Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo

MARTIN RUS

ZASNOVA VISOKO UČINKOVITEGA STAVBNEGA OVOJA TRGOVSKEGA CENTRA KOVINAR V RIBNICI Z GLEDIŠČA OSVETLJENOSTI IN ENERGIJSKE UČINKOVITOSTI

MAGISTRSKO DELO

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM
DRUGE STOPNJE STAVBARSTVO

Ljubljana, 2017

Hrbtna stran: **RUS MARTIN** 2017

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo

Jamova cesta 2
1000 Ljubljana,Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE STAVBARSTVO

Kandidat/-ka:

MARTIN RUS

ZASNOVA VISOKO UČINKOVITEGA STAVBNEGA OVOJA TRGOVSKEGA CENTRA KOVINAR V RIBNICI Z GLEDIŠČA OSVETLJENOSTI IN ENERGIJSKE UČINKOVITOSTI

HIGH-PERFORMANCE BUILDING ENVELOPE DESIGN OF SHOPPING CENTRE KOVINAR IN RIBNICA FROM THE ASPECT OF DAYLIGHTING AND ENERGY EFFICIENCY

Mentor/-ica:
doc. dr. Mitja Košir

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:
/

Član komisije:

2017

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
20	6	Enačba (2)	Se odstrani

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM

UDK: **699.86:725(497.4Ribnica)(043.3)**

Avtor: **Martin Rus**

Mentor: **doc. dr. Mitja Košir**

Naslov: **Zasnova visoko učinkovitega stavbnega ovoja trgovskega centra Kovinar v Ribnici z gledišča osvetljenosti in energijske učinkovitosti**

Tip dokumenta: **Magistrsko delo**

Obseg in oprema: **93 str., 42 pregl., 37 graf., 59 sl., 6 en., 1 pril.**

Ključne besede: **uporaba energije, osvetljenost z dnevno svetlobo, stavbni ovoj, zasteklitev, Revit**

Izvleček

Predmet obravnave v magistrskem delu je bil projekt idejne arhitekturne zasnove trgovskega centra Kovinar v Ribnici. Namen dela je bil, da na osnovi pridobljenega idejnega projekta poskušamo optimizirati zasnovo stavbnega ovoja z gledišča notranje osvetljenosti z dnevno svetlobo ter sočasno zmanjšati uporabo energije za ogrevanje in hlajenje. V izhodišču smo opravili pregled relevantne strokovne literature, kjer so bile izvedene študije, ki so obravnavale uporabo arhitekturnih ukrepov, izvedenih na nivoju stavbnega ovoja z namenom zmanjšanja uporabe energije ter izboljšanja osvetljenosti prostorov z dnevno svetlobo, kot smo ji predvidevali izvesti v našem delu. V praktičnem delu naloge smo najprej izvedli analizo osvetljenosti predlagane idejne zasnove z dnevno svetlobo s pomočjo računalniškega 3D modela ter izdelali optimiziran model z vidika količine in razporeditve zasteklitve. Kot optimalna kombinacija se je izkazala uporaba fasadnih in strešnih zasteklitev. V nadaljevanju smo izvedli simulacije uporabe energije na modelu z optimizirano zasteklitvijo ter določili ustrezne gradbeno-fizikalne ter optične lastnosti transparentnega in netransparentnega stavbnega ovoja. Model z optimizirano zasteklitvijo je imel 33,10% manjšo površino zasteklitev v primerjavi s površino zasteklitve izhodiščnega modela, površine prostorov z zadostno osvetljenostjo z dnevno svetlobo so se povečale za do 36%, zmanjšanje zadostno osvetljenih površin se je pojavilo le enkrat in sicer za 13%. Predvidena kumulativna potrebna energija stavbe je znašala 495491 MJ (267,25 MJ/m^2) v izhodiščnem modelu, v modelu z optimizirano zasteklitvijo pa 407511 MJ (257,67 MJ/m^2). Prihranki kumulativne energije stavbe so znašali 18%. Skupna letna potrebna energija za ogrevanje stavbe v izhodiščnem modelu je znašala 272684 MJ (172,15 MJ/m^2), v optimiziranem modelu pa 280760 MJ (177,25 MJ/m^2). Energija za hlajenje stavbe na letni ravni v izhodiščnem modelu je znašala 222807 MJ (140,66 MJ/m^2), v optimiziranem modelu pa 126751 MJ (80,01 MJ/m^2). V modelu z optimizirano zasteklitvijo smo izvedli še dodatne ukrepe na stavbnem ovoju, kjer smo v končni varianti izpolnili vse zahteve certifikacijskega sistema LEED za osvetljevanje stavb.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: **699.86:725(497.4Ribnica)(043.3)**

Author: **Martin Rus**

Supervisor: **Assist. Prof. Mitja Košir, Ph. D.**

Title: **High-performance building envelope design of shopping centre Kovinar in Ribnica from the aspect of daylighting and energy efficiency**

Document type: **Master Thesis**

Scope and tools: **93 p., 42 tab., 37 graph., 59 fig., 6 eq., 1 ann.**

Keywords: **energy use, daylighting, building envelope, glazing, Revit**

Abstract

The subject of the master's thesis is a conceptual architectural design for the Kovinar shopping centre in Ribnica. Based on the conceptual project we have received, we are trying to optimise the concept of the building envelope in terms of indoor illumination with daylight, and at the same time reduce the use of energy for heating and cooling purposes. At first we reviewed relevant professional literature containing studies dealing with architectural measures applied to building envelopes with the purpose of reducing energy use, and improving illumination of rooms with daylight, which was our purpose as well. In the practical part of the thesis we analysed illumination with daylight offered by the proposed conceptual design, using a computer 3D model, and designed an optimized model in terms of the amount and the layout of the glazing. We established that a combination of glazing on both the facade and the roof was optimal. We continued with simulations of energy use at the model with optimised glazing, and defined the adequate construction and physical properties of both transparent and non-transparent structures of building envelopes. The total glazing area of the optimised model was smaller by 33.10%, compared to the glazing area of the initial model, while the indoor surface with adequate daylight illumination increased by up to 36%, while the adequately illuminated surfaces diminished by 13% only in one case. The anticipated required cumulative energy of the building amounted to 495491 MJ (267,25 MJ/m^2) for the initial model, while for the model with optimized glazing it amounted to 407511 MJ (257,67 MJ/m^2), resulting in saving of 18% of the cumulative energy of the building. The total annually required energy for heating of the building for the initial model was 272684 MJ (172,15 MJ/m^2), and 280760 MJ (177,25 MJ/m^2) for the optimised model. The annually required energy for cooling purposes for the initial model amounted to 222807 MJ (140,66 MJ/m^2), and to 126751 MJ (80,01 MJ/m^2) for the optimised model. The model with optimised glazing was subjected to some other measures applied to the building envelope; thus compliance with all the requirements of the LEED certification system for illumination of buildings was achieved.

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorju doc. dr. Mitji Koširju za vse napotke, strokovnost in odzivnost pri izdelavi magistrske naloge.

Posebna zahvala gre moji družini, predvsem staršem, ki sta mi omogočila študij in nudila vso podporo v času šolanja. Prav tako se iskreno zahvaljujem svoji punci Lari, ki mi je bila v podporo v času izdelovanja magistrske naloge.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE ..... **I**

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM ..... **II**

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT ..... **III**

ZAHVALA ..... **IV**

OKRAJŠAVE ..... **XIV**

SIMBOLI ..... **XV**

1.0 UVOD **1**

1.1 Tematika in namen magistrskega dela 2

1.2 Izhodiščne hipoteze 2

1.3 Pregled literature 2

1.4 Vpliv zasnove stavbnega ovoja na porabo energije in notranje okolje 4

1.4.1 Transparentni del stavbnega ovoja 5

1.4.2 Netransparentni del stavbnega ovoja 7

2.0 PREDSTAVITEV OBRAVNAVANE STAVBE IN PODNEBNIH LASTNOSTI LOKACIJE **8**

2.1 Opis obravnavane stavbe in podatki o lokaciji 8

2.2 Klimatski podatki 10

3.0 METODOLOGIJA **14**

3.1 Izračun osvetljenosti z dnevno svetlobo 16

3.1.1 Metrike za oceno dnevne osvetljenosti 17

3.1.1.1 Metrika UDI* 18

3.1.1.2 Avtonomija dnevne osvetljenosti z uporabo sDA+ASE. 18

3.2 Izračun uporabe energije 19

3.2.1 Algoritem izračuna potrebne energije za ogrevanje in hlajenje stavbe 19

3.3 Standardi in priročnik ASHRAE 20

3.4 Izdelava računalniškega 3D modela 22

3.4.1 Izris modela 22

3.4.2 Vhodni podatki 23

3.4.2.1 Toplotne cone 23

3.4.2.2 Urniki obratovanja 23

3.4.2.3 Infiltracija zraka in prezračevanje 25

3.2.2.4 Notranji toplotni viri 25

3.2.2.5 Lastnosti stavbnega ovoja 26

3.5 Predstavitev uporabljene programske opreme 28

3.5.1 Program Revit 28
3.5.2 Funkcija Energy Analysis 29
3.5.3 Dodatek Insight 360 30

4.0 ANALIZA VPLIVA ZASNOVE STAVBNEGA OVOJA NA CELOSTNO ENERGIJSKO BILANCO STAVBE 31

4.1 Energijski potencial stavbnega ovoja 32
4.1.1 Prejeto sončno sevanje 33

4.2 1. SKLOP: Analiza dnevne osvetljenosti 36
4.2.1 Model 1 36
4.2.1.1 Lastnosti modela 1 36
4.2.1.2 Osvetljenost z dnevno svetlobo – model 1 37
4.2.2 Model 2 38
4.2.2.1 Predstavitev modela 2 38
4.2.2.2 Osvetljenost z dnevno svetlobo – model 2 39
4.2.3 Model 3 41
4.2.3.1 Predstavitev modela 3 41
4.2.3.2 Osvetljenost z dnevno svetlobo – model 3 42
4.2.4 Model 4 44
4.2.4.1 Predstavitev modela 4 44
4.2.4.2 Osvetljenost z dnevno svetlobo – model 4 45
4.2.5 Model 5 48
4.2.5.1 Predstavitev modela 5 48
4.2.5.2 Osvetljenost z dnevno svetlobo – model 5 49
4.2.6 Model 6 51
4.2.6.1 Predstavitev modela 6 51
4.2.6.2 Osvetljenost z dnevno svetlobo – model 6 54
4.2.7 Primerjava osvetljenosti z dnevno svetlobo modela 1 in modela 6 56

4.3 2. SKLOP: Energijska analiza 59
4.3.1 Simulacija uporabe energije 59
4.3.1.1 Simulacija 1 59
4.3.1.2 Simulacija 2 62
4.3.1.3 Simulacija 3 65
4.3.1.4 Simulacija 4 67
4.3.1.5 Simulacija 5 70
4.3.2 Primerjava uporabe energije med modeloma E1 in E2 73

4.4 3. SKLOP: Analiza dnevne osvetljenosti modela E2 in zadostitev kriterijem metrik sDA + ASE 77
4.4.3 Analiza dnevne osvetljenosti modela E2 in primerjava osvetljenosti z modelom 6 77
4.4.4 Zadostitev kriterijem metrik sDA + ASE 78

4.4.5 Analiza dnevne osvetljenosti modela E3 81

4.5 4. SKLOP: Energijska analiza 83

4.5.1 Definiranje urnika delovanja umetne razsvetljave 83

4.5.2 Simulacija uporabe energije modela E3 in modela E4 85

5.0 ZAKLJUČEK 87

VIRI 89

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Klimatski podatki meteorološke postaje za Kočevje, podatki ARSO (Agencija republike Slovenije za okolje) za dolgoletno povprečje [34]. 10
Preglednica 2: Klimatski podatki meteorološke postaje za Kočevje, podatki ARSO za leto 2006 [36] in klimatski podatki ACS, povzeti iz rezultatov energijske analize v Revitu za leto 2006 [35]. 12
Preglednica 3: Referenčne temperature ogrevanja in hlajenja v toplotni coni. 23
Preglednica 4: Gradbeno-fizikalne lastnosti konstrukcijskega sklopa 1. 26
Preglednica 5: Gradbeno-fizikalne lastnosti konstrukcijskega sklopa 2. 26
Preglednica 6: Gradbeno-fizikalne lastnosti konstrukcijskega sklopa 3. 27
Preglednica 7: Gradbeno-fizikalne lastnosti konstrukcijskega sklopa strehe. 27
Preglednica 8: Gradbeno-fizikalne lastnosti konstrukcijskega sklopa talne konstrukcije. 27
Preglednica 9: Vrednosti refleksivnosti posameznih površin in pripadajoče vrednosti RGB z barvno lestvico. 27
Preglednica 10: Gradbeno-fizikalne in optične lastnosti zasteklitve 1. 28
Preglednica 11: Prikaz bruto površin sten in neto površin strehe in tal. 32
Preglednica 12: Bruto površine obravnavane stavbe za analizi osončenosti. 33
Preglednica 13: Podatki o zastekljenih površinah modela 1. 36
Preglednica 14: Osvetljenost prostora z dnevno svetlobo – model 1. 38
Preglednica 15: Podatki o zastekljenih površinah – model 2. 39
Preglednica 16: Osvetljenost prostora z dnevno svetlobo – model 2. 41
Preglednica 17: Podatki o zastekljenih površinah – model 3. 42
Preglednica 18: Osvetljenost prostora z dnevno svetlobo – model 3. 43
Preglednica 19: Dimenzije uporabljenih zasteklitev v modelu 4. 45
Preglednica 20: Podatki o zastekljenih površinah – model 4. 45
Preglednica 21: Osvetljenost prostora z dnevno svetlobo – model 4. 47
Preglednica 22: Dimenzije uporabljenih zasteklitev v modelu 5. 49
Preglednica 23: Podatki o zastekljenih površinah – model 5. 49
Preglednica 24: Osvetljenost prostora z dnevno svetlobo – model 5. 51
Preglednica 25: Dimenzije uporabljenih zasteklitev v modelu 6. 53
Preglednica 26: Podatki o zastekljenih površinah – model 6. 54
Preglednica 27: Osvetljenost prostora z dnevno svetlobo – model 6. 56
Preglednica 28: Letne vrednosti zahtev po hlajenju in ogrevanju stavbe v simulaciji 1. 62
Preglednica 29: Letne vrednosti zahtev po hlajenju in ogrevanju stavbe v simulaciji 2. 64
Preglednica 30: Letne vrednosti zahtev po hlajenju in ogrevanju stavbe v simulaciji 3. 67
Preglednica 31: Letne vrednosti zahtev po hlajenju in ogrevanju stavbe v simulaciji 4. 70
Preglednica 32: Letne vrednosti zahtev po hlajenju in ogrevanju stavbe v simulaciji 5. 73
Preglednica 33: Primerjava toplotnih dobitkov sončnega sevanja, energije, potrebne za hlajenje, in energije, potrebne za ogrevanje stavbe, na letni ravni med modeloma E1in E2, ter kumulativne energije. 76

