. U tom smislu, fasada je izdvojena po spratovima, na 6 zona. Na dnu i vrhu fasade postavljene su rešetke, dok je svaka zona fasade izdvojena pokretnim virtuelnim horizontalnim pregradama. Za unutrašnji konvektivni algoritam prelaza toplote izabran je "MoWiTT", dok je za spoljašnji postavljen "AdaptiveConvectionAlgorithm". Ova kombinacija algoritama konvektivnog prelaza toplote se pokazala kao najbolja kod ovakve konfiguracije objekta. Uzimajući u obzir površine poprečnog preseka DVF i otvora prozora,

4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA

"discharge coefficient" je postavljen na vrednost od 0,51. Prilikom podešavanja "Crack Flow", za prozore i zidove postavljeni su koeficijenti "air mass coefficient" na vrednosti 0,00015 i 0,00025. Za rešetke ovaj koeficijent iznosi 0,0015. Za podešavanje eksponenta "air mass flow" postavljene su vrednosti za rešetke 0,64, za unutrašnje i spoljašnje pregrade 0,68. U tabeli 4.3 prikazani su najznačajniji detalji o izabranim parametrima programa EnergyPlus+Airflow Network koji su korišćeni prilikom finog podešavanja modela.

Tabela 4.3: Detalji o finom podešavanju parametara simulacije EnergyPlus+Airflow Network

Simulaciona podešavanja	Izabrani tip ili parametar
Solar distribution	Full interior and exterior
Surface convection algorithm (unutrašnji)	MoWiTT
Surface convection algorithm (spoljašnji)	AdaptiveConvectionAlgorithm
Vremenski korak po satu	12
Airflow model	Airflow Network Algorithm
Ulazni podaci za C_p	G_p generator
Discharge coefficient otvora između spratova	0,51
Discharge coefficient za prozore	0,6
Faktor visine	1
Faktor širine	0,55
Crack Flow kroz prozore i zidove	Air mass coefficient (0,00015/0,00025)
Crack Flow kroz rešetke	0,0015
Air mass flow eksponent za unutrašnje i spoljašnje pregrade	0,68/0,68; rešetke 0,64
Ljudi	Ljudi/zoni 20
Osvetljenje	12 W/m ²
Ostali električni uređaji	16,1 W/m ²
Zone Equipment	ZoneHVAC:IdealLoadsAirSystem
Zimska temperatura u prostorijama	Između 7 i 19h, 23°C Ostali periodi 17°C
Letnja temperatura u prostorijama	Između 7 i 19h, 23,5°C Ostali periodi 28°C

4.4 REZULTATI POTVRĐIVANJA MODELA

Kako bi se utvrdio nivo tačnosti i poklapanja rezultata merenja i simulacija (rezultati predviđanja), u poglavlju 4.1.2 definisani su korišćeni statistički indikatori. Kao što je navedeno, usled nepostojanja preporuka ili standarda kada je u pitanju potvrđivanje modela predikcije temperatura i brzina vazduha, na standarde statističke indikatore pridodati su indikatori minimalnog $D_{\min}(S-M)$ i maksimalnog odstupanja $D_{\max}(S-M)$. Iako do danas ne postoje preporukom predviđeni kriterijumi o prihvatljivosti potvrđivanja rezultata, standardni statistički indikatori poput MBE, RMSE, CV(RMSE) i R^2 daju dovoljno tačnu sliku o kvalitetu rezultata izvedenih simulacija. Za povećanje kredibilitnosti ocene prihvatljivosti, proces validacije rezultata je urađen u tri režima (zimski, prelazni i letnji). U tom smislu, provereni su rezultati svih zona vezanih za sledeće parametre:

1. temperature površina unutrašnjeg dela stakla pridodatog sloja DVF;
2. temperature površina spoljašnjeg dela prozora osnovnog sloja DVF;
3. temperature površina spoljašnjeg dela parapeta osnovnog sloja DVF;

4. temperature vazduha u DVF;
5. brzine strujanja vazduha u DVF.

4.4.1 REZULTATI POTVRĐIVANJA TEMPERATURA POVRŠINA UNUTRAŠNJEG DELA STAKLA PRIDODATOG SLOJA DVF

Na osnovu sprovedene kvantitativne analize, dobijeni su pokazatelji nivoa kvaliteta postavljenog simulacionog modela, koji su predstavljeni na slici 4.9 i u tabelama 4.4 i 4.5.

Koeficijent determinacije (R^2) ukazuje na visok stepen objašnjenosti varijacija rezultata simulacije modelom, u svakom pojedinačnom slučaju (zona/režim). Drugim rečima, preko 90% rezultata dobijenih simulacijom modela, podudara se sa izmerenim vrednostima. Najbolji rezultati ovog indikatora zabeleženi su u toku leta u III zoni (95,5%), a najlošiji u I zoni, zimski režim (93,1%). Imajući u vidu da preporučeni standard u ovoj oblasti definiše da vrednost koeficijenta determinacije treba da bude veća ili jednaka od 75%, postavljeni model se može okarakterisati kao kvalitetan i validan, u smislu predikcije rezultata.

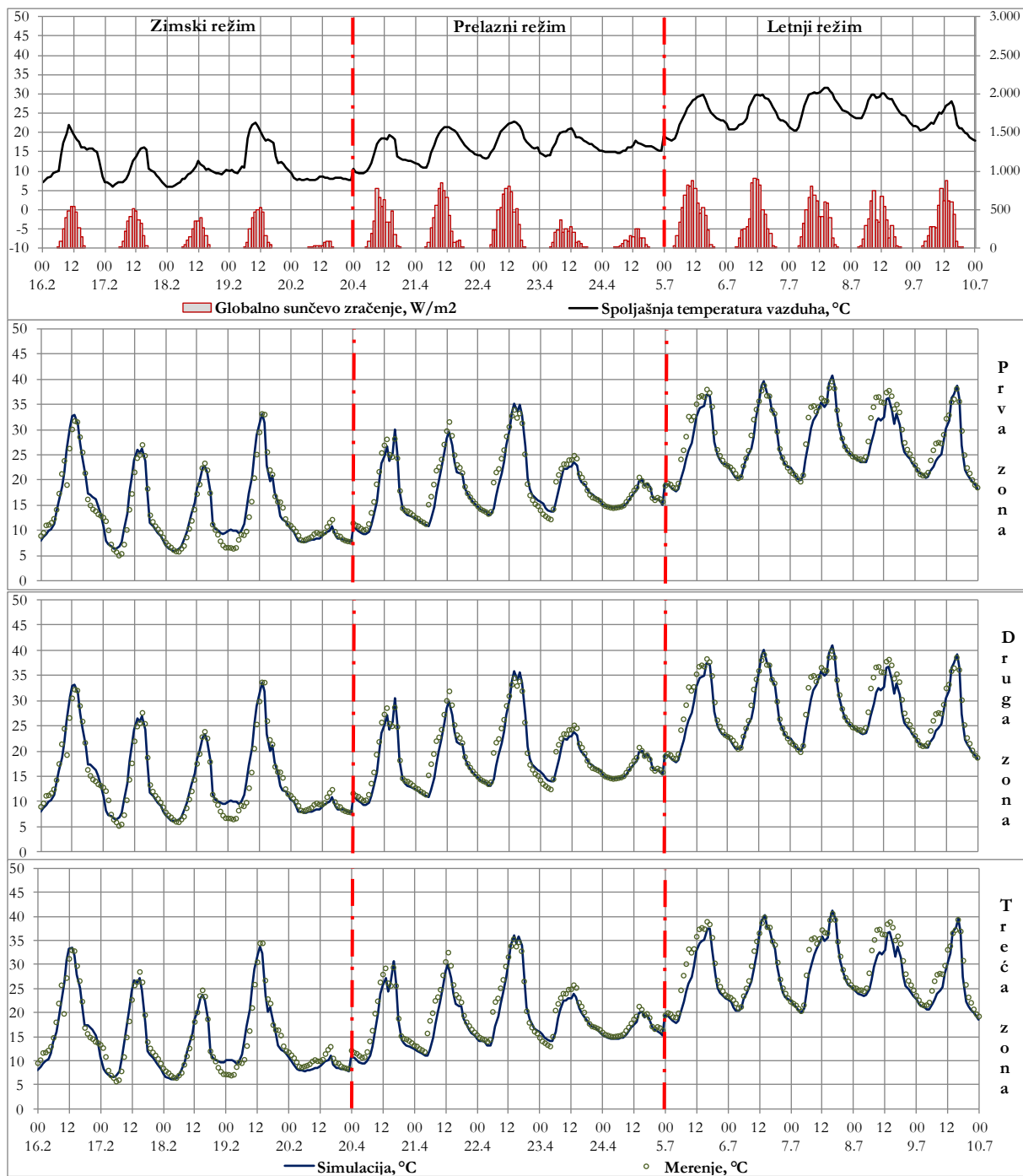
Parametar srednje greške pristrasnosti (MBE) ukazuje na preovlađujuću negativnu vrednost prosečnog odstupanja modelom predviđenih i izmerenih vrednosti posmatrane pojave, što ukazuje na činjenicu da model predviđa ispod stvarne vrednosti. Imajući u vidu pomenuto, posmatrani indikator ne uzima u obzir grešku potiranja pozitivnih i negativnih vrednosti razlika simulacijom dobijenih (S) i izmerenih (M) vrednosti, treba računati na nešto niže vrednosti srednje greške pristrasnosti od stvarnih. U skladu sa izloženim, rezultati ovog parametra su bolji, ako su njegove vrednosti bliže nuli. Najbolje vrednosti indikatora MBE dobijene su za zonu III, zimski režim (-0,15), dok su najlošije vrednosti zabeležene za II zonu, letnji režim (-1,25).

Srednja vrednost odstupanja (RMSE), simulacijom dobijenih od stvarnih vrednosti pojave je relativno niska i ukazuje na male fluktuacije serije podataka dobijenih simulacijom u odnosu na seriju podataka zabeleženih merenjem na objektu. Najpoželjnije vrednosti su one koje su bliže nuli. U tom smislu, najbolje vrednosti ovog indikatora zabeležene su u toku proleća u I zoni (1,61), a najlošije u toku leta, III zona (2,39).

Koeficijent varijacije (CV(RMSE)) kao važan pokazatelj reprezentativnosti uzorka i pouzdanosti eksperimentalne metode primenjene u istraživanju se nalazi u granicama normale od 7% do 15%, čime se ne može dovesti u pitanje pouzdanost ocene rezultata simulacije. Najbolje vrednosti indikatora koeficijenta varijacije postižu se u toku leta za prvu zonu (7,01%), dok su najlošiji rezultati zabeleženi zimskom režimu I zona.

Pokazatelji minimalnih $D_{\min}(S-M)$ i maksimalnih razlika $D_{\max}(S-M)$ modelom simulacije izračunatih i izmerenih vrednosti u sinergiji sa ostalim pokazateljima, upotpunjuju tvrdnju da je reč o dobro postavljenom, kalibrisanom modelu simulacije. Minimalne vrednosti razlika između simuliranih i izmerenih rezultata u veoma bliski nuli, dok maksimalne vrednosti idu do -7,19 za slučaj III zone letnji režim. Maksimalne razlike ipak ne treba da brinu, zato što su jako retke i pojavljuju se samo nekoliko sati u toku posmatranog perioda.

4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA



Slika 4.9: Potvrđivanje temperatura površina spoljašnjeg dela pridodatog sloja DVF

Tabela 4.4: Rezultati statističkih indikatora za slučaj potvrđivanja temperatura površina spoljašnjeg dela pridodatog sloja DVF - prvi deo

Režim	U	Z	P	L	U	Z	P	L	U	Z	P	L
I zona	0,96	0,93	0,94	0,94	-0,50	0,36	-0,64	-0,85	1,87	1,94	1,62	2,02
II zona	0,96	0,93	0,94	0,94	-0,71	0,16	-0,84	-1,01	1,94	1,92	1,72	2,16
III zona	0,96	0,93	0,96	0,94	-1,02	-0,15	-1,15	-1,25	2,09	1,93	1,90	2,39
Indikator	R^2				MBE				RSME			

Tabela 4.5: Rezultati statističkih indikatora za slučaj potvrđivanja temperatura površina spoljašnjeg dela pridodatog sloja DVF - drugi deo

Režim	U	Z	P	L	U	Z	P	L	U	Z	P	L
I zona	9,16	14,25	8,60	7,01	0,01	0,01	0,02	-0,03	6,93	6,93	-5,17	-6,70
II zona	9,35	13,69	8,99	7,40	0,01	0,02	0,01	-0,01	-6,90	6,73	-5,37	-6,90
III zona	9,86	13,38	9,71	8,10	0,02	0,01	0,02	-0,01	-7,20	6,43	-5,67	-7,20
Indikator	CVRSME				$D_{\min}(S-M)$				$D_{\max}(S-M)$			

4.4.2 REZULTATI POTVRĐIVANJA TEMPERATURA POVRŠINA SPOLJAŠNJEG DELA PROZORA OSNOVNOG SLOJA DVF

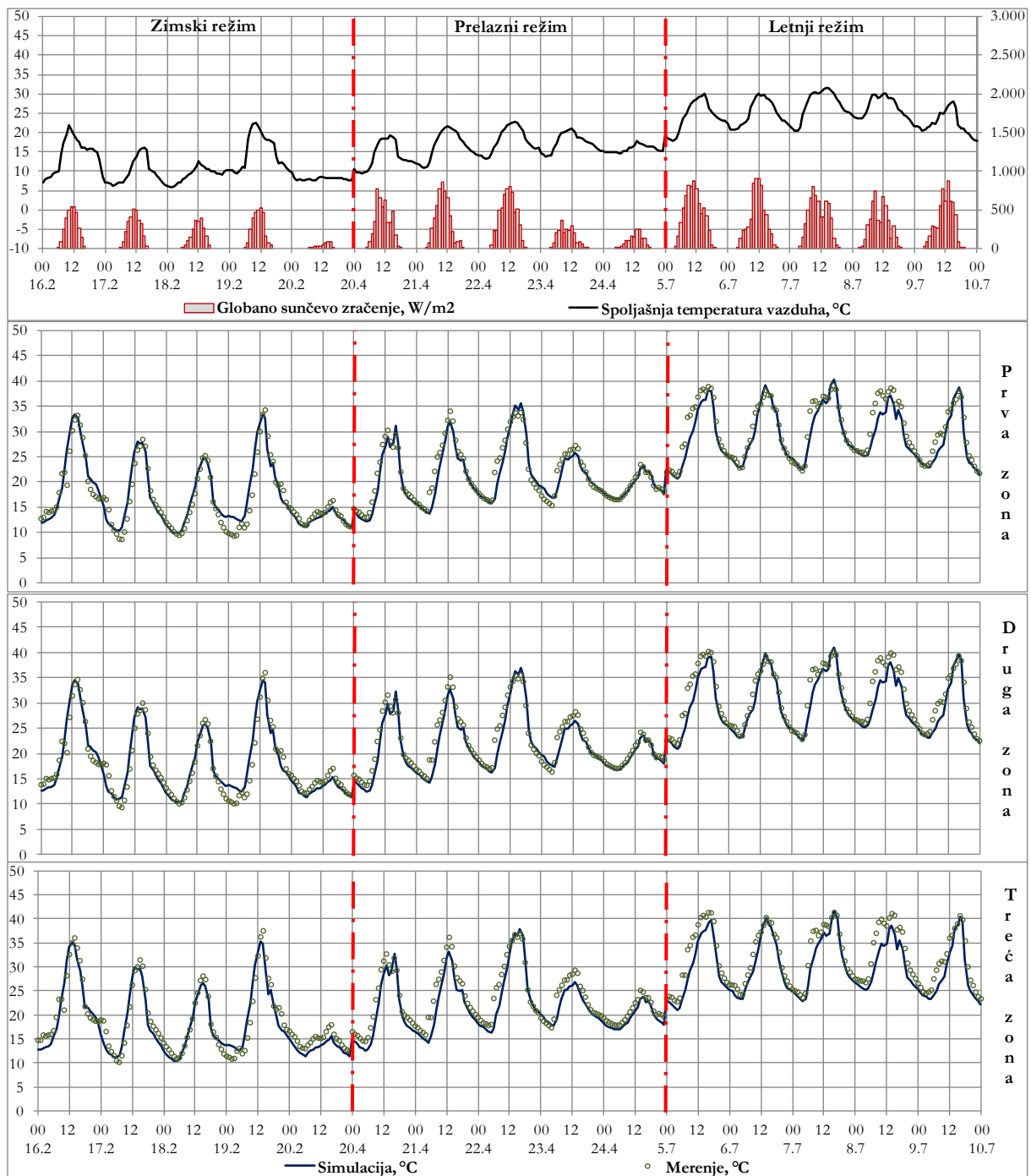
Analiza izračunatih pokazatelja potvrđenosti modela na primeru temperatura površina spoljašnjeg dela prozora osnovnog sloja DVF, ukazuje na veoma slične rezultate kao i u prethodnom slučaju (slika 4.10 i tabele 4.6 i 4.7). Naime, vrednost koeficijenta determinacije (R^2) je zadovoljavajuće visoka za sve tri zone i režima rada, sa nešto višim vrednostima u trećoj zoni. U svakom pojedinačnom slučaju, procenat objašnjenog varijabiliteta u ukupnom varijabilitetu prelazi 90% i upućuje na dobro postavljen simulacioni model. Najbolje vrednosti postižu se u III zoni za vreme prelaznog režima (95,5), odnosno najlošije u I zoni, zimskog režima (91,3).

U prilog tome, važno je navesti i niske vrednosti pokazatelja MBE i RSME koji pojedinačno ukazuju na dobro slaganje podataka, dobru prilagodljivost simulacionog modela i samim tim mala odstupanja simulacijom dobijenih (S) i izmerenih (M) vrednosti. Vrednosti indikatora MBE kreću se od -0,11 (II zona, zimski režim) do -1,66 (III zona, letnji režim). Što se tiče vrednosti indikatora RSME, njegove vrednosti idu od 1,59 (II zona, prelazni režim) do 2,68 (III zona, letnji režim).

Kada je u pitanju temperatura površina spoljašnjeg dela prozora osnovnog sloja DVF, koeficijent varijacije se kreće u granicama od 6,5% do 11,5% i ovaj interval je i dalje u granicama prihvatljivosti sa aspekta kontrole reprezentativnosti uzorka.

Indikator $D_{\min}(S-M)$ konvergira oko nule i ukazuje na dobro podudaranje simulacionih i izmerenih vrednosti. Sa druge strane, posmatranjem indikatora $D_{\max}(S-M)$, uočava se pozitivna vrednost razlika (S-M) u zimskom režimu rada kod sve tri zone, što upućuje na činjenicu da su u tom segmentu vrednosti dobijene simulacijom bile više u odnosu na stvarne vrednosti. Maksimalne vrednosti idu do 6,9 i ova vrednost ne predstavlja opasnost po potvrđivanje modela, jer se javlja retko, samo u par sati u toku posmatranog intervala.

4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA



Slika 4.10: Potvrđivanje temperatura površina spoljašnjeg dela prozora osnovnog sloja DVF

Tabela 4.6: Rezultati statističkih indikatora za slučaj potvrđivanja temperatura površina spoljašnjeg dela prozora osnovnog sloja DVF - prvi deo

Režim	U	Z	P	L	U	Z	P	L	U	Z	P	L
I zona	0,95	0,91	0,93	0,92	-0,49	0,38	-0,63	-0,85	1,85	1,93	1,60	1,98
II zona	0,95	0,92	0,93	0,93	-0,98	-0,11	-1,12	-1,25	2,02	1,90	1,83	2,31
III zona	0,96	0,92	0,96	0,93	-1,48	-0,62	-1,62	-1,66	2,30	1,99	2,17	2,69
Indikator	R^2				MBE				RSME			

Tabela 4.7: Rezultati statističkih indikatora za slučaj potvrđivanja temperatura površina spoljašnjeg dela prozora osnovnog sloja DVF - drugi deo

Režim	U	Z	P	L	U	Z	P	L	U	Z	P	L
I zona	8,05	11,48	7,45	6,49	0,01	0,01	0,02	-0,03	6,93	6,93	-5,17	-5,84
II zona	8,42	10,58	8,10	7,31	-0,01	0,01	0,01	-0,01	6,43	6,43	-5,67	-5,81
III zona	9,30	10,64	9,29	8,33	-0,02	-0,02	0,05	-0,02	-6,18	5,93	-6,17	-6,18
Indikator	CVRSME				$D_{\min}(S-M)$				$D_{\max}(S-M)$			

4.4.3 REZULTATI POTVRĐIVANJA TEMPERATURA POVRŠINA SPOLJAŠNJEG DELA PARAPETA OSNOVNOG SLOJA DVF

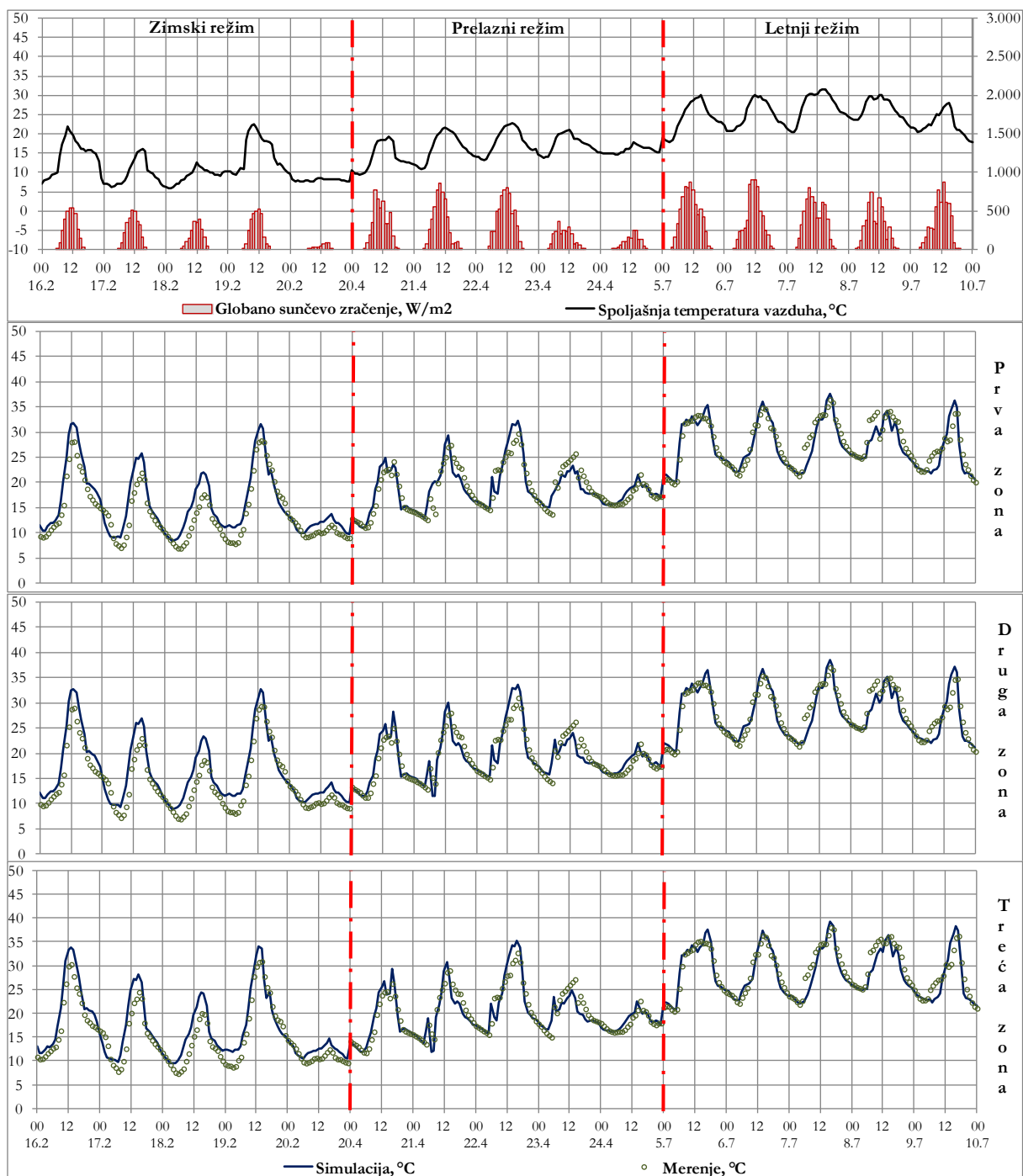
U slučaju analize izračunatih indikatora potvrđenosti modela za temperature površina spoljašnjeg dela parapeta osnovnog sloja DVF, dobijeni rezultati ukazuju na visok nivo tačnosti, kao i u prethodnim slučajevima (slika 4.11 i tabele 4.8 i 4.9). Vrednosti koeficijenta determinacije (R^2) su prihvatljivo visoke za sve tri zone i režima rada, sa nešto višim vrednostima u trećoj zoni u sva tri režima. U svakom pojedinačnom slučaju procenat objašnjenog varijabiliteta u ukupnom varijabilitetu prelazi 83% i upućuje na dobro postavljen simulacioni model.

Niske vrednosti statističkih indikatora MBE i RSME upotpunjuju tvrdnju da je model u visokoj meri potvrđen i da dobijeni rezultati i pojedinačno dobro ukazuju na slaganje podataka, dobru prilagodljivost simulacionog modela i samim tim mala odstupanja simulacijom dobijenih (S) i izmerenih (M) vrednosti. Vrednosti indikatora MBE kreću se od 0,08 (II zona, prelazni režim) do 1,98 (I zona, zimski režim). Što se tiče vrednosti indikatora RSME, njegove vrednosti idu od 1,77 (I zona, letnji režim) do 2,65 (III zona, letnji režim).

Koeficijent varijacije CVRSME kod slučaja potvrđenosti modela za temperature površina spoljašnjeg dela parapeta osnovnog sloja DVF, nalaze se u intervalu od 6,1% (III zona, letnji režim) do 19,5% (I zona, zimski režim). Ove vrednosti su i dalje u granicama prihvatljivosti sa aspekta kontrole reprezentativnosti uzorka.

U posmatranom slučaju, pokazatelj $D_{\min}(S-M)$ konvergira ka nuli kao idealnoj vrednosti, dok pokazatelj $D_{\max}(S-M)$ uzima visoke pozitivne vrednosti za sve tri zone u toku zime, negativne u toku leta, a vrednost ovog pokazatelja u proleće se kreće od visoke pozitivne razlike 6,53 u I zoni, do negativne razlike od -5,66 u III zoni. Vrednosti maksimalnih razlika i dalje ne predstavljaju veliki rizik po kvalitet modela, jer se ove vrednosti retko pojavljuju, svega nekoliko sati u toku celog intervala.

4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA



Slika 4.11: Potvrđivanje temperatura površina spoljašnjeg dela parapeta osnovnog sloja DVF

Tabela 4.8: Rezultati statističkih indikatora za slučaj potvrđivanja temperatura površina spoljašnjeg dela parapeta osnovnog sloja DVF - prvi deo

Režim	U	Z	P	L	U	Z	P	L	U	Z	P	L
I zona	0,92	0,92	0,83	0,86	0,60	1,98	0,20	-0,48	2,14	2,68	1,86	1,77
II zona	0,91	0,91	0,86	0,87	0,55	1,54	0,08	-0,51	2,13	2,68	1,81	1,83
III zona	0,93	0,93	0,93	0,88	0,43	1,18	0,12	-0,59	2,13	2,68	1,83	1,79
Indikator	R ²				MBE				RSME			

Tabela 4.9: Rezultati statističkih indikatora za slučaj potvrđivanja temperatura površina spoljašnjeg dela parapeta osnovnog sloja DVF - drugi deo

Režim	U	Z	P	L	U	Z	P	L	U	Z	P	L
I zona	10,67	19,54	9,86	6,36	0,01	0,04	0,02	0,01	6,54	5,63	6,54	-4,92
II zona	10,32	18,70	9,34	6,29	0,03	0,07	0,01	0,02	4,88	4,88	-4,78	-4,57
III zona	10,03	17,93	9,05	6,18	0,01	0,01	0,01	0,01	-5,66	5,24	-5,66	-4,75
Indikator	CVRSME				$D_{\min}(S-M)$				$D_{\max}(S-M)$			

4.4.4 REZULTATI POTVRĐIVANJA TEMPERATURA VAZDUHA U MEĐUPROSTORU DVF

Indikatori za procenu nivoa tačnosti rezultata simulacionog modela na primeru temperatura vazduha međuprostora DVF, pokazuju dobar deo sličnosti sa istim indikatorima vezanim za ostale analizirane slučajeve (slika 4.12 i tabele 4.10 i 4.11). Procena i predikcija temperature vazduha u međuprostoru DVF predstavlja najznačajniji parametar simulacije, od koga kasnije najviše zavisi definisanje budućih operativnih i kontrolnih strategija modela.