Preglednica 34: Osvetljenost prostora z dnevno svetlobo – model E2. 77
Preglednica 35: Prikaz primerjave UDI* med modeloma 6 in E2. 78
Preglednica 36: Primerjava vrednosti osvetljenosti z dnevno svetlobo med modelom E2 in modelom E3. 82
Preglednica 37: Celoletna analiza osvetljenosti prostora z dnevno svetlobo modela E3. 83
Preglednica 38: Izračun premalo osvetljenih površin v prostoru na letni ravni. 84
Preglednica 39: Urniki delovanja umetne razsvetljave. 84
Preglednica 40: Podatki o lastnostih izbranih svetilk. 84
Preglednica 41: Primerjava toplotnih dobitkov sončnega sevanja, energije potrebne za hlajenje in energije potrebne za ogrevanje stavbe na letni ravni med modeloma E2 in E3, ter kumulativne energije. 85
Preglednica 42: Primerjava rezultatov uporabe energije za hlajenje in ogrevanje ter kumulativne energije med modeloma E3 in E4. 86

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Primerjava povprečnih temperatur med virtualno vremensko postajo (podatki za leto 2006), meteorološko postajo Kočevje (podatki za leto 2006) in meteorološko postajo Kočevje (dolgoletno povprečje) [36]. 13
Grafikon 2: Urnik zasedenosti stavbe [50]. 24
Grafikon 3: Urnik delovanja elektronske opreme. 24
Grafikon 4: Urnik umetne razsvetljave. 25
Grafikon 5: Prejeto sončno sevanje na letni ravni. 35
Grafikon 6: Primerjava površine zasteklitve fasad in strehe med modelom 1 in modelom 6. 57
Grafikon 7: Primerjava WWR in SRR med modelom 1 in modelom 6. 57
Grafikon 8: Primerjava DPT med modelom 1 in modelom 6. 58
Grafikon 9: Primerjava UDI* med modelom 1 in modelom 6. 58
Grafikon 10: Prikaz mesečne uporabe energije za hlajenje stavbe – model E2, simulacija 1. 59
Grafikon 11: Prikaz mesečne uporabe energije za ogrevanje stavbe – model E2, simulacija 1. 60
Grafikon 12: Prikaz dobitkov sončnega sevanja – model E2, simulacija 1. 60
Grafikon 13: Transmisijske izgube skozi zasteklitev – model E2, simulacija 1. 61
Grafikon 14: Transmisijske izgube skozi zunanje stene – model E2, simulacija 1. 61
Grafikon 15: Prikaz mesečne uporabe energije za hlajenje stavbe – model E2, simulacija 2. 62
Grafikon 16: Prikaz mesečne uporabe energije za ogrevanje stavbe – model E2, simulacija 2. 63
Grafikon 17: Prikaz dobitkov sončnega sevanja – model E2, simulacija 2. 63
Grafikon 18: Transmisijske izgube skozi zasteklitev – model E2, simulacija 2. 64
Grafikon 19: Transmisijske izgube skozi zunanje stene – model E2, simulacija 2. 64
Grafikon 20: Prikaz mesečne uporabe energije za hlajenje stavbe – model E2, simulacija 3. 65
Grafikon 21: Prikaz mesečne uporabe energije za ogrevanje stavbe – model E2, simulacija 3. 65
Grafikon 22: Prikaz dobitkov sončnega sevanja – model E2, simulacija 3. 66
Grafikon 23: Transmisijske izgube skozi zasteklitev – model E2, simulacija 3. 66
Grafikon 24: Transmisijske izgube skozi zunanje stene – model E2, simulacija 3. 67
Grafikon 25: Prikaz mesečne uporabe energije za hlajenje stavbe – model E2, simulacija 4. 68
Grafikon 26: Prikaz mesečne uporabe energije za ogrevanje stavbe – model E2, simulacija 4. 68
Grafikon 27: Prikaz dobitkov sončnega sevanja – model E2, simulacija 4. 69
Grafikon 28: Transmisijske izgube skozi zasteklitev – model E2, simulacija 4. 69
Grafikon 29: Transmisijske izgube skozi zunanje stene – model E2, simulacija 4. 70
Grafikon 30: Prikaz mesečne uporabe energije za hlajenje stavbe – model E1, simulacija 5. 71
Grafikon 31: Prikaz mesečne uporabe energije za ogrevanje stavbe – model E1, simulacija 5. 71
Grafikon 32: Prikaz dobitkov sončnega sevanja – model E1, simulacija 5. 72
Grafikon 33: Transmisijske izgube skozi zasteklitev – model E1, simulacija 5. 72
Grafikon 34: Transmisijske izgube skozi stene – model E1, simulacija 5. 73
Grafikon 35: Prikaz primerjave mesečnih zahtev po hlajenju stavbe med modelom E1 in modelom E2. 74

Grafikon 36: Prikaz primerjave mesečnih zahtev po ogrevanju stavbe med modelom E1 in modelom E2. 75
Grafikon 37: Prikaz primerjave toplotnih dobitkov sončnega sevanja med modelom E1 in modelom E2. 75

KAZALO SLIK

Slika 1: Prikaz stavbnega ovoja s tipičnimi elementi: streha, zunanje stene, tla in okna. 4
Slika 2: Prikaz prehoda sončnega sevanja skozi tipično dvoslojno zasteklitev z low-E (prilagojeno po: [19]). 5
Slika 3: Okno z dvojno (levo) in trojno (desno) zasteklitvijo [24]. 6
Slika 4: Slika levo prikazuje kombinacijo kratkega nadstreška s horizontalnimi lamelami, srednja slika prikazuje vertikalne lamele in slika desno prikazuje senčilo iz horizontalnih lamel [26]. 7
Slika 5: Primer masivne opečne gradnje (levo) [27] in skeletne lesene gradnje (desno) [28]. 7
Slika 6: Vizualizacija obravnavanega računalniškega 3D-modela stavbe. 8
Slika 7: Tloris stavbe z označenimi smermi neba. 9
Slika 8: Prečni prerez stavbe. 9
Slika 9: Prikaz fasad stavbe. 9
Slika 10: Na sliki levo je prikazana lega Ribnice na območju Slovenije, srednja slika prikazuje Ribnico z bližnjo okolico, desna slika pa prikazuje predvideno lokacijo stavbe z bližnjimi objekti in ulicami [29]. 10
Slika 11: Potek izbire klimatskih podatkov v programu (prilagojeno po: [35]). 11
Slika 12: Prikaz izbire lokacije stavbe (označeno z rdečo oznako) in izbire vremenske postaje (označeno z oranžno oznako) [35]. 11
Slika 13: Dendrogram postopka dela od 1. do 4. sklopa. 16
Slika 14: Shema uporabne dnevne osvetljenosti UDI*. 18
Slika 15: Z zelenimi ploskvami definirana toplotna cona. 23
Slika 16: Potek simulacije energijske analize [50]. 29
Slika 17: 3D model za analizo prejetega sončnega sevanja. 32
Slika 18: Prikaz orientacije fasad glede na smer neba. 33
Slika 19: Grafični prikaz osončenosti na letni ravni. 34
Slika 20: Prikaz padanja senc ob dnevih 21.12. in 21.6. 35
Slika 21: 3D-prikaz modela 1. 36
Slika 22: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 12.00 – model 1 37
Slika 23: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 12.00 – model 1 37
Slika 24: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 12.00 – model 1 38
Slika 25: 3D-prikaz modela 2. 39
Slika 26: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 12.00 – model 2. 40
Slika 27: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 12.00 – model 2. 40
Slika 28: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 12.00 – model 2. 40
Slika 29: 3D prikaz modela 3. 41
Slika 30: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 12.00 – model 3. 42
Slika 31: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 12.00 – model 3. 42
Slika 32: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 12.00 – model 3. 43
Slika 33: 3D-prikaz modela 4. 44

Slika 34: Nadstrešek na JV strani objekta za namen senčenja spodnjega pasu zasteklitve. 44
Slika 35: Uporabljena strešna zasteklitev – model 4..... 44
Slika 36: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 12.00 – model 4. 46
Slika 37: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 12.00 – model 4. 46
Slika 38: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 12.00 – model 4. 46
Slika 39: 3D-prikaz modela 5. 48
Slika 40: Senčila, namenjena senčenju spodnjega pasu zasteklitve na JV fasadi. 48
Slika 41: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 12.00 – model 5. 50
Slika 42: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 12.00 – model 5. 50
Slika 43: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 12.00 – model 5. 50
Slika 44: 3D-prikaz modela 6. 52
Slika 45: Prikazane fasade modela 6. 52
Slika 46: Prerez zasteklitve na strehi. 53
Slika 47: Prerez senčil v modelu 6. 53
Slika 48: Prikaz senčil na JV fasadi modela 6. 54
Slika 49: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 12.00 – model 6. 55
Slika 50: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 12.00 – model 6. 55
Slika 51: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 12.00 – model 6. 55
Slika 52: Prikaz rezultatov sDA + ASE za model E2 (levo grafični prikaz, desno pogovorno okno). ... 79
Slika 53: Senčila pod strešnimi okni (levo-razširjena senčila, desno-zložena senčila). 79
Slika 54: Prerez senčil na JV fasadi (vhod) na sliki levo, prerez senčil na V fasadi na sliki desno. 80
Slika 55: Pogled na senčila na JV in V fasadi. 80
Slika 56: Prikaz rezultatov, s katerimi smo zadostili kriterijem sDA + ASE. 80
Slika 57: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 12.00 – model E3. 81
Slika 58: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 12.00 – model E3. 81
Slika 59: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 12.00 – model E3. 82

OKRAJŠAVE

ASHRAE	= Ameriško združenje inženirjev za ogrevanje, hlajenje in prezračevanje (angl. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)
BIM	= informacijski model stavbe (angl. *Building Information Model*)
LEED	= Mednarodno priznana shema za certificiranje projektiranja, gradnje, vzdrževanja in obratovanja poslovnih ter stanovanjskih objektov (angl. *Leadership in Energy and Environmental Design*)
DA	= avtonomija dnevne osvetljenosti (angl. *Daylight Autonomy*)
sDA	= prostorska avtonomija dnevne osvetljenosti (angl. *spatial Daylight Autonomy*)
cDA	= kontinuirana avtonomija dnevne osvetljenosti (angl. *continuous Daylight Autonomy*)
ASE	= letna izpostavljenost direktnemu sončnemu sevanju (angl. *Annual Sunlight Exposure*)
PURES	= Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah [10]
GBS	= oblačna storitev za izračune energijskih analiz (angl. *Green Building Studio*)
TSG-1-004:2010	= Tehnična smernica za graditev – Učinkovita raba energije [9]
UDI	= uporabna dnevna osvetljenost prostora (angl. *Useful Daylight Autonomy*)
UDI_{avg}	= povprečna uporabna dnevna osvetljenost prostora (angl. *Useful Daylight Autonomy Average*)
low-e	= nizkoemisijski nanosi
WWR	= razmerje med površino zasteklitve sten in celotno površino sten
SRR	= razmerje med površino zasteklitve strehe in celotno površino strehe
DPT	= delež zasteklitve glede na površino tal

SIMBOLI

λ = koeficient toplotne prevodnosti [W/mK]

LT = koeficient prepustnosti vidnega dela spektra sončnega sevanja

g = koeficient prepustnosti celotnega spektra sončnega sevanja

ε = emisivnost; predstavlja razmerje med količino energije, ki jo oddaja neko telo in količino energije, ki bi jo ob enakih temperaturnih pogojih oddajalo idealno črno telo

U = toplotna prehodnost konstrukcijskega sklopa [W/m^{2}K]. Je količina toplotne energije, ki v 1 s in pri temperaturni razliki 1 K prehaja skozi površino 1 m^2

c = specifična toplota materiala [J/g°C]

ρ = gostota materiala [kg/m^3]

C = toplotna masa [kJ/K]

R = toplotni upor [m^{2}K/W]

E = osvetljenost; predstavlja gostoto svetlobnega toka, ki pade na določeno ploskev [lx]

lx = enota za osvetljenost (lx = lm/m^2 = (cd*sr)/m^2)

1.0 UVOD

Globalno segrevanje ni več stvar prihodnjih generacij, temveč smo mu priča že danes. Vplivi globalnega segrevanja so v vsakdanjem življenju vedno bolj opazni v obliki ekstremnih vremenskih pojavov, kot so suše, močna neurja, poplave, vročinski valovi poleti ter milejše zime [1]. Glavni krivec za globalno segrevanje je toplogredni plin ogljikov dioksid, katerega v ozračje spuščamo tudi ljudje s svojim življenjskim slogom. Da bi omilili vpliv globalnega segrevanja v prihodnosti, je Evropska unija sprejela Energetsko strategijo 2050 (ang. *2050 Energy strategy*), katera stremi k zmanjšanju izpustov toplogrednih plinov za od 80-95% glede na leto 1990 in povečanju rabe energije, proizvedene iz obnovljivih virov energije, za 55% [2]. Do izpolnitve strategije 2050 Evropska unija predvideva še dve strategiji, in sicer Energetsko strategijo 2020 in Energetsko strategijo 2030. Energetska strategija 2020 [3] predvideva zmanjšanje izpustov toplogrednih plinov za 20% glede na leto 1990 do leta 2020, delež energije, pridobljene iz obnovljivih virov, naj bi se povečal za 20%, uporaba energije pa zmanjšala za 20%. Energetska strategija 2030 [4] pogoje, predvidene za leto 2020, še dodatno zaostri s 40-odstotnim zmanjšanjem emisij toplogrednih plinov glede na leto 1990 in povišanjem deleža rabe energije, pridobljene iz obnovljivih virov, za 27%.

Izpolnjevanje energetskih strategij direktno vpliva na načrtovanje stavb; te se morajo in se bodo morale tudi v prihodnje prilagajati tako zahtevam omenjenih strategij kot tudi podnebnim spremembam. Predvsem zmanjšanje izpustov toplogrednih plinov narekuje prilagajanje stavb novim zahtevam, saj so stavbe med največjimi porabniki energije, proizvedene na primarni ravni. Ocenjuje se, da stavbe v Evropski uniji uporabijo 40% vse proizvedene primarne energije ter v ozračje izpustijo 36% vseh emisij CO_2 [5].

Stavbe, prilagojene nizki uporabi energije, morajo imeti pametno zasnovan stavbni ovoj (povezava med zunanjostjo in notranjostjo stavbe), ki omogoča dobro toplotno izolativnost, obenem pa tudi izkoriščanje dnevne svetlobe za osvetljevanje notranjosti, saj nestanovanjske stavbe povprečno porabijo 32% električne energije za umetno razsvetljavo [6]. Z zadostno toplotno izolativnostjo stavbnega ovoja zmanjšamo potrebe po energiji za ogrevanje in hlajenje, z zadostno količino dovedene dnevne svetlobe v prostor pa se zmanjšajo potrebe po električni energiji za delovanje umetne razsvetljave [7]. Ob tem pa morajo biti stavbe sprejemljive za lokalno okolje, v katerem se nahajajo, in upoštevati želje uporabnikov stavb.