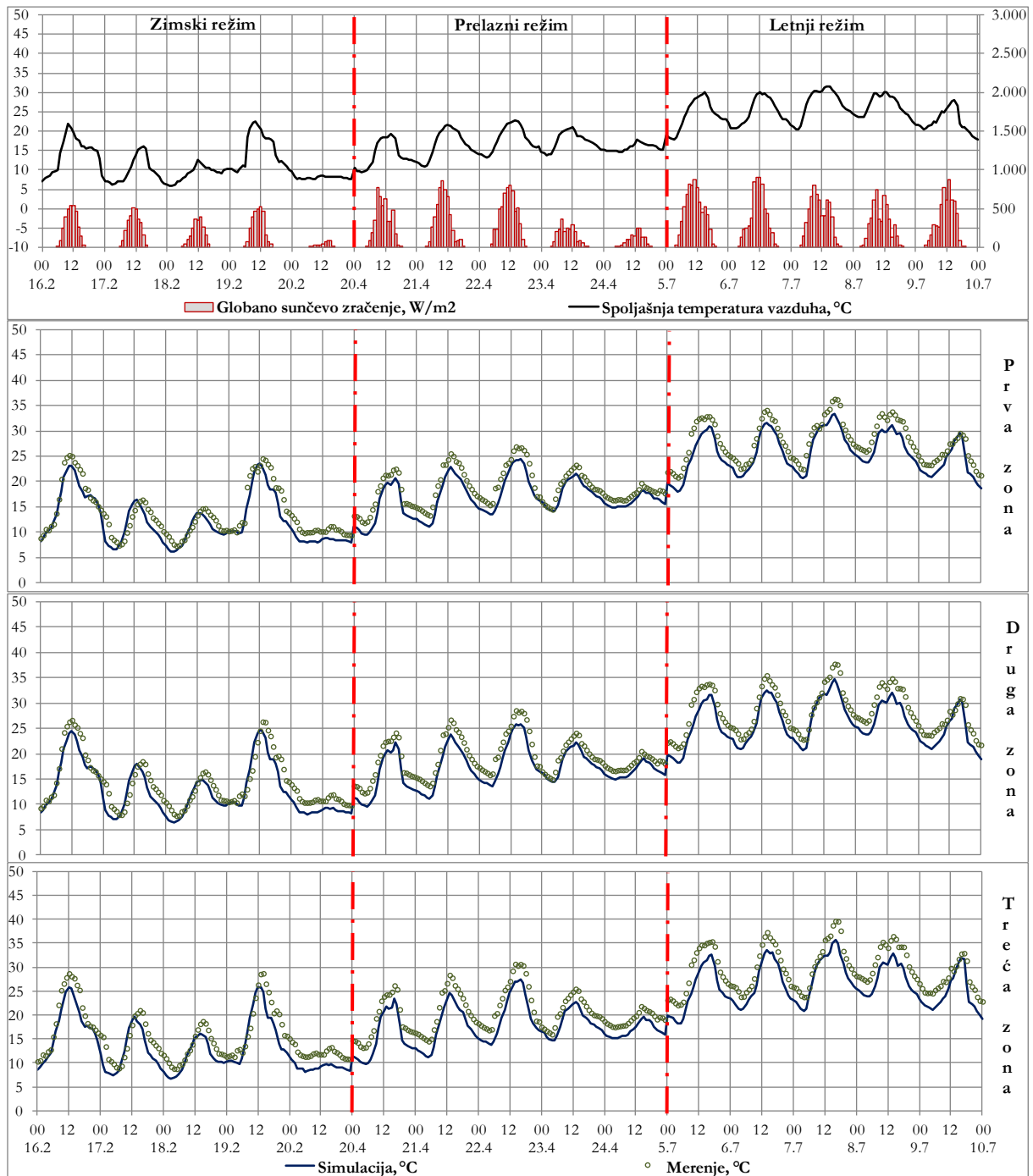
Koeficijent determinacije (R^2) ukazuje na visok stepen podudaranja rezultata merenja i simulacije modela. U svakom pojedinačnom slučaju (zona/režim), preko 90% rezultata dobijenih simulacijom modela, podudara se sa izmerenim vrednostima. Najbolji rezultati ovog indikatora zabeleženi su u toku prelaznog režima u III zoni (97,8%), a najlošiji u II zoni, zimski režim (90,2%).

I u ovom slučaju dobijene su niske vrednosti statističkih indikatora MBE i RSME što ukazuje na visok nivo slaganja rezultata, a samim tim mala odstupanja simulacijom dobijenih (S) i izmerenih (M) vrednosti. Vrednosti indikatora MBE kreću se od -1,35 (I zona, zimski režim) do -2,88 (III zona, prelazni režim). Što se tiče vrednosti indikatora RSME, vrednosti se kreću od 2,04 (I zona, zimski režim) do 3,03 (III zona, letnji režim).

Koeficijent varijacije je nešto veći i varira u intervalu od 8,8% (I zona, letnji režim) do 17,7% (III, zimski režim), što se može smatrati kretanjem u granicama prihvatljivosti i validacije dobrog odabira parametara modela primenjenog u istraživanju.

Bez ulaženja u ponavljanje zaključaka vezanih za pokazatelje potvrđenosti modela koji se na sličan način ispoljavaju u prethodna tri izložena slučaja (R^2 , MBE, RMSE), neophodno je naglasiti pokazatelje koji pokazuju određene razlike. U slučaju temperatura vazduha međuprostora DVF, pokazatelj $D_{\min}(S-M)$ je u I zoni pozitivan za sva tri vremenska režima (zima, proleće, leto), a negativan u II i III zoni, dok $D_{\max}(S-M)$ uzima negativne vrednosti za sva tri režima i sve tri zone. Minimalne vrednosti su bliske nuli, dok maksimalne idu do -7,26 u III zoni, zimski režim.

4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA



Slika 4.12: Potvrđivanje temperatura vazduha u međuprostoru DVF

Tabela 4.10: Rezultati statističkih indikatora za slučaj potvrđivanja temperatura vazduha u međuprostoru DVF - prvi deo

Režim	U	Z	P	L	U	Z	P	L	U	Z	P	L
I zona	0,97	0,90	0,94	0,95	-1,86	-1,36	-1,93	-1,73	2,22	2,04	2,11	2,47
II zona	0,97	0,89	0,95	0,95	-2,15	-1,57	-2,28	-1,94	2,49	2,27	2,43	2,74
III zona	0,97	0,90	0,98	0,96	-2,75	-2,17	-2,88	-2,43	3,02	2,72	3,00	3,31
Indikator	R^2				MBE				RSME			

**4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE
NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA**

Tabela 4.11: Rezultati statističkih indikatora za slučaj potvrđivanja temperatura vazduha u međuprostoru DVF - drugi deo

Režim	U	Z	P	L	U	Z	P	L	U	Z	P	L
I zona	11,05	15,04	11,31	8,82	0,01	0,01	0,08	0,06	-7,07	-7,07	-4,32	-5,08
II zona	11,97	15,88	12,52	9,53	-0,02	-0,02	-0,16	-0,12	-7,47	-7,47	-4,72	-5,40
III zona	13,85	17,68	14,71	11,13	0,01	0,02	-0,76	-0,38	-7,26	-7,26	-5,32	-6,00
Indikator	CVRSME				$D_{\min}(S-M)$				$D_{\max}(S-M)$			

4.4.5 REZULTATI POTVRĐIVANJA BRZINA STRUJANJA VAZDUHA U MEĐUPROSTORU DVF

Za razliku od prethodnih slučajeva, indikatori računati za slučaj otvorene i zatvorene fasade, ukazuju na poprilične razlike u vrednostima koje su dobijene u odnosu na prethodno komentarisane slučajeve simulacije (slika 4.13 i tabele 4.12 i 4.13). U stvarnosti, fasada objekta je uvek otvorena, međutim usled havarijskog zatvaranja protivpožarnih klapni, ukazala se mogućnost da se analizira i slučaj kada je međuprostor fasade zatvoren.

Koeficijent determinacije R^2 , kod otvorene fasade, ukazuje na dobro definisanje modela simulacije, budući da uzima vrednost od približno 86% sa izrazito malim razlikama u vrednosti između posmatranih zona. Sa druge strane, vrednost ovog pokazatelja kod zatvorene fasade je niska (od 65% do 69%) i nalazi se ispod standardom predviđene granice od 75%.

Vrednosti indikatora MBE su ujednačene, konvergiraju ka nuli, s tim što otvorenu fasadu karakteriše pozitivna vrednost ovog pokazatelja (vrednosti simulacije su veće od izmerenih vrednosti na objektu), a zatvorenu fasadu negativna.

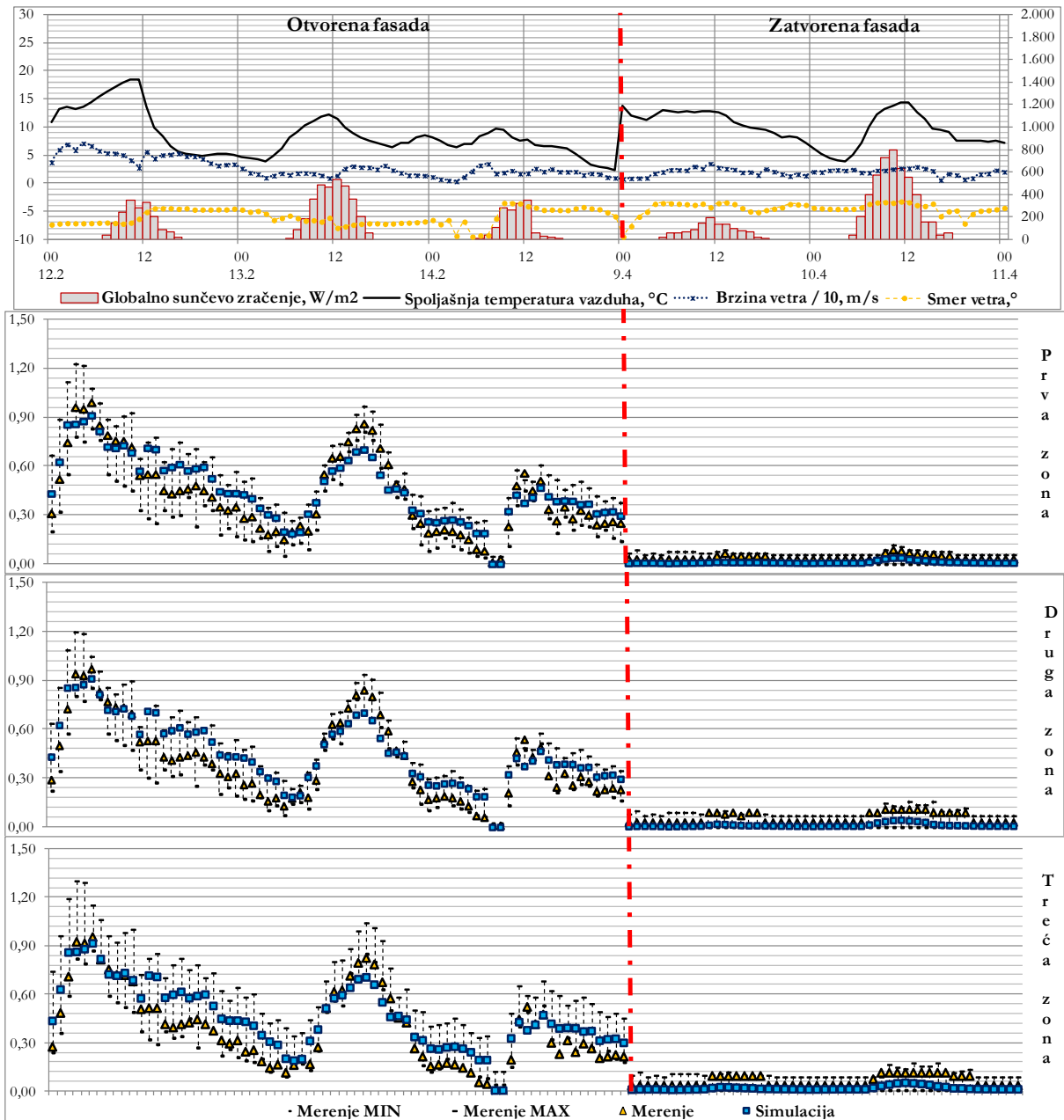
Vrednosti standardne devijacije su izuzetno niske i veoma blizu idealne vrednosti, što zajedno sa pokazateljem MBE upućuje na izuzetno podudaranje stvarnih rezultata merenja i rezultata dobijenih simulacijom, te upućuju na dobro postavljen model, uprkos niskim vrednostima koeficijenta determinacije i izrazito, čak na prvi pogled, neprihvatljivo visokim vrednostima koeficijentata varijacije, koje se za otvorenu fasadu kreću u intervalu od 22,6% do 29,8%, a za zatvorenu u intervalu od 74% do čak 86,37%. Ovakvi, na prvi pogled paradoksalni rezultati, svoje uporište ne nalaze u lošem postavljanju simulacionog modela, nego u mernoj skali malog raspona i niskoj vrednosti aritmetičke sredine, koja se kod zatvorene fasade kreće u intervalu od 0,04 do 0,06.

Pokazatelj minimalnih razlika $D_{\min}(S-M)$ ukazuje na pozitivne razlike prisutne kod otvorenog sistema u II zoni. U svim drugim slučajevima razlike imaju negativan predznak. Kada je reč o pokazatelju maksimalnih razlika $D_{\max}(S-M)$ ističu se II i III zona kod otvorenog sistema, gde su te razlike pozitivne, dok su u svim ostalim slučajevima negativne. Niske razlike između simulacionih i izmerenih veličina kod zatvorene fasade, na koje nas upućuje vrednost pokazatelja $D_{\max}(S-M)$, su još jedna potvrda da niski koeficijent determinacije kod zatvorene fasade nije posledica loše postavljenog modela.

Takođe, ono što treba naglasiti je, da je brzina vazduha u međuprostoru DVF jako promenljiva i da se opseg njenog merenja mora smanjiti i na nivo ispod minuta. U ovom slučaju, zbog dugog vremenskog intervala, merenje nije bilo u mogućnosti izvesti u kraćim intervalima. Na slici 4.13, prikazane su minimalne i maksimalne vrednosti brzina u posmatranom satu (broj merenja u toku sata je bio 4). Prilikom ove analize vremenski korak od 15 minuta je dug i ne daje dovoljnu

4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA

preciznost usled brzih promena analiziranih parametara. Generalni zaključak koji se može izvesti na osnovu svih dobijenih statističkih indikatora je da je postavljeni model potvrđen.



Slika 4.13: Potvrđivanje brzina strujanja vazduha u međuprostoru DVF

Tabela 4.12: Rezultati statističkih indikatora za slučaj potvrđivanja brzina vazduha u međuprostoru DVF - prvi deo

Zona	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Otvorena DVF	0,86	0,86	0,86	0,03	0,05	0,06	0,10	0,10	0,12
Zatvorena DVF	0,69	0,65	0,70	-0,03	-0,04	-0,04	0,03	0,05	0,05
Indikator	R^2			MBE			RSME		

4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA

Tabela 4.13: Rezultati statističkih indikatora za slučaj potvrđivanja brzina vazduha u međuprostoru DVF - prvi deo

Zona	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Otvorena DVF	22,66	25,66	29,79	-0,02	0,01	0,01	-0,18	0,18	0,20
Zatvorena DVF	74,28	87,57	86,38	-0,01	-0,06	-0,08	-0,05	-0,06	-0,07
Indikator	CVRSME			$D_{\min}(S-M)$			$D_{\max}(S-M)$		

4.5 ZAKLJUČCI FORMIRANJA I POTVRĐIVANJA MODELA

Sprovedeni eksperimentalni deo istraživanja, u najvećoj meri je ukazao na ključne prednosti i nedostatke koncepta primene DVF. Kao nastavak analize, neophodno je bilo postaviti i formirati virtuelni model objekta sa izabranom DVF. Cilj formiranja virtuelnog, potvrđenog modela jeste, da se u daljem istraživanju putem energetskih simulacija prouče uticaji DVF u raznim scenarijima, koji fizički nisu mogli biti deo eksperimentalnog dela istraživanja.

Kombinacija softverskog alata EnergyPlus i Airflow Network mrežnog algoritma strujanja, pokazala se kao dobar i opravdan izbor kada je u pitanju odnos tačnosti i vremena potrebnog za simulaciju. Simulacije su u proseku trajale oko 10 minuta, što se može smatrati relativno kratkim vremenom za dobijanje rezultata. Softverski alat podrazumeva da je vazduh u zoni uniformne temperature i stoga daje samo jednu simuliranu vrednost. Merenjem su dobijene dve vrednosti temperature vazduha po širini fasade, a u ovoj analizi je korišćena prosečna izmerena vrednost. Isti slučaj je i za temperature posmatranih površina, s tim što je putem merenja zabeležena jedna izmerena vrednost.

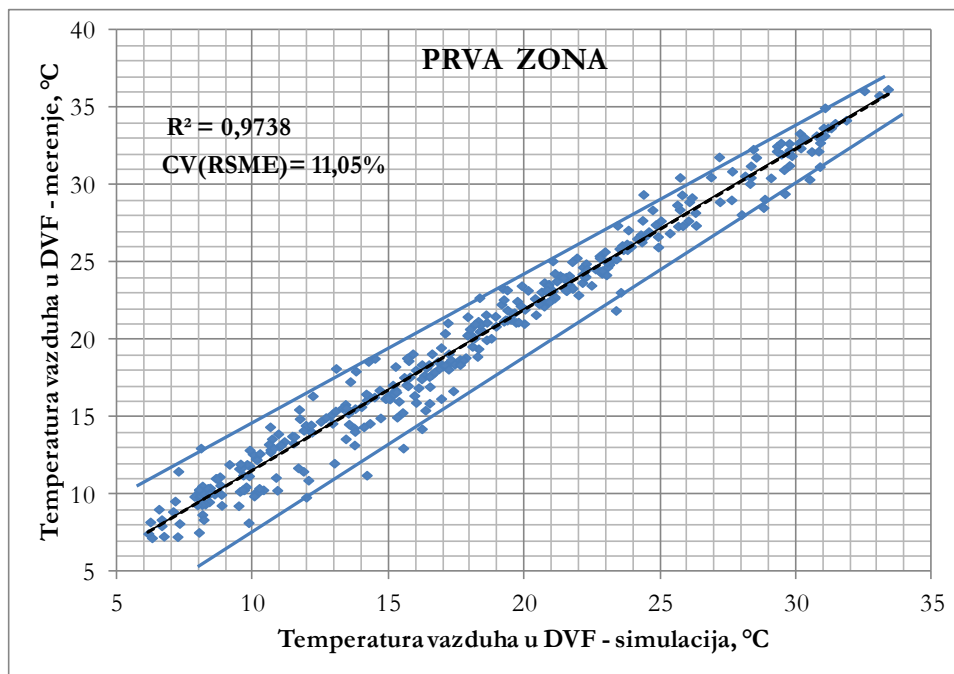
U slučaju analize brzina strujanja vazduha u međuprostoru fasade, zabeležen je viši stepen neslaganja merenja i simulacija. Glavni problem predstavlja limitiranost softverskog paketa koji rezultate daje na časovnom nivou, a sama priroda promene posmatranog parametra je na nivou od par sekundi. Kako bi se detaljnije prikazala priroda promene na dijagramima su prikazane minimalno i maksimalno zabeležene izmerene vrednosti brzina vazduha u toku jednog sata. U budućem istraživanju, interval merenja mora biti kraći na nivou od par sekundi. Izlazne vrednosti Airflow Network mrežnog algoritma strujanja generišu vrednosti zapreminskog protoka vazduha (m^3/s), koji se deli sa površinom poprečnog preseka fasade i sa vrednošću "discharge" koeficijenta za posmatrani virtuelni horizontalni otvor. Na taj način, dobijene vrednosti merenja i simulacija su postale uporedive. Posmatrajući dva slučaja, otvorena i zatvorena DVF, dobijeni rezultati pokazali su različite faktore koji utiču na vrednosti brzina. U slučaju kada je fasada otvorena, vrednost brzina izrazito zavisi od brzine vetra. Takođe, u dnevnom režimu, na ovu brzinu utiče i vrednost sunčevog zračenja, što implicira da je vrednost brzine vazduha u međuprostoru DVF direktno proporcionalna sa vrednostima brzine vetra i intenzitetom sunčevog zračenja. Kao dodatak treba navesti i uticaj smera strujanja vetra. U periodu havarijskog zatvaranja protivpožarnih klapni, ukazala se mogućnost da se analizira i slučaj zatvorene fasade. Očito je da vrednost brzine zavisi samo od dnevnog nivoa sunčevog zračenja, kada su zabeležene i najviše vrednosti brzina.

Svi korišćeni statistički indikatori pokazali su visok nivo tačnosti i poklapanja rezultata dobijenih simulacijom i rezultata dobijenih merenjem. Vrednosti odstupaju u zavisnosti od posmatranog režima i zone i zaključak je, da se bolje vrednosti poklapanja rezultata dobijaju u prelaznom i letnjem režimu, pogotovo kada se analizira najuticajniji parametar - temperatura vazduha u DVF. Takođe, zaključak je da se veća odstupanja pojavljuju u toku dana, što kao razlog može imati složeno termičko ponašanje DVF koje se reflektuje na nepreciznost i nesigurnost konvektivnog koeficijenta prelaza toplote. Kada je u pitanju vrednost brzine vazduha, zaključak je da se ovaj

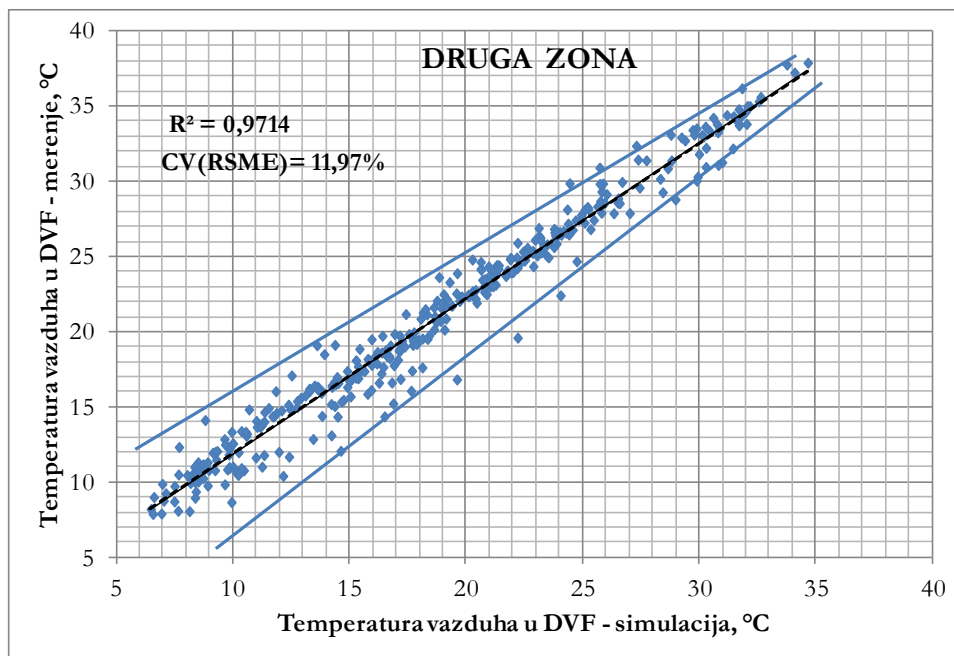
4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA

parametar mora analizirati zasebno u mnogo kraćem vremenskom intervalu (interval od nekoliko sekundi). Dobijeni rezultati vezani za brzinu vazduha ukazuju, da se vrednosti bolje poklapaju u slučaju kada su klapne spuštene, odnosno kada je posmatrani slučaj bolje kontrolisan.

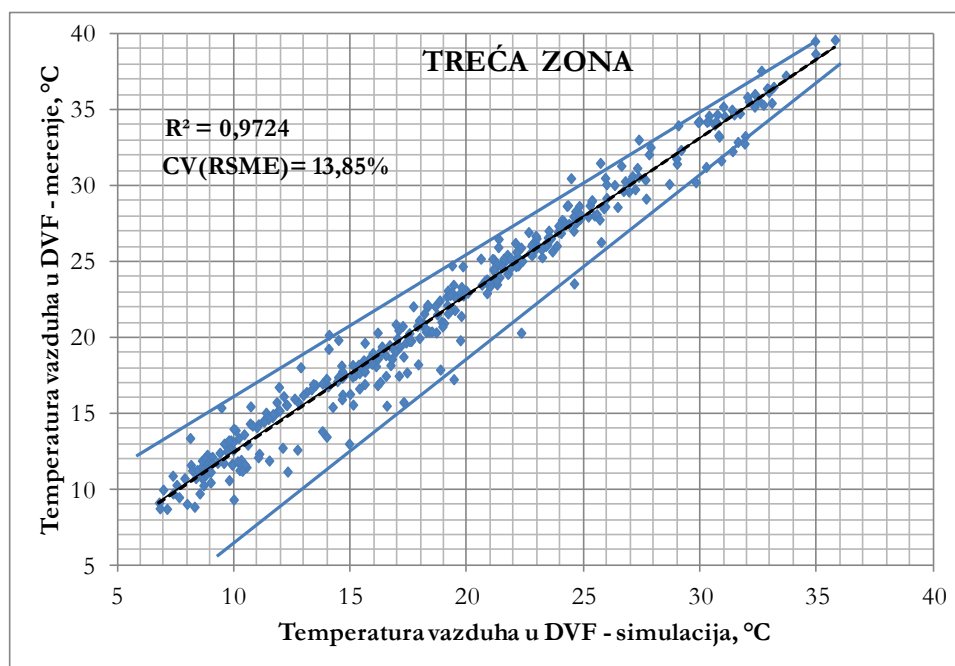
Slike 4.14, 4.15 i 4.16, prikazuju dva najreprezentativnija statistička indikatora, R^2 i $CV(RSME)$, za slučaj temperatura vazduha u fasadi u toku celog posmatranog perioda.



Slika 4.14: R^2 i $CV(RSME)$ - prva zona, temperatura vazduha u DVF



Slika 4.15: R^2 i $CV(RSME)$ - druga zona, temperatura vazduha u DVF



Slika 4.16: R² i CV(RSME) - treća zona, temperatura vazduha u DVF

Opšti zaključak formiranja, finog podešavanja i potvrđivanja modela objekta sa DVF, jeste da dobijeni rezultati simulacija predstavljaju dobro predviđanje realnih (izmerenih) vrednosti. Stoga, ovako fino podešen (kalibrisan) model je visoko pouzdan u smislu budućih ocena termičkih performansi objekta sa DVF. Takođe treba napomenuti, da i pored nepostojanja standarda ili smernica za verifikaciju temperatura i brzina, objektivno gledano pouzdanost modela je dobra u smislu dobijenih vrednosti predloženih statističkih indikatora.

4.6 LITERATURA

- [1] AIVC., In: Wind pressure workshop proceedings AIC-TN-13.1-84. Brussels: AIVC; 1984
- [2] ASHRAE., ASHRAE handbook – fundamentals. Atlanta, USA, 2013
- [3] Ayres, M.J., Stamper, E., Historical development of building energy calculations, ASHRAE Transactions 101(1), 1995, p.p. 47-55
- [4] Building Performance Simulation for Design and Operation, (edited by Jan Hensen and Roberto Lamberts), London, Spon Press, 2011
- [5] Bacot, P., Neveu, A., Sicard, J., Analyse modale des phenomenes thermiques en regime variable dans le batiment. Revue Generale de Thermique, p.p. 267-189, 1984
- [6] Beck, J.V., Arnold, K.J., Parametric estimation in engineering and science, John Wiley & Sons, 1977, New York
- [7] Bertagnolio, S., Evidence-based model calibration for efficient building energy services, PhD Thesis, University of Liege, Belgium, 2012
- [8] Cellier, F. E., Kofman, E., Continuous System Simulation, Springer, 2006
- [9] Chan, A.L.S., Chow, T.T., Fong, K.F. Lin, Z., Investigation on energy performance of double skin facade in Hong Kong, Energy and Buildings 41, 2009, p.p.1135–1142
- [10] Choi, W., et al., Operation and control strategies for multi-storey double skin facades during the heating season, Energy and Buildings 2012; 49; p.p. 454-465
- [11] Clark, D.R., HVACSIM+ building systems and equipment simulation program: Reference manual. NBSIR 84-2996, U.S. Department of Commerce, Washington, D.C. 1985
- [12] Cóstola, D., Blocken, B., Hensen, J.L.M., Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs, Building and Environment, 2009, p.p. 2027–2036

4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA

- [13] Crawley, D., et al., Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs, *Building and Environment* 2008; 43; p.p. 661-673
- [14] Crawley, D. et al., EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program, *Energy and Buildings*, 2001, p.p. 319-331
- [15] De Wit, S., Augenbroe, G., Uncertainty analysis of building design evaluations, *Proceeding of the 7th International Building Simulation Conference*, Rio de Janeiro, 2001
- [16] De Wit, S., Uncertainty in predictions of thermal comfort in buildings, PhD Thesis, Delft University of Technology, 2001
- [17] Grosso, M., Wind pressure distribution around buildings: a parametrical mode. *Energy and Buildings* 1992; p.p.101–31
- [18] Gvozdenac, D., Kljajć, M., Petrović, J., *Merenje i regulisanje u termoprocesnoj tehnici*, FTN izdavaštvo, Novi Sad, 2009
- [19] Hashemi, N., et al., Thermal behaviour of a ventilated double skin facade in hot arid climate, *Energy and Buildings* 42, 2010, p.p 1823-1832
- [20] Holscher N, Niemann, H.J., Towards quality assurance for wind tunnel tests: a comparative testing program of the Windtechnologische Gesellschaft. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* 1998, p.p. 599–608
- [21] Howe, D., *The free On-line Dictionary of Computing*
- [22] <http://cpgen.bouw.tno.nl>
- [23] Jaewan, J., et al., Load Characteristics and Operation Strategies of Building Integrated with Multi story Double Skin Facade, *Energy and Buildings* 2013; 60; p.p. 185-198
- [24] Joe, J., et al., Optimal design of a multi-story double skin facade, *Energy and Buildings* 76, 2014, p.p. 143–150
- [25] Kalyanova, O., et al., An empirical validation of building simulation software for modeling of doubleskin facade (DSF), *Proceedings of 11th International Conference on Building Simulation*, Glasgow, Scotland, 2009
- [26] Kim, D., Park, C., Difficulties and limitations in performance simulation of a double skin facade with EnergyPlus, *Energy and Buildings* 43, 2011, p.p. 3635–3645
- [27] Kim, Y., et al., Contribution of natural ventilation in a double skin envelope to heating load reduction in winter, *Building and Environment* 44, 2009, P.P. 2236–2244
- [28] Klein, S.A., Beckman, W.A., Duffie, J.A., TRNSYS: A transient simulation program. *Engineering Experiment Station Report 38-14*, University of Wisconsin-Madison. 1994
- [29] Knoll, B., Phaff, J.C., De Gids, W.F., Pressure simulation program, *Proceedings of the conference on implementing the results of ventilation research*. AIVC; 1995
- [30] Kreider, J.F., Haberl, J., Predicting hourly building energy usage: The great predictor shootout-Overview and discussion of results, *ASHRAE Transactions* 100, 1994. p.p. 1104-1118
- [31] Kreider, J.F., Rabl, A., *Heating and cooling of buildings*, McGraw-Hill, New York. 1994
- [32] Kusuda, T., Thermal response factors for multi-layer structures of various heat conduction systems, *ASHRAE Transactions* 75, 1969. p.p. 246-271
- [33] Kusuda, T., Early history and future prospects of building system simulation, *Proceedings of the Sixth International IBPSA Conference*, 1999; Kyoto; Japan; p.p. 3-15.
- [34] Lawrence Berkeley National Laboratory, EnergyPlus input output reference: the encyclopedic reference to EnergyPlus input and output, Berkely: LBL; 2012
- [35] Liddament, M.W., *Air infiltration calculation techniques – an applications guide*, Bracknell: AIVC; 1986
- [36] Liddament, M.W., *Air Infiltration Calculation Techniques - An Applications Guide*, AIVC, Warwick, UK, 1986
- [37] Manz, H., et al., Series of experiments for empirical validation of solar gain modeling in building energy simulation codes-experimental setup, test cell characterization, specifications and uncertainty analysis, *Building and Environment* 41, 2006, p.p. 1784–1797

4. DEFINISANJE, FINO PODEŠAVANJE I POTVRĐIVANJE NUMERIČKOG MODELA OBJEKTA

- [38] Marinosci, C., et al., Empirical validation and modelling of a naturally ventilated rainscreen facade building, *Energy and Buildings* 43, 2011, p.p.853–886
- [39] Mateus, N., et al., Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell, *Energy and Buildings*, 75, 2014, p.p. 511-522
- [40] Mitalas, G.P., Calculations of transient heat flow through walls and roofs, *ASHRAE Transactions* 74, 1968, p.p. 182-188
- [41] Mitalas, G.P., D.G. Stephenson., Room thermal response factors, *ASHRAE Transactions* 73(1):III.2.1-III.2.10. , 1967
- [42] Orme, M.L., Liddament, M.W., Wilson, A., Numerical data for air infiltration and natural ventilation calculations, Technical note 44, AIVC, 1998
- [43] Orme, M.L., Leksmono, N., AIVC Guide 5, AIVC, 2002
- [44] Rabl, A., Parameter estimation in buildings: Methods for dynamic analysis of measured energy use, *Journal of Solar Energy Engineering* 1988, p.p. 52-66
- [45] Raftery, P., Calibrated whole building energy simulation: An evidence-based methodology, PhD Thesis, NUI Galway, Scotland, 2011
- [46] Reddy, T., Application of dynamic building inverse models to three occupied residences monitored non-intrusively, *Proceedings of the Thermal Performance of Exterior Envelopes of Buildings IV*, 1989, ASHRAE/DOE/BTECC/CIBSE
- [47] Reddy, T., Literature Review on Calibration of Building Energy Simulation Programs: Uses, Problems, Procedures, Uncertainty, and Tools, *ASHRAE Transaction*, Vol 112, Part I, ASHRAE, 2005.
- [48] Richards, P.J., Hoxey, R.P., Connell, B.D., Lander, D.P., Wind-tunnel modelling of the Silsoe Cube. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* 2007, p.p.1384–99.
- [49] Shurcliff, W.A., *Frequency method of analyzing a building's dynamic thermal performance*, Cambridge, 1984
- [50] Sonderegger, R.C., Thermal modeling of buildings as a design tool, *Proceedings of CHMA 2000*
- [51] Sonderegger, R.C., Dynamic models of house heating based on equivalent thermal parameters, Ph.D. dissertation, Center for Energy and Environmental Studies Report No. 57. Princeton University, Princeton, 1977
- [52] Stephenson, D.G., Mitalas, G.P., Cooling load calculations by thermal response factor method, *ASHRAE Transactions* 73(1):III.1.1-III.1.7., 1967
- [53] Subbarao, K., PSTAR-Primary and secondary terms analysis and renormalization: A unified approach to building energy simulations and short-term monitoring. SERI/TR-253-3175. 1988
- [54] Subbarao, K., Thermal parameters for single and multi-zone buildings and their determination from performance data, SERI Report SERI/TR-253-2617, Solar Energy Research Institute (now National Renewable Energy Laboratory), 1986
- [55] Swami, M.V., Chandra, S., Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural-ventilation airflow. *ASHRAE Transactions* 1988; p.p.243–66
- [56] Walton, G. N., "AIRNET – A Computer Program for Building Airflow Network Modeling", NISTIR 89-4072, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 1989
- [57] Zhai, Z. et al., Assessment of natural and hybrid ventilation models in whole-building energy simulations, *Energy and Buildings* 43, 2011, p.p. 2251–2261

**5. PREDLOZI I OCENA SEZONSKIH OPERATIVNIH I
KONTROLNIH STRATEGIJA - OPRAVDANOST PRIMENE
KONCEPTA DVF**

["We shape our buildings, thereafter they shape us"]

(Winston Churchill)

5. PREDLOZI I OCENA SEZONSKIH OPERATIVNIH I KONTROLNIH STRATEGIJA - OPRAVDANOST PRIMENE KONCEPTA DVF

Opšte je poznato, da na stanje unutrašnjeg termičkog komfora u objektu najviše utiču trenutni klimatski parametri, a među njima su najznačajniji: spoljašnja temperatura vazduha, sunčevo zračenje i uticaj vetra. Ove komponente su dominantne i praktično definišu prenos toplote koji nastaje između objekta i njegove spoljašnjosti.