Za načrtovanje visoko učinkovitega stavbnega ovoja trgovskega centra smo uporabili sodobno programsko opremo, ki omogoča celovito energijsko analizo in simulacijo dnevne svetlobe z uporabo enega računalniškega programa. Izračuni energijske analize temeljijo na ameriški standardih ASHRAE (angl. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning*) [8]. Zahtevam TSG-1-004:2010 (Tehnična smernica za graditev - Učinkovita raba energije) [9] smo lahko prilagodili bistvene vhodne podatke o gradbeno-fizikalnih lastnostih stavbnega ovoja ter toplotnih conah, končne rezultate energijske analize pa smo primerjali z zahtevami PURES-a (Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah) [10]. Pri načrtovanju stavbnega ovoja smo uporabljali elemente, ki so aktualni na trgu gradbenih proizvodov in jih je možno aplicirati na stavbo v primeru realizacije investicije.

1.1 Tematika in namen magistrskega dela

V magistrskem delu bomo obravnavali manjši trgovski center z vidika osvetljenosti z dnevno svetlobo in uporabe energije v arhitekturno-načrtovalskem BIM (angl. *Building Information Modeling*) programu Autodesk Revit 2017 [11] (v nadaljevanju *Revit*). Namen dela je, da na osnovi pridobljenega idejnega projekta poskušamo izboljšati in optimizirati osvetljenost z dnevno svetlobo ter hkrati reducirati porabo energije stavbe za ogrevanje in hlajenje. Obenem pa želimo tudi preveriti učinkovitost in smiselnost uporabe programa Revit ter dodatkov za analizo dnevne osvetljenosti in energijske analize v začetnih fazah projektiranja.

1.2 Izhodiščne hipoteze

Hipoteze, ki smo jih preverjali v magistrskem delu, so:

1. Obstoječa izhodiščna zasnova stavbe bo zaradi velikih nesenčenih transparentnih površin, orientiranih predvsem proti V, JV in JZ, v poletnem času nagnjena k pregrevanju.
2. Izhodiščna zasnova stavbe bo neprimerno osvetljena z dnevno svetlobo.
3. Z optimizacijo transparentnih elementov stavbnega ovoja je možno doseči boljšo osvetljenost stavbe z naravno svetlobo.
4. Z optimizacijo stavbnega ovoja je možno zmanjšati potrebo po energiji za hlajenje stavbe, vendar zaradi zmanjšanja velikih steklenih površin povečamo potrebno energijo za ogrevanje stavbe, kumulativna uporaba energije je kljub temu manjša od izhodiščne zasnove stavbe.

1.3 Pregled literature

Glavnino literature, ki zadeva osvetljenost z dnevno svetlobo in energijsko učinkovitost stavb, smo pridobili iz strokovnih člankov na spletni strani Science Direct [12]. Tematika o osvetljenosti z dnevno svetlobo in porabi energije v stavbah je precej raziskana, vendar člankov, ki bi vsebovali tudi študije v trgovskih centrih praktično ni, zato smo uporabili študije, izvedene na primerih poslovnih in industrijskih zgradb ter šolskih učilnic. Preučili smo 6 izbranih člankov, predstavljenih v nadaljevanju.

Chen J. in sod. [6] v svojem delu opisujejo, kako učinkovita osvetljenost prostora z dnevno svetlobo zmanjšuje porabo energije stavbe v veliki industrijski stavbi. Ker večina študij s podobno tematiko analizira pisarniške stavbe, so se Chen J. in sod. osredotočili na industrijske stavbe, kjer umetna razsvetljava v večini primerov predstavlja glavnega porabnika električne energije. Izvedli so računalniško simulacijo in eksperimentalno študijo. Računalniška simulacija je bila izvedena s programoma Ecotect in Desktop Radiance. Za eksperimentalno študijo distribucije dnevne svetlobe so uporabili mrežo 6 m x 6 m in meritve izvedli na sončen spomladanski dan v štirih časovnih periodah po 1,5 h od 9.00 do 16.30. Primerjava eksperimentalne študije in računalniška simulacije je pokazala dobro ujemanje med rezultati. Simulacija porabe električne energije z interakcijo umetne razsvetljave in dnevne svetlobe je bila izvedena za dva primera regulacije umetne razsvetljave, in sicer kot regulacija On/Off ali regulacija z možnostjo zatemnitve svetil. Potencial prihrankov električne energije med regulacijo On/Off in zatemnitvijo je bil 36,1% oz. 41,5%, kar pa je sicer nekoliko povišalo potrebo po energiji za ogrevanje za 7,1% oz. 8,7%.

Krstić-Furundžić A. in Kosić T. [13] sta na primeru pisarniške stavbe analizirala vpliv različnih zasnov stavbnega ovoja na energijsko učinkovitost stavbe. Analizirani so bili trije hipotetični modeli z različnimi zasnovami fasad. Največji poudarek je bil na fasadi, ki je bila obrnjena na glavno ulico. Prvi model je bil zasnovan s klasično fasado in okni, drugi model je imel večjo zastekljeno površino, narejeno iz toplotno

izolativnih panelov, v tretjem modelu pa je bila uporabljena steklena fasada s troslojno zasteklitvijo z nizkoemisijskim premazom. Avtorja članka sta za posamezne modele analizirala še možnost senčenja z notranjimi senčili s faktorjem senčenja 60%, senčenje z zunanjimi žaluzijami pod kotom 45° in 10% faktorjem senčenja, ter varianto brez senčil. Ugotovili so, da se je drugi model pri porabi energije za ogrevanje in hlajenje na letni ravni izkazal najslabše. Z izboljšanim U-faktorjem zasteklitve z 2,7 W/m^{2}K na 0,7 W/m^{2}K zmanjšamo porabo energije na letni ravni za skoraj 50%. V primeru senčil z zunanjimi žaluzijami pa so zabeležili 40-50% zmanjšanje porabe energije za ogrevanje in hlajenje v primerih pretežno zastekljene fasade.

Capeluto I.G. [14] je v svojem delu obravnaval samosenčene stavbe oz. fasade in vpliv na energijsko učinkovitost. Ugotovil je, da najbolj optimalno rešitev predstavlja zamik gornjih etaž stavbe za kot 31° merjeno od parapetov okenskih površin spodnje etaže do zunanjega roba zgornje etaže. Avtor opisuje, da najboljšo rešitev za vzhodno in zahodno orientacijo predstavlja samosenčena fasada z uporabo notranjih senčil, ki se uporabijo po potrebi, medtem ko na južnih samosenčenih fasadah notranja senčila niso potrebna.

Zhang A. in sod. [15] so v svoji raziskavi skušali najti kompromis med zmanjšanjem uporabe energije za ogrevanje in razsvetljavo; poskušali so poleti reducirati čas, ko se pojavlja toplotno neudobje, in maksimalno izkoristiti uporabno povprečno dnevno osvetljenost prostora UDI_{avg} (angl. Useful Daylight Autonomy Average) 100-2000 lx v šolski stavbi. Simulirali so različne prostorske konfiguracije z upoštevanjem orientacije, globine prostora, deleža zasteklitve sten, tipa zasteklitve in senčenja. S svojim pristopom so uspeli zmanjšati porabo energije za ogrevanje in razsvetljavo za 24-28%, izboljšali so toplotno udobje v poletnem času za 9-23% in dvignili vrednosti UDIavg za 15-63%. (UDI je metrika za ocenjevanje ravni osvetljenosti prostora z dnevno svetlobo in je definirana z mejnimi vrednostmi med 100 lx do 2000 lx [16]. Enako pomeni tudi UDI_{avg}, le, da gre tu za povprečje več izračunanih časovnih obdobij.)

Singh R. in sod. [17] so s programom EnergyPlus izvedli simulacijo energijske učinkovitosti in vizualnega udobja v pisarni velikosti 4 m x 4 x m x 3 x m. Preučevali so vpliv kombinacije deleža zasteklitve stene, senčila, različne variante dvoslojnih zasteklitev in orientacije za vse štiri glavne smeri neba. Deleži zasteklitve sten so znašali 30%, 60% oz. 90%. Za vsako kombinacijo prej omenjenih parametrov so analizirali porabo energije, potencial prihrankov energije, avtonomijo dnevne svetlobe oz. DA (angl. *Daylight Autonomy*), uporabno dnevno svetlobo oz. UDI (angl. *Useful Daylight Illuminance*) ter merili čas, ko se je v prostoru pojavljalo bleščanje. (DA je tako kot UDI metrika za ocenjevanje ravni osvetljenosti prostora z dnevno svetlobo, le da je določena le spodnja meja osvetljenosti, ki znaša 300 lx [16].)

Negendahl K. in Nielsen R.T. [18] v svojem delu opisujeta poenostavljeno metodo celostnega načrtovanja energijske uporabe stavbe v začetnih fazah, ki obravnava več vidikov: rabo energije, stroške energije, distribucijo dnevne svetlobe in notranje toplotno okolje. Ugotovili so, da je takšno celostno obravnavanje stavbe v začetnih fazah precej negotovo in tvegano, vendar je vseeno priporočljivo objekt že v začetku načrtovanja smiselno obravnavati tudi iz omenjenih vidikov.

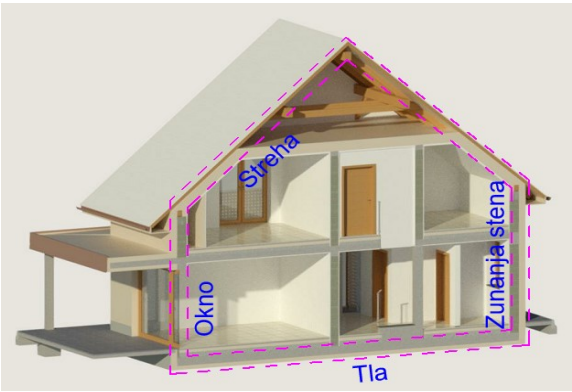
Po pregledani literaturi lahko povzamemo, da je smiselno uporabiti zasteklitev z možnostjo senčenja, predvsem na južno orientiranih fasadah. Senčenje je lahko fiksno z nadstreški ali s pomičnimi senčili. Z ustrezno dimenzionirano zasteklitvijo, pri kateri naj bo delež zasteklitve sten nekje od 30-60%, in strešno zasteklitvijo z okrog 5% deležem bomo v prostoru dosegli dokaj enakomerno distribucijo dnevne svetlobe ter dovolj solarnih dobitkov pozimi, s čimer zmanjšamo potrebe po ogrevanju, v poletnem času pa s kombinacijo senčenja in primerne zasteklitve zmanjšamo solarne pritoke in s tem pregrevanje stavbe ter skušamo izničiti neprijetno bleščanje v prostorih in na delovnih ravninah. Poraba električne

energije v stavbah, kjer je potrebna konstantna in visoka osvetljenost za nemoteno izvajanje delovnih procesov, se v primeru dobre osvetljenosti z dnevno svetlobo zmanjša tudi do 30%, prav tako tudi uporaba energije za hlajenje in ogrevanje v kombinaciji z učinkovito toplotno izolacijo preostalega stavbnega ovoja. Iz literature lahko razberemo, da so simulacije energijske analize in analize osvetljenosti z dnevno svetlobo v zgodnjih fazah načrtovanja dobrodošle. Ne moremo sicer že v fazah idejnih zasnov točno definirati, kakšne bodo dejanske zasteklitve, senčenje in toplotna izolacija, pomaga pa nam, da v nadaljevanju načrtovanja zgradbe predvidimo, kako bo na določen parameter vplival posamezen ukrep. S pomočjo vmesnih analiz in simulacij uporabe energije in distribucije dnevne svetlobe končni izdelek ne bo bistveno odstopal od zastavljenih ciljev.

1.4 Vpliv zasnove stavbnega ovoja na porabo energije in notranje okolje

Notranje grajeno okolje je okolje, ki ga ustvari človek za namen svojega bivanja in funkcioniranja znotraj sociološko-ekonomskega sistema. Notranje okolje stavbe določa stavbni ovoj s funkcijo hidroizolacije, toplotne izolacije, zvočne izolacije, psihofizične zaščite, komunikacije, nosilne konstrukcije ipd., ki notranje okolje ločuje in povezuje s širšim zunanjim okoljem. S stavbnim ovojem tako ustvarimo v notranjem okolju parametre, ki so različni od parametrov zunanjega okolja. Med notranjostjo in zunanjostjo skozi stavbni ovoj poteka izmenjava energije, snovi in informacij [19]. Stavbni ovoj vpliva na človekovo udobje v prostoru, na njegovo zdravje in produktivnost, saj z izbiro stavbnega ovoja vplivamo na toplotno in zvočno udobje prostora ter vizualno udobje (npr. kontroliranje bleščanja v prostoru), kot tudi na povezavo z naravnim okoljem. Hkrati stavbni ovoj daje uporabnikom občutek varnosti pred neželenimi posegi v stavbo (npr. vlomi), možnost pregleda nad dogajanjem okrog stavbe, ščiti pred vremenskimi nevšečnostmi in požarom [20]. Izbira stavbnega ovoja je odvisna od kulturoloških vplivov lokacije, kjer se stavba nahaja, tehnoloških zmožnostih in klimatoloških lastnosti lokacije [19]. Visokoučinkovit stavbni ovoj je celovit sistem, ki vključuje zagotavljanje zadostne osvetljenosti notranjih prostorov z dnevno svetlobo, nadzor nad toplotnimi dobitki sončnega sevanja, prezračevanje, toplotno udobje v prostoru, obenem pa zagotavlja zdravo okolje za bivanje ljudi [21]. Transparentni deli predstavljajo največji delež na osončenih straneh stavbnega ovoja (južno orientirane fasade in strehe), netransparetni deli pa največji delež predstavljajo v konstrukcijah v stiku s tlemi in na severno orientiranih straneh ter se proti južno orientiranim delom zmanjšujejo.

Stavbni ovoj sestoji iz dveh delov: transparentnega in netransparentnega (Slika 1). Transparentni del predstavljajo okna, vrata, svetlobniki ter ostali prosojni elementi, ki služijo predvsem prepuščanju sončnega sevanja in s tem dnevne svetlobe ter zagotavljajo kontakt z zunanjostjo. K transparentnemu delu ovoja štejemo tudi senčila, s katerimi kontroliramo vdor sončnega sevanja, izboljšamo varnost stavbe ter zagotavljamo zasebnost uporabnikov stavbe. Netransparentni del stavbnega ovoja predstavljajo streha, zunanje stene in tla. V kontekstu uporabe energije je netransparentni del zanimiv predvsem z gledišča zagotavljanja toplotne izolacije in akumulacije toplote [19].



Slika 1**: Prikaz stavbnega ovoja s tipičnimi elementi: streha, zunanje stene, tla in okna.**

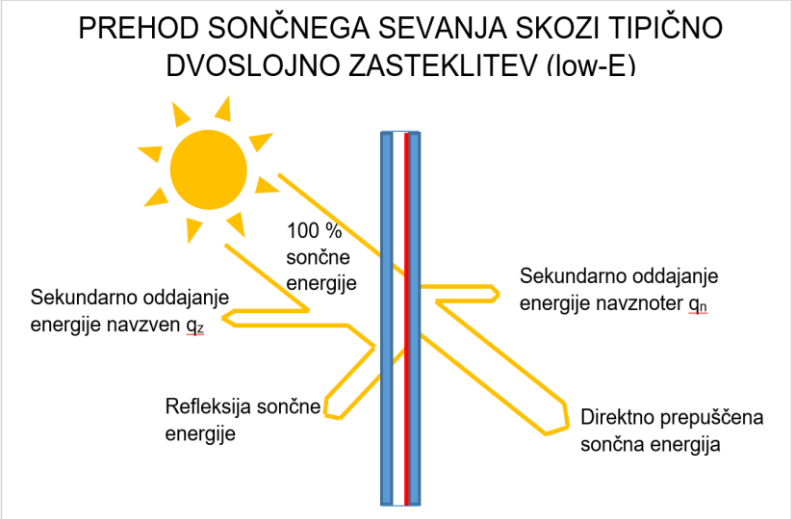
Pri načrtovanju netransparetnega dela v smislu učinkovite rabe energije se je potrebno zavedati, da s tem delom ovoja najbolj vplivamo na akumulacijo toplote in toplotno izolativnost, s transparentnim delom

pa najbolj vplivamo na solarne dobitke v stavbi, osvetljenost prostora z dnevno svetlobo in transmisijske izgube v zimskem času.

Ker želimo v stavbi dosegati dobro osvetljenost prostorov z dnevno svetlobo, hkrati pa imeti energijsko varčno stavbo, je potrebno pri načrtovanju razmerja zasteklitve sten glede na celotno površino fasad WWR (ang. *window to wall ratio*) ali strehe SRR (ang. *skylight to roof ratio*) iskati kompromise med površino zasteklitve in površino sten ter strehe. Velike zastekljene površine, orientirane od JV do JZ, nam v zimskem času sicer lahko prinašajo relativno visoke solarne dobitke, v poletnem času pa zaradi tega prihaja do pregrevanja stavbe; če ni zagotovljeno senčenje teh površin, se lahko v prostorih pojavi tudi problem bleščanja zaradi prevelikih vrednosti osvetljenosti z dnevno svetlobo. Količnik WWR v celinskih podnebjih naj ne bi bil večji od 40%, medtem ko naj bo količnik SRR med 3% in 6% [22].

1.4.1 Transparentni del stavbnega ovoja

Steklo je najpogosteje uporabljani element transparentnega dela stavbnega ovoja, V gradbeništvu se uporablja steklo, ki je v osnovi sestavljeno iz zmesi kremenčevega peska, dolomita, apnenca, sulfata in natrijevega karbonata, lahko so dodana tudi barvila. Takšno steklo ima gostoto približno 2500 kg/m^3, je dober električni izolator in relativno slab toplotni izolator s koeficientom toplotne prevodnosti λ približno 0,8 W/mK. Zasteklitev del sončnega sevanja reflektira navzven, del ga absorbira, preostanek pa prepusti v prostor, kar vpliva na toplotne dobitke v prostoru (Slika 2) [23]. Pomembna optična lastnost zasteklitve z gledišča prehoda sončnega sevanja je prepustnost za vidni del sončnega spektra (380-750 nm) in jo označimo z LT. Druga pomembna optična lastnost je g-faktor zasteklitve, ki nam pove, kolikšna je prepustnost za celoten del sončnega spektra (380-2500 nm). Ti dve lastnosti sta odvisni od vpadnega kota sončne svetlobe, barve zasteklitve, števila stekel ter lastnosti uporabljenih nizkoemisijskih low-e nanosov in spektralno-selektivnih nanosov [19].



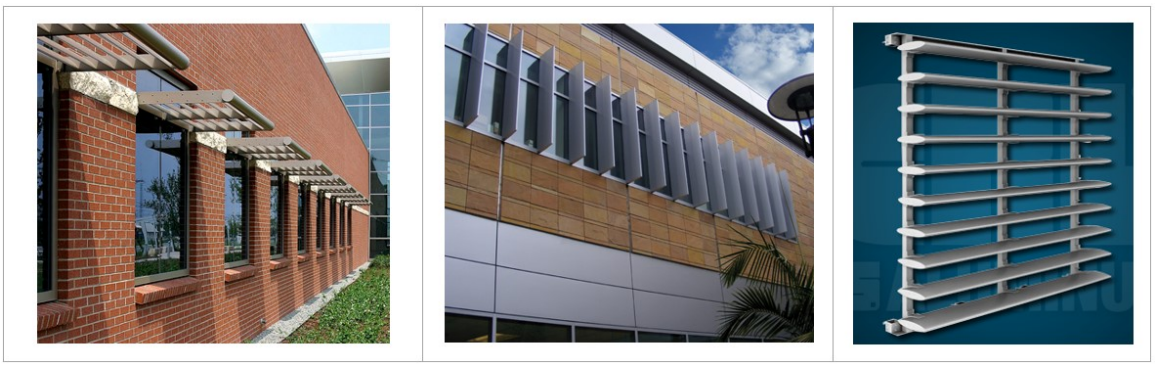
Slika 2: Prikaz prehoda sončnega sevanja skozi tipično dvoslojno zasteklitev z low-E (prilagojeno po: [19]).

Toplotne izgube skozi zasteklitev potekajo s kondukcijo, konvekcijo in sevanjem. Sevalne izgube pri običajnih zasteklitvah znašajo 2/3 celotnih toplotnih izgub zasteklitve, konvekcijske in kondukcije toplotne izgube skupaj pa 1/3. Navadno okensko steklo toplotnega sevanja ne reflektira, temveč ga absorbira in s tem segreje, nato pa s sevanjem oddaja toploto v okolico. Z večanjem števila plasti stekel zasteklitev se sicer izboljša toplotna zaščita zasteklitve, vendar se s tem zmanjšuje prepustnost zasteklitve za sončno sevanje, ki v zimskem času in prehodnih obdobjih znatno prispeva k toplotni bilanci stavbe. Zato se je razvoj zasteklitev, namesto v povečevanje števila plasti stekel v zasteklitvah, usmeril v razvoj low-e nanosov in s tem k zmanjšanju sevalnih izgub. Emisivnost ε navadnega stekla je v povprečju malo nad 0,8, z nanašanjem za oko nevidnih kovinskih oksidov pa se ε površine stekla zmanjša do vrednosti 0,04. Zasteklitve z low-e nanosi dobro prepuščajo kratkovalovno sončno sevanje, močno pa zmanjšujejo dolgovalovno sevanje, ki ga oddajajo segreti predmeti v prostoru. Low-e nanosi

tako dolgovalovno sevanje odbijajo nazaj v prostor namesto navzven. Pri toplotno zaščitnih zasteklitvah se low-e nanosi nanašajo v medstekelni prostor na steklo, ki meji v prostor. Konvekcijske toplotne izgube se pri zasteklitvah pojavljajo v medstekelnem prostoru, ki je običajno napolnjen z žlahtnim plinom (najpogosteje sta uporabljena argon ali kripton). Za preprečevanje prepuščanja vodne pare v medstekelni prostor in preprečevanje uhajanje polnilnega plina iz medstekelnega prostora so steklene plošče, ki sestavljajo zasteklitev, po robovih spojene s tesnili. Tesnilo predstavlja pri zasteklitvah z low-e nanosi največje toplotne izgube, ki potekajo s kondukcijo. Toplotna prehodnost U [W/m^{2}K] zasteklitve je tako odvisna od vseh treh sestavnih delov zasteklitve – polnila, low-e nanosov in tesnila [23]. V praksi se najpogosteje uporabljajo zasteklitve z dvojno ali trojno zasteklitvijo s toplotno prehodnostjo od U = 0,7 W/m^{2}K (trojna zasteklitev) do U = 1,1 W/m^{2}K (dvojna zasteklitev) z low-e nanosi (Slika 3).

Slika 3: Okno z dvojno (levo) in trojno (desno) zasteklitvijo [24].

Za regulacijo vpada sončnega sevanja in svetlobnih razmer v prostoru na območjih transparentnih delov stavbnega ovoja, ki so izpostavljena sončnemu sevanju, je smiselno uporabiti senčila. Podnebne razmere, funkcija stavbe in vir svetlobe, ki ga je potrebno regulirati, nam pogojujejo zasnovo ustreznih senčil. Senčila so lahko notranja ali zunanja. Notranja senčila se nahajajo v prostoru ali med stekli in so namenjena predvsem vzpostavljanju zasebnosti in nadzoru osvetlitve, ne preprečujejo pa segrevanja prostora. Najenostavnejša notranja senčila so zavese, roloji ali žaluzije. Za nadzor direktnega sončnega sevanja in dnevne osvetljenosti so učinkovita zunanja senčila. Obstaja več različnih oblik senčil; nekatera je bolj smiselno uporabiti na južno orientiranih površinah, druga je bolj smiselno vgraditi na vzhodno in zahodno orientirane površine stavbnega ovoja. Na južnih površinah je najbolj enostavna izbira fiksnih horizontalnih senčil, to so lahko napušči, kratki nadstreški, izdelani kot ploskovni elementi, balkoni ali iz lamel sestavljeni elementi, ki omogočajo odzračevanje toplega zraka, blokirajo direktno sevanje in prepuščajo difuzno sevanje. Senčenje vzhodno in zahodno orientiranih zasteklitev zahteva izredno dolge horizontalne nadstreške, s tem pa omejimo vpad svetlobe globje v prostor. Z uporabo premičnih senčil lahko učinkovito senčimo praktično vse zasteklitve ne glede na orientacijo, saj s premikanjem senčil rešimo problem prilaganja zunanjim razmeram. Pod pomična senčila spadajo vertikalne lamele, horizontalne lamele, žaluzije, rolete, polkna in zasloni, poleg senčenja pa lahko opravljajo tudi vlogo nočne izolacije. Premikanje senčil je lahko vodeno avtomatsko, kar je primerno predvsem pri nestanovanjskih stavbah in večjih zastekljenih površinah, kjer je bistven pravočasni odziv na zunanje razmere. Za izboljšanje osvetljenosti prostora in hkrati senčenja zasteklitve lahko uporabimo svetlobne police, ki delijo zasteklitve na dva dela. Spodnji del zasteklitve se senči, skozi zgornji del zasteklitve pa polica odbije svetlobo v prostor proti stropu [25]. Na podoben način kot svetlobno polico lahko izkoristimo tudi ustrezno oblikovane lamele ali žaluzije, izdelane iz pocinkane pločevine, aluminija ali PVC-ja, ki nam svetlobo reflektirajo v strop [21]. Na sliki 4 prikazujemo tri različne tipe senčil, ki ponazarjajo nekatere zgoraj opisane izvedbe senčil.



Slika 4: Slika levo prikazuje kombinacijo kratkega nadstreška s horizontalnimi lamelami, srednja slika prikazuje vertikalne lamele in slika desno prikazuje senčilo iz horizontalnih lamel [26].

1.4.2 Netransparentni del stavbnega ovoja

Nosilne konstrukcije netransparentnih delov so lahko izvedene kot masivne konstrukcije (ploskovne konstrukcije iz opeke, betona, kamna, masivnega lesa) ali pa kot skeletni sistemi (linijske konstrukcije iz lesa, jekla, betona). Na sliki 5 prikazujemo primerjavo med masivno in skeletno konstrukcijo.

Slika 5: Primer masivne opečne gradnje (levo) [27] in skeletne lesene gradnje (desno) [28].

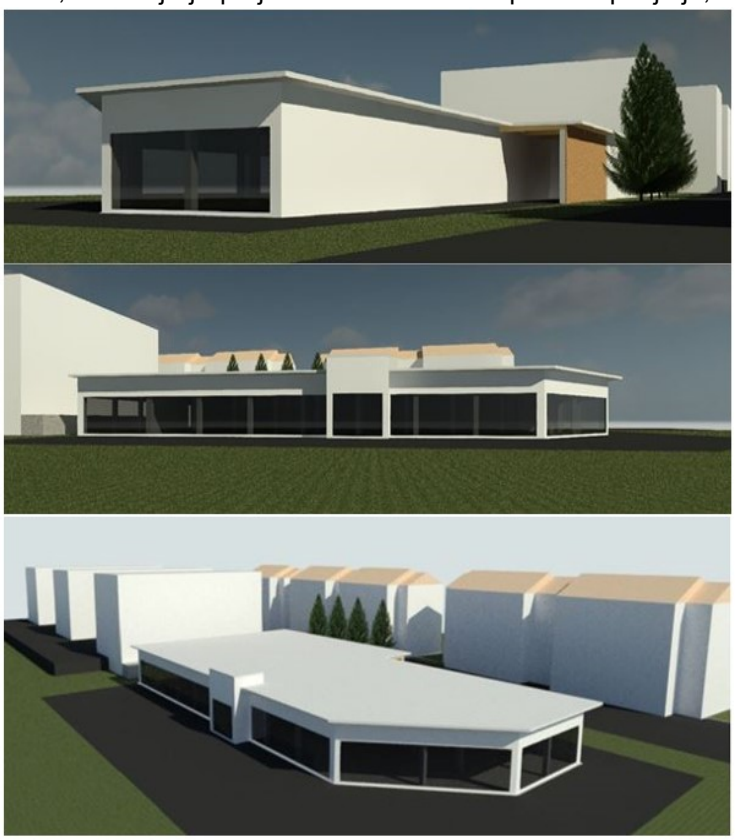
Nosilnim konstrukcijam je z notranje in/ali zunanje strani dodano več zaporednih plasti s funkcijami toplotne izolacije, hidroizolacije, prezračevanja, zaščite pred vetrom, zaščite pred kondenzacijo vodne pare itd., ki skupaj tvorijo konstrukcijski sklop. Netransparentni deli največ pripomorejo k toplotni izolativnosti stavb; izpolnjevati morajo zahteve Tehničnih smernic TSG-1-004:2010 glede največje dovoljene toplotne prehodnosti konstrukcijskega sklopa U, ki znaša za zunanje stene U_{sten} = 0,28 W/m^{2}K, za strehe U_{strehe} = 0,20 W/m^{2}K in za tla v stiku s terenom U_{tal} = 0,35 W/m^{2}K.

Poleg toplotne izolativnosti netransparentni deli stavbnega ovoja omogočajo tudi akumulacijo toplote. Netransparetni deli, izvedeni z masivnimi nosilnimi konstrukcijami, zaradi sposobnosti velike akumulacije ne omogočajo hitrega toplotnega odziva sistema, medtem ko skeletne konstrukcije nimajo sposobnosti velike akumulacije toplotne mase in s tem omogočajo hiter toplotni odziv sistema, kar v določenih klimatskih pogojih in načinih uporabe stavb ni zaželeno [19].