Današnje visoke, poslovne zgrade u većini slučajeva za omotač imaju visoki procenat staklene površine, što zbog estetskog efekta, to i zbog lakše konstrukcije i statike celokupnog objekta. Kao najveći problem koji se pojavljuje kod ovakvih objekata navodi se izuzetna zavisnost i promenljivost procesa prenosa toplote od trenutnih meteoroloških parametara. Takođe, treba napomenuti da u objektima sa jednostrukom staklenom fasadom, uticaj orijentacije igra značajnu ulogu u količini primljene i oslobođene toplote. Uprkos dobrobitima (bolja prirodna osvetljenost i lakša konstrukcija), ovakve fasade generalno podstiču povećanu potrošnju energije, usled većih zimskih gubitaka i letnjih dobitaka toplote.

Kako bi se ublažilo povećanje potrošnje energije, a pri tome zadržala visoka transparentnost i estetika fasade, inženjeri su počeli da razvijaju koncept DVF. U ovom slučaju vazdušni međuprostor fasade se ponaša kao "tampon zona", koja u dobroj meri štiti objekat od promenljivih spoljašnjih uticaja. Ovo potvrđuju i rezultati skorašnjih studija [8, 9, 11, 12, 13, 14, 15], koje analiziraju efekte prenosa toplote i prirodne ventilacije nastale usled prisustva DVF. Opšti zaključak je da glavne prednosti koncepta DVF nastaju samo u slučaju njihovog dobrog projektovanja, održavanja i vođenja u procesu eksploatacije. Pravilno definisane i primenjene sezonske kontrolne i operativne strategije, sa sigurnošću dovode do povećanja energetske efikasnosti i kvaliteta termičkog komfora u objektu [4, 10]. Bez adekvatnog pristupa u vođenju i održavanju DVF, neminovni su povećani energetske troškovi. Naravno, klimatsko područje i neposredno okruženje objekta igraju značajnu ulogu, da li je i koliko primena ovog koncepta opravdana. Takođe, treba napomenuti da su za primenu DVF neophodni i veći inicijalni investicioni troškovi.

Predviđanje potrošnje energije i ocena efektivnosti koncepta DVF je dosta složena. Kao glavni uticajni faktori performanse DVF navode se termički i procesi strujanja u međuprostoru fasade. Oni se ne mogu odrediti samo na osnovu poznavanja karakteristika korišćenih materijala (optičke i termičke karakteristike). Teškoće prilikom određivanja performansi, kao i neprecizne i loše procene efektivnosti, dovode do nesigurnosti i pogrešnih ocena. Na kraju, energetska efektivnost i ekonomska opravdanost primene DVF zavisi od ovih zaključaka.

Današnja mišljenja o DVF podeljena su na pozitivna i negativna. Postoje protivurečnosti i kada su u pitanju eksperimentalna istraživanja. Glavni razlozi su, pre svega nedovoljno iskustvo, mali broj eksperimentalnih istraživanja, nerazumevanje operativnih strategija, kao i različita klimatska područja za koje su rezultati dobijeni. Najveći broj eksperimentalnih studija sprovedena su na malim laboratorijskim modelima, dok je većina analiza za višespratne objekte bez merenja.

Kako bi se dobila kredibilna i pouzdana procena efektivnosti DVF, neophodno je da proces ocene i predviđanja potrošnje energije bude sproveden putem eksperimentalnog potvrđivanja (validacije) predloženog modela. U skladu sa tim, cilj ovog dela istraživanja je da se putem prethodno eksperimentalno potvrđenog modela objekta sa DVF, izvrši ocena efektivnosti i efikasnosti predloženih kontrolnih i operativnih strategija. Takođe, opravdanost primene koncepta DVF, sa aspekta potrošnje energije, za klimatsko područje Beograda, sprovedena je komparativnom analizom sa modelima koji imaju tradicionalnu fasadu.

5.1 PREDLOZI SEZONSKIH OPERATIVNIH STRATEGIJA

Osnovni model objekta sa DVF predstavlja isti potvrđeni model iz poglavlja 4. Svi delovi objekta su zadržani kakvi u stvarnosti i jesu, a detalji se mogu pronaći u poglavlju 2. Celokupna procedura finog podešavanja modela je zadržana, a njeni detalji se mogu pronaći u poglavlju 4.3, tabela 4.3. Posmatrana DVF, koja se nalazi na severo-istoku objekta, podeljena je na 6 (šest) vertikalnih zona, koje su povezane sa virtuelnim pokretnim klapnama. Osnovni sloj fasade urađen je na tradicionalni način, odnos "prozor-zid" ("WWR") je postavljen na 45%. Vrednost koeficijenta prolaza toplote za spoljašnji zid (osnovni sloj fasade) je $0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$, a za ravan krov i pod je $0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$. Ostale karakteristike stakla i venecijanera date su u poglavlju 2.

Venecijaneri su smešteni u međuprostoru fasade i regulisani su tako, da se nalaze u fiksnom položaju od 45° za slučaj kada je spoljašnja temperatura viša od 25°C i kada je intenzitet horizontalnog sunčevog zračenja viši od 300 W/m^2 . Unutrašnji dobici toplote od opreme su preuzeti iz ASHARE standarda [1] i iznose $16,1 \text{ W/m}^2$, a dobici od osvetljenja su postavljeni na 12 W/m^2 . Što se tiče broja ljudi u prostoriji, broj korisnika po zoni je postavljen na 20 ljudi/zoni, a prema ASHARE standardu 62.1-2013 [2], zahtev svežeg vazduha po korisniku je usvojen i iznosi $30,6 \text{ m}^3/\text{h}$. Što se tiče KGH sistema u objektu, usvojen je sistem sa toplotnom pumpom (direktna ekspanzija) za sve klimatizovane zone. Sistem za KGH radi u toku radnih sati od 7h do 19h. Unutrašnje temperature su definisane prema projektnim uslovima, 21°C (grejna sezona oktobar-april) i 26°C (letnja sezona maj-septembar). U toku neradnih sati i u toku noći, dozvoljava se pad temperature u toku grejne sezone do 17°C i povećanje temperature u toku letnje sezone do 29°C . Prilikom energetskih simulacija i procene potrošnje energije predloženih modela, koristi se tipična časovna meteorološka godina IWEC [3], za lokaciju grada Beograda.

Detaljan opis svih modela sa predloženim adekvatnim sezonskim operativnim i kontrolnim strategijama dat je u tabeli 5.1 i na slici 5.1.

Predloženi modeli predstavljaju sledeće:

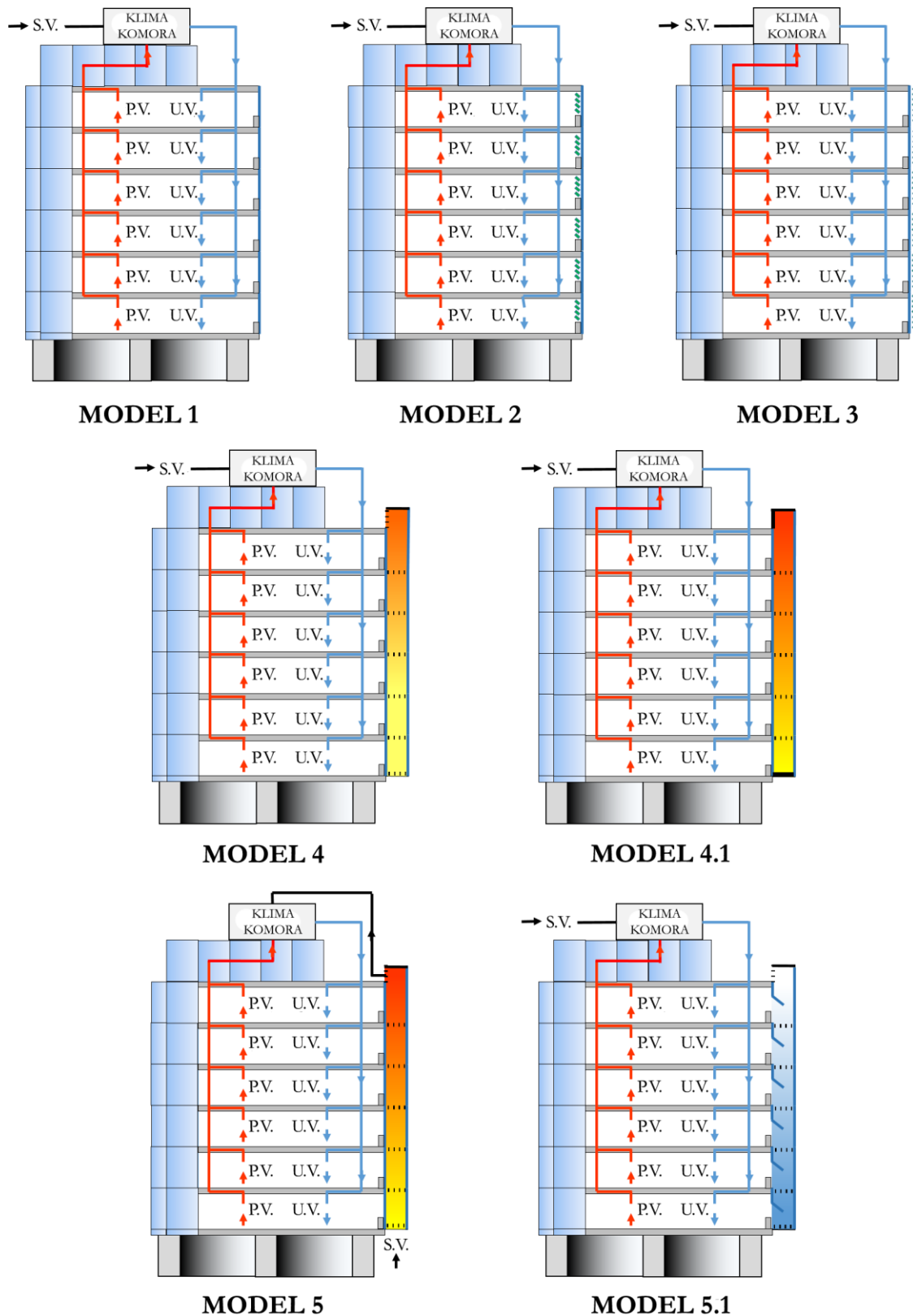
1. Model 1. predstavlja klasično izgrađen objekat bez zaštite od sunčevog zračenja;
2. Model 2. predstavlja klasično izgrađen objekat sa venecijanerima postavljenim unutra;
3. Model 3. predstavlja klasično izgrađen objekat sa venecijanerima postavljenim spolja (brisoletji);
4. Model 4. predstavlja postojeći objekat sa DVF;
5. Model 4.1 predstavlja postojeći objekat sa DVF sa regulisanim otvorima;
6. Model 5. predstavlja zimsku sezonsku strategiju primenjenu na postojećem objektu (povezivanje međuprostora DVF i KGH sistem objekta);
7. Model 5.1 predstavlja letnju sezonsku strategiju primenjenu na postojećem objektu (prirodna ventilacija objekta).

Neophodno je napomenuti da svi modeli imaju istu neto korisnu klimatizovanu površinu i isti sistem snabdevanja toplotne energije (grejanje + klimatizacija). Svi modeli formirani su na osnovu karakteristika datim u poglavlju 2.

Tabela 5.1: Detaljna specifikacija predloženih modela i njihovih operativnih i kontrolnih strategija

Model	Tip omotača	Tip KGH sistema	Zaštita od sunčevog zračenja	Tip ventilacije u objektu	Tip ventilacije u međuprostoru fasade	Kontrolne strategije	Operativno vreme
1	Tradicionalna fasada	Toplotna pumpa	Bez zaštite	Mehanička	Prirodna	Bez	Cela godina
2	Tradicionalna fasada	Toplotna pumpa	Zaštita postavljena unutra - venecijaneri	Mehanička	Prirodna	Kontrola venecijanera	Cela godina
3	Tradicionalna fasada	Toplotna pumpa	Zaštita postavljena spolja - brisoleji	Mehanička	Prirodna	Kontrola brisoleja	Cela godina
4	Dvostruka fasada - trenutno stanje	Toplotna pumpa	Venecijaneri u međuprostoru DVF	Mehanička	Prirodna	Kontrola venecijanera	Cela godina
4.1	Dvostruka fasada - trenutno stanje	Toplotna pumpa	Venecijaneri u međuprostoru DVF	Mehanička	Prirodna	Regulacija otvora DVF + kontrola venecijanera	Cela godina
5	Dvostruka fasada - trenutno stanje	Toplotna pumpa	Venecijaneri u međuprostoru DVF	Mehanička	Prirodna	Povezivanje međuprostora DVF i KGH sistema + regulacija otvora DVF + kontrola venecijanera	Zimski režim
5.1	Dvostruka fasada - trenutno stanje	Toplotna pumpa	Venecijaneri u međuprostoru DVF	Mehanička	Prirodna	Prirodno provetravanje + regulacija otvora DVF + kontrola venecijanera	Letnji režim

5. PREDLOZI I OCENA SEZONSKIH OPERATIVNIH I KONTROLNIH STRATEGIJA -
OPRAVDANOST PRIMENE KONCEPTA DVF



Slika 5.1: Modeli sa izabranim operativnim i kontrolnim strategijama

5.1.1 MODELI OBJEKTA SA TRADICIONALNOM FASADOM

Modeli od 1 do 3 predstavljaju objekat izgrađen klasično, sa tradicionalnom fasadom. Osnovne razlike između modela su tipovi zaštite od sunčevog zračenja, koji su podeljeni na: bez zaštite, zaštita postavljena unutar objekta i zaštita postavljena spolja. Modeli sa zaštitom od sunčevog zračenja - sa venecijanerima ili brisolejima, poseduju i sistem njihove kontrole tako da su oni postavljeni u fiksnom položaju od 45° u slučaju kada je temperatura spoljašnjeg vazduha viša od 25°C i kada je intenzitet horizontalnog sunčevog zračenja viši od 300 W/m².

Cilj formiranja ovih modela je da se komparativnom analizom utvrdi odnos potrošnje energije objekta, sa i bez DVF.

5.1.2 MODEL POSTOJEĆEG OBJEKTA SA I BEZ REGULACIONIH KLAPNI

Kao što je detaljno opisano u poglavlju 2, model postojećeg objekta formiran je na osnovu svih poznatih informacija. Model postojećeg stanja predstavlja model 4, za koji je izvršena eksperimentalna analiza koja detaljno opisana u poglavlju 3. Takođe, verifikacija i potvrđivanje ovog modela izvršena je u poglavlju 4.

Neophodno je napomenuti, da u skladu sa dobijenim eksperimentalnim rezultatima, postojeći model ima dosta prostora za dalje unapređenje. Odnosno, sadašnje stanje objekta ne donosi uvek povećanje energetske efikasnosti, što dovodi do zaključka da DVF nije u potpunosti iskorišćena. Glavni problem je nepostojanje regulacionih klapni na ulazu i izlazu DVF, koje bi u zimskom periodu omogućile zatvaranje međuprostora fasade, a time, sigurno i smanjenje gubitaka toplote. U vezi sa tim, formiran je u model 4.1 koji poseduje virtuelne pokretne klapne na ulazu i izlazu, koje vrše zatvaranje/otvaranje međuprostora fasade, u skladu sa zadatim potrebama. Kod oba modela prisutna je kontrola zaštite od sunčevog zračenja, venecijaneri smešteni u međuprostoru fasade postavljeni su pod uglom od 45°, za slučaj kada su temperature spoljašnjeg vazduha više od 25°C i kada je intenzitet horizontalnog sunčevog zračenja viši od 300 W/m².

5.1.3 MODEL POSTOJEĆEG OBJEKTA SA ZIMSKOM OPERATIVINOM STRATEGIJOM

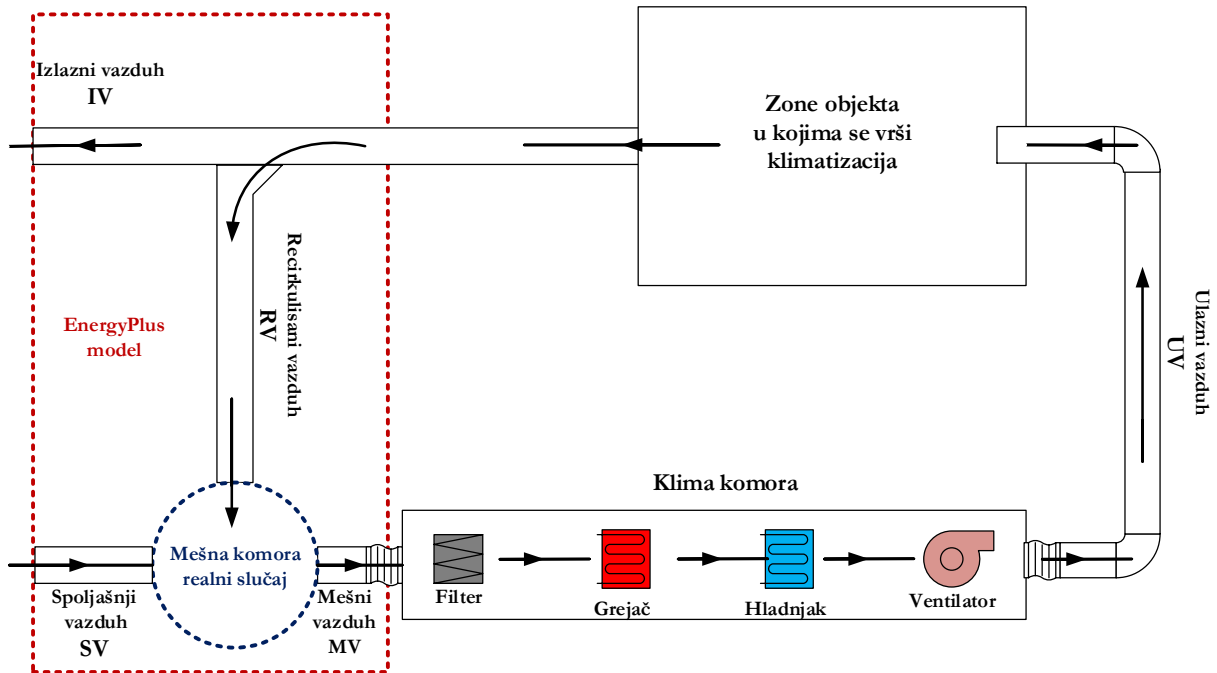
Kako bi se utvrdile i analizirale dodatne mogućnosti ušteda u toku zimske sezone, na osnovu potvrđenog modela formiran je model 5, koji povezuje međuprostor DVF sa klima komorom KGH sistema objekta. Ova zimska operativna strategija je izabrana iz razloga što se do sada pokazala kao najefikasnija [4, 9]. Pored nje, u literaturi se mogu pronaći zimske kontrolne strategije koje se baziraju na prirodnoj ventilaciji objekta, u slučaju kada su temperature vazduha u međuprostoru DVF više nego u prostoriji. Ove strategije ipak donose manje uštede nego predložena [4].

Suština predložene zimske kontrolne strategije je da se povezivanjem međuprostora DVF i klima komore poveća efikasnost KGH sistema i smanji potrošnja energije potrebna za zagrevanje prostora. Princip je sledeći:

1. otvori (prozori) osnovnog sloja DVF su uvek zatvoreni;
2. spoljašnji vazduh prolazi kroz međuprostor DVF i zagreva se usled dejstva sunčevog zračenja i usled prenosa toplote iz zagrejane prostorije ka spoljašnosti;
3. vazduh iz međuprostora DVF dospeva do ulaza u klima komoru.

5. PREDLOZI I OCENA SEZONSKIH OPERATIVNIH I KONTROLNIH STRATEGIJA - OPRAVDANOST PRIMENE KONCEPTA DVF

Kako bi predloženi model 5 bio pravilno definisan u EnergyPlus-u, postojeća šema KGH sistema koja je korišćena u modelima od 1, 2, 3, 4 i 4.1 mora se modifikovati. U prethodnim modelima korišćena je klasična šema (slika 5.2) - jednokanalne klimatizacije sa mešnom komorom spoljašnjeg (SV) i dela povratnog vazduha (PV) – recirkulisnog vazduha (RV) [5, 6]. Ovakvim načinom klimatizacije, centralno pripremljen vazduh se jednokanalno doprema do zone putem terminalnih jedinica. U ovom slučaju koristi se sistem koji direktno doprema vazduh u zonu bez zonske kontrole temperature ili protoka.



Slika 5.2: Šema jednokanalne klimatizacije sa mešnom komorom spoljašnjeg (SV) i recirkulisnog vazduha (RV) - modeli 1, 2, 3, 4, 4.1

Izabrani sistem predstavlja najjednostavniju varijantu jednokanalne klimatizacije sa mešnom komorom spoljašnjeg i recirkulisnog vazduha. Suština je, da zona u kojoj se vrši klimatizacija dobija vazduh direktno iz uređaja za centralnu pripremu, koji je već podešen da vrši kontrolu temperature u zadatoj zoni. Kako bi sistem pravilno radio, neophodno je da sume zonskih maksimalnih vrednosti protoka vazduha budu jednake maksimalnoj vrednosti protoka vazduha centralnog sistema.

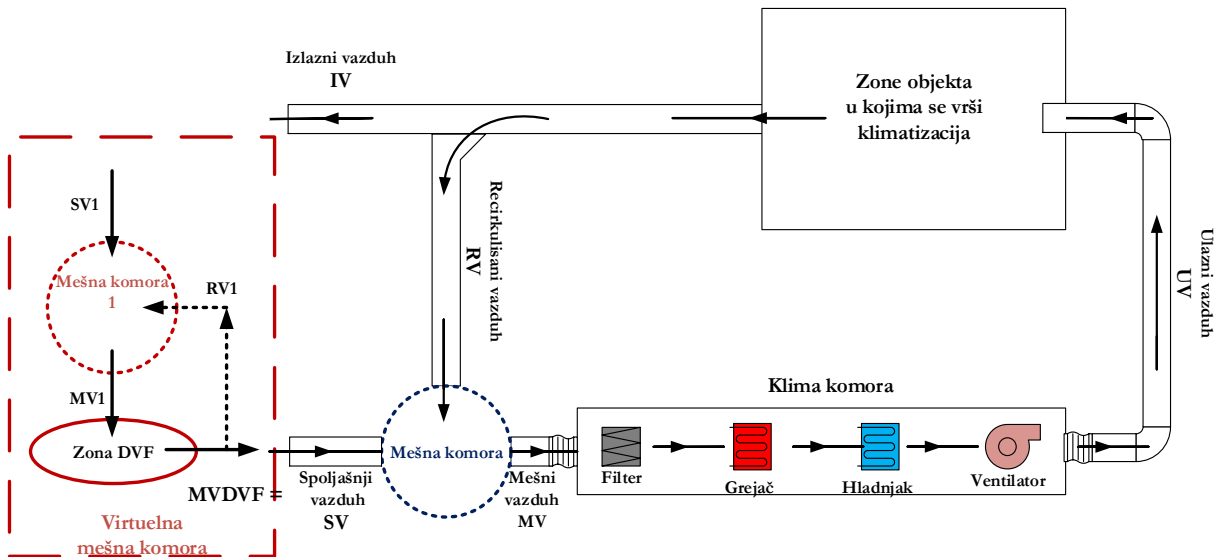
Proces EnergyPlus modeliranja jednokanalne klimatizacije sa mešnom komorom spoljašnjeg i recirkulisnog vazduha, može se opisati na sledeći način [5, 6]:

1. prethodno termički pripremljen vazduh u klima komori, jednokanalno se doprema do zona objekta u kojima se vrši klimatizacija;
2. u realnosti, mešna komora se sastoji iz tri čvora, dva ulazna (SV i RV) i jednog izlaznog (MV). Kod EnergyPlus modela, mešna komora se sastoji iz četiri čvora, dva ulazna čvora (spoljašnji vazduh (SV) i recirkulisani vazduh (RV)) i dva izlazna čvora (izlazni vazduh (IV) i mešni vazduh (MV)). Dakle, EnergyPlus mešna komora, dodatno sadrži i čvor za izlazni vazduh. Ali, iako postoji poseban čvor za izlazni vazduh, protok recirkulisnog vazduha u sebi uvek sadrži i komponentu izlaznog vazduha. Stoga, u EnergyPlus modelu, stvarna količina recirkulisnog vazduha dobija se kao razlika količine vazduha u čvoru recirkulisnog vazduha i u čvoru izlaznog vazduha;

5. PREDLOZI I OCENA SEZONSKIH OPERATIVNIH I KONTROLNIH STRATEGIJA - OPRAVDANOST PRIMENE KONCEPTA DVF

3. za klima komoru izabran je centrifugalni ventilator sa konstantnim protokom. Ventilator je uvek u pogonu za vreme predefinisano KGH operativnog rasporeda. Izvor toplote predstavlja toplotna pumpa sa direktnom ekspanzijom.

Kao što je i napomenuto, da bi se ostvarila predložena zimska operativna strategija povezivanja međuprostora DVF i KGH sistema, postojeća šema prikazana na slici 5.2 je zamenjena šemom na slici 5.3. EnergyPlus modeliranje KGH vazdušnih sistema zahteva da se veza između čvornih mesta uvek predstavlja u formi kruga ("loop"), što uslovljava da se broj čvorova ne može promeniti (dodavati). Kako nije moguće dodati još jedno ulazno čvorno mesto u postojećoj mešnoj komori, zaključak je da se u slučaju direktnog povezivanja vazduha iz međuprostora DVF na ulazno čvorno mesto za spoljašnji vazduh (SV), gubi pozicija za ulaznog čvora SV, što onemogućava dalju regulaciju protoka SV. Rešenje za novonastali problem može se pronaći u dodavanju još jedne, virtuelne, mešne komore. Pozicija nove mešne komore 1 je takva, da se ona nalazi između ulaznog čvora gde je povezan vazduh iz međuprostora DVF i ulaznog čvora, gde je povezan spoljašnji vazduh. Na ovaj način, spoljašnji vazduh (SV1) mešne komore 1, snabdeva vazduhom međuprostor DVF. Spoljašnji vazduh se dalje meša sa vazduhom koji se nalazi u zoni DVF. Vazduh u zoni DVF se zagreva pod uticajem sunčevog zračenja i prenosa toplote iz zagrejanih prostorija. Takva mešavina (MVDVF) vazduha se postavlja na čvorno mesto spoljašnjeg vazduha (SV) u prvobitnoj mešnoj komori. Ovakvom konfiguracijom KGH sistema, omogućava se kontrola i regulacija protoka spoljašnjeg vazduha. Dodatna podešavanja nove mešne komore 1 odnose se da su protoci spoljašnjeg (SV1) i ulaznog (MV1) vazduha jednaki, što implicira da je vrednost recirkulisanog vazduha mešne komore 1 (RV1) jednak nuli. Dakle, u slučaju mešne komore 1, vrši se princip klimatizacije sa 100% spoljašnji vazduhom.