2.0 PREDSTAVITEV OBRAVNAVANE STAVBE IN PODNEBNIH LASTNOSTI LOKACIJE

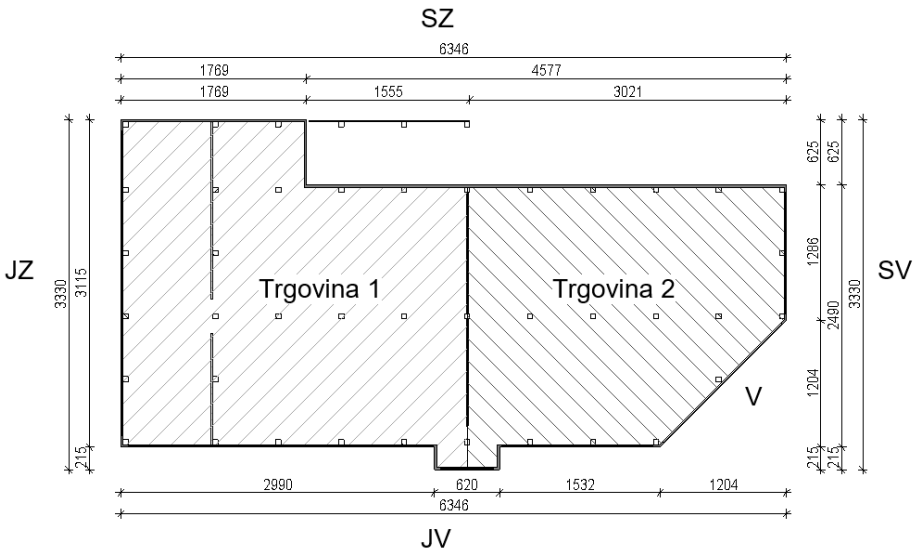
2.1 Opis obravnavane stavbe in podatki o lokaciji

Stavba, ki jo bomo v nalogi obravnavali, je manjši trgovski center, v katerem sta predvideni dve večji trgovini ali tri do štiri manjše. Za potrebe naloge smo predvideli dve večji trgovini z varianto, da je večja izmed njih še dodatno pregrajena ter s tem razdeljena na dva prostora znotraj ene trgovine. Po klasifikaciji stavb CC-SI se uvršča med nestanovanjske trgovske stavbe s klasifikacijsko številko 12301. Idejna zasnova, na podlagi katere smo izdelali računalniški 3D-model (Slika 6), je bila narejena leta 2015, izdelal jo je projektivni biro RMA za potrebe podjetja, ki se ukvarja s prodajo vrtnega pohištva, izdelkov za strojništvo in gradbeništvo. V pomoč pri izdelavo modela so bile 2D-risbe s tlorisi in prerezi ter 3D-skice stavbe. Vertikalno nosilno konstrukcijo trgovskega centra predstavlja skelet z armiranobetonskimi stebri, horizontalno pa lepljeni leseni nosilci, ki povezujejo stebre v prečni smeri stavbe. Stene, ki mejijo na zunanjost stavbe, predstavljajo fasadni toplotno izolativni paneli, ravno streho pa strešni paneli. Predviden sestav talne konstrukcije je armiranobetonska temeljna plošča na toplotni izolaciji. Zunanje površine stavbe predstavljajo asfaltirano parkirišče in travnati deli z nekaj drevesi na SZ strani. Blokovska naselja na SZ in JZ strani stavbe segajo v višino 20 m, od obravnavane stavbe so oddaljena najmanj 5 m na JZ strani in 30 m na SZ strani stavbe.

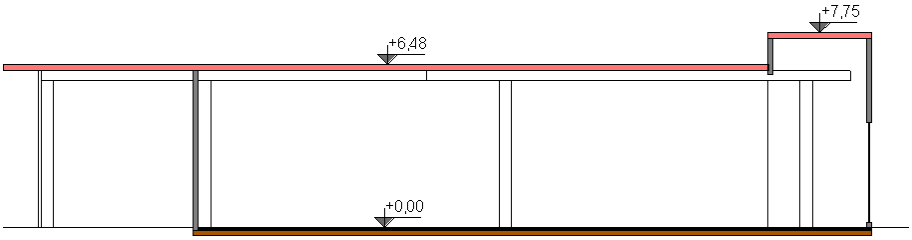


Slika 6: Vizualizacija obravnavanega računalniškega 3D-modela stavbe.

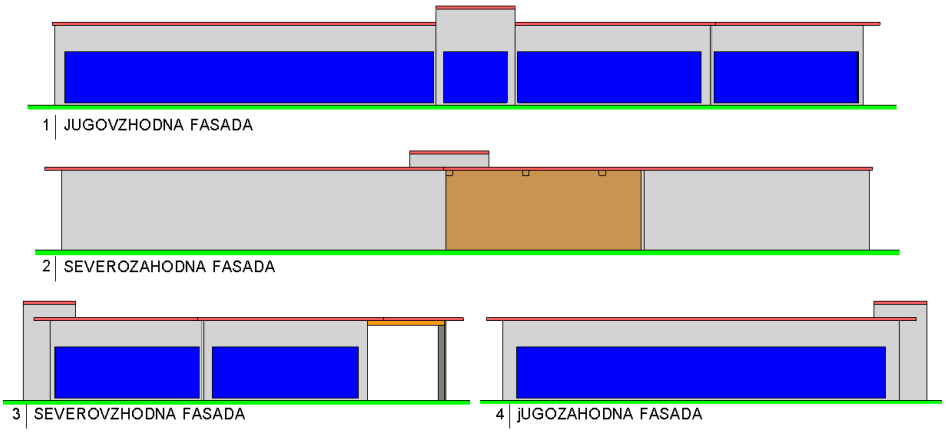
Tloris stavbe (Slika 7) je nepravilne oblike z eno stranico bistveno daljšo od druge, orientacija v vzdolžni smeri poteka od SV proti JZ. V vzdolžno smer meri 63,5m, v prečno smer pa je največja dimenzija 33,3 m. Vhod v objekt se nahaja na JV strani in delno izstopa iz celotnega kubusa stavbe, vzhodna fasada pa se poševno priključi iz JV fasade v SV fasado pod kotom 45°. Na SZ delu stavbe se nahaja skladišče in manjša nadstrešnica, namenjena dostavnim vozilom, ki je s SZ strani zaprta. Prostor stavbe se deli na dva dela, na trgovino 1 in trgovino 2. Neto tlorisna površina tal meri 1584 m^2, neto prostornina znaša 9862 m^3. Za neto površino strehe bomo označili samo tisti del strehe, ki je viden znotraj stavbe brez napuščev in nadstrešnice ter tako znaša 1584 m^2, enako kot neto tlorisna površina tal, skupaj z napušči in nadstrešnico pa površina strehe znaša 1919 m^2. V višino stavba meri 6,5 m oz. 7,8 m nad vhodom in po celotni površini obsega eno etažo. Zastekljene površine stavbe se nahajajo na JV, V, SV in JZ fasadi. Omenjene fasade so zastekljene po celotni dolžini sten z višino zasteklitve 4,0 m in parapetom višine 0,2 m. Prečni prerez stavbe prikazujemo na sliki 8, fasade pa so prikazane na sliki 9.



Slika 7: Tloris stavbe z označenimi smermi neba.



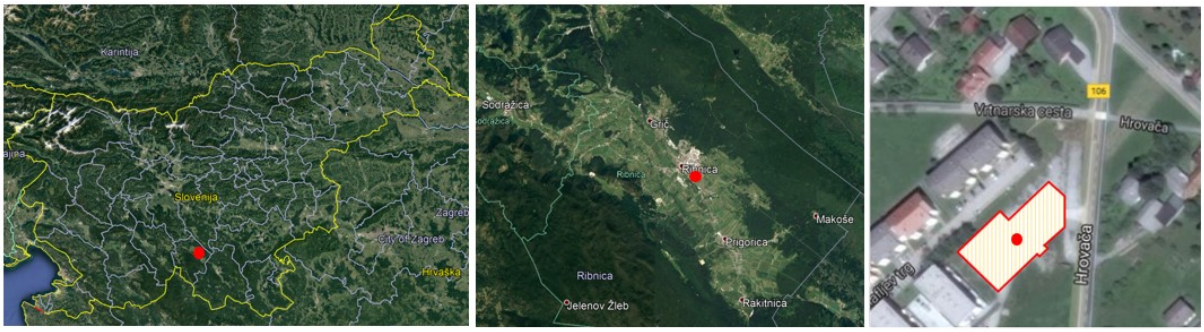
Slika 8: Prečni prerez stavbe.



Slika 9: Prikaz fasad stavbe.

Predvidena lokacija stavbe (Slika 10) je v Ribnici na Dolenjskem, katastrska občina 1626-Goriča vas, v neposredni bližini blokovskih naselij Knafljev trg in Zlata Ribica ter tik ob glavni cesti Ljubljana-Kočevje. Koordinatne točke predvidene lokacije stavbe so 45°44' severne geografske širine in 14°44' vzhodne geografske dolžine, nadmorska višina Ribnice znaša 492 m [29].

Ribnica je del Ribniške doline, ki leži sredi ravnine ribniškega polja v JV Sloveniji ob Dinarski pregradi, med grebenoma Male gore na SV, Velike gore na JZ, s SZ smeri jo omejujejo Slemena in na JV hrib Strmec. Prav zaradi visoke nadmorske višine in relativne bližine Velike gore sonce v zimskem času hitro zaide, medtem ko je poleti ta vpliv nekoliko manjši.



Slika 10: Na sliki levo je prikazana lega Ribnice na območju Slovenije, srednja slika prikazuje Ribnico z bližnjo okolico, desna slika pa prikazuje predvideno lokacijo stavbe z bližnjimi objekti in ulicami [29].

2.2 Klimatski podatki

Podnebje na območju JV Slovenije je zmerno celinsko s hladnimi in dolgimi zimami in vročimi poletji [30] s povprečnimi temperaturami pod 0°C v najhladnejših mesecih in s temperaturami nad 30°C [31] v času poletja. Podnebje izbrane lokacije lahko opredelimo tudi kot zmerno celinsko podnebje zahodne in južne Slovenije, za katero je značilna velika količina padavin (1300-2500 mm padavin na leto) s presežkom padavin jeseni [32]. Na najbližji meteorološki postaji Kočevje [33], ki je od predvidene lokacije stavbe oddaljena približno 15 km zračne linije, znaša povprečna letna temperatura zraka 8,8°C, poletna povprečna dnevna temperatura je 17,0°C, spomladanska 8,2°C, jesenska 9,0°C ter zimska povprečna temperatura -0,7°C. V povprečju je 119 dni v letu je temperatura del dneva pod lediščem, 5 dni v letu se temperature povzpnejo nad 30°C. Število dni, ko so tla prekrita s snegom, v povprečju znaša 72 na leto. Klimatske podatke za Kočevje na mesečni ravni prikazuje preglednica 1.

Preglednica 1: Klimatski podatki meteorološke postaje za Kočevje, podatki ARSO (Agencija republike Slovenije za okolje) za dolgoletno povprečje [34].

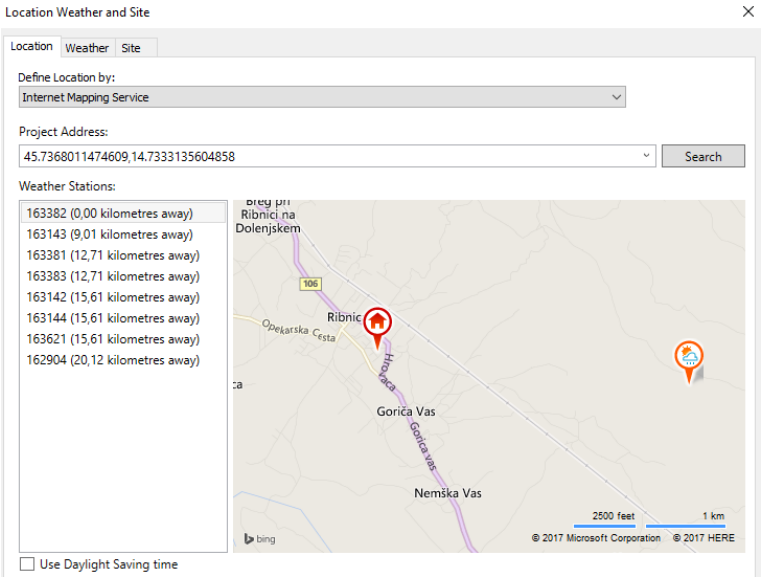
Dolgoletno povprečje	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep	Okt	Nov	Dec
Povp. temperatura [°C]	-1,6	0,2	3,6	8,1	12,8	16,0	17,8	17	13,8	9,0	4,0	-0,5
Povp. najvišja dnevna temperatura [°C]	2,7	5,1	9,2	13,9	18,9	22,1	24,6	24,0	20,7	15,3	8,5	3,2
Povp. najnižja dnevna temperatura [°C]	-5,9	-4,1	-1,3	2,5	6,7	10,0	11,3	11,1	8,5	4,4	0,2	-4,0
Absolutna najvišja temperatura [°C]	15,2	19,0	24,5	28,7	30,3	32,6	35,6	34,0	31,0	27,2	21,6	16,0
Absolutna najnižja temperatura [°C]	-29,2	-27,4	-26,4	-10,5	-4,4	-0,4	2,6	1,6	-3,1	-7,7	-20,2	-23,4
Št. dni z najnižjo temp. <=0 [°C]	26,3	21,9	18,8	7,0	0,9	0,1	0,0	0,0	0,3	5,6	14,5	24,3
Št. dni z najvišjo temp. >= 25 [°C]	0,0	0,0	0,0	0,3	2,4	8,7	15,5	13,0	5,3	0,5	0,0	0,0
Povp. relativna vlaga ob 14.00 [%]	78,4	71,2	64,0	58,3	57,5	60,9	57,3	59,1	62,0	66,1	74,8	82,3
Višina padavin [mm]	89	91	116	130	123	145	127	141	139	138	168	116
Št. dni s snežno odejo ob 7.00	19,6	16,7	11,5	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	5,9	16,8
Št. dni z meglo	6,9	5,6	4,3	4,1	4,4	4,9	6,3	11,3	13,1	11,6	7,9	8,4

Za pridobitev kar najbolj realnih rezultatov energijske analize v Revitu smo morali, poleg lokacije, izbrati tudi vremensko postajo. Program omogoča izbiro med dvema tipoma vremenskih postaj; izbiramo lahko med virtualnimi in dejanskimi vremenskimi postajami (Slika 11). Nosilec podatkov vremenskih postaj je ACS (Autodesk Climate Server) [35], ki zbira klimatske podatke iz različnih virov.

Slika 11: Potek izbire klimatskih podatkov v programu (prilagojeno po: [35]).

ACS vsebuje bazo klimatskih podatkov, do katerih dostopamo z izbiro želene vremenske postaje, ki po naši presoji najbolj ustreza lokaciji stavbe. Vreme je od lokacije do lokacije različno, tudi na relativno majhni oddaljenosti. Večina klimatskih podatkov je pridobljenih iz fizično pozicioniranih vremenskih postaj, ki se nahajajo na večjih letališčih ali v velikih mestih, kar pa nujno ne odraža klimatskih vplivov na tisti lokaciji, za katero želimo pridobiti podatke. ACS vsebuje 1,6 milijona virtualnih vremenskih postaj, katerih vremenski podatki temeljijo na numeričnih meteoroloških simulacijah. Tako je vzpostavljena mreža virtualnih vremenskih postaj praktično pa vsem svetu, razen v najbolj odročnih krajih, ki tako ali tako niso primerni za bivanje. Na ta način z mrežo virtualnih postaj na poljubni lokaciji izberemo vremensko postajo, ki od obravnavane lokacije ni oddaljena več kot cca. 14 km, in ki bolje odraža podnebne lastnosti izbrane lokacije kot pa fizična vremenska postaja, ki je od izbrane lokacije oddaljena 100 ali več kilometrov. Če bi na primer želeli izbrati klimatske podatke, pridobljene iz dejanske vremenske postaje, bi bila to vremenska postaja na letališču Jožeta Pučnika Ljubljana.

Izbiro lokacije in ustrezne virtualne vremenske postaje prikazujemo na sliki 12. Izbrana virtualna vremenska postaja ima identifikacijsko številko 163382 in je izbrani lokaciji najbližje, njena nadmorska višina znaša 577 m. Po podatkih programa izbrana lokacija vremenske postaje sovpada s predvideno lokacijo stavbe, grafična pozicija vremenske postaje pa prikazuje oddaljenost približno 3 km od lokacije stavbe. To pripisujemo temu, da mreža virtualnih vremenskih postaj v programu ni natančno pozicionirana, ampak je le približek in s tem prihaja do manjših odstopanj.



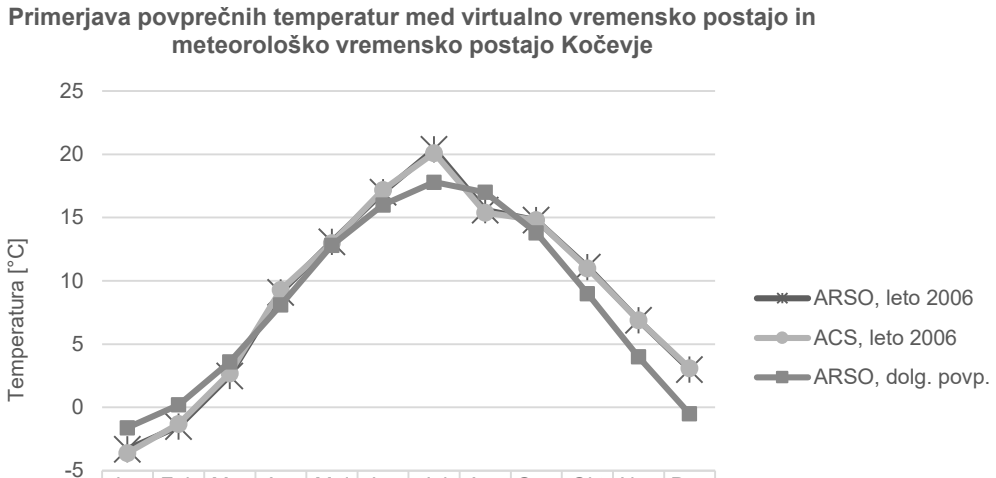
Slika 12: Prikaz izbire lokacije stavbe (označeno z rdečo oznako) in izbire vremenske postaje (označeno z oranžno oznako) [35].

Klimatske podatke, izmerjene na meteorološki postaji Kočevje leta 2006, in klimatske podatke iz virtualne vremenske postaje iz leta 2006 prikazujemo v preglednici 2. Dejstvo, da podatki odražajo vse anomalije in ekstremne pojave tistega leta predstavlja veliko omejitev pri izračunih energijskih analiz, ki bi bili realnejši, če bi imeli na voljo podatke večletnih meritev. To se lahko odraža pri večjih odstopanjih energijskih analiz, zato obstaja verjetnost, da so nekatere vrednosti energijske analize izračunane bistveno višje ali nižje kot bi bile, če bi jih računali na osnovi klimatskih podatkov dolgoletnega povprečja.

Preglednica 2: Klimatski podatki meteorološke postaje za Kočevje, podatki ARSO za leto 2006 [36] in klimatski podatki ACS, povzeti iz rezultatov energijske analize v Revitu za leto 2006 [35].

Leto 2006	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep	Okt	Nov	Dec	Vir
Povp. temperatura [°C]	-3,3	-1,5	2,5	9,1	13,1	17,0	20,4	15,6	14,8	11,1	6,9	3,0	ARSO
	-3,6	-1,3	2,7	9,3	13,0	17,2	20,1	15,4	14,8	11,0	6,9	3,1	ACS
Povp. najvišja dnevna temperatura [°C]	0,5	4,2	8,2	16,4	20,6	25,1	29,5	22,0	22,9	18,3	12,8	7,1	ARSO
	-1,2	1,8	6,3	14,5	18,8	22,8	26,1	20,0	20,8	16,4	11,1	6,5	ACS
Povp. najnižja dnevna temperatura [°C]	-6,6	-6,4	-2,8	3,5	7,1	10,3	13,1	11,1	9,2	5,9	1,6	-1,1	ARSO
	-6,0	-4,2	-1,3	4,7	7,7	11,6	14,5	11,1	10,0	6,6	3,4	0,6	ACS
Povp. relativna vlaga ob 14. uri [%]*	72,0	61,0	55,0	48,0	48,0	43,0	41,0	60,0	53,0	53,0	59,0	76,0	ARSO
	91,6	87,0	80,1	66,2	61,2	61,6	57,1	73,2	70,5	72,9	75,9	82,1	ACS

Povprečne mesečne temperature iz leta 2006, pridobljene iz virtualne in iz dejanske vremenske postaje, ter povprečne mesečne temperature dolgoletnega povprečja smo primerjali v grafikonu 1.



	Jan	Feb	Mar	Apr	Maj	Jun	Jul	Avg	Sep	Okt	Nov	Dec
ARSO, leto 2006	-3,3	-1,5	2,5	9,1	13,1	17	20,4	15,6	14,8	11,1	6,9	3
ACS, leto 2006	-3,6	-1,3	2,7	9,3	13	17,2	20,1	15,4	14,8	11	6,9	3,1
ARSO, dolg. povp.	-1,6	0,2	3,6	8,1	12,8	16	17,8	17	13,8	9	4	-0,5

Grafikon 1: Primerjava povprečnih temperatur med virtualno vremensko postajo (podatki za leto 2006), meteorološko postajo Kočevje (podatki za leto 2006) in meteorološko postajo Kočevje (dolgoletno povprečje) [36].

Izkaže se, da so si povprečne mesečne temperature, pridobljene iz virtualne in iz dejanske meteorološke postaje, zelo podobne; razlike znašajo največ ± 0,3 °C. Večja odstopanja se pojavijo v primerjavi temperatur iz leta 2006 s povprečnimi mesečnimi temperaturami dolgoletnega povprečja; odstopanja znašajo do ± 3,6 °C. Največje razlike se pojavijo pri temperaturah, izmerjenih v zimskem in poletnem času, najmanjše pa v spomladanskem in jesenskem času.

3.0 METODOLOGIJA

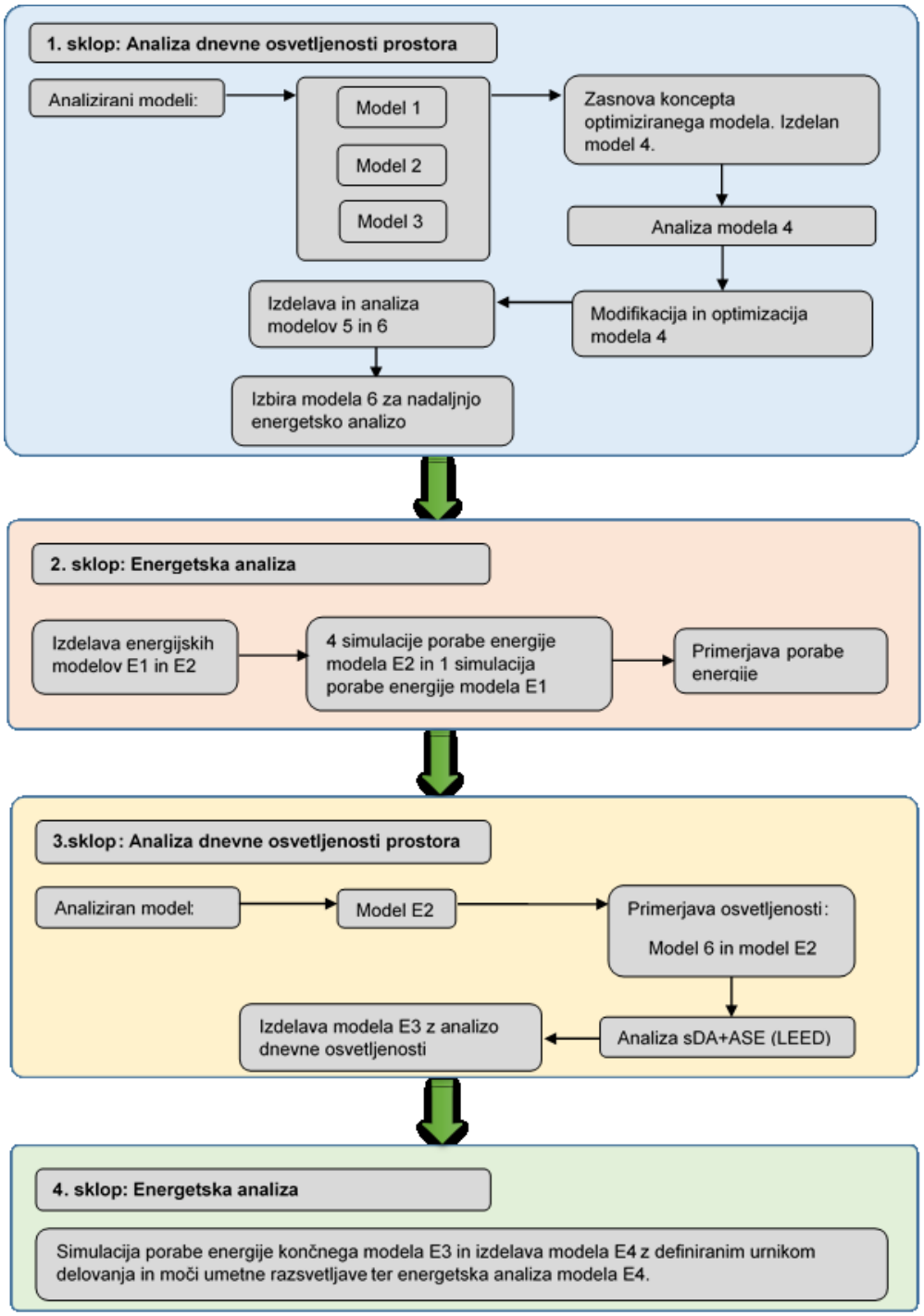
Področje dela v okviru magistrskega dela je bila simultana analiza in integrirano načrtovanje transparentnega in netransparentnega stavbnega ovoja glede na parametre notranje osvetljenosti in uporabe energije.

Pred pričetkom simulacij uporabe energije in analiz dnevne osvetljenosti ter izdelavo računalniškega 3D-modela smo se morali najprej podrobno seznaniti z delovanjem programske opreme, ki smo jo želeli uporabiti. Zanimala nas je metodologija izračunov, uporabljenih v simulacijah uporabe energije, ter izvor v izračunih uporabljenih vhodnih podatkov, za razumevanje rezultatov analiz osvetljenosti z dnevno svetlobo pa smo raziskali različne že uveljavljene metrike za oceno osvetljenosti.

Izdelava končnega modela je potekala postopoma, v več fazah, kjer smo z integriranimi načrtovanjem dnevne osvetljenosti in simuliranjem uporabe energije stavbe prišli od izhodiščnega modela do končnega energijsko optimiziranega modela. Izhodišče je predstavljal model, zasnovan na načrtih idejne zasnove obravnavane stavbe. Najprej smo analizirali energijski potencial stavbnega ovoja, tako da smo izračunali prejeto sončno sevanje in analizirali vpliv senčenja sosednjih stavb in ovir na obravnavano stavbo. Nadaljevanje naloge smo razdelili v štiri sklope, ki so nam omogočali sprotni pregled vplivov na stavbnem ovoju izvedenih sprememb na analizirane parametre. Naš cilj je bil pridobiti največje možne solarne pritoke pozimi in preprečiti pregrevanje poleti.

V prvem sklopu smo analizirali vpliv različnih zasnov zasteklitve ter v ta namen izdelali 6 različno zastekljenih modelov. Prvi izdelani model je bil izhodiščni model, zasnovan na idejni zasnovi, nato smo izdelali še dva modela, in sicer model, pri katerem smo zasteklili vse fasade, ter model, ki je imel zasteklitev samo na strehi. Model z vsemi zastekljenimi fasadami smo izdelali z namenom ugotoviti, kako globoko lahko osvetlimo prostor z zadostno količino dnevne svetlobe, ki še dosega naše zastavljene kriterije, ter kakšen je potencial zasteklitve SZ orientiranih fasad, ki prejmejo najmanj sončnega sevanja na letni ravni. Vrednosti WWR posameznih fasad nikoli ni znašala več kot 60%. Pri tem smo upoštevali ugotovitev, ki sta jo v svojem delu objavila Eržen in Košir [16], in sicer da se s povečevanjem WWR pri vseh orientacijah avtonomija dnevne osvetljenosti DA povečuje, UDI pa zmanjšuje, rast DA pa se pri vrednostih WWR večjih od 40% močno upočasni. Na primeru osnovnošolskih učilnic sta ugotovila, da WWR z vidika količine naravne svetlobe ni smiselno povečevati na več kot 60%. Z izdelavo modela z zasteklitvijo samo na strehi smo želeli ugotoviti, v katerem časovnem obdobju je strešna zasteklitev najbolj oziroma najmanj učinkovita, kakšna je distribucija svetlobe v prostoru ter kakšne vrednosti osvetlitve z dnevno svetlobo lahko dosežemo pri relativno majhni površini zasteklitve v primerjavi s primeri, kjer je zastekljena samo fasada. Vrednost SRR je znašala največ 10%, saj fasade niso bile zastekljene. V kombinaciji z zastekljenimi stenami je sicer priporočljivo, da SSR znaša med 3%-6% [22]. Ker stene v tem modelu (model 3) ne vsebujejo zasteklitve, smo se odločili, da za SSR upoštevamo okvirno 10%. Po opravljeni analizi rezultatov omenjenih treh modelov smo izdelali model (model 4), katerega zasteklitev je bila zasnovana kot presek vseh lastnosti zasteklitve prvih treh analiziranih modelov; ta vsebuje poleg zasteklitev na fasadah tudi zasteklitev strehe s strešnimi svetlobniki v obliki tristranih prizem. V iskanju optimalne rešitve smo poizkusili še zmanjšati površino vertikalne zasteklitve z uporabo manjših elementov zasteklitve in s spreminjanjem pozicije in oblike strešne zasteklitve, obenem pa smo v tej fazi tudi že predvidevali vpliv na porabo energije. Četrti model smo še dodatno izboljšali z vidika osvetljenosti z dnevno svetlobo s preizkušanjem različnih možnosti zasteklitve strehe, hkrati pa smo zmanjšali površino zasteklitve fasad. V ta namen smo izdelali še peti in šesti model ter slednjega uporabili za nadaljnjo energijsko analizo v drugem sklopu.

Z zadovoljivimi rezultati osvetljenosti z dnevno svetlobo smo nadaljevali z energijsko analizo modela 6, ki je dosegel želene rezultate z gledišča dnevne osvetljenosti v 1. sklopu. Ta model smo v energijski analizi poimenovali model E2. Tu smo analizirali različne tipe zunanjih sten z različnimi toplotno izolativnimi in akumulacijskimi lastnostmi ter dva različna tipa zasteklitve. Po izbiri ustreznega stavbnega ovoja z gledišča uporabe energije smo rezultate simulacije uporabe energije primerjali z rezultati izhodiščnega modela oz. modela E1 z enakimi toplotno izolativnimi lastnostmi stavbnega ovoja, s čimer smo se prepričali, da smo zasnovali energijsko učinkovitejši model glede na izhodiščni model. Zaradi spremembe toplotno izolativnih lastnosti zasteklitve so se spremenile tudi optične lastnosti zasteklitve (vrednost LT), zato smo v 3. sklopu energijski model E2 ponovno analizirali z gledišča dnevne osvetljenosti prostora ter izvedli primerjavo dnevne osvetljenosti z modelom 6. V 3. sklopu smo izdelali končni model E3, v katerem smo izpolnili vse zahteve sistema za certificiranje stavb LEED za osvetljevanje stavb. V zadnjem, četrtem sklopu, smo izvedli simulacijo uporabe energije končnega modela. zasnovanega v tretjem sklopu, z dodanim urnikom delovanja in moči umetne razsvetljave (model E4), kar je pripomoglo k bolj realni oceni uporabe energije v stavbi. Postopek dela od 1. do 4. sklopa je shematično prikazan v dendrogramu na sliki 13.