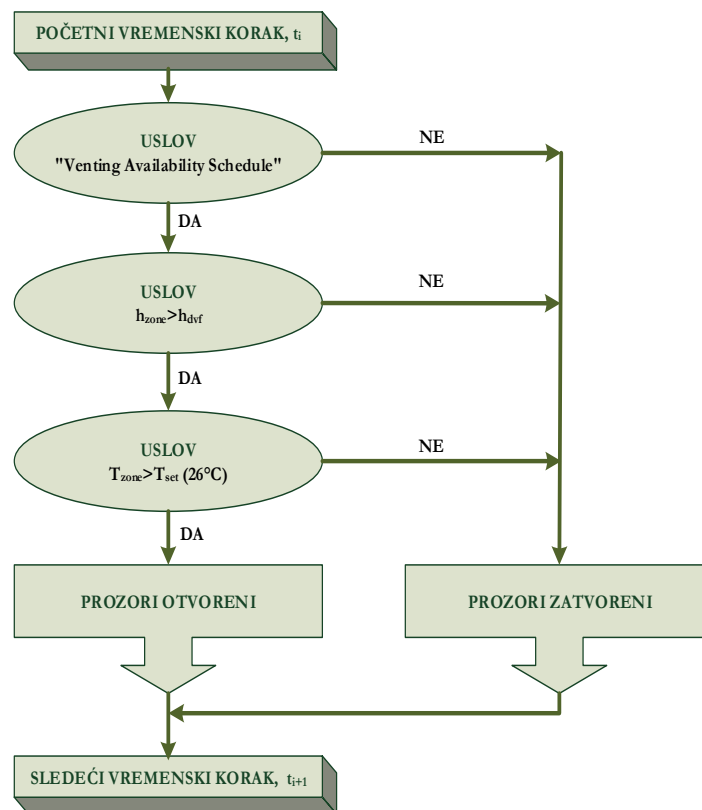
Slika 5.3: Šema jednokanalne klimatizacije sa dve mešne komore - model 5

5.1.4 MODEL POSTOJEĆEG OBJEKTA SA LETNJOM OPERATIVINOM STRATEGIJOM

Kako bi se ublažili efekti eksperimentalno utvrđenog pregrevanja u toku letnje sezone, pregledom literature i dosadašnjih istraživanja, najbolji rezultati se postižu primenom mera prirodnog provetravanja, kada spoljašnji uslovi to i dozvoljavaju. Naravno, podrazumeva se da su regulacione klapne međuprostora DVF u ovom periodu uvek otvorene. Takođe, u literaturi se mogu pronaći i strategije koje podrazumevaju postavljanje dodatnih ventilatora u međuprostoru, kako bi se povećao protok vazduha i poboljšalo odvođenje toplote iz pregrejane DVF. Pored toga, postoje i varijante sa ubacivanjem izlaznog (otpadnog) vazduha klimatizacionog sistema direktno u međuprostor fasade. Ove varijante sigurno doprinose željenom efektu pothlađivanja vazduha u međuprostoru fasade, ali neophodna instalacija za njihovu primenu dosta komplikuje postojeći sistem. U slučaju direktnog ubacivanja otpadnog vazduha, gubi se mogućnost za prirodno provetravanje i snabdevanje prostorija svežim vazduhom.

Osnovna kontrolna logika EnergyPlus algoritma razvijena za primenu prirodne ventilacije, zasnovana je na principu kontrole temperature ili entalpije vazduha. Dosadašnja istraživanja [4, 10], u većoj meri koriste kontrolnu logiku zasnovanu na temperaturi vazduha, što u potpunosti nije korektno kada je u pitanju klimatizacija. Iz tog razloga, u slučaju primene letnje operative strategije, koristi se model 5.1 sa kombinovanom varijantom koji podrazumeva kontrolu i temperature i entalpije vazduha, slika 5.4.

Dakle, prozori na osnovnom sloju DVF biće otvoreni, u slučaju kada su sva tri zahteva ispunjena, $h_{zone} > h_{dvf}$, $T_{zone} > T_{set}$ i da prethodno definisan raspored dozvoljava provetravanje ("Venting Availability Schedule"). Kako bi se izbeglo predgrevanje, temperatura T_{set} je postavljena na projektnu vrednost od 26°C.

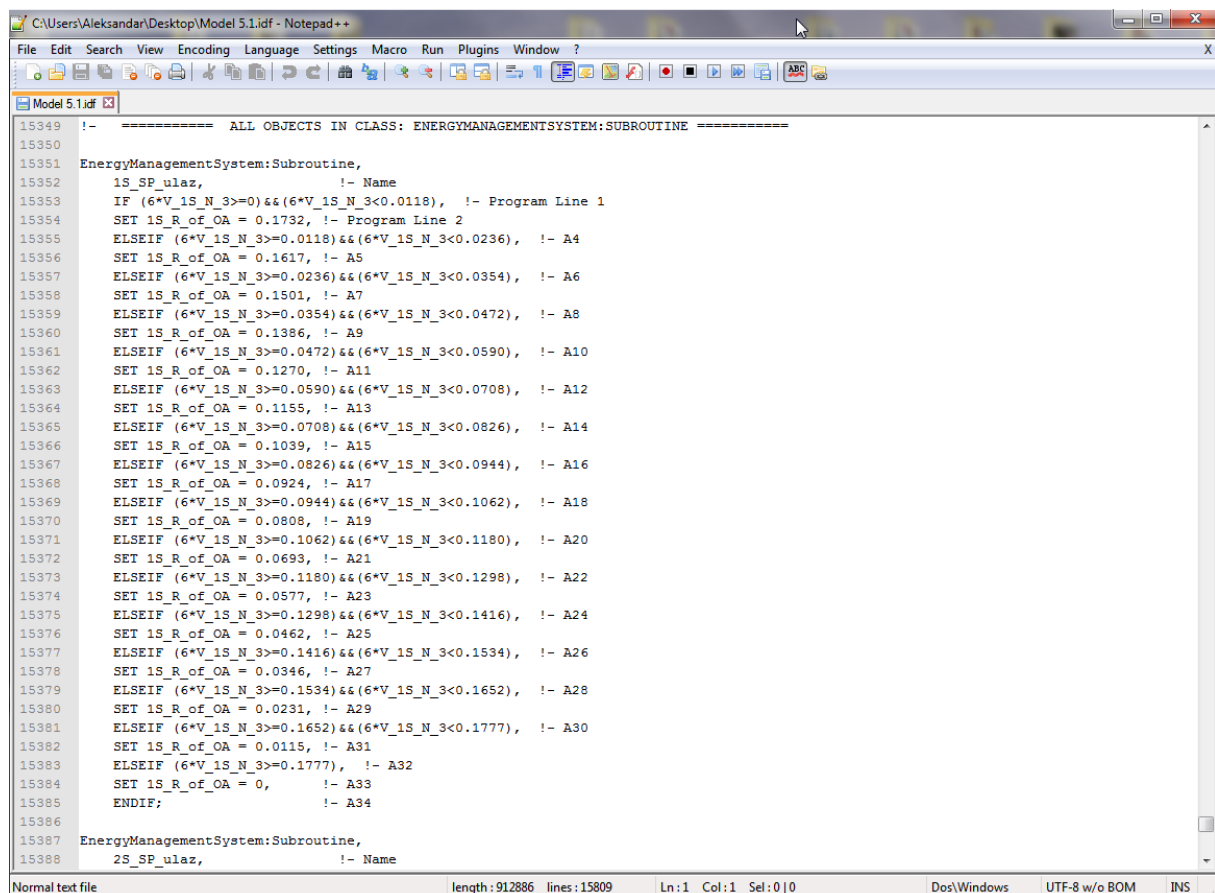


Slika 5.4: Kontrolni algoritam prirodnog provetravanja - model 5.1

5. PREDLOZI I OCENA SEZONSKIH OPERATIVNIH I KONTROLNIH STRATEGIJA - OPRAVDANOST PRIMENE KONCEPTA DVF

Pored prethodno definisanog kontrolnog algoritma prirodnog provetravanja, u EnergyPlus programu definisan je i algoritam za kontrolu količine vazduha za provetravanje. Dakle, cilj ovog algoritma je da kontroliše protoke vazduha za provetravanje kroz prozore i količinu spoljašnjeg vazduha koja ulazi u zonu DVF. Algoritam za kontrolu protoka postavljen je na osnovu podataka dobijenih u prethodno definisanom Airflow Network mrežnom modelu. Protok spoljašnjeg vazduha se kontroliše u zavisnosti od protoka kroz prozore osnovnog sloja DVF.

Kako bi se ova kontrolna strategija i ostvarila u modelu 5.1 EnergyPlus-a, napisan je programski kod u "Energy Management System"-u (EMS) putem jezika "EnergyPlus Runtime Language" (ERL) [6, 7] (slika 5.5). Na ovaj način, prethodno definisana, količina svežeg vazduha po korisniku od 30,6 m³/h (po zoni: 612 m³/h = 0,1777 m³/s, ASHARE standard 62.1-2013), zadovoljena je zbirom količine vazduha ostvarene prirodnim provetravanjem i količine dobijene iz klima komore KGH sistema. Vrednosti "discharge coefficient", faktora visine i širine, mogu se pronaći u tabeli 4.3.



```
15349 !- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: ENERGYMANAGEMENTSYSTEM:SUBROUTINE =====
15350
15351 EnergyManagementSystem:Subroutine,
15352     1S_SP_ulaz,                !- Name
15353     IF (6*V_1S_N_3>=0)&&(6*V_1S_N_3<0.0118), !- Program Line 1
15354     SET 1S_R_of_OA = 0.1732, !- Program Line 2
15355     ELSEIF (6*V_1S_N_3>=0.0118)&&(6*V_1S_N_3<0.0236), !- A4
15356     SET 1S_R_of_OA = 0.1617, !- A5
15357     ELSEIF (6*V_1S_N_3>=0.0236)&&(6*V_1S_N_3<0.0354), !- A6
15358     SET 1S_R_of_OA = 0.1501, !- A7
15359     ELSEIF (6*V_1S_N_3>=0.0354)&&(6*V_1S_N_3<0.0472), !- A8
15360     SET 1S_R_of_OA = 0.1386, !- A9
15361     ELSEIF (6*V_1S_N_3>=0.0472)&&(6*V_1S_N_3<0.0590), !- A10
15362     SET 1S_R_of_OA = 0.1270, !- A11
15363     ELSEIF (6*V_1S_N_3>=0.0590)&&(6*V_1S_N_3<0.0708), !- A12
15364     SET 1S_R_of_OA = 0.1155, !- A13
15365     ELSEIF (6*V_1S_N_3>=0.0708)&&(6*V_1S_N_3<0.0826), !- A14
15366     SET 1S_R_of_OA = 0.1039, !- A15
15367     ELSEIF (6*V_1S_N_3>=0.0826)&&(6*V_1S_N_3<0.0944), !- A16
15368     SET 1S_R_of_OA = 0.0924, !- A17
15369     ELSEIF (6*V_1S_N_3>=0.0944)&&(6*V_1S_N_3<0.1062), !- A18
15370     SET 1S_R_of_OA = 0.0808, !- A19
15371     ELSEIF (6*V_1S_N_3>=0.1062)&&(6*V_1S_N_3<0.1180), !- A20
15372     SET 1S_R_of_OA = 0.0693, !- A21
15373     ELSEIF (6*V_1S_N_3>=0.1180)&&(6*V_1S_N_3<0.1298), !- A22
15374     SET 1S_R_of_OA = 0.0577, !- A23
15375     ELSEIF (6*V_1S_N_3>=0.1298)&&(6*V_1S_N_3<0.1416), !- A24
15376     SET 1S_R_of_OA = 0.0462, !- A25
15377     ELSEIF (6*V_1S_N_3>=0.1416)&&(6*V_1S_N_3<0.1534), !- A26
15378     SET 1S_R_of_OA = 0.0346, !- A27
15379     ELSEIF (6*V_1S_N_3>=0.1534)&&(6*V_1S_N_3<0.1652), !- A28
15380     SET 1S_R_of_OA = 0.0231, !- A29
15381     ELSEIF (6*V_1S_N_3>=0.1652)&&(6*V_1S_N_3<0.1777), !- A30
15382     SET 1S_R_of_OA = 0.0115, !- A31
15383     ELSEIF (6*V_1S_N_3>=0.1777), !- A32
15384     SET 1S_R_of_OA = 0, !- A33
15385     ENDIF; !- A34
15386
15387 EnergyManagementSystem:Subroutine,
15388     2S_SP_ulaz,                !- Name
```

Slika 5.5: Deo koda napisanog u "EnergyPlus Runtime Language" koji vrši kontrolu protoka provetravanja prve zone modela 5.1

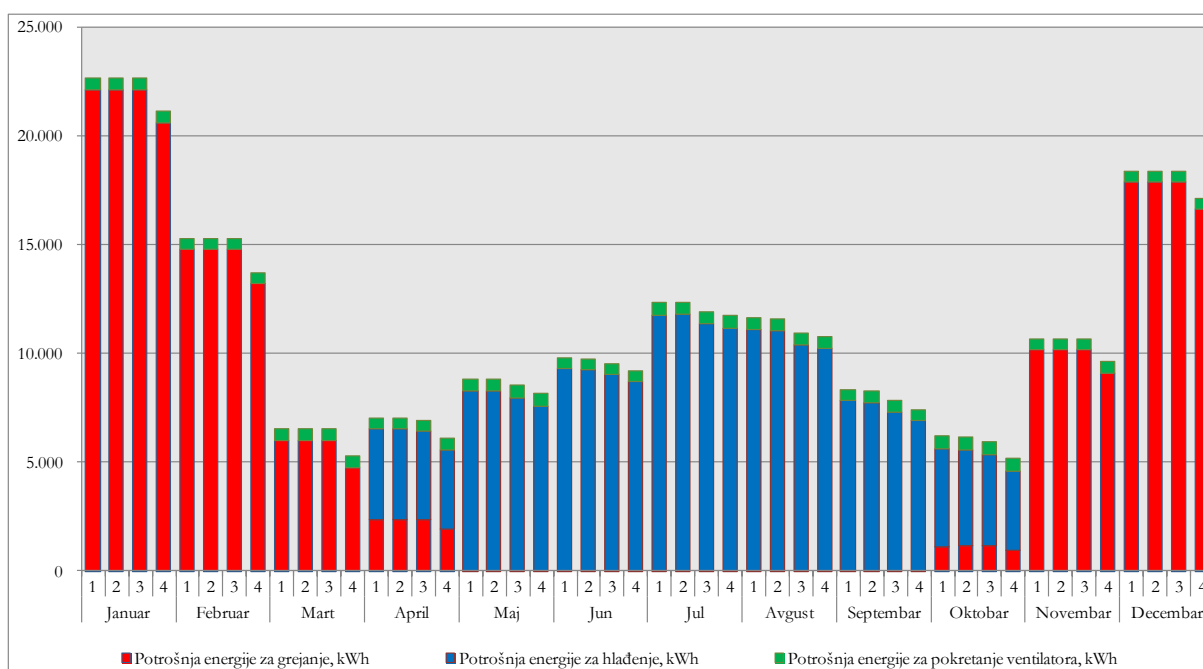
5.2 REZULTATI SIMULACIJA PREDLOŽENIH MODELA

Ciljevi analize rezultata simulacije predloženih modela su sledeći:

1. da se utvrdi kakva je razlika (energetski gledano) između modela objekta sa tradicionalnom fasadom (modeli 1, 2 i 3) i postojećeg stanja i korišćenja objekta sa DVF (model 4);
2. da se utvrdi kakve se uštede mogu očekivati u toku zimske sezone, ako se na postojeći model objekta ugrade regulacione klapne (razlika između modela 4.1 i 4);
3. da se utvrdi kakve se uštede mogu ostvariti u zimskom periodu, primenom zimske sezone strategije (razlika između modela 4.1 i 5);
4. da se utvrdi kakve se uštede mogu ostvariti u letnjem periodu, primenom letnje sezone strategije (razlika između modela 4.1 i 5.1);
5. da se utvrdi razlike (energetski gledano) između modela 1, 2, 3, 4, 4.1 i 5.+5.1 na godišnjem nivou, na osnovu čega se može doneti konačan zaključak o opravdanosti primene koncepta DVF u okviru umereno kontinentalnog klimatskog područja.

5.2.1 REZULTATI ANALIZE POREĐENJA MODELA OBJEKTA SA TRADICIONALNOM FASADOM I MODELA OBJEKTA SA DVF – POSTOJEĆE STANJE

Slika 5.6, prikazuje potrošnju energije po mesecima za grejanje, hlađenje i pokretanje ventilatora klima komore za slučajeve dobijenih rezultata izvedenih simulacija modela 1, 2, 3 i 4, odnosno odnos potrošnje između modela sa tradicionalnom fasadom i sadašnjeg stanja objekta sa DVF.

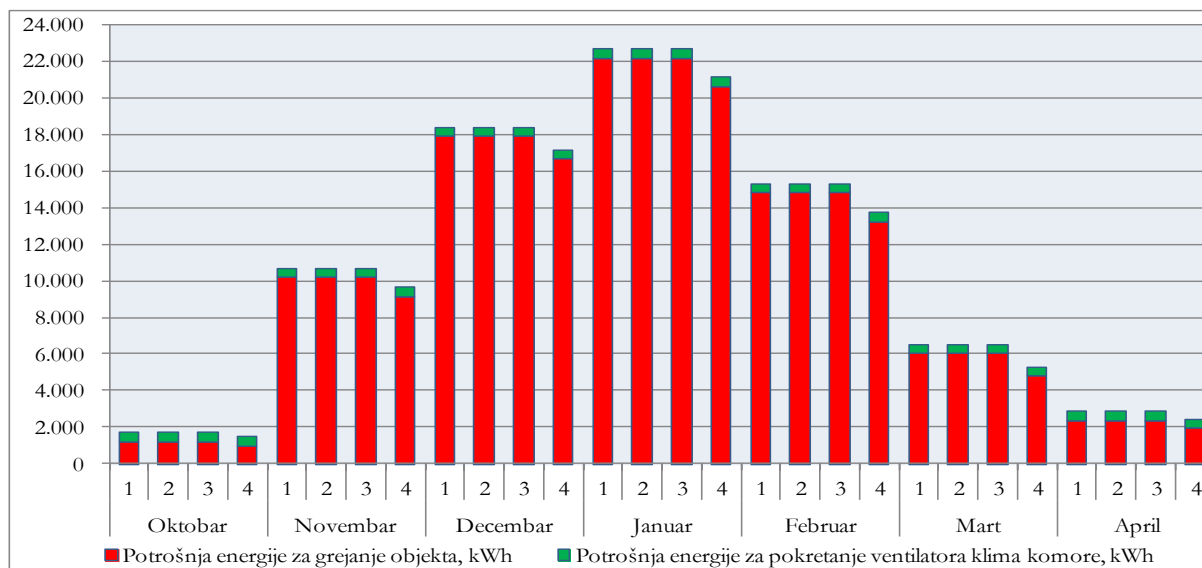


Slika 5.6: Komparativna analiza mesečnih potrošnja energije modela 1, 2, 3 i 4

Primećuje se da, kada je grejanje u pitanju, modeli sa tradicionalnom fasadom imaju iste vrednosti potrošnje energije, što je posledica istih kontrolnih strategija regulacije venecijanera i brisoleja. Strategija predviđa da je zaštita od sunčevog zračenja uvek podignuta za vreme grejne sezone, kako bi se apsorbiralo što više dobitaka toplote od Sunca.

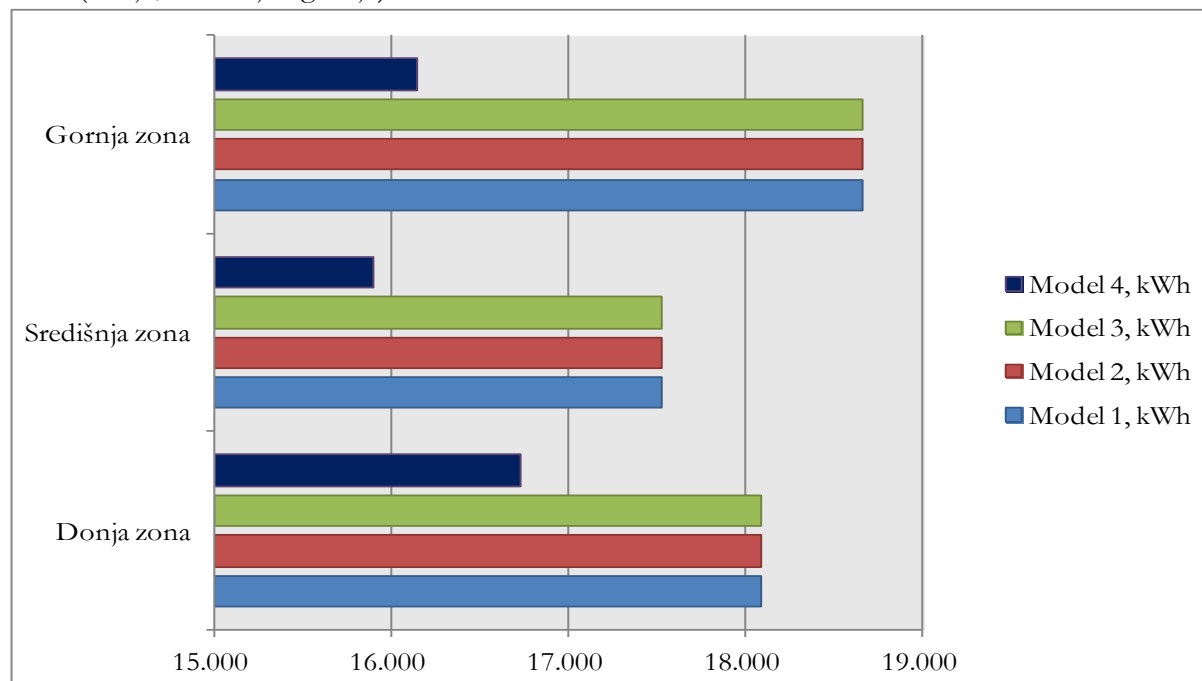
5. PREDLOZI I OCENA SEZONSKIH OPERATIVNIH I KONTROLNIH STRATEGIJA - OPRAVDANOST PRIMENE KONCEPTA DVF

Slika 5.7, prikazuje potrošnju energije za grejanje za gore navedene modele. U grejnoj sezoni, primećuje se pozitivan uticaj prisustva DVF, koji u svakom mesecu smanjuje potrošnju toplotne energije. Ovo je, pre svega, posledica novonastale "bafer" zone u međuprostoru fasade, koja doprinosi povećanju indirektnih dobitaka toplote. Takođe, zbog dodatne zaštite od dejstva vetra u slučaju modela 4, smanjeni su i gubici toplote usled infiltracije. Što se tiče potrošnje energije za pokretanje ventilatora klima komore, vrednosti su konstantne za sve modele, pošto su zahtevi za svežim vazduhom isti u svim slučajevima.



Slika 5.7: Komparativna analiza potrošnje energije za grejanje modela 1, 2, 3 i 4

Uočljivo je, da je potrošnja energije u svim mesecima grejne sezone niža u slučaju postojećeg modela objekta sa DVF. Da bi se potvrdila prisutnost vertikalnog gradijenta u DVF, na slici 5.8, prikazane su potrošnje energije dobijene simulacijom modela 4, za tri eksperimentalno analizirane zone (donja, središnja i gornja).



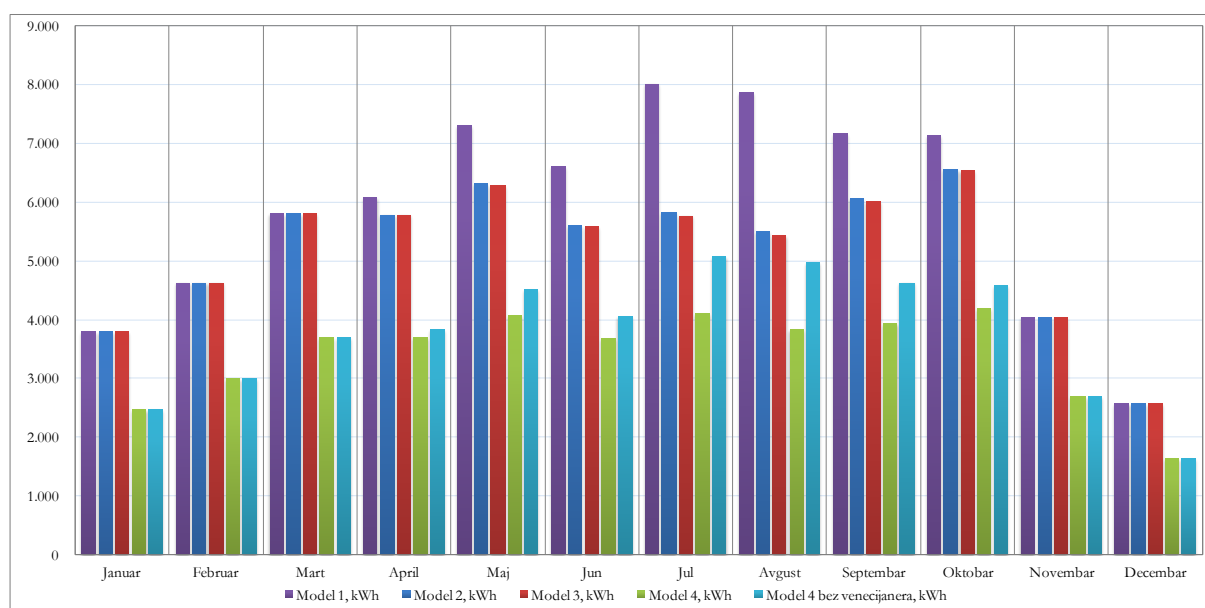
Slika 5.8: Komparativna analiza potrošnje energije za grejanje, za tri eksperimentalno analizirane zone (modeli 1, 2, 3 i 4)

5. PREDLOZI I OCENA SEZONSKIH OPERATIVNIH I KONTROLNIH STRATEGIJA - OPRAVDANOST PRIMENE KONCEPTA DVF

Primećuje se, da je najviša potrošnja energije u donjoj zoni, pošto je ona i pod najvećim uticajem hladnog spoljašnjeg vazduha. Kako se pomeramo naviše, potrošnja energije se snižava, dok za gornju zonu imamo malo povećanje potrošnje, koje je nastalo zbog uticaja ravnog krova. Pod tim se misli na povećanu površinu pregrada, koje su u direktnom kontaktu sa spoljašnjim vazduhom.

Posmatrajući letnji i prelazni period na slici 5.6, može se primetiti da sadašnje stanje objekta sa DVF ima manju potrošnju energije za hlađenje nego svi modeli objekta sa tradicionalnom fasadom. Što se tiče ovih modela, potrošnja energije opada od modela 1 prema modelu 3, što potvrđuje zaključak, da u slučaju primene tradicionalne fasade najbolja pozicija venecijanera je spolja (brisoleji).

Glavni razlog smanjenja potrošnje energije u toku letnje sezone predstavlja bolja zaštita od sunčevog zračenja kod objekta sa DVF. Ovo se potvrđuje i na slici 5.9, gde je prikazana komparativna analiza prolaza sunčevog zračenja u klimatizovane zone objekta.

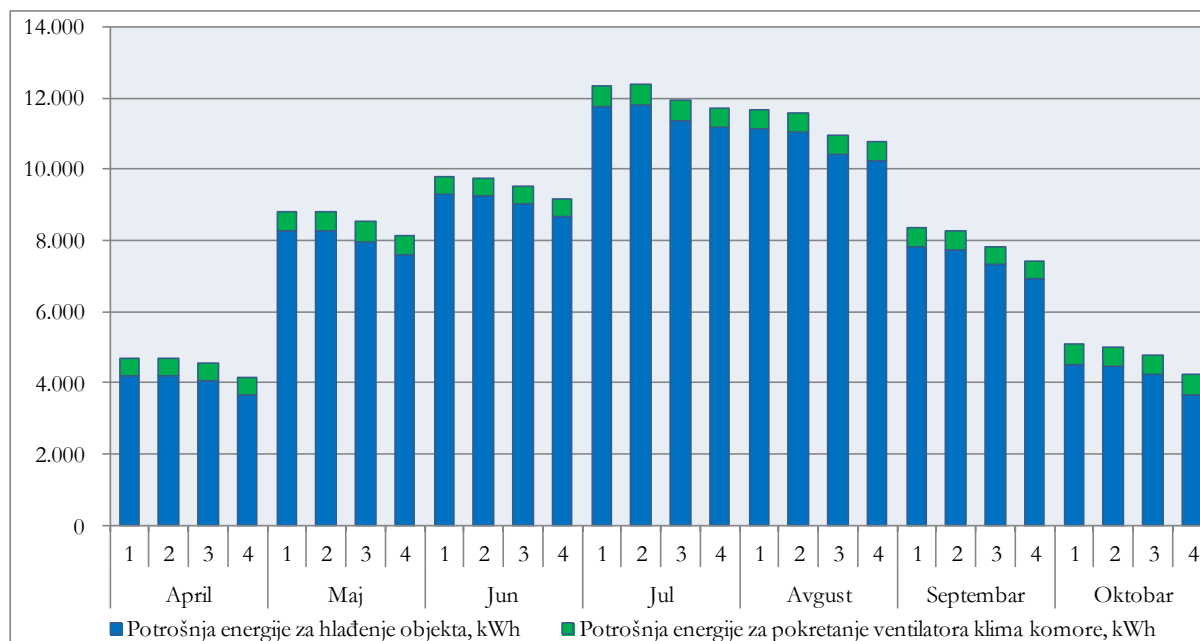


Slika 5.9: Komparativna analiza prolaza sunčevog zračenja u klimatizovane zone objekta

Očigledan je trend smanjenja prolaza sunčevog zračenja, čak i za slučaj DVF bez venecijanera u međuprostoru. Ovo u suštini predstavlja i glavni doprinos DVF u smanjenu toplotnih dobitaka. Naravno, prilikom implementacije mera zaštite, mora se obratiti pažnja i na deo koji se odnosi na snižavanje intenziteta dnevnog osvetljenja.