Slika 13: Dendrogram postopka dela od 1. do 4. sklopa.

3.1 Izračun osvetljenosti z dnevno svetlobo

Osvetljenost je ena izmed osnovnih fotometričnih količin. Predstavlja gostoto svetlobnega toka, ki pade na določeno ploskev. Osvetljenost je tem večja, čim močnejši je svetlobni tok, in tem šibkejša, čim večja je ploskev, na katero se mora svetlobni tok porazdeliti [37].

Za analizo osvetljenosti prostorov z dnevno svetlobo smo izbrali tri kritične dneve, ob katerih smo izvajali analize. Dneve analiz smo izbrali na intervalu ± 7 dni glede na dan, ko nastopijo spomladanski ekvinokcij (21. marec) ter poletni (21. junij) in zimski solsticij (21. december). Na dan spomladanskega ekvinokcija

sta dan in noč enako dolga, medtem ko poletni solsticij predstavlja najdaljši dan v letu, zimski pa najkrajšega. Dneve analiz smo določili znotraj časovnega intervala na podlagi podatkov oblačnosti, ki smo jih razbrali iz klimatskih podatkov izbrane virtualne vremenske postaje, saj smo za analizo osvetljenosti uporabili Perezov vsevremenski model neba, ki prilagaja distribucijo svetlosti neba glede na realne klimatske podatke [38]. Poiskali smo najbolj oblačen dan na vsakem od omenjenih časovnih intervalov v bližini spomladanskega ekvinokcija ter poletnega in zimskega solsticija. Dnevi, izbrani za analize osvetljenosti prostorov z dnevno svetlobo, so tako 22. marec, 23. junij in 21. december. Za definiranje urnika umetne razsvetljave smo za vsak posamezni mesec v letu določili dan za izvedbo analiz dnevne osvetljenosti na enak način, na kakršen smo izbrali tri omenjene kritične dneve (določeni dnevi: 28.1., 22.2., 22.3., 19.4., 24.5., 23.6., 27.7., 25.8., 18.9., 21.10., 22.11., 21.12.). Za vsak določen dan smo izračunali osvetljenost z dnevno svetlobo ob 9.00, 12.00, 15.00 in 18.00. S tem samo zajeli skoraj celoten predviden obratovalni čas stavbe z razmeroma kratkimi časovnimi intervali. V prvem sklopu analiz osvetljenosti z dnevno svetlobo so imele vse uporabljene zasteklitve fasad faktor LT = 0,72, zasteklitev strehe pa LT = 0,77; v 2. sklopu so bile vrednosti različne in so definirane v vsaki simulaciji posebej.

Osvetljenost z dnevno svetlobo smo izračunavali na višini 1 m od tal analiziranega prostora, razpon rezultatov izračunanih vrednosti osvetljenosti pa je segal od 0 do 6000 lx. Najpomembnejši podatki, ki so nas zanimali tekom analiz, so bili poleg doseženih vrednosti o osvetljenosti prostora z dnevno svetlobo tudi WWR in SRR ter DPT (delež zasteklitve glede na površino tal) v uporabljenih 3D-modelih. Grafični prikaz rezultatov osvetljenosti z dnevno svetlobo za vsak analiziran dan smo v poglavju 4.0 prikazali samo ob 12.00, grafični prikaz rezultatov analiz izvedenih ob 9.00, 15.00 in 18.00 se nahaja v prilogi A, medtem ko smo številčne vrednosti rezultatov analiz osvetljenosti z dnevno svetlobo prikazali v celoti znotraj poglavja 4.0. Podatke o lastnostih uporabljenih zasteklitev strehe smo pridobili od proizvajalcev strešnih oken Velux [39], podatke za uporabljene zasteklitve fasad pa smo pridobili od proizvajalca zasteklitev Ertlglas [40].

3.1.1 Metrike za oceno dnevne osvetljenosti

Za izračun osvetljenosti prostora z dnevno svetlobo obstajajo različne dinamične oz. klimatsko pogojene metrike, ki v izračunih upoštevajo klimatske danosti in zasedenost (način uporabe) prostora. Takšne metrike so naprednejše in bolje odražajo realno stanje v prostoru kot najpogosteje uporabljene metode izračuna osvetljenosti, kjer se v izračunih uporablja statično stanje neba [16]. V nalogi smo si za izračun osvetljenosti prostora zamislili metriko UDI*, ki temelji na že uveljavljenih metrikah, ki jih bomo opisali v nadaljevanju.

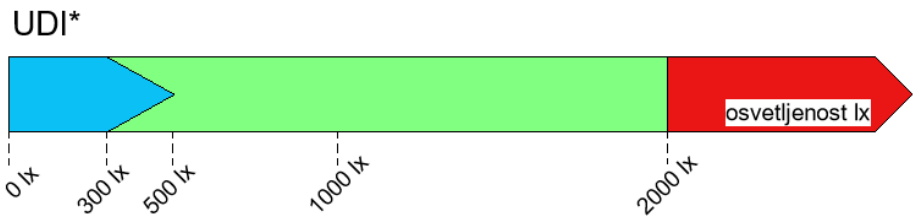
Avtonomija dnevne osvetljenosti DA (angl. *Daylight Autonomy*) [16] ocenjuje dnevno osvetljenost prostora s stališča dinamičnega spreminjanja zunanjih klimatskih pogojev. Ideja DA je izračun odstotka časa v določenem intervalu skozi celotno leto, ko je analizirana površina osvetljena z dnevno svetlobo nad določeno mejno vrednostjo – definirana je glede na vizualne zahteve opravljenega dela – vsaj 50% časa. V tem primeru se obravnavani prostor šteje kot dobro osvetljen.

Prostorska avtonomija dnevne osvetljenosti sDA (angl. *spatial Daylight Autonomy*) [16] predstavlja modifikacijo DA. Definirana je kot površina, ki je osvetljena z več kot 300 lx (mejna vrednost) dnevne osvetljenosti v več kot 50% analiziranega časa, ko je prostor v uporabi. Meja med prenizko in zadovoljivo osvetljenostjo je pri tej metodi postavljena zelo ostro, saj se že nekaj odstotkov pod mejno vrednostjo ne upošteva več pri določitvi DA. To pomanjkljivost je mogoče izboljšati z metodo kontinuirane dnevne osvetljenosti cDA (angl. *continuous Daylight Autonomy*), tako da ustvarimo »mehek« prehod med mejo, ki označuje prenizko in zadovoljivo dnevno osvetljenost. Vrednosti, ki so nižje od mejne, se upoštevajo diskontirano v odvisnosti od razmerja med dejansko in mejno osvetljenostjo.

Uporabna dnevna osvetljenost UDI (angl. *Useful Daylight Autonomy*) [16] ocenjuje osvetljenost prostora glede na čas uporabe in mejne vrednosti osvetljenosti na delovni ravnini. UDI predstavlja nadgradnjo DA, pri čemer metrika oceni, koliko časa je v analiziranem prostoru osvetljenost primerna za vizualno delo. Vrednosti, ki znašajo med 100 lx – 2000 lx, se štejejo kot primerno osvetljene, vrednosti pod 100 lx se štejejo kot nezadovoljive, medtem ko se vrednosti nad 2000 lx uvrščajo v območje s previsoko osvetljenostjo. Nove študije, izvedene v pisarniških okoljih, so mejo za preveliko osvetljenost dvignile na 3000 lx, saj je bil razlog za uporabo zgornje vrednosti 2000 lx v tem, da so bili stari računalniški zasloni CRT bolj občutljivi na bleščanje kot novejši LCD zasloni. Sorazmerno s povečevanjem osvetljenosti narašča tudi UDI, vendar pa s prekoračenjem zgornje mejne vrednosti UDI začne padati, česar preostale prej omenjene metrike ne upoštevajo.

3.1.1.1 Metrika UDI*

Metriko UDI* smo izdelali kot kombinacijo DA, sDA, cDA in UDI, saj ob pričetku izvedbe praktičnega dela naloge uporabljena programska oprema ni omogočala analiziranja po katerikoli izmed navedenih metrik, obenem pa smo želeli predvideti urnik in moč potrebne umetne razsvetljave. Kot najnižjo vrednost osvetljenosti smo postavili vrednost 500 lx, ki smo jo določili s pomočjo standarda ÖNORM EN 12464-1 [41], kjer so zajete priporočene vrednosti za osvetlitev površin v posameznih tipih stavb oz. prostorov. Zgornjo mejo smo določili pri 2000 lx, kot sta jo določila Mardaljevič in Nabil [42]. Za bolj realno oceno osvetljenosti z dnevno svetlobo smo vrednosti od 300-500 lx upoštevali kot »mehek« prehod, kot je to upoštevano v metriki cDA. Korekcijski faktor za vrednosti med 300 lx in 500 lx je znašal 300/500 = 0,6. To pomeni, da smo površinam, ki so osvetljene v mejah med 500-2000 lx, prišteli še 60% površin, osvetljenih v vrednostih med 300-500 lx (Slika 14).



Slika 14: Shema uporabne dnevne osvetljenosti UDI*.

3.1.1.2 Avtonomija dnevne osvetljenosti z uporabo sDA+ASE.

Pri določanju končne zasnove transparentnega dela stavbnega ovoja z ustreznim senčenjem smo si pomagali tudi z analizo DA, s katero smo nadgradili uporabljano programsko opremo. To se je zgodilo tekom izdelave praktičnega dela magistrske naloge; zdelo se nam je smiselno, da zadostimo vsem zahtevanim kriterijem. Avtonomija dnevne svetlobe v uporabljenem programskem dodatku Insight 360 [43] predstavlja kombinacijo metrike sDA in metrike ASE (angl. *Annual Sunlight Exposure*), ki je uporabljena v certifikacijskem sistemu za ocenjevanje stavb LEED [44]. Metrika sDA postavlja mejo, da je vsaj 55% prostora osvetljenega z več kot 300 lx več kot 50% časa uporabe prostora od 8.00 zjutraj do 18.00 zvečer tekom celega leta. Metrika ASE [16] izračuna celoletno izpostavljenost soncu. ASE ni samostojna metrika in se uporablja kot dopolnilo metriki sDA. ASE ocenjuje količino kumulativnih ur analizirane točke, ki je izpostavljena direktnemu sončnemu sevanju tekom celega leta v času zasedenosti prostora. ASE upošteva samo tiste vrednosti osvetljenosti, ki presegajo določeno mejo v času pojavljanja direktne komponente sončnega sevanja. V primeru certifikacijskega sistema LEED je ASE definirana s 1000 lx osvetljenosti v analizirani točki, ki je dosežena pri direktnem sončnem sevanju. Kumulativno število ur v letu, ko je kriterij presežen, ne sme biti večje od 250 ur za 10% površine prostora. Z doseganjem kriterija metrike ASE reduciramo bleščanje zaradi prevelikih vrednosti

osvetljenosti in pripomoremo k zmanjševanju pregrevanja stavbe zaradi prevelikih solarnih pritokov [45]. Kriteriji za uporabljene metrike sDA in ASE so določeni v standardu IES LM-83-12 [46].

3.2 Izračun uporabe energije

V simulacijah uporabe energije stavbe smo analizirali mesečne in celoletne potrebe po energiji za ogrevanje in hlajenje stavbe. V izračunih so bili upoštevani tako toplotni dobitki v stavbi kot tudi toplotne izgube skozi stavbni ovoj. Toplotne dobitke v izračunih so predstavljali elektronska oprema, uporabniki stavbe in dobitki sončnega sevanja ter delno tudi prezračevalni pritoki (v poletnih mesecih, ko je zunanja temperatura zraka višja od predvidene temperature zraka v prostoru), ki se pojavijo kot posledica (ne)zrakotesnosti stavbnega ovoja. Toplotne dobitke umetne razsvetljave smo uporabili le v zadnji energijski analizi. Toplotne izgube so predstavljale transmisijske izgube (toplotne izgube zaradi prehoda toplote skozi stavbni ovoj) skozi zastekljene površine, tla, streho in zunanje stene ter delno prezračevalne izgube (kadar je bila zabeležena zunanja temperatura zraka nižja od predvidene temperature zraka v prostoru).

V simulacijah uporabe energije za ogrevanje in hlajenje so nas najbolj zanimale transmisijske izgube skozi dele stavbnega ovoja, ki smo jih obravnavali tekom celotne naloge. Tako smo podrobno analizirali vpliv transmisijskih izgub skozi zasteklitev in zunanje stene ter vpliv toplotnih dobitkov kot posledico sončnega sevanja na izračun energije, potrebne za ogrevanje in hlajenje stavbe. Transmisijskim izgubam skozi tla in netransparetni del strehe nismo posvečali posebne pozornosti, saj so bile te vrednosti bolj ali manj enake tekom vseh opravljenih simulacij. Prav tako nismo posebej obravnavali prezračevalnih izgub oz. pritokov zaradi vpliva zrakotesnosti stavbnega ovoja, saj so vhodni podatki, ki vplivajo na izračun v programski opremi, fiksni in na njih ne moremo vplivati. Prav tako nismo imeli vpliva na toplotne dobitke, povzročene s strani elektronskih naprav v stavbi, saj njihovega vpliva ni možno popolnoma izločiti iz izračunov.

3.2.1 Algoritem izračuna potrebne energije za ogrevanje in hlajenje stavbe

Program Revit za izračune energijskih analiz uporablja oblačno storitev GBS (angl. *Green Building Studio*) [47], ki za izračune potrebne energije za ogrevanje in hlajenje stavbe uporablja program DOE-2 [48].