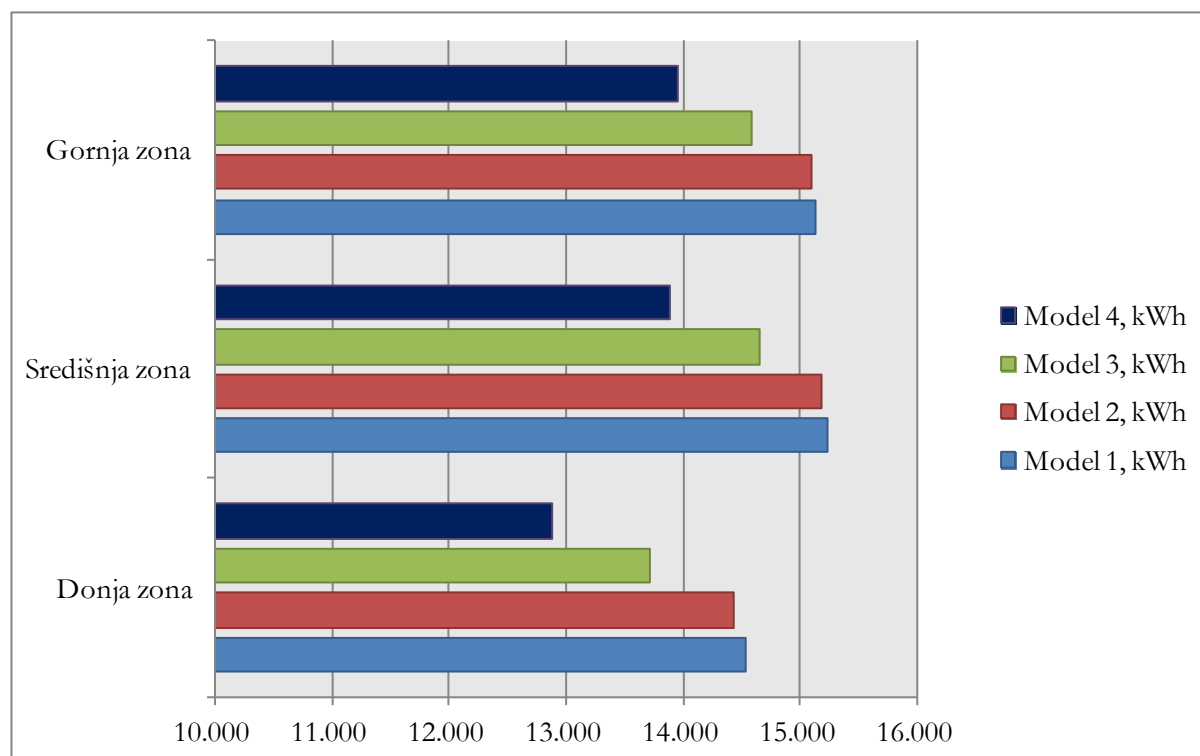
Slika 5.10, prikazuje potrošnju energije za hlađenje analiziranih modela. Što se tiče potrošnje energije za pokretanje ventilatora klima komore, vrednosti su konstantne za sve modele, pošto su zahtevi za svežim vazduhom u zonama isti. Slika 5.6, potvrđuje prethodno iznesene tvrdnje o boljoj efikasnosti postojećeg modela objekta sa DVF, u odnosu na modele sa tradicionalnom fasadom. Rezultati analize potvrdili su, da i u toku letnjih meseci (jul i avgust), vrednosti potrošnje energije za model 4 u odnosu na model 3, su i dalje niže. Razlog tome je, pre svega, severo-istočna orijentacija posmatrane fasade. Za drugačiju orijentaciju fasade ovi rezultati mogu biti i suprotni, što će potvrditi rezultati analize prikazane u nastavku. Takođe, treba napomenuti i da u slučaju modela sa DVF, otvorenost fasade igra značajnu ulogu u odvođenju indirektnih dobitaka toplote putem prirodnog provetravanja međuprostora. Ovaj uticaj, takođe, smanjuje potrebu za hlađenjem objekta.

5. PREDLOZI I OCENA SEZONSKIH OPERATIVNIH I KONTROLNIH STRATEGIJA -
OPRAVDANOST PRIMENE KONCEPTA DVF



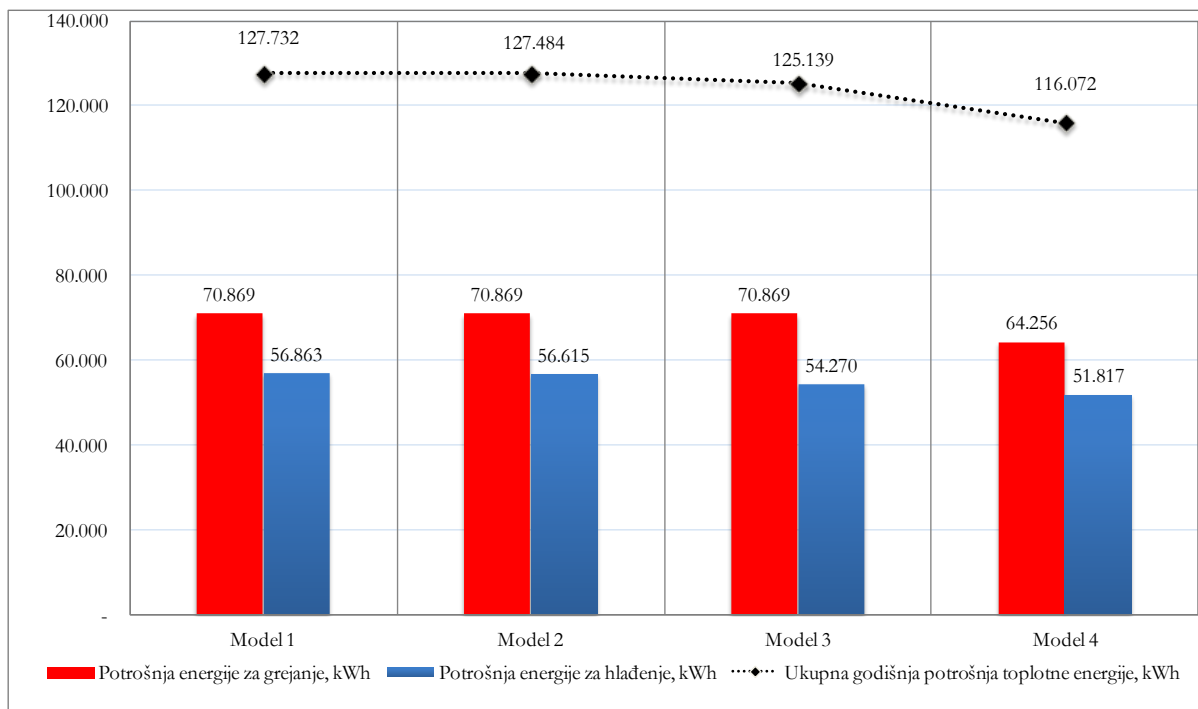
Slika 5.10: Komparativna analiza potrošnje energije za hlađenje modela 1, 2, 3 i 4

Glavni problem koji se javlja u toku letnje sezone, jeste prisustvo vertikalnog gradijenta koji negativno utiče i povećava potrošnju energije u gornjim zonama objekta. Potvrda ove tvrdnje, koja je i eksperimentalno dokazana, prikazana je na slici 5.11, gde se primećuje povećanje potrošnje energije za hlađenje, u višim zonama modela objekta sa DVF.



Slika 5.11: Komparativna analiza potrošnje energije za hlađenje, za tri eksperimentalno analizirane zone (modeli 1, 2, 3 i 4)

Posmatrajući analizirane modele i njihove godišnje potrošnje toplotne energije za grejanje i hlađenje, kao posledica gore navedenih rezultata, očigledan je trend smanjenja potrošnje, kako se ide od modela 1 prema modelu 4 (slika 5.12).



Slika 5.12: Komparativna analiza ukupne godišnje potrošnje toplotne energije (modeli 1, 2, 3 i 4)

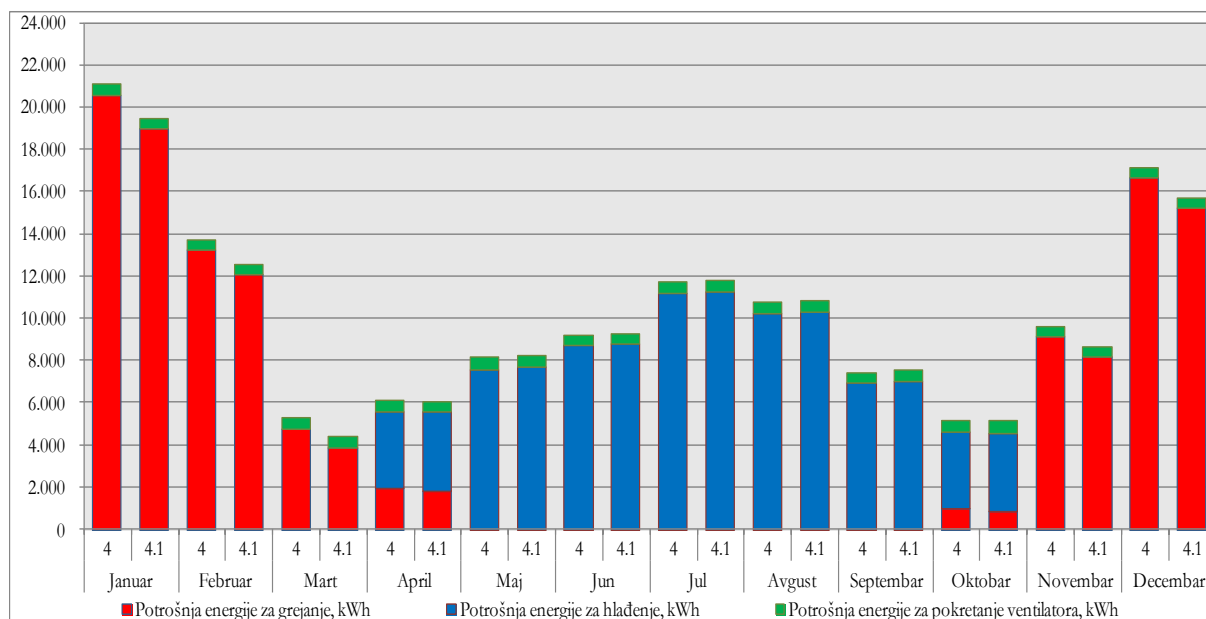
5.2.2 REZULTATI ANALIZE POREĐENJA SADAŠNJEG MODELA OBJEKTA SA DVF I MODELA SA DVF KOJI JE UNAPREĐEN POSTAVLJANJEM REGULACIONIH KLAPNI

Eksperimentalno dobijeni rezultati su potvrdili nedostatak sadašnjeg načina korišćenja DVF. Pod tim se podrazumeva nepostojanje regulacionih klapni na ulazu i izlazu DVF, čijim pravilnim upravljanjem u zimskim i prelaznim periodima bi se još više smanjili toplotni gubici objekta. Kako bi se ovaj efekat i kvantifikovao, model 4 je unapređen modelom 4.1 koji poseduje virtuelne regulacione klapne. Simulacioni režim modela 4.1 je tako podešen, da su virtuelne regulacione klapne spuštene u grejnom periodu od oktobra do aprila.

Na slici 5.13, prikazana je uporedna analiza potrošnje energije po mesecima za grejanje, hlađenje i pokretanje ventilatora klima komore modela 4 i modela 4.1.

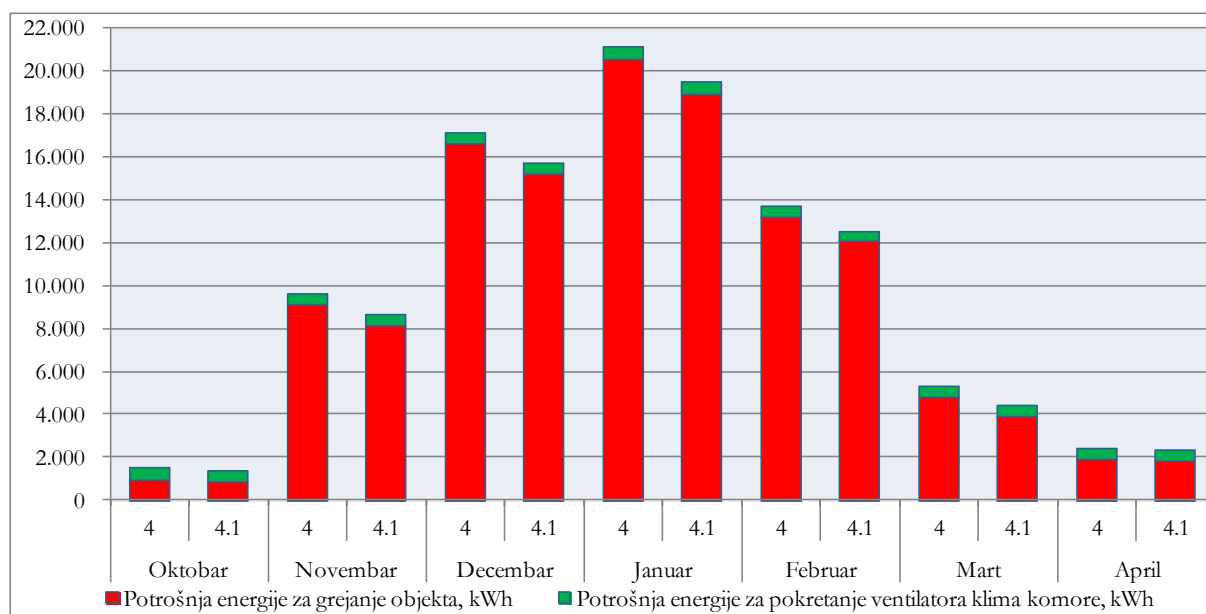
Na primeru potrošnje toplotne energije za grejanje, primećuje se značajna ušteda u potrošnji i smanjenu toplotnih gubitaka, primenom predložene mere zatvaranja međuprostora fasade. Međutim, primećuje se i minimalno povećana potrošnja energije za hlađenje u prelaznom periodu (april, oktobar), koja za posledicu ima grubu regulaciju klapni, odnosno međuprostor fasade je uvek zatvoren u toku grejne sezone. U vezi sa tim, kako bi se izbegla ova negativna posledica, potrebno je napraviti algoritam regulacije klapni, u zavisnosti od spoljašnje i od temperature u međuprostoru fasade. Takođe, treba obratiti pažnju i na uticaj vetra, odnosno, da se u grejnom režimu klapne zatvaraju ako su u pitanju visoke vrednosti brzina.

5. PREDLOZI I OCENA SEZONSKIH OPERATIVNIH I KONTROLNIH STRATEGIJA -
OPRAVDANOST PRIMENE KONCEPTA DVF



Slika 5.13: Komparativna analiza mesečnih potrošnji energije modela 4 i 4.1

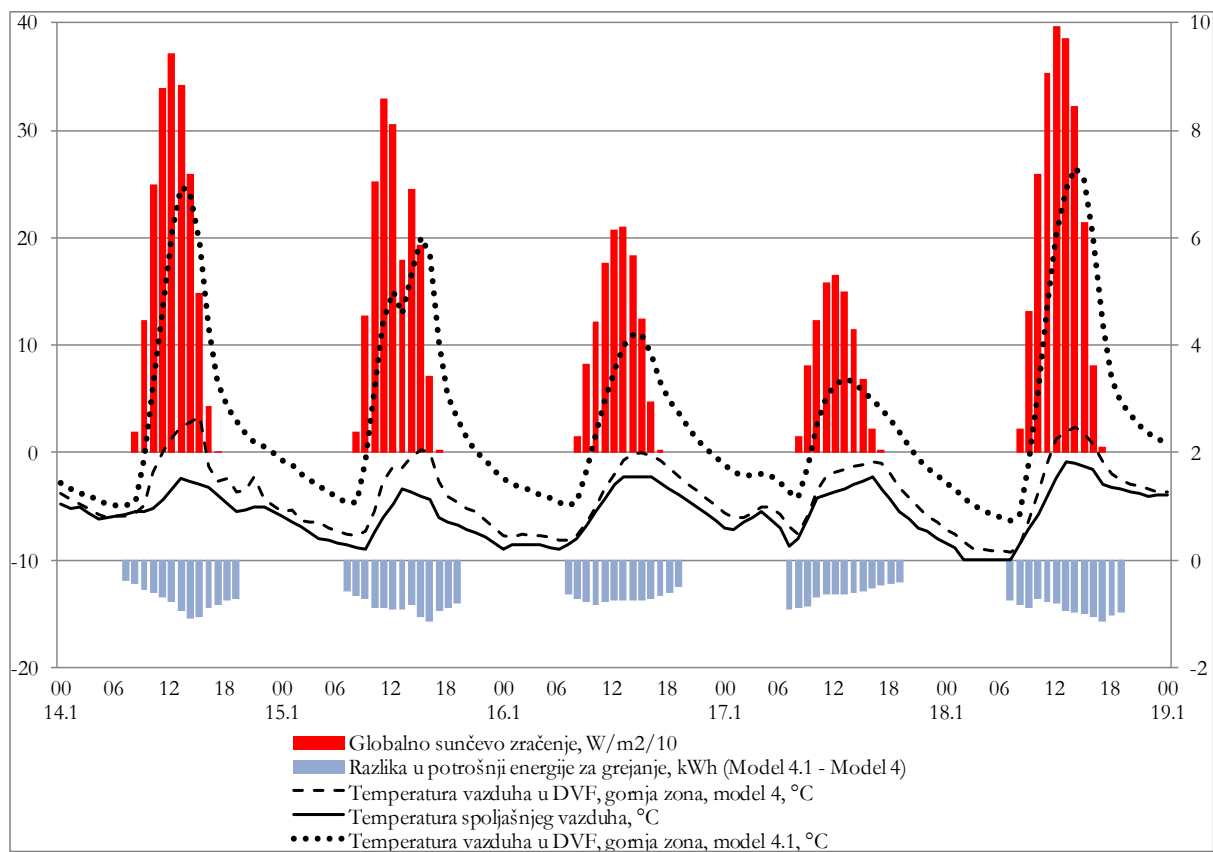
Slika 5.14, prikazuje izdvojenu uporednu potrošnju toplotne energije za grejanje za gore navedene modele. Što se tiče potrošnje energije za pokretanje ventilatora klima komore, vrednosti su konstantne za oba modela, pošto su zahtevi za svežim vazduhom isti u oba slučaja.



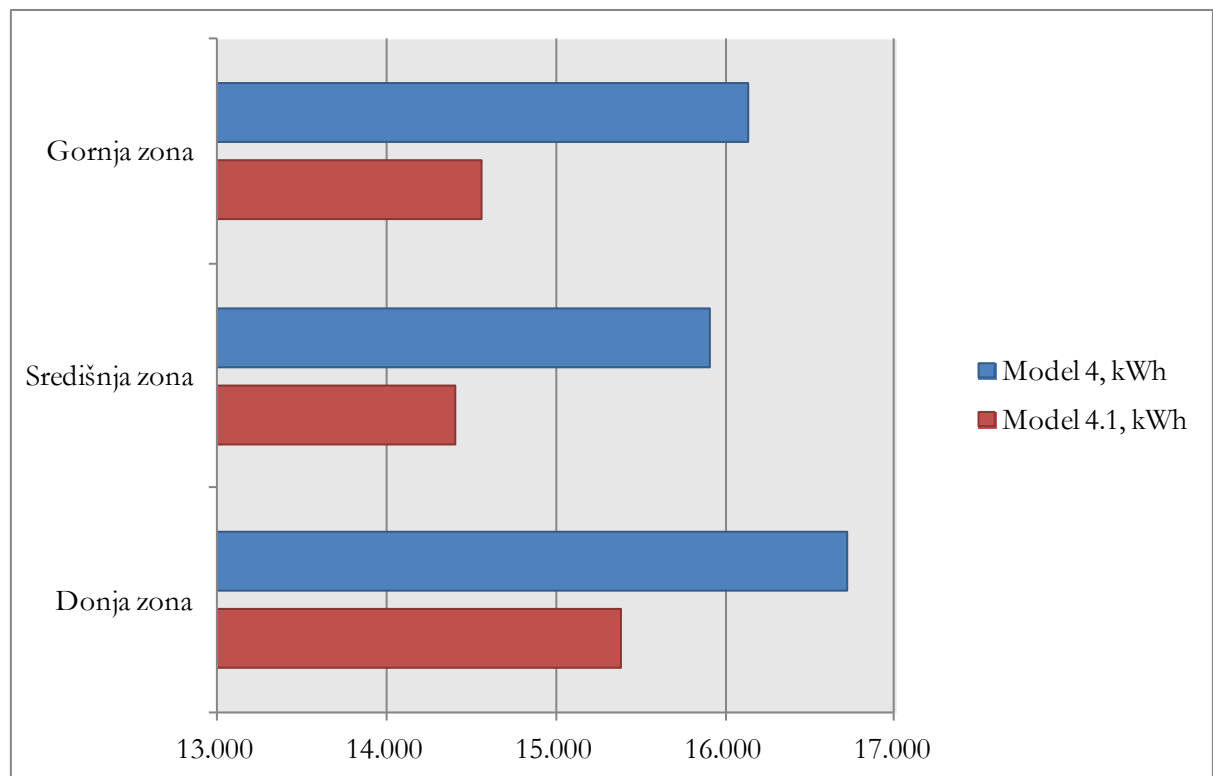
Slika 5.14: Komparativna analiza potrošnje energije za grejanje modela 4 i 4.1

Potrošnja toplotne energije za grejanje u svim mesecima je niža u slučaju novog modela objekta sa DVF. Ovo je posledica još intenzivnijeg "bafer" efekta u međuprostoru fasade, koji doprinosi povećanju indirektnih dobitaka toplote (slika 5.15). Na ovoj slici jasno se vide postignute uštede, na časovnom nivou u toku radnog režima objekta (7-19h), za izabrani zimski period (14-19.01.2014.). Takođe, zbog veće dodatne zaštite od dejstva vetra u slučaju modela 4.1, smanjeni su i gubici toplote usled infiltracije. Postojanje vertikalnog gradijenta u DVF, potvrđuje slika 5.16, gde su prikazane potrošnje energije dobijene simulacijom oba modela, za tri eksperimentalno analizirane zone (donja, središnja i gornja). Rezultati simulacije modela 4.1 pokazuju sličan trend potrošnje po izabranim zonama, kao i u slučaju prethodno analiziranog modela 4.

5. PREDLOZI I OCENA SEZONSKIH OPERATIVNIH I KONTROLNIH STRATEGIJA -
OPRAVDANOST PRIMENE KONCEPTA DVF



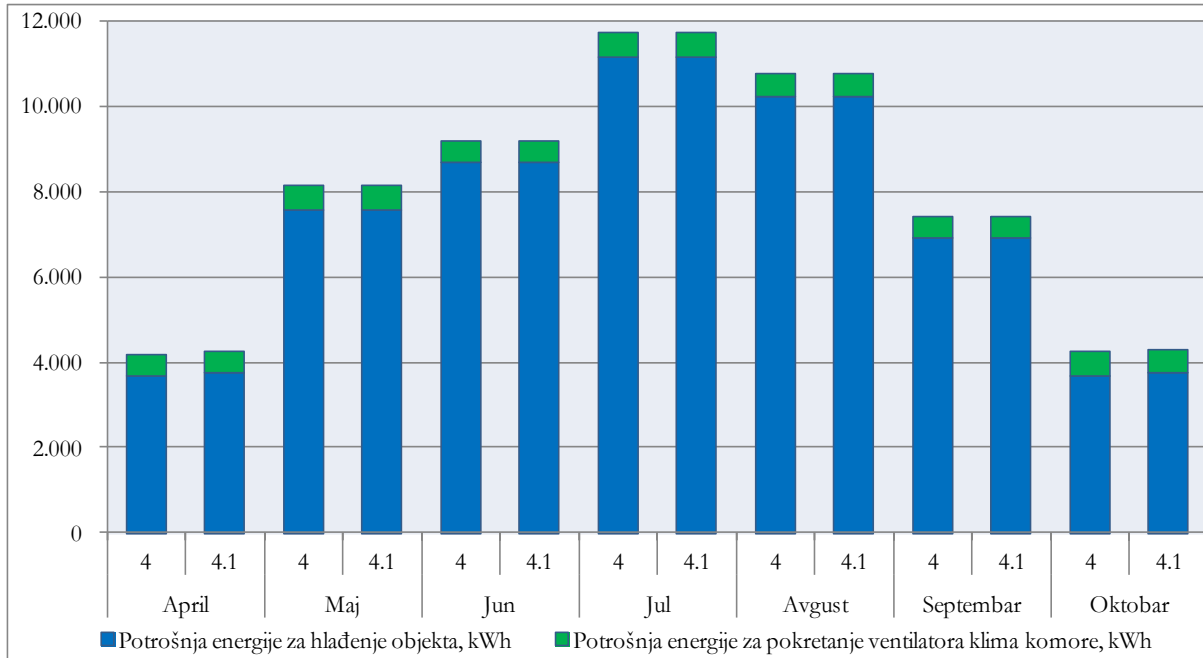
Slika 5.15: Časovna komparativna analiza potrošnje energije i razlika u temperaturama vazduha u DVF modela 4 i 4.1



Slika 5.16: Komparativna analiza potrošnje energije za grejanje, za tri eksperimentalno analizirane zone (model 4 i 4.1)

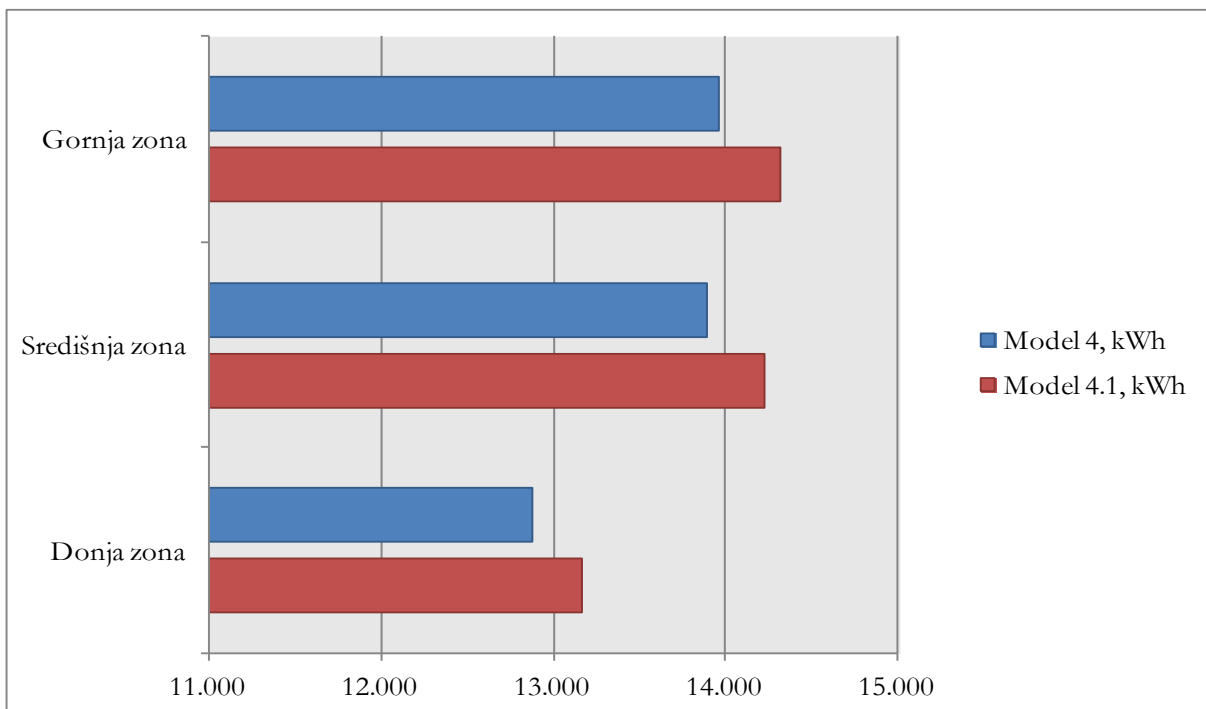
**5. PREDLOZI I OCENA SEZONSKIH OPERATIVNIH I KONTROLNIH STRATEGIJA -
OPRAVDANOST PRIMENE KONCEPTA DVF**

Na slici 5.17, prikazana je uporedna potrošnja toplotne energije za hlađenje analiziranih modela. Za letnji i prelazni period, navedena slika potvrđuje minimalno povećanu potrošnju toplotne energije za hlađenje, koja je nastala zbog grube regulacije klapni. Što se tiče potrošnje energije za pokretanje ventilatora klima komore, vrednosti su takođe konstantne za oba modela, pošto su u zonama isti zahtevi za svežim vazduhom.



Slika 5.17: Komparativna analiza potrošnje energije za hlađenje modela 4 i 4.1

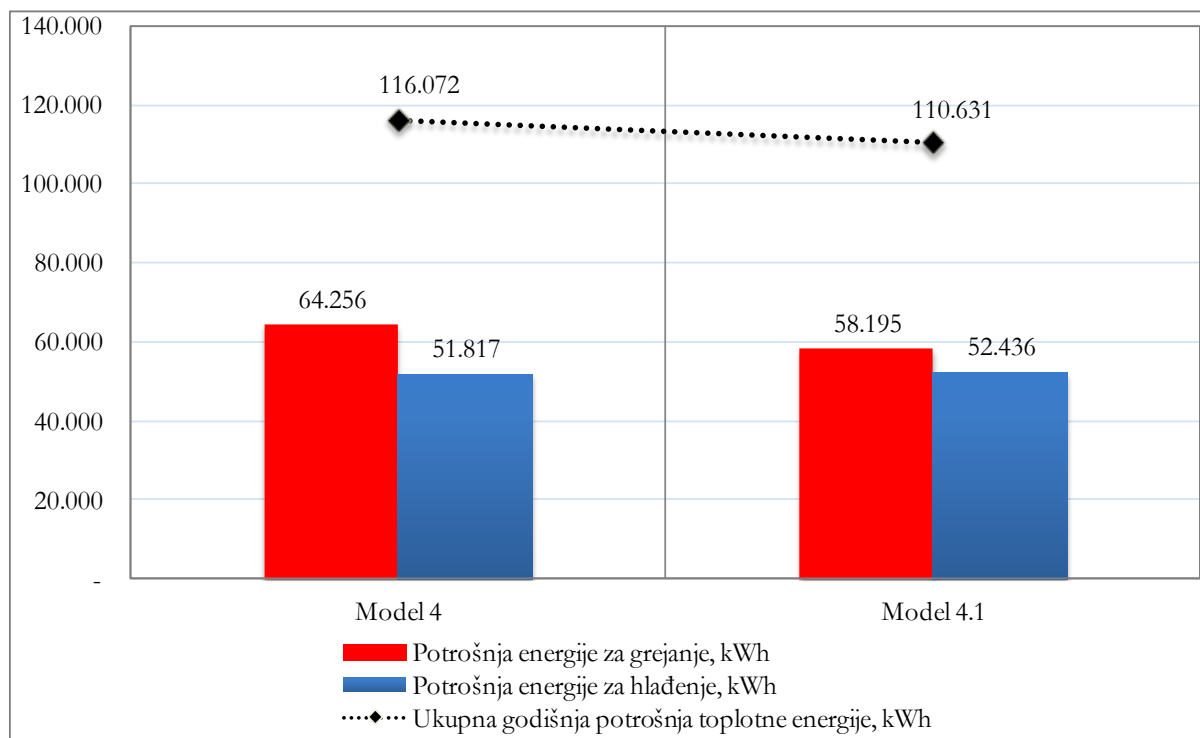
Efekat i prisustvo vertikalnog gradijenta u toku letnje sezone negativno utiče i povećava potrošnju energije u gornjim zonama objekta. Potvrda ovoga prikazana je na slici 5.18.



Slika 5.18: Komparativna analiza potrošnje energije za hlađenje, za tri eksperimentalno analizirane zone (model 4 i 4.1)

5. PREDLOZI I OCENA SEZONSKIH OPERATIVNIH I KONTROLNIH STRATEGIJA - OPRAVDANOST PRIMENE KONCEPTA DVF

Generalni zaključak pozitivnog efekta na smanjenje potrošnje toplotne energije predloženog modela 4.1, dat je kroz uporednu analizu ukupne godišnje potrošnje toplotne energije (slika 5.19). Kao dodatak treba navesti, da postavljanje regulacionih klapni ne podrazumeva visoka finansijska ulaganja. Kao ograničavajući faktori postavljanja regulacionih klapni, u praksi mogu se pojaviti zahtevi i norme koje se tiču protivpožarne zaštite objekta.



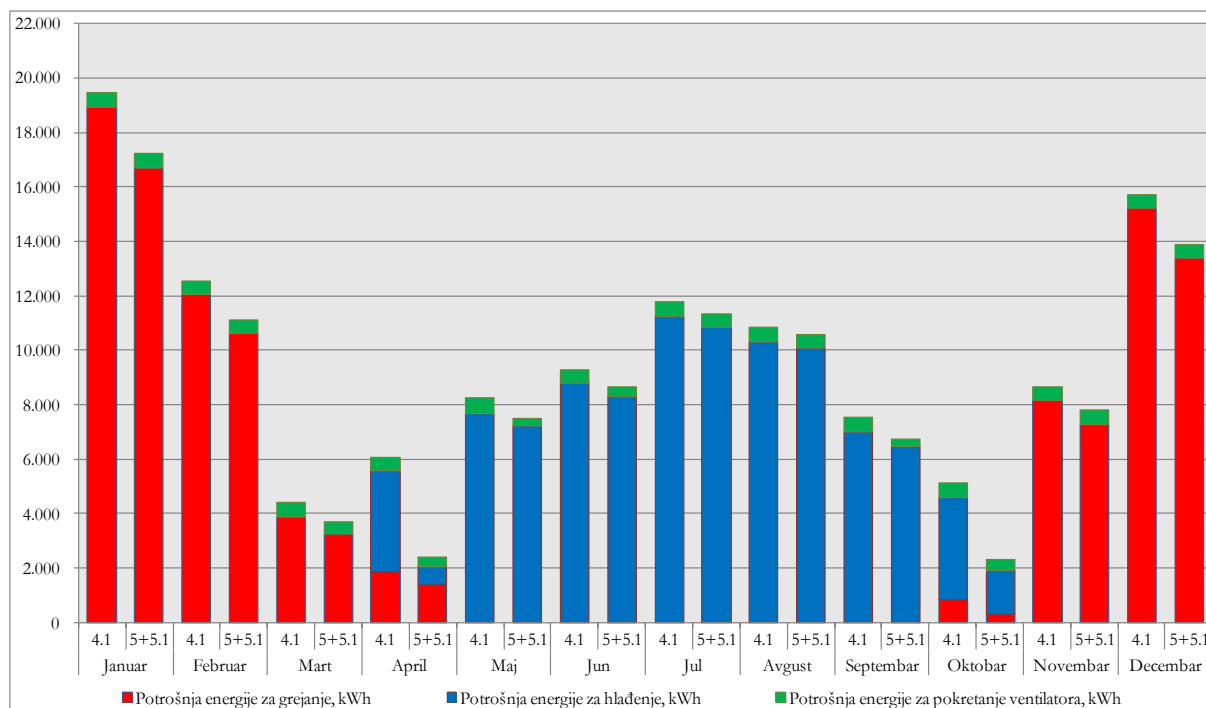
Slika 5.19: Komparativna analiza ukupne godišnje potrošnje toplotne energije (model 4 i 4.1)

5.2.3 REZULTATI ANALIZE POREĐENJA MODELA SA DVF KOJI JE UNAPREĐEN POSTAVLJANJEM REGULACIONIH KLAPNI I MODELA SA DVF KOJE IMAJU PRIMENJENE SEZONSKE OPERATIVNE STRATEGIJE

Kako bi se utvrdila i kvantifikovala primena predloženih sezonskih operativnih strategija, sprovedena je uporedna analiza unapređenog, postojećeg modela 4.1 i predloženog modela sa kontrolnim strategijama 5+5.1.

Slika 5.20, prikazuje uporednu analizu potrošnje toplotne energije po mesecima za grejanje, hlađenje i pokretanje ventilatora klima komore modela 4.1 i modela 5+5.1. U potpunosti se vide pozitivni efekti predloženih sezonskih operativnih strategija koji utiču na smanjenje potrošnje toplotne energije za grejanje i hlađenje, a u ovom slučaju i za pokretanje ventilatora klima komore (letnji i prelazni režim).

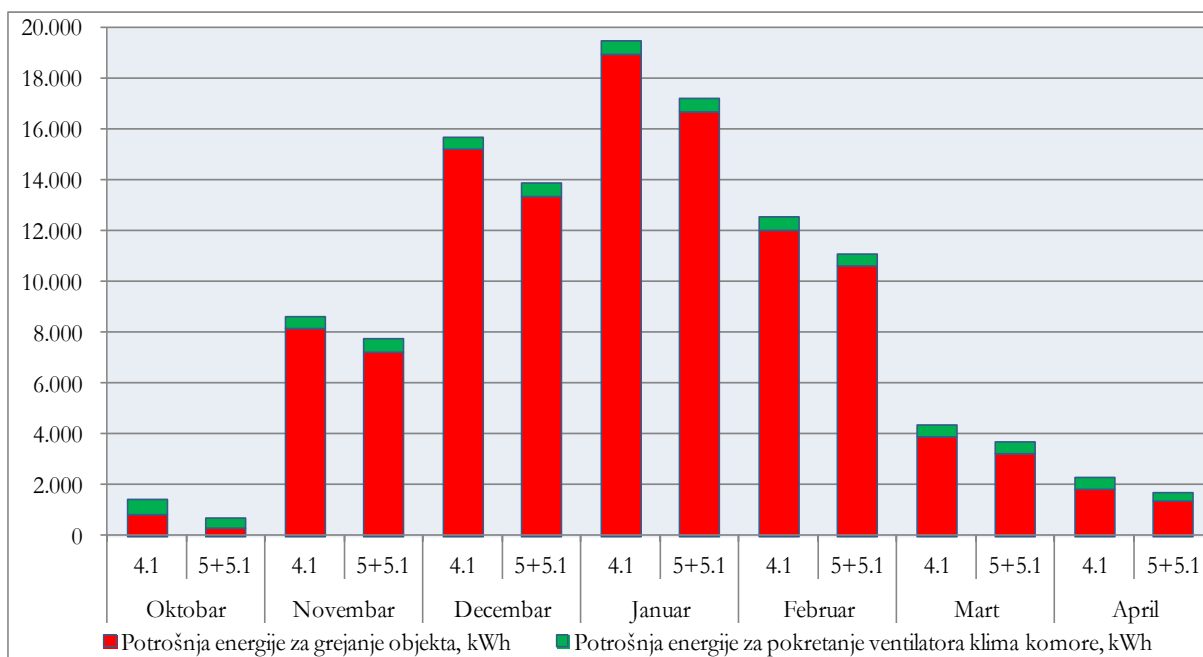
5. PREDLOZI I OCENA SEZONSKIH OPERATIVNIH I KONTROLNIH STRATEGIJA -
OPRAVDANOST PRIMENE KONCEPTA DVF



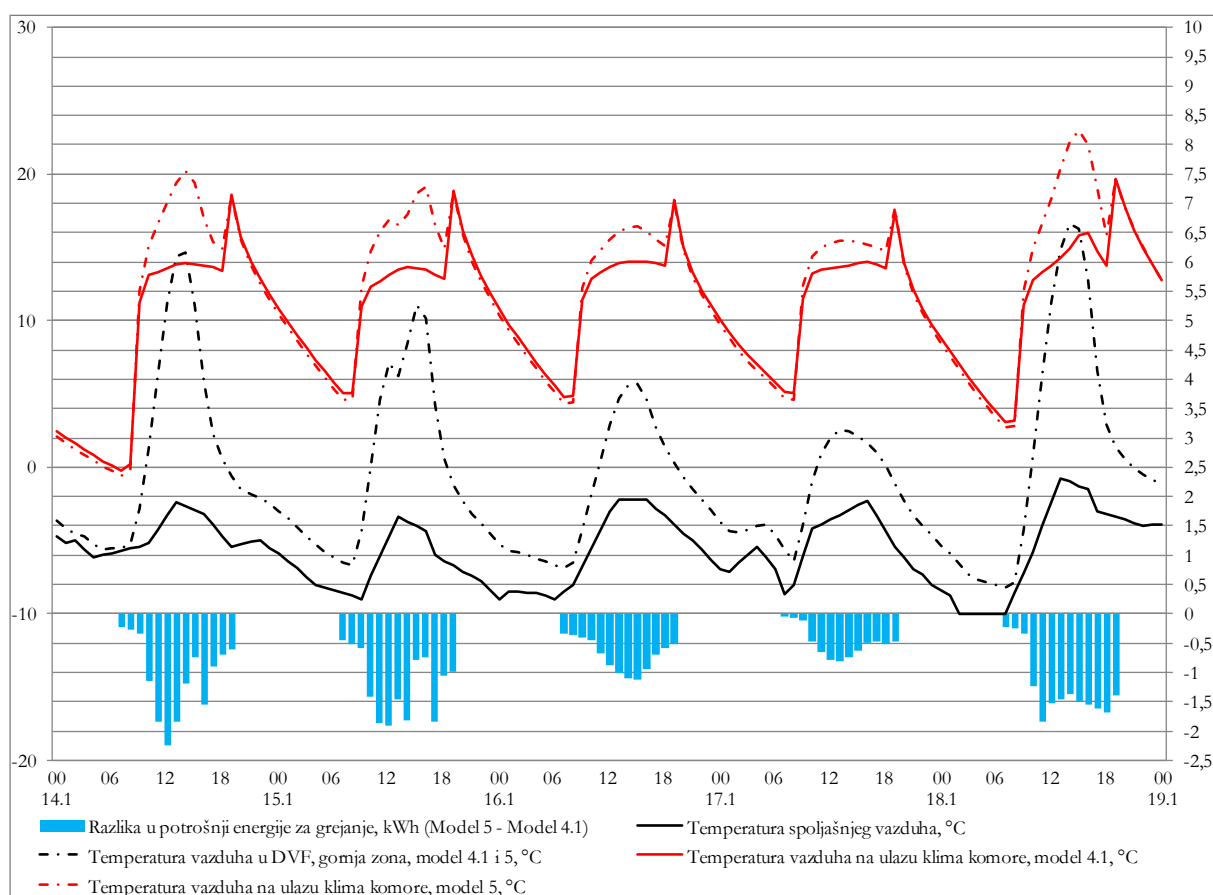
Slika 5.20: Komparativna analiza mesečnih potrošnji energije modela 4.1 i 5+5.1

Slika 5.21 prikazuje izdvojenu uporednu potrošnju toplotne energije za grejanje u gore navedenim modelima. Potrošnja toplotne energije za grejanje, u slučaju novog modela objekta sa DVF, je uvek niža. Razlog smanjenju potrošnje toplotne energije za grejanje u slučaju modela 5 je to, što je u ovom slučaju temperatura ulaznog vazduha u klima komoru uvek viša u odnosu na slučaj modela 4.1 (slika 5.22). To omogućuje virtuelno uspostavljena veza između klima komore i međuprostora fasade. Slika 5.22 prikazuje ostvarene uštede u potrošnji energije za grejanje, na časovnom nivou u toku radnog režima objekta (7-19h), za izabrani zimski period (14-19.012014.). Kao negativan efekat ovog povezivanja može se desiti, da budu povećani gubici toplote modela 5 nastali usled intenzivnijeg (više brzine strujanja vazduha u međuprostoru fasade) prelaza toplote na površini osnovnog sloja DVF, što je pojava koja ipak ne ugrožava ukupno smanjenje potrošnje energije za grejanje. Ovaj efekat nastaje zbog povećanog odvođenja toplote iz međuprostora fasade, koje je nastalo zbog gore pomenute veze i dejstva ventilatora klima komore. Što se tiče potrošnje energije za pokretanje ventilatora klima komore, vrednosti su konstantne u toku zimskog režima za oba modela, pošto su zahtevi za svežim vazduhom isti u oba slučaja.

5. PREDLOZI I OCENA SEZONSKIH OPERATIVNIH I KONTROLNIH STRATEGIJA -
OPRAVDANOST PRIMENE KONCEPTA DVF



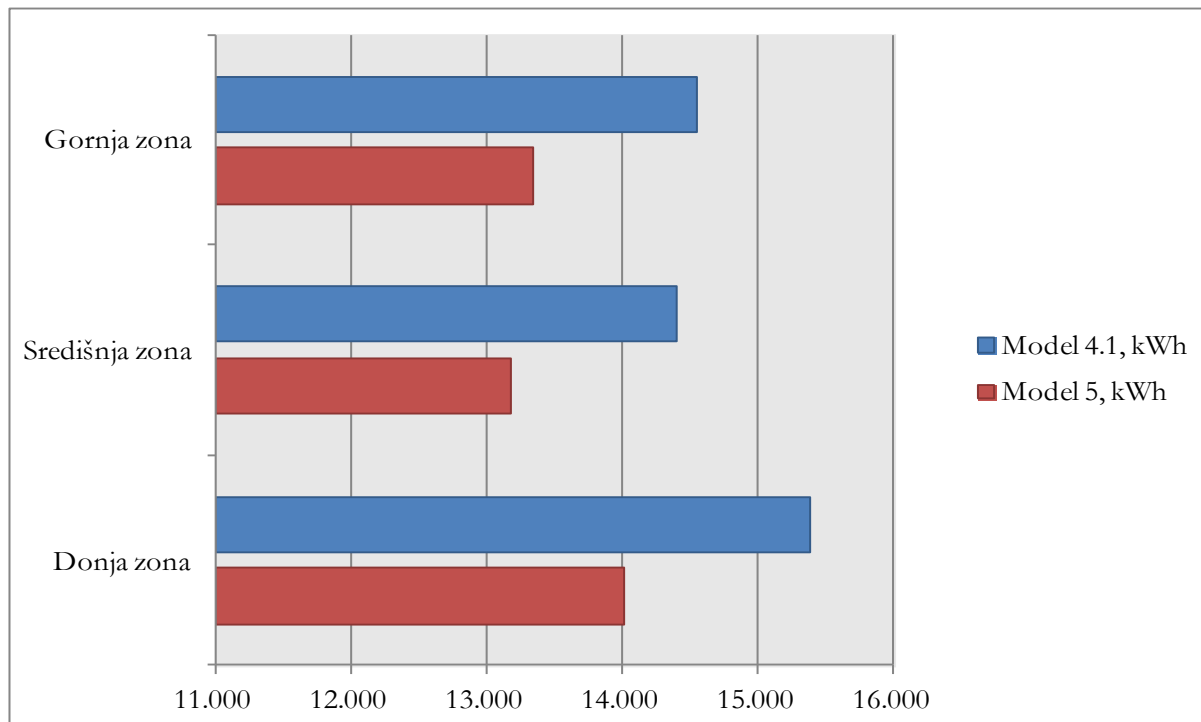
Slika 5.21: Komparativna analiza potrošnje energije za grejanje modela 4.1 i 5



Slika 5.22: Časovna komparativna analiza potrošnje energije, razlika u temperaturama vazduha u DVF i razlika u temperaturama vazduha na ulazu klima komore modela 4.1 i 5

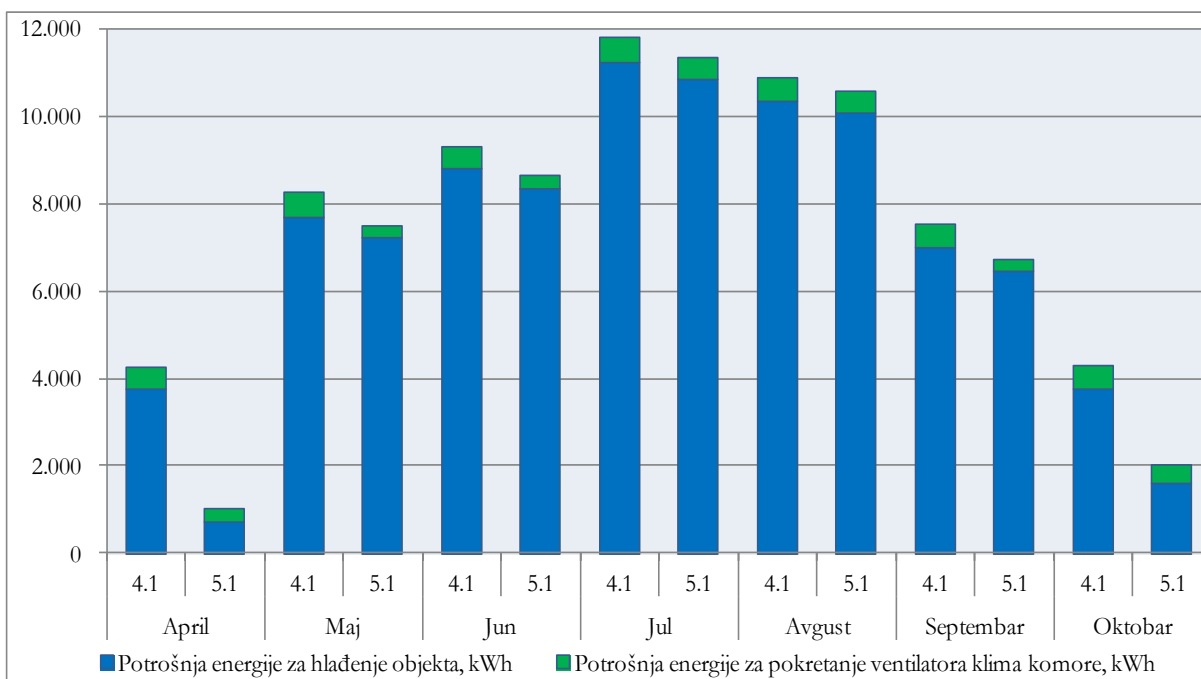
5. PREDLOZI I OCENA SEZONSKIH OPERATIVNIH I KONTROLNIH STRATEGIJA - OPRAVDANOST PRIMENE KONCEPTA DVF

Vertikalni termički gradijent u DVF modela 4.1 i 5 u toku grejne sezone za tri eksperimentalno analizirane zone (donja, središnja i gornja), prikazan je na slici 5.23. Rezultati simulacije ovih modela pokazuju sličan trend potrošnje po izabranim zonama, kao i u prethodnim slučajevima.



Slika 5.23: Komparativna analiza potrošnje energije za grejanje, za tri eksperimentalno analizirane zone (model 4.1 i 5)

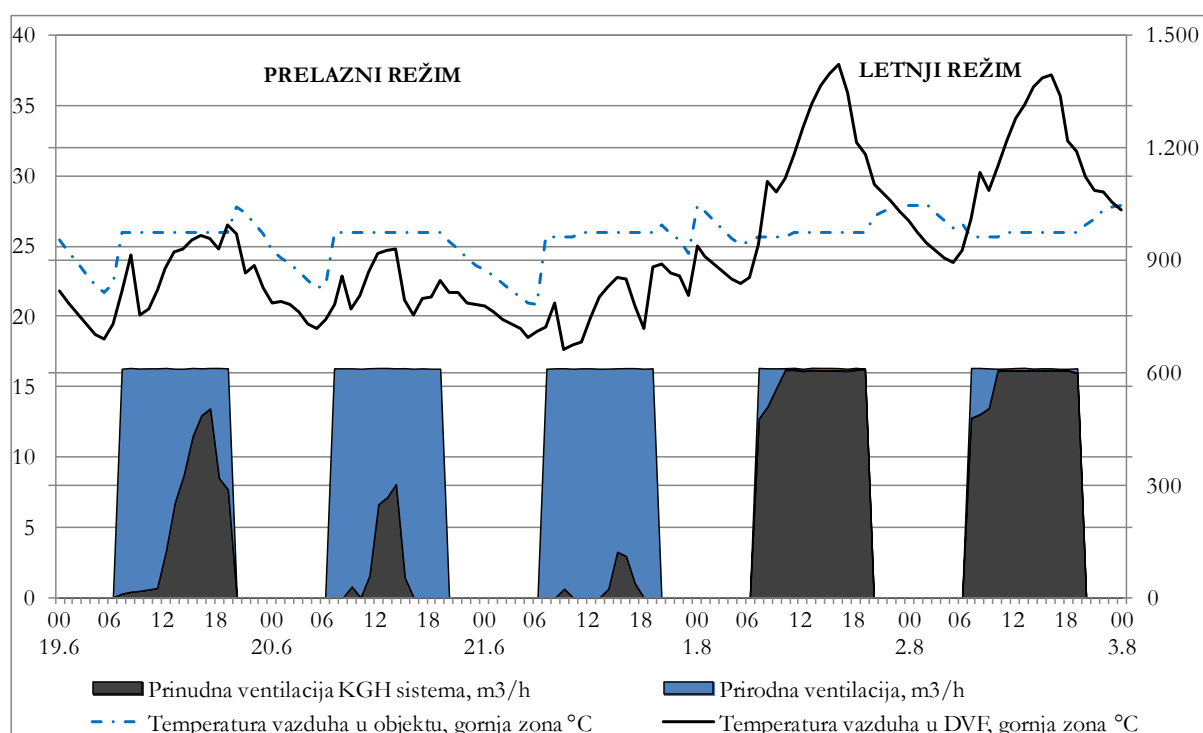
Na slici 5.24 prikazana je uporedna potrošnja toplotne energije za hlađenje analiziranih modela. Za letnji i prelazni period, navedena slika potvrđuje značajno smanjenje potrošnje toplotne energije za hlađenje, usled primenjene mere prirodne ventilacije. Ušteda je značajnije naglašena u prelaznom periodu, zbog umerenih spoljašnjih temperatura i intenziteta sunčevog zračenja.



Slika 5.24: Komparativna analiza potrošnje energije za hlađenje modela 4.1 i 5.1

5. PREDLOZI I OCENA SEZONSKIH OPERATIVNIH I KONTROLNIH STRATEGIJA - OPRAVDANOST PRIMENE KONCEPTA DVF

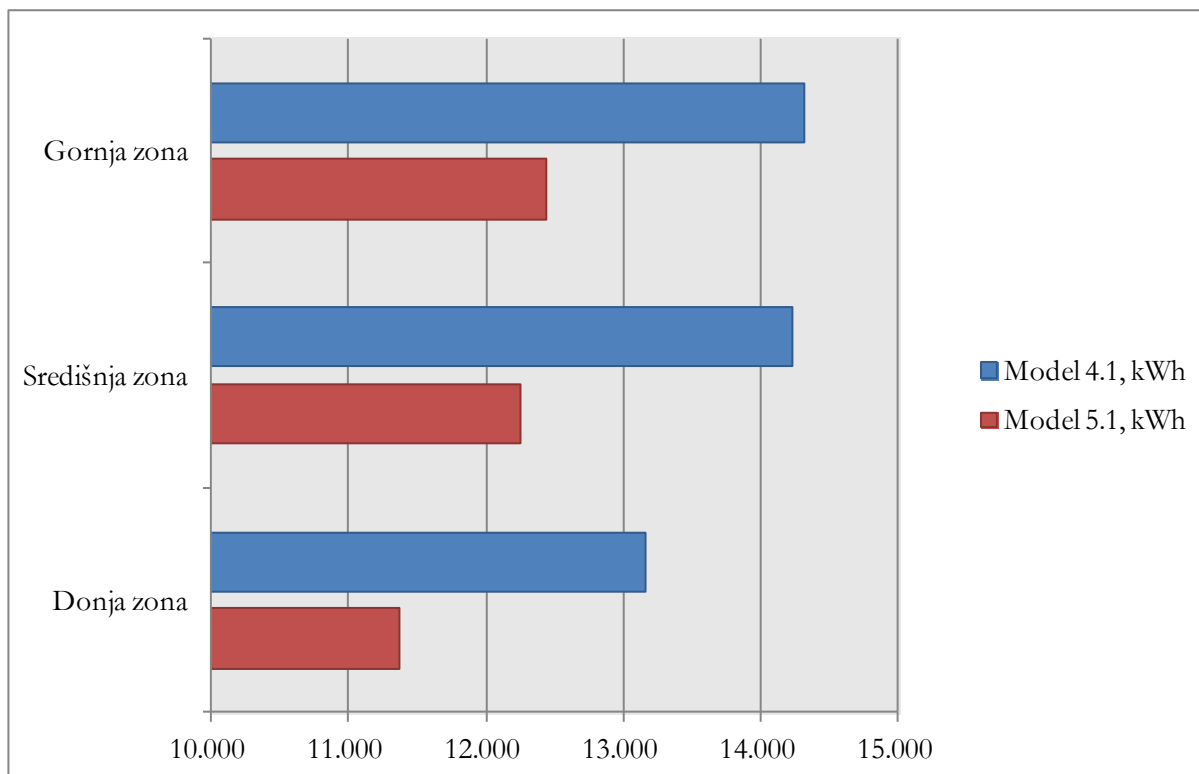
Smanjenje potrošnje toplotne energije za hlađenje je rezultat pothlađivanja vazduha u zonama, koje nastaje zbog efekta prirodnog provetravanja. Time se smanjuju toplotni dobici i doprema se određena količina svežeg vazduha. Usled ovog efekta, potrebna je i manja količina svežeg vazduha koja se obezbeđuje putem klima komore, što rezultuje i smanjenom potrošnjom energije za pokretanje ventilatora. Ovaj efekat je značajan u prelaznom periodu, dok je u letnjem manje izražen. Takođe, primena mere prirodnog provetravanja u toku vreljih letnjih dana nije ni moguća, zbog povišene temperature u međuprostoru fasade. Slika 5.25, prikazuje na časovnom nivou, udeo prirodnog provetravanja u ukupno potrebnoj količini svežeg vazduha za posmatranu zonu. Razdvojeni su periodi u prelaznom (19-22.06.2014.) i letnjem režimu (01-03.08.2014.), gde se jasno vidi značaj primenjene operativne strategije. Takođe, prikazane su i temperature vazduha u zoni i spolja. Što se tiče radnog režima objekta (7-19h) u toku letnjeg režima, prirodno provetravanje je ostvarivo samo u jutarnjim i noćim periodima i taj udeo je minimalan, kada se posmatra radni režim objekta. U toku prelaznog režima, udeo prirodnog provetravanja se drastično povećava.



Slika 5.25: Udeo prirodnog provetravanja na časovnom nivou za model 5.1

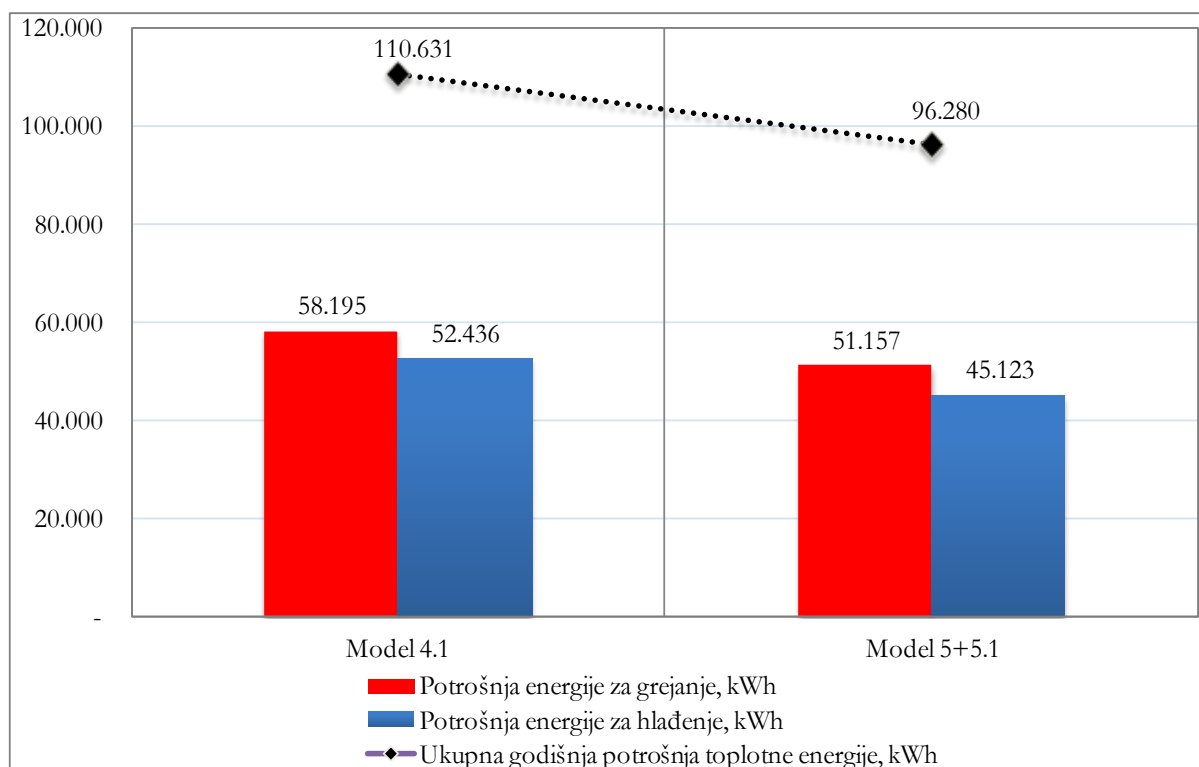
Slika 5.26, prikazuje prisustvo vertikalnog termičkog gradijenta u toku letnje sezone i evidentnu razliku u potrošnjama toplotne energije analiziranih modela 4.1 i 5.1. Trend porasta potrošnje je isti kao i u prethodnim slučajevima.

5. PREDLOZI I OCENA SEZONSKIH OPERATIVNIH I KONTROLNIH STRATEGIJA -
OPRAVDANOST PRIMENE KONCEPTA DVF



Slika 5.26: Komparativna analiza potrošnje energije za hlađenje, za tri eksperimentalno analizirane zone (model 4 i 4.1)

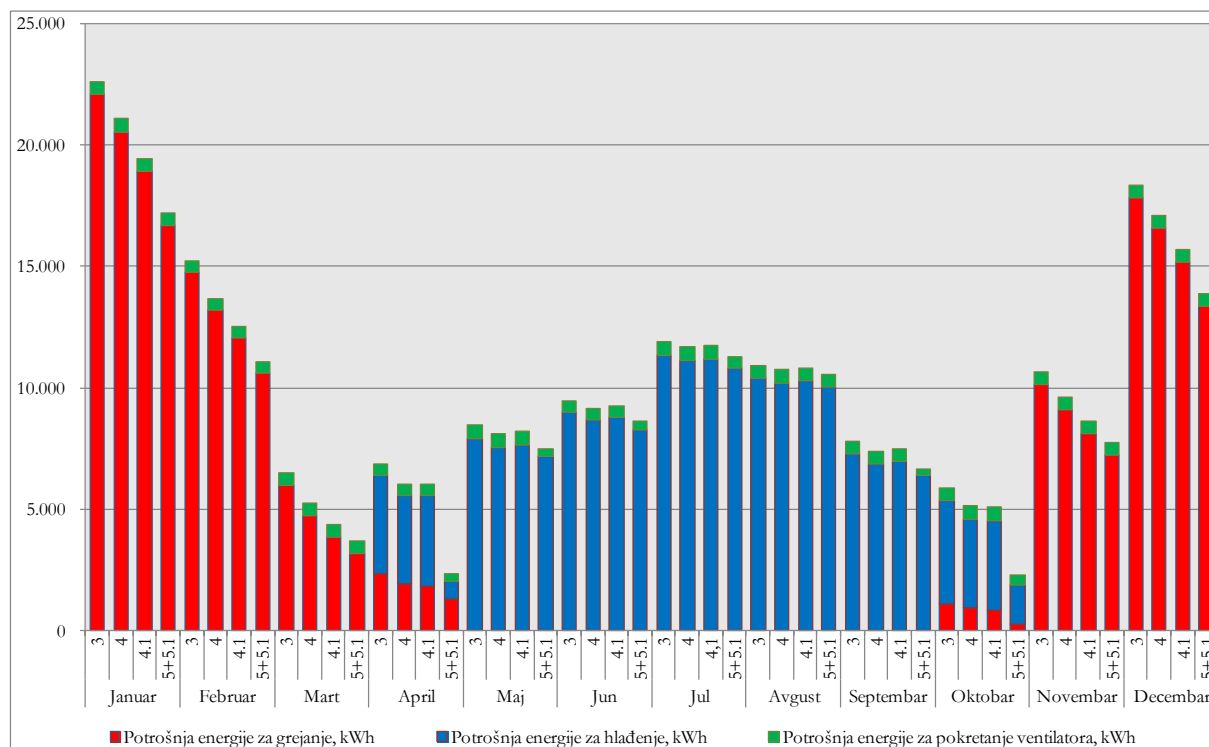
Generalni zaključak pozitivnog efekta na smanjenje potrošnje toplotne energije predloženog integralnog modela 5+5.1, dat je kroz uporednu analizu ukupne godišnje potrošnje toplotne energije sa modelom 4.1 (slika 5.27).



Slika 5.27: Komparativna analiza ukupne godišnje potrošnje toplotne energije (model 4.1 i 5+5.1)

5.2.4 REZULTATI ANALIZE POREĐENJA IZBRANIH MODELA SA TRADICIONALNOM FASADOM I MODELA SA DVF KOJE IMAJU PRIMENJE SEZONSKE OPERATIVNE STRATEGIJE

Kako bi se kvantifikovali učinci primene sezonskih operativnih strategija modela sa DVF i uporedili sa izabranim modelom sa tradicionalnom fasadom, na slici 5.28, prikazana je uporedna analiza mesečnih potrošnja toplotne energije za modele 3, 4, 4.1 i 5+5.1.



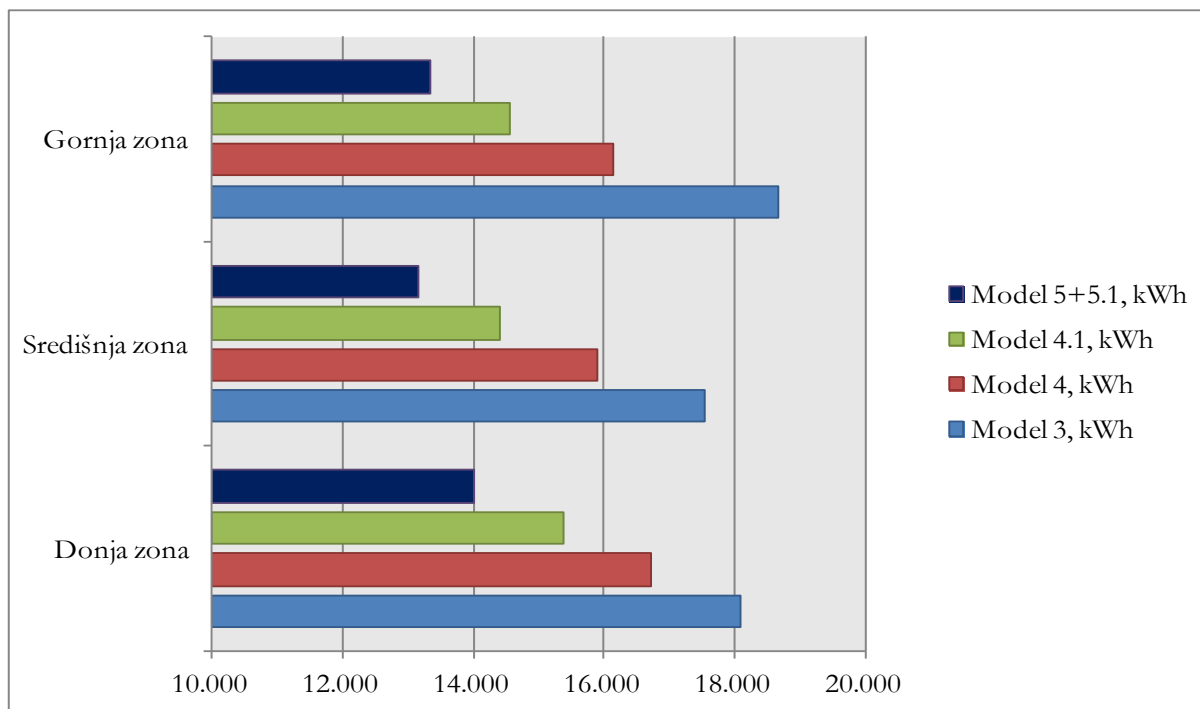
Slika 5.28: Komparativna analiza mesečnih potrošnja energije modela 3, 4, 4.1 i 5+5.1

Što se tiče grejne sezone, primetno je da sve primenjene operativne strategije daju očekivane efekte ušteda u potrošnji energije. Evidentno je, da u slučaju povezivanja međuprostora DVF i KGH sistema objekta, imamo i najveće uštede. Takođe, treba naglasiti da se i najjednostavnijom regulacijom otvorenosti DVF u toku grejne sezone, ostvaruju značajne uštede.

Kada je u pitanju letnji režim, primenjena operativna strategije prirodne ventilacije donosi očekivane uštede i u smanjenju potrošnje energije za hlađenje, kao i u potrošnji energije za pokretanje ventilatora klima komore, pošto se deo svežeg vazduha obezbeđuje prirodnim provetranjem.

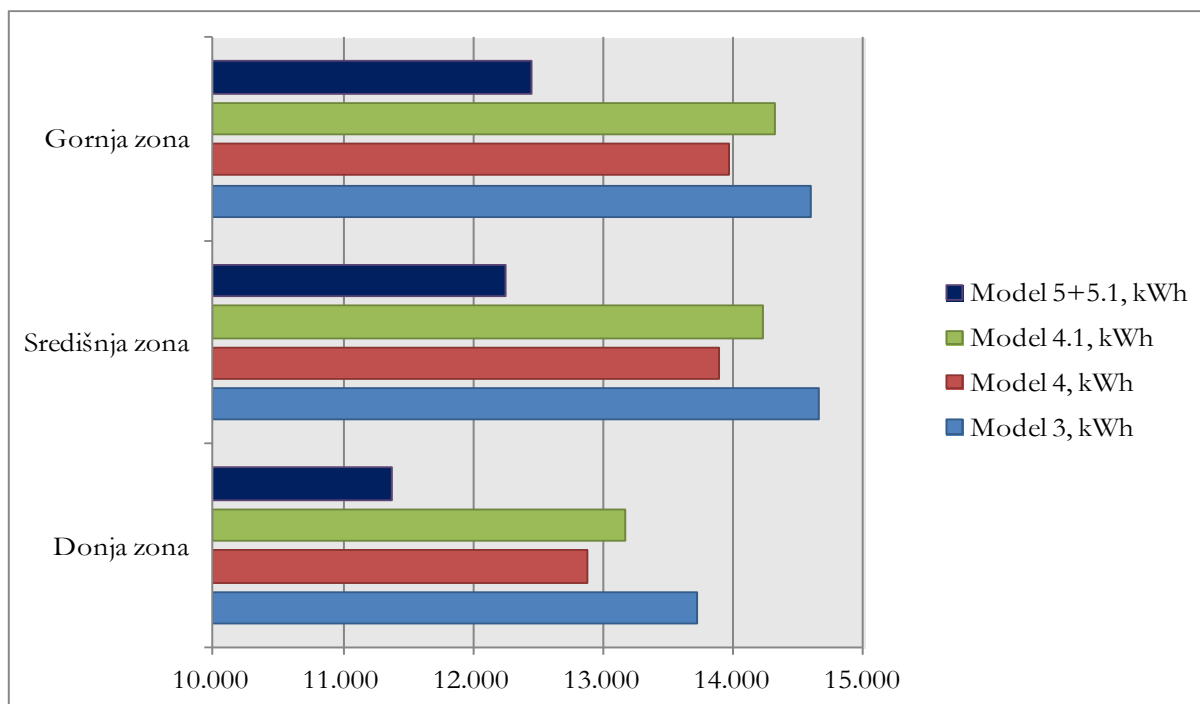
Slike 5.29 i 5.30, predstavljaju analizu posmatranih modela, kada je u pitanju vertikalni termički gradijent. Posmatrajući grejni period, uočljivo je, da model sa operativnom strategijom povezivanja međuprostora DVF i KGH sistema ima najmanju potrošnju. Potrošnje po posmatranim zonama su slične, što je posledica izdellenosti zona regulacionim klapnama. Nema velikih odstupanja ni kada je u pitanju donja zona, koja je najizloženija spoljašnjem vazduhu. To se isto primećuje i kod modela 4.1, kada su klapne takođe spuštene i pregrađuju prostor DVF. Kod slučaja otvorene DVF, model 4, primećuje se povećana potrošnja, koja je posledica prodora hladnog spoljašnjeg vazduha.

5. PREDLOZI I OCENA SEZONSKIH OPERATIVNIH I KONTROLNIH STRATEGIJA -
OPRAVDANOST PRIMENE KONCEPTA DVF



Slika 5.29: Komparativna analiza potrošnje energije za grejanje, za tri eksperimentalno analizirane zone (modeli 3, 4, 4.1 i 5+5.1)

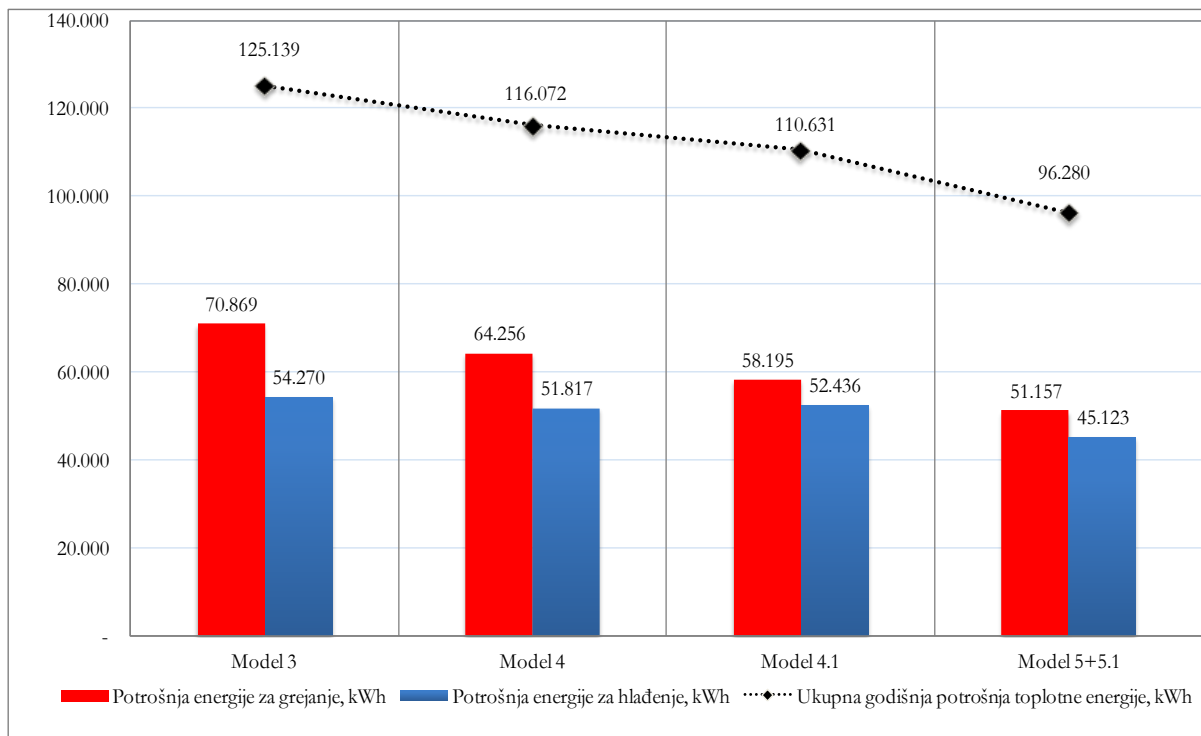
Kada je u pitanju letnji period, na slici 5.30, prikazan je uticaj efekata vertikalnog gradijenta. Potrošnje energije u svim zonama su najniže kada se primenjuje sezonska operativna strategija prirodnog provetravanja (model 5+5.1). Potrošnja se blago povećava kako se pomeramo ka višim zonama, u svim analiziranim modelima. Takođe, treba napomenuti da je potrošnja energije neznatno viša u slučaju modela 4.1, u odnosu na model 4. Razlog tome su povećani indirektni dobici toplote usled zatvorene fasade i grube regulacije klapni u prelaznom režimu modela 4.1.



Slika 5.30: Komparativna analiza potrošnje energije za hlađenje, za tri eksperimentalno analizirane zone (modeli 3, 4, 4.1 i 5+5.1)

5. PREDLOZI I OCENA SEZONSKIH OPERATIVNIH I KONTROLNIH STRATEGIJA - OPRAVDANOST PRIMENE KONCEPTA DVF

Slika 5.31, prikazuje ukupnu godišnju potrošnju toplotne energije za izabrane modele. Za sve posmatrane modele sa tradicionalnom fasadom, pozicija zaštite od sunčevog zračenja nema značajnu ulogu u konačnoj vrednosti potrošnje toplotne energije. Uštede se u ovom slučaju jedino ostvaruju u vrednostima potrošnje energije za hlađenje. Kao reprezent tradicionalne fasade izabran je model 3, kao model sa najnižom potrošnjom.



Slika 5.31: Komparativna analiza ukupne godišnje potrošnje toplotne energije (izabrani modeli)

Tabela 5.2, prikazuje detaljniju, procentualnu, uporednu analizu ušteta analiziranih modela. Prikazani su rezultati ušteta za sve varijante modela sa tradicionalnom fasadom i njihovim odnosom sa sadašnjim objektom (model 4).

Tabela 5.2: Poređenje modela 1, 2, 3 i 4 - procentualna ušteta potrošnje energije

Poređenje modela	Model 1	Model 1	Model 1	Model 1	Model 2	Model 3
		Model 2	Model 3	Model 4	Model 4	Model 4
Potrošnja toplotne energije za grejanje, kWh	70.868,5	70.869,2	70.868,9	64.255,8	64.255,8	64.255,8
Potrošnja toplotne energije za hlađenje, kWh	56.863,0	56.614,8	54.269,8	51.816,6	51.816,6	51.816,6
Ukupna godišnja potrošnja toplotne energije, kWh	127.731,5	127.484,0	125.138,7	116.072,3	116.072,3	116.072,3
Procentualna ušteta - grejanje		0%	0%	9%	9%	9%
Procentualna ušteta - hlađenje		0,4%	5%	9%	8%	5%
Ukupna procentualna godišnja ušteta		0,2%	2%	9%	9%	7%

5. PREDLOZI I OCENA SEZONSKIH OPERATIVNIH I KONTROLNIH STRATEGIJA - OPRAVDANOST PRIMENE KONCEPTA DVF

Što se tiče modela sa tradicionalnom fasadom, potrošnja energije za grejanje je ista, pošto su venecijaneri uvek u podignutom položaju u toku grejne sezone. Uporedna analiza pokazuje minimalne razlike između modela 1 i 2, a ušteda je ostvarena u potrošnji energije za hlađenje (0,4%) usled prisustva unutrašnjih venecijanera kod modela 2. U daljem poređenju, model 3 je zabeležio još veće uštede u potrošnji energije za hlađenje (5%) u odnosu na model 1, što potvrđuje pretpostavku da je spoljašnja pozicija venecijanera (brisoleji) najefikasnija u smanjenju dobitaka toplote. U daljoj analizi, kao reprezent modela sa tradicionalnom fasadom koristiće se model 3.

Prilikom poređenja reprezentativnog modela sa tradicionalnom fasadom i sadašnjeg stanja objekta sa DVF (model 4), zabeležene su uštede u potrošnji energije za grejanje (9%) i u energiji za hlađenje (5%).

U tabeli 5.3, dat je nastavak uporedne, procentualne analize između modela 3, 4, 4.1 i 5+5.1.

Tabela 5.3: Poređenje modela 3, 4, 4.1 i 5+5.1 - procentualna ušteda potrošnje energije

Poređenje modela	Model 3	Model 3	Model 4	Model 4	Model 4.1
	Model 4.1	Model 5+5.1	Model 4.1	Model 5+5.1	Model 5+5.1
Potrošnja toplotne energije za grejanje, kWh	58.195,1	58.195,1	51.157,3	51.157,3	51.157,3
Potrošnja toplotne energije za hlađenje, kWh	52.436,1	52.436,1	45.122,7	45.122,7	45.122,7
Ukupna godišnja potrošnja toplotne energije, kWh	110.631,2	110.631,2	96.279,9	96.279,9	96.279,9
Procentualna ušteda - grejanje	18%	28%	9%	20%	12%
Procentualna ušteda - hlađenje	4%	17%	-1%	14%	13%
Ukupna procentualna godišnja ušteda	12%	23%	5%	17%	13%

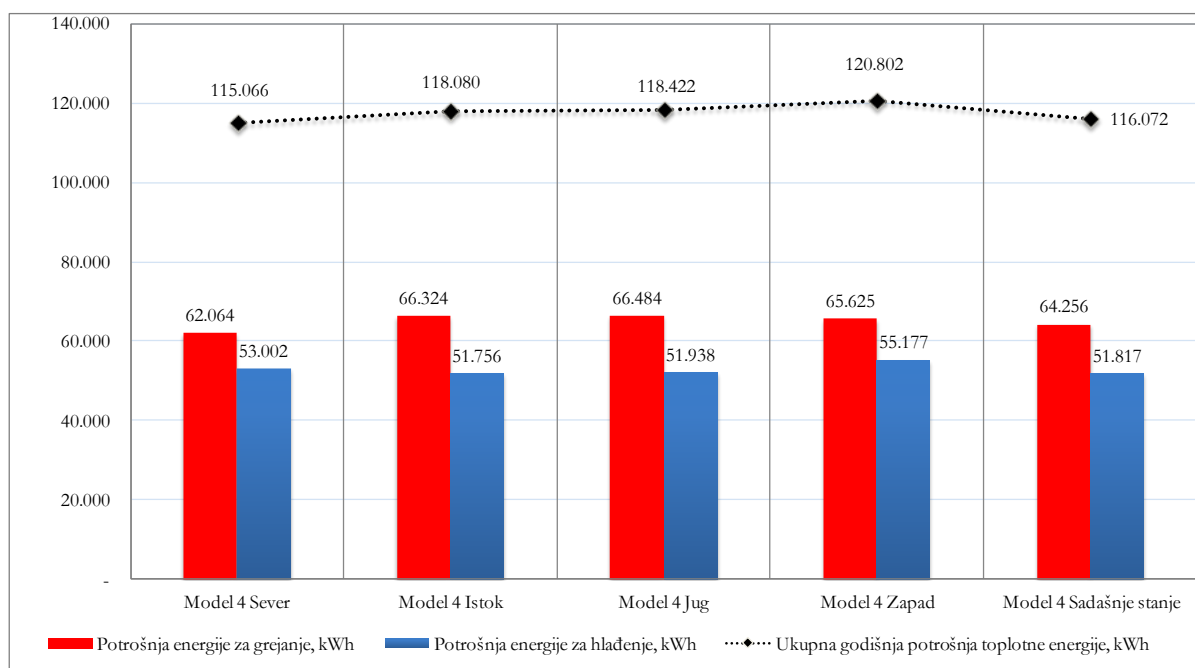
Za slučaj poređenja modela 3 sa poboljšanim modelom postojećeg objekta (model 4.1), ušteda u potrošnji energije za grejanje se duplira i iznosi 18%, dok se zbog grube regulacije klapni u prelaznom režimu smanjuje ušteda u potrošnji energije za hlađenje na 4%. Ove razlike u uštedi se vide i u analizi poređenja modela 4 i 4.1 (9% uštede u grejnom periodu i povećanje potrošnje od 1% za hlađenje). Kada je u pitanju poređenje prethodnih modela sa modelom u kojem su implementirane sezonske kontrolne strategije, procenat ušteda u potrošnji energije za grejanje i hlađenje je značajan. Ušteda u potrošnji energije za grejanje je 12%, kada je u pitanju poređenje sa modelom 4.1, 20% za model 4, a kada je u pitanju poređenje sa izabranim modelom sa tradicionalnom fasadom, ušteda iznosi 28%. Uporednom analizom dobijenih rezultata za potrošnju energije za hlađenje, ostvarene su uštede od 14%, kada je u pitanju model 4, 13% kada je u pitanju model 4.1, dok su najviše uštede ostvarene u poređenju sa modelom 3, 23%.

Opšti zaključak je, da su primenjene mere adekvatne i da rezultuju uštedama u potrošnji toplotne energije, kako za grejanje tako i za hlađenje, što svakako opravdava (sa energetskeg aspekta) primenu koncepta DVF u području umereno kontinentalne klime. Za poboljšanje termičkih karakteristika DVF, neophodno je koristiti predložene sezonske operativne strategije, jer samo u tom slučaju se ostvaruju značajne uštede u potrošnji toplotne energije. Treba naglasiti da je primenjena metodologija univerzalna i može se, uz minimalne korekcije, primeniti u različitim

klimatskim uslovima, dok dobijeni rezultati oslikavaju potrošnju energije samo za umereno kontinentalnu klimu.

5.2.5 UTICAJ ORIJENTACIJE DVF NA POTROŠNJU TOPLOTNE ENERGIJE - REZULTATI ANALIZE OSETLJIVOSTI

Za analizu uticaja orijentacije DVF na potrošnju toplotne energije izabran je model 4, odnosno trenutno stanje realnog objekta. Osnovni cilj ove analize je da se vidi na koji se način menja potrošnja energije, ako se promeni orijentacija DVF. Pored toga, potrebno je utvrditi i uporediti potrošnju energije za hlađenje u toku najtoplijih letnjih meseci. Razlog tome su dobijeni rezultati uporedne analize modela 4 i modela 3, gde su niže vrednosti dobijene u slučaju sadašnjeg stanja objekta sa DVF u odnosu na izabrani model sa tradicionalnom fasadom. Rezultati simulacija izabranih modela prikazani su na slici 5.32.



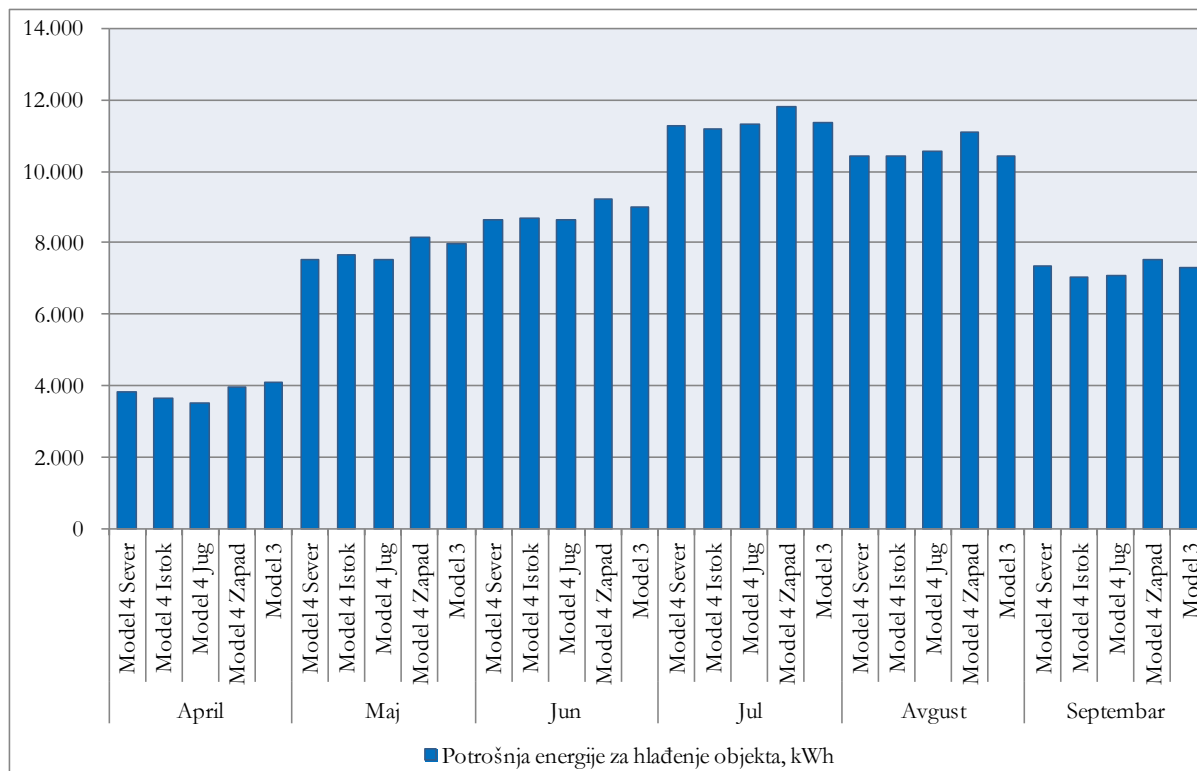
Slika 5.32: Rezultati analize osetljivosti za model 4

Rezultati pokazuju da se u slučaju severne orijentacije dobijaju najveće uštede, kada je u pitanju potrošnja energije za grejanje. Nakon nje slede zapadna i istočna, dok su vrednosti potrošnja najviše u slučaju južne orijentacije. Kada je u pitanju analiza potrošnje energije za hlađenje, najpogodnija je istočna, potom slede južna i severna, a orijentacija sa najvišom potrošnjom toplotne energije za hlađenje je zapadna.

Na slici 5.33, prikazan je karakter potrošnje energije za hlađenje modela 4, u slučaju promena orijentacije DVF. U slučaju poređenja sadašnje orijentacije modela 4 sa modelom 3, dobijeni su rezultati koji pokazuju uštede čak i u najtoplijim mesecima, što odstupa od rezultata dobijenih merenjem. Razlog tome je to, što izabrana tipična meteorološka godina koja je korišćena za simulaciju, predstavlja osrednjene i prosečne vrednosti meteoroloških parametara i zbog toga ne tretira na adekvatan način klimatske pikove. Međutim, na slici 5.30, za severnu, južnu i zapadnu orijentaciju modela 4, ipak se dobijaju više vrednosti potrošnja u mesecu julu i avgustu. Takođe, zapadna orijentacija modela 4 kao najnepovoljnija, ima više vrednosti potrošnje i u mesecu maju, junu i septembru. Istočna orijentacija, kao najpovoljnija u slučaju modela 4, u svim mesecima ima niže potrošnje u odnosu na model 3. Takođe, treba naglasiti, što se ne vidi na prikazanim rezultatima simulacija, da se u slučaju visokih temperatura i intenziteta zračenja mogu očekivati

5. PREDLOZI I OCENA SEZONSKIH OPERATIVNIH I KONTROLNIH STRATEGIJA - OPRAVDANOST PRIMENE KONCEPTA DVF

problemi sa pregrevanjem i povećanim potrošnjama energije za hlađenje, u poređenju sa objektom koji ima tradicionalnu fasadu. Ovom analizom prikazan je značaj pravilnog odabira strane sveta prilikom projektovanja objekta sa DVF.



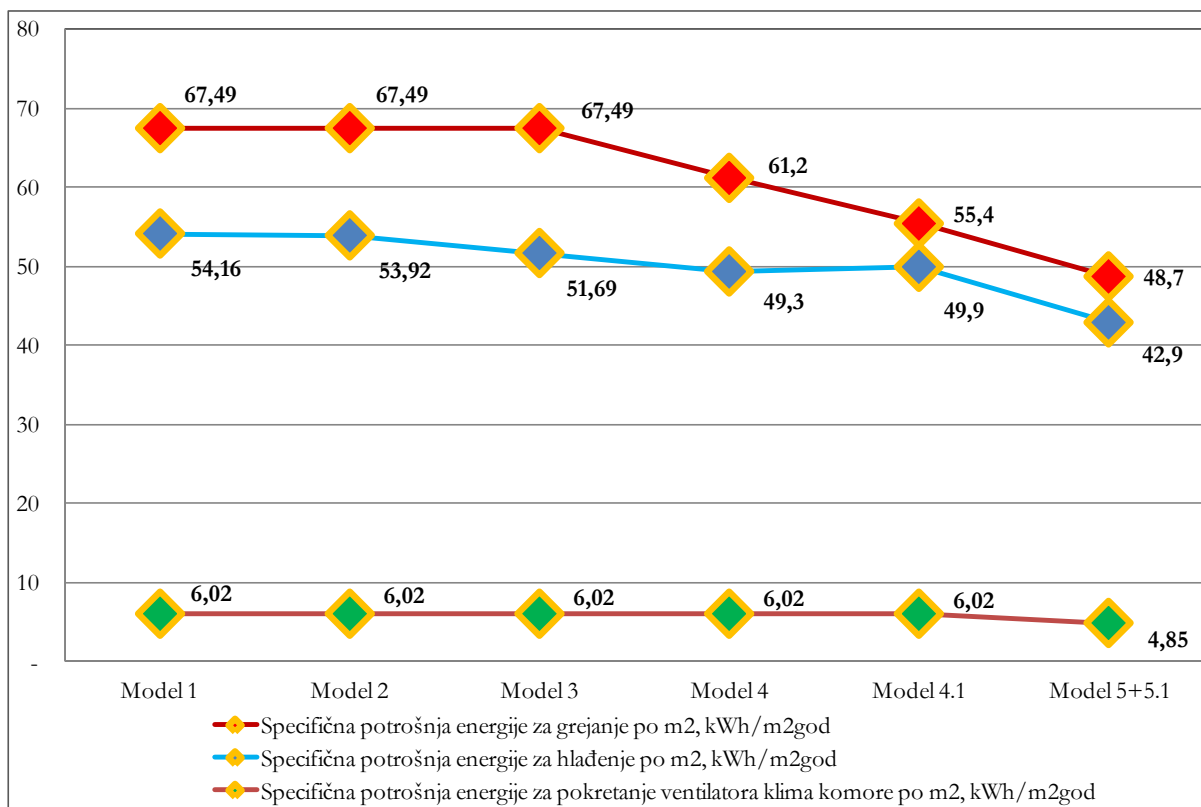
Slika 5.33: Rezultati analize osetljivosti - karakter mesečne potrošnje toplotne energije za hlađenje modela 4

Prikazani rezultati analize osetljivosti orijentacije DVF ukazuju da je ovaj koncept fasade dosta inertniji i da su promene u potrošnji nastale usled promene strane sveta manje u poređenju sa tradicionalnim tipom fasade. Razlog tome leži u slabijoj zaštiti od sunčevog zračenja kod tradicionalne fasade (slika 5.9). Iz tog razloga osetljivost potrošnje toplotne energije objekta sa tradicionalnom fasadom je veća, kada dolazi do promene intenziteta zračenja nastalog usled drugačije orijentacije.

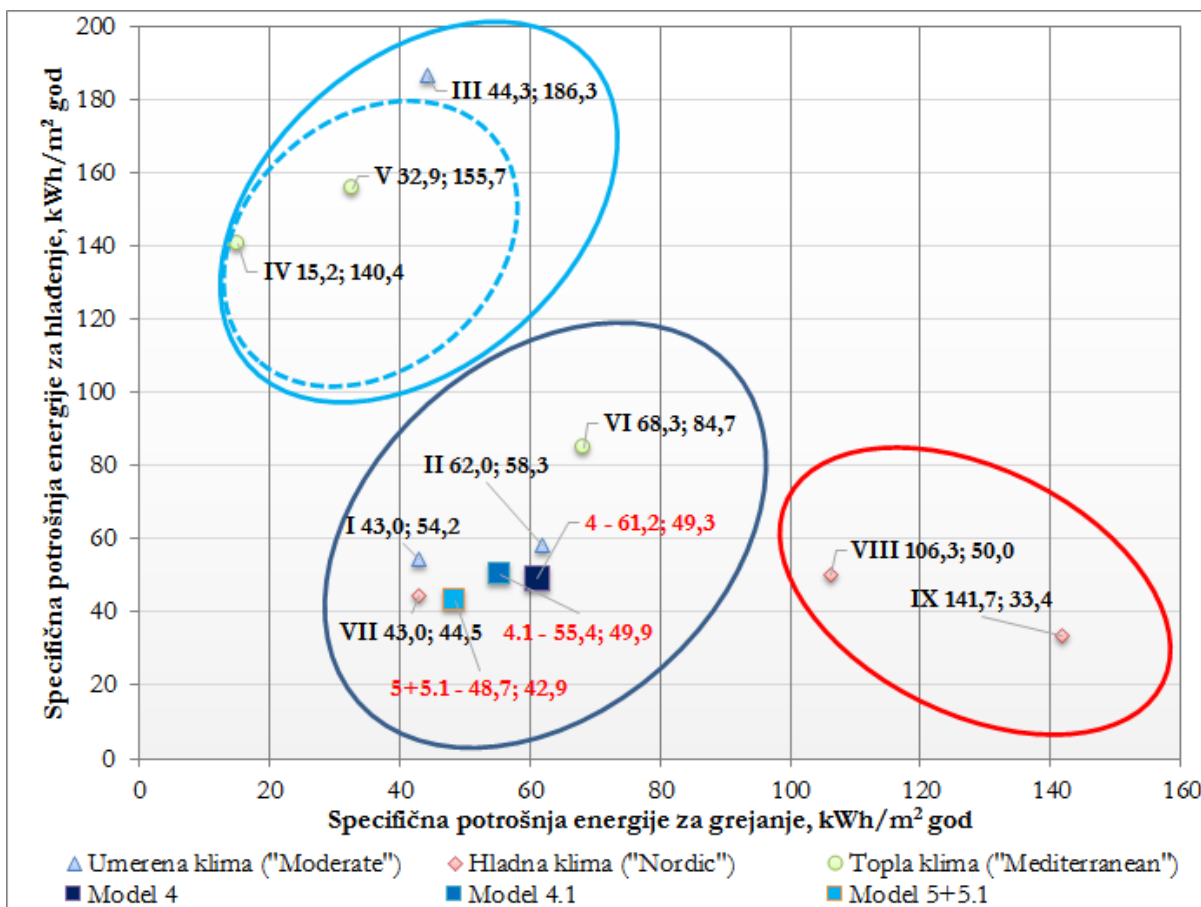
5.2.6 REZULTATI ANALIZE POREĐENJA SPECIFIČNIH GODIŠNJIH POTROŠNJI TOPLOTNE ENERGIJE

Opšti zaključak opravdanosti primene koncepta DVF u uslovima umereno kontinentalne klime, je da, energetske gledano, primena koncepta ima smisla i opravdana je i sa aspekta grejanja i sa aspekta hlađenja. To potvrđuje i slika 5.34, gde su prikazane specifične potrošnje toplotne energije po m^2 korisne površine objekta. Potrošnja energije po m^2 neto površine objekta se smanjuje kako se modeli unapređuju predloženim sezonskim kontrolnim strategijama. Na taj način, specifična potrošnja energije za grejanje je smanjena sa početnih $67,5 \text{ kWh/m}^2$ (modeli 1, 2 i 3) na $48,7 \text{ kWh/m}^2$ (model 5+5.1). Sadašnje stanje objekta, model 4, ima specifičnu potrošnju energije od $61,2 \text{ kWh/m}^2$. Što se tiče specifične potrošnje energije za hlađenje i ona se snižava, sem u slučaju modela 4.1 gde imamo minimalno povećanje usled grube regulacije klapni. Vrednosti specifičnih potrošnja se kreću od maksimalnih $54,2 \text{ kWh/m}^2$ do minimalnih $42,9 \text{ kWh/m}^2$. Sadašnje stanje objekta, model 4, ima specifičnu potrošnju u iznosu od $49,3 \text{ kWh/m}^2$.

5. PREDLOZI I OCENA SEZONSKIH OPERATIVNIH I KONTROLNIH STRATEGIJA -
OPRAVDANOST PRIMENE KONCEPTA DVF



Slika 5.34: Komparativna analiza potrošnje toplotne energije po m² korisne površine



Slika 5.35: Komparativna analiza potrošnje toplotne energije po m² korisne površine za različite klimatske uslove Evrope

5. PREDLOZI I OCENA SEZONSKIH OPERATIVNIH I KONTROLNIH STRATEGIJA - OPRAVDANOST PRIMENE KONCEPTA DVF

Što se tiče specifične potrošnje energije za pokretanje ventilatora klima komore, vrednosti su konstante u većini modela ($6,02 \text{ kWh/m}^2$) zbog istih zahteva za svežim vazduhom. Jedino u slučaju modela 5+5.1, gde je primenjena strategija prirodnog provetravanja, potrošnja je smanjena na $4,85 \text{ kWh/m}^2$.

U cilju upredne analize dobijenih rezultata specifičnih potrošnja toplotne energije sa objektima u eksploataciji, iskorišćeni su rezultati međunarodnog FP7 projekta "Best practice for double skin facades - BESTFACADE" [16]. Komparativna analiza dobijenih rezultata sadašnjeg i unapređenih modela sa DVF i rezultata preuzetih iz gore navedene studije, prikazani su na slici 5.35. Istraživanje [16], je obuhvatilo analizu potrošnja energije objekata u različitim klimatskim zonama Evrope ("Moderate", "Nordic" i "Mediterranean"), koje su u tesnoj vezi sa načinom kontrole međuprostora DVF. U tom smislu, za slučaj umerene klime data su dva objekta gde postoje dobre operativne strategije (I i II) i jedan kod koga je povećana potrošnja energije za hlađenje, nastala usled loše kontrole tokom letnjih meseci (III). Slično tome, za slučaj tople klimatske zone, dva objekta su bez strategija prirodnog provetravanja (IV i V), dok objekat VI ima dobro primenjenu letnju sezonsku strategiju što rezultuje i smanjenom potrošnjom energije za hlađenje. U slučaju hladne klime dva objekta su bez zimskih operativnih strategija (VIII i IX), dok objekat VII ima sniženu potrošnju energije za grejanje, koja je rezultat adekvatne kontrolne strategije. Pored primenjenih strategija, uticaj na konačnu potrošnju toplotne energije ima i sam tip DVF. U tom smislu analizirani objekti imaju ili koridorni ili višespratni ili "Shaft-box" tip fasade. Što se tiče rezultata dobijenih simulacijom modela 4, 4.1 i 5+5.1 oni su bliski i dobro se podudaraju sa objektom II koji se nalazi u umerenoj klimi i koji ima višespratni tip fasade. Na ovaj način je izvršena potvrda rezultata dobijenih simulacijom i njihova bliska veza sa specifičnom potrošnjom realnog objekta koji se nalazi u umerenoj klimi Evrope. Treba naglasiti da nije bilo moguće proceniti ili izračunati potrošnju toplotne energije objekta VIG Plaza, pošto u objektu postoji samo jedno električno brojilo, koje registruje zbirnu potrošnju toplotne pumpe i svih ostalih uređaja koji koriste električnu energiju.

Konačni zaključak je, da je primena koncepta DVF u klimatskom području Beograda opravdana sa energetskog gledišta i da je ona još značajnija u slučaju primene odgovarajućih sezonskih operativnih strategija.

5.3 LITERATURA

- [1] ASHRAE., ASHRAE Handbook - Fundamentals, American Society for Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, 2013
- [2] ASHRAE., ASHRAE Standard 62.1-2013 - Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, American Society for Heating Refrigerating and Air- Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, 2013
- [3] ASHRAE., International Weather for Energy Calculation (IWEC), American Society for Heating Refrigerating and Air- Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, 2012
- [4] Choi, W., et al., Operation and control strategies for multi-storey double skin facades during the heating season, Energy and Buildings 2012; 49; p.p. 454-465
- [5] DOE., EnergyPlus 8.2 Engineering Reference: The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Calculations, U.S. Department of Energy, 2014
- [6] DOE., EnergyPlus 8.2 Engineering Reference: The Input Output Reference to EnergyPlus Calculations, U.S. Department of Energy, 2014
- [7] Ellis, P.G., Torcellini, P.A., Crawley, D.B., Simulation of energy management systems in EnergyPlus, 10th International IBPSA Conference, Peking, Kina, 2007
- [8] Fallahi, A., Haghghat, F., Elsadi, H., Energy performance assessment of double skin facade with thermal mass, Energy and Buildings 2010; 42; p.p. 1499-1509

*5. PREDLOZI I OCENA SEZONSKIH OPERATIVNIH I KONTROLNIH STRATEGIJA -
OPRAVDANOST PRIMENE KONCEPTA DVF*

- [9] Hawkes, D., Forster, W., Energy efficient buildings, Architecture-engineering and environment, Norton & Company, Inc., New York, NY, USA, 2002
- [10] Jaewan, J., et al., Load Characteristics and Operation Strategies of Building Integrated with Multi story Double Skin Facade, Energy and Buildings 2013; 60; p.p. 185-198
- [11] Kim, Y.M., et al., Effect of double skin envelopes on natural ventilation and heating in office buildings, Energy and Buildings 2011; 43; p.p. 2118-2126
- [12] Lee, E.S., Selkowitz, S., Bazjanac, S.V., Kholer, C., High-performance commercial building facades, LBNL Report-50502, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA, 2002
- [13] Saelens, D., Roels, S., Hens, H., Strategies to improve the energy performance of multiple-skin facades, Building and Environment 2008; 43; p.p. 638-650
- [14] Shameri, M.A., et al., Perspectives of double skin facade systems in buildings and energy saving, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2011; 15; p.p. 1468-1475
- [15] Kim, Y.M., Kim, S., Shin, S.W., Sohn, J.Y., Contribution of natural ventilation in a double skin envelope to heating load reduction in winter, Building and Environment 2009; 44; p.p. 2236-2244
- [16] Intelligent energy EU project: Best practice for double skin facades (BESTFACADE), reference number EIE/04/135/S07.38652, Publishable report WP3, 2008

6. ZAVRŠNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA

Neka budućnost kaže istinu i vrednuje
svakoga prema njegovom radu i dostignućima.
Sadašnjost je njihova; budućnost je, za koju stvarno radim, moja
["Let the future tell the truth,
and evaluate each one according to his work and accomplishments.
The present is theirs; the future, for which I really work, is mine"]

(Nikola Tesla)

Doktorska disertacija predstavlja integralno istraživanje na temu razvoja i promocije koncepta dvostrukih ventilisanih fasada, kao jednog od mogućih tipova adaptivnih fasada. Potreba i entuzijazam velikih firmi koje ne štede novac, kako bi njihovi budući poslovni objekti bili jedinstveni i zapaženi, takođe podstiče razvoj koncepta. Na taj način se praktičnim putem omogućava dalja promocija i razvoj ovog tipa fasade. Jer ipak, jedna je stvar ako je nešto na papiru i ako samo tu i ostane, a sasvim je suprotno, ako ideja dobije i svoju praktičnu potvrdu. U suštini, glavna ideja ovog istraživanja je i zasnovana na prethodnoj težnji. Dakle, da se praktičnim (eksperimentalnim) putem potvrdi da li je i kada primena projektnog rešenja DVF opravdana. Naravno, niste uvek u mogućnosti da sve izmerite i da na taj način izvršite potvrđivanje, ali ipak jedna dovoljna količina realnog podudaranja eksperimentalnog i izmerenog, daje dovoljno kredibilitnosti da se taj model može dalje opravdano koristiti za buduće (virtuelne) operativne i kontrolne strategije. Na ovaj način se povećava transparentnost o tome kako se realno ponašaju i koji se sve benefiti postižu primenom ovog projektnog rešenja fasade.

Metodologija istraživanja je podeljena na više celina: pregled dosadašnje literature i prakse; presek sadašnjeg stanja; mogući načini projektovanja, dizajna i modeliranja; eksperimentalno istraživanje na realnom objektu; formiranje i potvrđivanje numeričkog modela postojećeg objekta; razvoj novih modela i njihovih sezonskih operativnih i kontrolnih strategija; komparativna analiza sa modelima koji imaju tradicionalnu fasadu koja ocenjuje opravdanost primene koncepta u klimatskoj zoni grada Beograda. Kao jedan od glavnih zaključaka istraživanja, disertacija pruža odgovore na ključna pitanja i barijere koji mogu biti presudni u daljem razvoju i promociji koncepta. Dakle, zadatak istraživanja je da se eksperimentalnim i numeričkim putem prouče potencijali višespratnog tipa DVF u cilju sniženja potrošnje toplotne energije objekta. Rezultati su pokazali da primenjeni modeli daju mogućnost za uštedu, neki u većoj, a neki u manjoj meri. Takođe treba napomenuti, da u toku kraćih ekstremnih sezonskih perioda (visoke temperature, intenzivno sunčevo zračenje i snažni vetar), postoji opravdana sumnja koja je potkrepljena eksperimentalnom analizom, da se potrošnja energije može i povećati. Glavni koraci koji su realizovani i na osnovu kojih su doneseni zaključci mogu se podeliti na sledeći način:

1. Eksperimentalna analiza

Eksperimentalni deo istraživanja je sproveden za sva tri režima u periodu od januara do avgusta 2014. godine, na objektu VIG Plaza u Beogradu. Osnovni zadatak izvršenih merenja je bio da se utvrdi trenutno stanje izabranog dela omotača objekta sa DVF. Dobijeni rezultati su iskorišćeni, kako bi se stepen efektivnosti i kvantifikovao. Eksperimentalni rezultati pokazuju zimski, prelazni i letnji način termičkog ponašanja posmatrane fasade. Kako otvori na ulazu i izlazu fasade nisu regulisani, ponašanje fasade je u tesnoj vezi sa trenutnim spoljašnjim uslovima (unutrašnji uslovi se mogu pretpostaviti da su konstantni u toku posmatranog režima). Iz tog razloga, rezultati pokazuju da energetska efikasnost fasade nije u potpunosti dostignuta. Glavni problemi su nastali prilikom izbora projektnog rešenja, čiji je osnovni cilj bio težnja za estetikom i smanjenjem spoljašnje buke. Kasnije su se konstatovali i problemi sa nerazumevanjem osnovnih radnih principa ovog tipa fasade. Na osnovu izvedenih merenja na objektu VIG Plaza, mogu se izvesti sledeći zaključci:

- u toku zime, temperature u međuprostoru fasade su malo više u odnosu na spoljašnje vrednosti. Vertikalni termički gradijent je više naglašen u toku perioda sa višim vrednostima sunčevog zračenja. Brzina strujanja vazduha u fasadi najviše zavisi od uticaja vetra i za slučaj ekstremnih brzina vetra (20 m/s), dokazano je da fasada u velikom meri eliminiše negativne efekte. Termovizijskim ispitivanjem prikazane su razlike u transmissionim gubicima u odnosu na tip omotača sa "zid zavesom". Analizom su potvrđene niže vrednosti gubitaka kod DVF i veoma male horizontalne i vertikalne

devijacije temperatura po površini fasade. Zaključeno je, da je neophodna regulacija otvora fasade u smislu još boljeg "buffer" efekta;

- prelazni (prolećni) režim predstavlja period sa najboljim karakteristikama efektivnosti fasade. Umereni spoljašnji uslovi su glavni razlog tome. U ekstremnim slučajevima (niže ili više spoljašnje temperature i vrednosti insolacije), regulacija otvora ili prikladna noćna ventilacija su neophodni, kako bi se eliminisali negativni efekti pothlađenja ili pregrevanja vazduha u fasadi;
- u toku leta, međuprostor fasade je u određenim periodima pregrejan. Iz tog razloga, količina indirektnih solarnih dobitaka je povećana, što negativno utiče na termički komfor u blizini prozora. Tokom ovog perioda neophodno je sniziti vrednosti temperatura u fasadi, prikladnim operativnim strategijama. Pod tim se podrazumeva povećanje brzine strujanja vazduha u fasadi (ubrzano odvođenje toplote), noćno provetravanje ili povezivanje sa KGH sistemom. Zaključak je, da za dobre performanse DVF, inženjeri moraju napraviti kompromis i optimizovati prirodne (razlika temperatura između delova DVF) i prinudne (uticaj vetra) efekte konvekcije. Takođe, treba naglasiti, da se u toku leta, regulisanim venecijanerima i adekvatnim spoljašnjim zastakljenjem praktično eliminišu dobitci nastali prodorom sunčevog zračenja. Budućim energetskim simulacijama neophodno je formirati bilans energije, koji predstavlja odnos negativnog (pregrevanje vazduha u međuprostoru fasade) i pozitivnog efekta (eliminisanje dobitaka toplote nastalih prodorom sunčevog zračenja), kako bi se doneo zaključak o uticaju DVF u letnjem režimu.

2. Formiranje sadašnjeg modela objekta sa DVF i njegovo potvrđivanje

Sprovedeni eksperimentalni deo istraživanja u najvećoj meri je ukazao na ključne prednosti i nedostatke koncepta primene DVF. Sa rezultatima i iskustvom dobijenim u eksperimentu, u izabranom softverskom paketu EnergyPlus+Airflow Network, formiran je i fino podešen numerički model sadašnjeg stanja objekta sa DVF. Kombinacija softverskog alata EnergyPlus i Airflow Network mrežnog algoritma strujanja, pokazala se kao dobar i opravdan izbor kada je u pitanju odnos tačnosti i vremena potrebnog za simulaciju.

Svi korišćeni statistički indikatori pokazali su visok nivo tačnosti i poklapanja rezultata dobijenih simulacijom i rezultata dobijenih merenjem. Vrednosti odstupaju u zavisnosti od posmatranog režima i zone, a zaključak je, da se bolje vrednosti poklapanja rezultata dobijaju u prelaznom i letnjem režimu, pogotovu kada se analizira najuticajniji parametar - temperatura vazduha u DVF. Takođe, zaključak je, da se veća odstupanja pojavljuju u toku dana, što kao razlog može imati složeno termičko ponašanje DVF koje se reflektuje na nepreciznost i nesigurnost konvektivnog koeficijenta prelaza toplote. Kada je u pitanju vrednost brzine vazduha, zaključak je da se ovaj parametar mora analizirati zasebno u mnogo kraćem vremenskom intervalu (interval od nekoliko sekundi). Dobijeni rezultati vezani za brzinu vazduha ukazuju da se vrednosti bolje poklapaju u slučaju kada su klapne spuštene, odnosno kada je posmatrani slučaj bolje kontrolisan.

Opšti zaključak formiranja, finog podešavanja i potvrđivanja modela objekta sa DVF jeste, da dobijeni rezultati simulacija predstavljaju dobro predviđanje realnih (izmerenih) vrednosti. Stoga, ovako fino podešen (kalibrisan) model je visoko pouzdan u smislu budućih ocena termičkih performansi objekta sa DVF. Takođe treba napomenuti, da i pored nepostojanja standarda ili smernica za verifikaciju temperatura i brzina, objektivno gledano pouzdanost modela je dobra u smislu dobijenih vrednosti predloženih statističkih indikatora. Na ovaj način potvrđene su prve dve hipoteze sprovedenog istraživanja.

3. Modeliranje i ocena opravdanosti primene koncepta DVF

Nastavak numeričkog modeliranja (potvrđenog modela) omogućio je dublju analizu potencijala primene koncepta DVF. Na ovaj način izvršene su energetske simulacije predloženih modela i njihovih sezonskih operativnih strategija. Takođe, uporednom analizom sa modelima koji imaju tradicionalnu fasadu, formiran je zaključak o opravdanosti primene koncepta DVF u uslovima umereno kontinentalne klime.

Opšti zaključak opravdanosti primene koncepta DVF, u uslovima umereno kontinentalne klime, je da, energetske gledano, primena koncepta ima smisla i opravdana je i sa aspekta grejanja i sa aspekta hlađenja. To potvrđuju i dobijene specifične potrošnje toplotne energije po m² korisne površine objekta. Potrošnja energije po m² neto površine objekta se smanjuje kako se modeli unapređuju predloženim sezonskim kontrolnim strategijama. Na taj način specifična potrošnja energije za grejanje je smanjena sa početnih 67,5 kWh/m² za modele sa tradicionalnom fasadom, na 48,7 kWh/m² za slučaj modela sa primenjenim sezonskim operativnim strategijama (procenat uštede potrošnje energije za grejanje je 28%, a za hlađenje je 23%). Model koji oslikava sadašnje stanje objekta ima specifičnu potrošnju energije od 61,2 kWh/m². Što se tiče specifične potrošnje energije za hlađenje i ona se snižava, sem u slučaju modela 4.1, gde imamo minimalno povećanje usled grube regulacije klapni u prelaznom režimu. Vrednosti specifičnih potrošnji se kreću od maksimalnih 54,2 kWh/m² do minimalnih 42,9 kWh/m². Model sadašnjeg stanja objekta, ima specifičnu potrošnju energije za hlađenje u iznosu od 49,3 kWh/m². Potvrđeno je, da je energetske bilans između pozitivnih i negativnih efekata u toku letnjih meseci negativan, odnosno prisustvo DVF snižava potrošnju energije za hlađenje. Što se tiče rezultata dobijenih simulacijom modela 4, 4.1 i 5+5.1, oni su bliski i dobro se podudaraju sa objektom II, koji se nalazi u umerenoj klimi i koji ima višespratni tip fasade. Na ovaj način je izvršena i potvrda rezultata dobijenih simulacijom i njihova bliska veza sa specifičnom potrošnjom realnog objekta, koji se nalazi u umerenoj klimi Evrope. Treba naglasiti da je primenjena metodologija univerzalna i može se, uz adekvatne korekcije primeniti u različitim klimatskim uslovima, dok dobijeni rezultati oslikavaju potrošnju energije samo za umereno kontinentalnu klimu.

Konačni zaključak je, da je primena koncepta DVF, u umereno kontinentalnom klimatskom području (grad Beograd), opravdana sa energetske gledišta i da je ona još značajnija u slučaju primene odgovarajućih sezonskih operativnih strategija. Ovo potvrđuje i osnovnu hipotezu istraživanja.

4. Glavni zaključci sprovedenog istraživanja

Kao glavni zaključci sprovedenog istraživanja mogu se navesti sledeće činjenice:

- efikasnost DVF u najvećoj meri zavisi od trenutnih meteoroloških uslova i načina operativnog korišćenja;
- eksperimentalno je potvrđeno da DVF štite i u najvećoj meri eliminišu negativne efekte snažnog vetra i intenzivnog sunčevog zračenja;
- takođe, eksperimentalno i numerički je potvrđeno da koncept DVF omogućava visok stepen dobro regulisanog prirodnog provetravanja, pogotovu u prelaznom i noćnom periodu;
- međuprostor DVF se može efikasno koristiti kao bezbedan prostor za predgrevanje vazduha (zimski režim), ili kao prostor za prirodno provetravanje (prelazni i letnji režim);
- numerički modeli objekta sa DVF u procesu potvrđivanja daju veoma dobre statističke indikatore - model postaje verifikovan;
- energetske gledano, primena koncepta DVF, u uslovima umereno kontinentalne klime, je opravdana i donosi (za predložene sezonske operativne strategije) procentualne

energetske uštede u iznosu od 28% za grejanje, odnosno 23% za hlađenje u odnosu na tradicionalni tip fasade;

- finansijski aspekt nije analiziran u okviru ovog istraživanja, ali na osnovu dosadašnje prakse, dobar deo povećanog investicionog ulaganja se može kompenzovati kroz manje zahteve toplotnih gubitaka i dobitaka objekta, odnosno jeftiniju instalaciju za KGH.

5. Pravci daljeg istraživanja

DVF podrazumevaju aktivno učešće inovativnih trendova i tehnologija, tako da sama realizacija ovakvih projekata predstavlja veliki izazov, u nekim slučajevima i veliki rizik. Neretko, inženjeri i istraživači sa tradicionalnim shvatanjima i praksom, izbegavaju da prihvate nešto novo i inovativno, koje sa sobom često dovodi i primese visokih troškova ulaganja, održavanja, neplaniranih troškova koji prouzrokuju neproporcionalne periode otplate. Međutim, preuzimajući odgovornost za povećani rizik, često se otvaraju nove mogućnosti i ambicije, koje same po sebi moraju biti podržane od visokostručnih i iskusnih kadrova. U tom smislu, kao predlog budućeg istraživanja, potrebno je uraditi sveobuhvatnu "life cycle" analizu troškova primene koncepta DVF.

Tranzicija od statičkog (tradicionalna fasada) prema dinamičkom (DVF) tipu omotača objekta, ne predstavlja samo kompleksniji proces projektovanja u idejnoj fazi, već i dodatan sloj u omotaču objekta, koji povećava kompleksnost u njegovoj operativnoj fazi. Pridodati sloj fasade ne garantuje uvek i uspešnu i efikasnu operativnost. Ponašanje i operativnost ovakvog tipa fasade mora da zadovolji zahteve za performansama, koje su u nekim trenucima u suprotnosti sa onim što se dešava u okolini, ili se međusobno suprotstavljaju. Zaključak je, da se u skladu sa nizom procedura i aktivnosti, mora izvršiti neophodna optimizacija komponenti fasade. Pod ovim se najčešće podrazumeva razvoj povezivanja različitih podsistema fasade u jednu celinu, kao i njihova saradnja i simultani rad sa ostalim sistemima zgrade. Pored toga, u obzir se uzima i pravilan odabir termo-fizičkih karakteristika primenjenih materijala. Kao budući izvori informacija za aktivnosti povezivanja podsistema, mogu se posmatrati odnosi, recimo, između: pasivnog zagrevanja/rizika od pregrevanja; prirodnog osvetljenja (solarna zaštita)/veštačkog osvetljenja; privatnosti/otvorenosti; prirodnog provetravanja/rizika od promaje... Takođe, sama operativna faza u ovom slučaju je opterećena dinamičkim i veoma kratkim promenama spoljašnjih uslova. U vezi sa tim, nekada je bolje ne reagovati odmah i sačekati, što bi u budućem kontekstu bila bolja performansa sistema od trenutne štete. Na osnovu ovoga, može se i naslutiti budući smer istraživanja koji ide ka tzv. "model predictive control (MPC)", odnosno ka upravljanju u realnom vremenu i na osnovu prognoze. Na ovaj način može se dobiti optimalna kontrola, koja je u bliskoj vezi sa kredibilnom vremenskom prognozom. Takođe, primena parametarskih i analiza optimizacije kod pravilnog odabira termo-fizičkih karakteristika primenjenih materijala, ili kod izbora najboljeg rešenja što se tiče KGH sistema, može predstavljati dalji pravac istraživanja.

U skladu sa trenutnim trendovima, kao pravac daljeg istraživanja, može se navesti veza između koncepta DVF i primene sistema koji koriste obnovljive izvore energije (solarni paneli i kolektori, mini vetro turbine...). Pored toga, primena novih savremenih materijala, poput fazno promenljivih, bi bila značajna sa aspekta potencijalne mogućnosti međusobne integracije.