Algoritem programa DOE-2 [49] deluje tako, da na podlagi toplotnih dobitkov izračuna potrebno energijo za hlajenje oz. na podlagi toplotnih izgub stavbe izračuna potrebno energijo za ogrevanje. Notranje temperature zraka se teoretično gledano ne spreminjajo. Gre za dinamično analizo izračuna, ki temelji na urni metodi izračunavanja energijskih potreb za vsak prostor posebej. Toplotni dobitki v prostoru so razdeljeni na različne komponente glede na namen in generirane toplotne dobitke v prostoru. Razdeljene so na dobitke sončnega sevanja, kondukcije toplote skozi elemente stavbnega ovoja, ki so v kontaktu z zunanjim zrakom, infiltracijo, kondukcijo toplote skozi stene in tla v kontaktu s terenom, ter toplotnimi dobitki zaradi uporabnikov, luči in elektronske opreme.
Toplotni dobitki ali izgube zunanjih sten zaradi kondukcije so izračunani po enačbi (1), do katere pridemo z rešitvijo diferencialne enačbe (2):

$$q_{inside(t)} = \sum_{i=0}^{\infty} Y_i \cdot T_{outside} \cdot (t - i\Delta) - \sum_{i=0}^{\infty} Z_i \cdot T_{inside} \cdot (t - i\Delta), \quad (1)$$

kjer so Y_i in Z_i faktorji toplotnega toka skozi steno, q_{inside} je toplotni tok na notranji površini stene, $T_{outside}$ in T_{inside} so temperature zunanje oz. notranje površine stene, t je čas in $i\Delta$ časovni korak. Notranji

prestopni koeficienti so vključeni v lastnostih sten in se ne morejo spreminjati. Zunanja temperatura na površini sten je izračunana z energijsko bilanco zunanje površine stene vključujoč temperature zunanjega zraka, prestopnega konvekcijskega koeficienta, absorbiranega sončnega sevanja, infrardečega sevanja, izsevanega v nebo ter okolico, in prehoda toplotnega toka skozi steno. Diferencialna enačba (2) je:

$$\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\delta T}{\delta T}, \tag{2}$$

kjer je T temperatura, x je razdalja od zunanje površine stene, α pa je toplotna difuzivnost.

Ostali toplotni dobitki so dobljeni na preprostejši način. Dobitki sončnega sevanja so izračunani iz direktne in difuzne komponente sončnega sevanja, podatki o teh pa so dobljeni iz klimatskih podatkov oblačnosti neba. Sončno sevanje, ki pade na zastekljeno površino, se delno transmitira, delno akumulira in delno odbije, odvisno od optičnih lastnosti zasteklitve.

Notranji dobitki zaradi razsvetljave, ljudi in razne elektronske opreme so v osnovi vneseni v program (v našem primeru Revit) s strani uporabnika. Dobitki so preprosto izračunani na podlagi moči oz. toplote, ki jo oddajajo, in pomnoženi z delnimi vrednostmi, določenimi v urnikih obratovanja in zasedenosti stavbe.

Toplotni tok skozi notranje stene in konstrukcije v stiku z zemljino algoritem izračunava v stacionarnem stanju, efekt toplotne kapacitivnosti notranjih sten je zanemarjen. Za stene in tla v stiku z zemljino je to razumno, saj temperatura zemljine preko leta zelo malo variira, v nasprotju stenami, ki mejijo proti zunanjosti in je njihova temperatura vsako uro dneva različna.

V splošnem toplotni dobitki niso enaki potrebni energiji za hlajenje. Izsevana toplota v prostoru hipno ne poviša temperature notranjega zraka, ampak se del toplote akumulira v konstrukcijske elemente, šele nato temperature zraka začnejo naraščati. Povišana temperatura notranjega zraka glede na referenčno določeno temperaturo pomeni, da je v stavbi višek toplote, ki ga je potrebno odvesti, če pa se temperatura spusti pod določeno referenčno temperaturo, je potrebno v stavbo dovajati toploto.

3.3 Standardi in priročnik ASHRAE

Vhodni podatki notranjih toplotnih virov (ljudje, razsvetljava, električna moč razne elektronske opreme), infiltracije in prezračevanja ter urniki in referenčne temperature ogrevanja in hlajenja, po navajanju spletne strani za pomoč uporabnikov programa Revit [50], temeljijo na standardih ASHRAE. Izračuni zahtev po ogrevanju in hlajenju pa so izračunani po postopku, opisanem v priročniku ASHRAE Handbook of Fundamentals. Omenjeni so standardi 62.1 (brez letnice), ASHRAE 90.1-2010 in 90.2-2010. Standarde izdaja ameriško inženirsko združenje ASHRAE [8] (angl. *American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers*) ustanovljeno leta 1894 z namenom doseganje boljših bivalnih pogojev ljudi z uporabo trajnostnih tehnologij grajenega okolja. Standardi ASHRAE zelo podrobno obravnavajo praktično celotno področje gradbeništva, vsebujejo vsa priporočili za projektiranje stavb, preizkušanje vgrajenih sistemov v stavbah vključno s testi programske opreme za projektiranje, zajemajo pa tudi področje letalstva in ladjedelništva.

Na spletni strani programskega orodja Revit ni eksplicitno navedeno, kateri vhodni podatki izhajajo iz določenega standarda, zato lahko ob pregledu in obsegu standardov samo sklepamo, kateri parametri so povzeti iz določenega standarda, saj se vse vrednosti parametrov v programu ne ujemajo s tistimi v standardu.

Standard ASHRAE 62.1-2010 [51] :
Namen standarda ASHRAE 62.1.-2010 je določiti zahteve za doseganje primernih stopenj prezračevanja in druge ukrepe, namenjene zagotavljanju notranje kvalitete zraka, ki je sprejemljiva uporabnikom stavb, ter zmanjšati škodljive vplive na zdravje ljudi. Standard določa ustrezne prakse in tehnike projektiranja pri gradnji novih in posege v obstoječe stavbe.

Standard po obsegu vsebuje 9 poglavij, skupaj z desetimi informativnimi dodatki vsebuje 58 strani. Vsebina standarda se nanaša na vse prostore v stavbah, razen na prostore v enodružinskih hišah in večstanovanjskih stavbah do treh etaž ali manj. Določa zahteve za prezračevanje, načrtovanje sistemov za čiščenje zraka, ter podaja napotke za zagon, upravljanje in vzdrževanje prezračevanih sistemov v stavbah. Vsebuje dodatne zahteve za posebne vrste prostorov kot so laboratoriji, industrijske stavbe, zdravstvene ustanove in druge prostore, ki jih pogojujejo posebne vrste delovnih mest ali kakšni drugi standardi. Standard ne predpisuje posebnih zahtev za prostore, namenjene kajenju, ali tiste prostore, ki ne ustrezajo merilom standarda za ločevanje prostorov in so lahko onesnaženi zaradi kajenja. Standard določa tudi primerno število oseb v posameznih tipih stavb oz. prostorov. Zahteve za prezračevanje temeljijo na podatkih o kemičnih, fizičnih in bioloških onesnaževalcih, ki vplivajo na kakovost zraka.

Standard ASHRAE 90.1-2010 [52]:
Standard 90.1-2010 [53] podaja minimalne zahteve za energijsko učinkovito projektiranje stavb in stavbnih sistemov, v katerih so energenti fosilna goriva in električna energija. Velja za vse vrste stavb razen za eno- in večstanovanjske stavbe do največ treh etaž ali manj. Določa ustrezne prakse in tehnike projektiranja pri gradnji novih in posegih v obstoječe stavbe, s katerimi zmanjšamo potrebe po energiji, ne da bi s tem zmanjšali kakovost bivanja ali storilnost uporabnikov. Standard je napisan v obliki gradbenega predpisa in je namenjen internacionalni uporabi. Preveden je v številne svetovne jezike, upoštevajo ga pa v vseh evropskih državah, kjer imajo namen stavbe certificirati po trajnostnem sistemu LEED.

Standard po obsegu zajema zahteve, ki so primerne za različne vrste stavb in različne podnebne cone ter za različne pogoje posameznih geografskih območij. Vsebuje 12 poglavij in 7 informativnih dodatkov. Brez dodatkov šteje standard 221 strani in je eden izmed obsežnejših. Določa minimalne zahteve glede energijske učinkovitosti pri projektiranju in gradnji novih stavb ter adaptacijah obstoječih stavb. To velja predvsem za novogradnje in njihove sisteme, za prizidke in sisteme v njih ter opremo obstoječih stavb. V obseg zahtev so zajeti zasnova ovoja stavbe, sistemi razsvetljave, sistemi ogrevanja, prezračevanja, klimatizacije ter ostala oprema, ki je odvisna od uporabe energije. Standard velja tudi za sisteme in opremo, ki se uporabljajo v povezavi s stavbami, vključno s sistemi ogrevanja, prezračevanja in klimatizacije, sistemi za ogrevanje porabne vode, pri razvodu električne energije, pri uporabi elektromotorjev in razsvetljave. Standard izrecno ne velja za eno- in večstanovanjske hiše do največ treh etaž ali manj ter za montažne hiše vključno z mobilnimi in modularnimi hišami. Prav tako ne pride v poštev pri stavbah, ki za delovanje ne uporabljajo fosilnih goriv ali elektrike, in za opremo ter dele stavbnih sistemov, ki uporabljajo energijo predvsem za oskrbo industrijskih, proizvodnih in poslovnih procesov.

Standard ASHRAE 90.2-2007 [54]:
Ta standard je namenjen zagotavljanju minimalnih zahtev za načrtovanje energijsko učinkovitih stanovanjskih stavb. Obravnava enodružinske hiše, večstanovanjske stavbe in modularne stanovanjske enote, ne obravnava pa hotelov, motelov, domov za starejše občane, zaporov in mobilnih hišk. Ker v našem delu ne obravnavamo stanovanjskih stavb, temu standardu ne bomo namenili posebne pozornosti. Naj omenimo, da ga v slovenskih knjižnicah ni na voljo, pa tudi drugje na spletu praktično ni dosegljiv, najdemo ga le na spletni strani združenja ASHRAE v obliki predogleda z letnico 2007.

2009 ASHRAE Handbook of Fundamentals [55]:
Priročnik 2009 ASHRAE Handbook of Fundamentals obsega 7 enot, ki so razdeljene na posamezna poglavja. Prva enota obravnava načela psihometrije in opisuje termodinamične lastnosti zraka in tekočin ter predstavlja postopke izračunavanja termodinamičnih lastnosti tekočin in plinov. Druga enota se posveča toplotnemu okolju v stavbah. Povzema osnovna načela človeške sposobnosti toplotne regulacije in metabolizma. Obravnava človekovo udobje oz. neudobje v smislu, da načrtovalcem sistemov v stavbah pomaga dosegati zadovoljive ravni udobja in načrtovanje zdravju primernega okolja uporabnikov stavb. Tretja enota govori o zdravem notranjem okolju. Bistvo je razumevanje načel zdravega notranjega okolja inženirjem, saj načrtovanje, delovanje in vzdrževanje stavb ter HVAC sistemov bistveno vpliva na uporabnike v stavbah. Obravnava tudi področje o onesnaževalcih zraka prostorih stavb. Tretja enota obsega izračune in določanje potrebne energije in toplotne obremenitve oz. zahteve za ogrevanje in hlajenje stanovanjskih in nestanovanjskih stavb. Obravnava klimatske podatke različnih con širom Združenih držav Amerike, načrtovanje zasteklitve ter izračune fizikalnih in optičnih lastnosti le-te. Vsebuje poglavje o izračunih prezračevanja in infiltracije stavb. Četrta enota obsega dimenzioniranje HVAC sistemov. Peta enota vsebuje navodila za analizo in načrtovanje sklopov stavbnega ovoja za učinkovit nadzor nad toploto, prezračevanjem in vlago. Šesta enota opisuje lastnosti goriv in izgorevanje teh, lastnosti hladilnih tekočin in hladilnikov ter fizikalnih lastnosti materialov. Zadnja, sedma enota je splošna in se navezuje na trajnostnost stavb, meritve in inštrumente, kratice in simbole, enote in pretvarjanje enot ter opis standardov.

3.4 Izdelava računalniškega 3D modela

Pogoj za izvedbo simulacij in analiz uporabe energije ter osvetljenosti prostora z dnevno svetlobo je izdelava računalniškega 3D-modela, kateremu je potrebno definirati vhodne podatke, ki so upoštevani v izračunih in omogočajo pridobitev karseda realnih rezultatov.

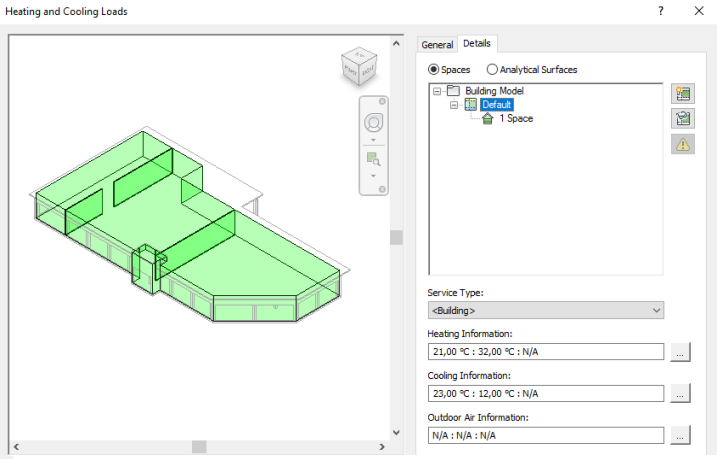
3.4.1 Izris modela

Izris 3D-modela v arhitekturnem delu programa nam ni predstavljal velike ovire, saj ima zgolj eno etažo in enostaven tloris. Uporabili smo funkcije pod zavihkom Arhitecture, za določitev dimenzij smo uporabili CAD (angl. *computer-aided design*) podlogo idejne zasnove projekta. V 3D-modelu smo uporabili samo elemente, ki so potrebni za izvedbo energijske analize, in analizo osvetljenosti z dnevno svetlobo (tla v stiku s terenom, zunanje stene, notranje stene, nosilno skeletno konstrukcijo in streho). Elementi modela morajo oblikovati zaprt prostor, saj v nasprotnem primeru program javi napako ob zagonu simulacije. Ker v nalogi uporabljamo več modelov z različnimi variantami zasteklitve in stene z različnimi gradbeno-fizikalnimi lastnostmi, je notranji obseg sten ostal vedno enak, prav tako pa imajo vsi analizirani modeli stavbe enako neto površino in prostornino. Za zasteklitev je bilo potrebno v Revit uvoziti vnaprej izdelane družine elementov, ki smo jih izdelali sami ali jih uvozili iz že izdelanih knjižnic materialov.

3.4.2 Vhodni podatki

3.4.2.1 Toplotne cone

V stavbi so predvideni trije ločeni prostori, vendar pa stene, ki omejujejo prostore v notranjosti modela namenoma niso povsem sklenjene, tako da program celotno površino stavbe zazna kot en sam prostor. Za energijsko analizo je dovolj že definiranje prostorov z ukazom Room, vendar v tem primeru v izračunu energijske analize ne moremo vplivati na vrednosti nekaterih notranjih toplotnih dobitkov v stavbi (uporabniki, razsvetljava in elektronska oprema) in število uporabnikov. Za vpliv na omenjene vrednosti je potrebno v stavbi definirati toplotne cone, kar storimo z ukazom Space ali Zone. Ukaz Zone je primeren za načrtovanje sistemov HVAC (angl. *Heating, Ventilation and Air Conditioning*), s čimer se v našem delu ne ukvarjamo, zato smo izbrali ukaz Space. Ker je v modelu definiran en sam prostor, je tudi toplotna cona samo ena (Slika 15). V celotni stavbi smo predvideli enak temperaturni režim ogrevanja in hlajenja, zato je izbira ene toplotne cone tudi smiselna. Za referenčne vrednosti ogrevanja in hlajenja v času zasedenosti in nezasedenosti v toplotni coni smo uporabili privzete vrednosti programa (Preglednica 3); vrednosti se zelo dobro ujemajo z vrednostmi, ki jih predpisuje slovenski Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb [56].



Slika 15: Z zelenimi ploskvami definirana toplotna cona.

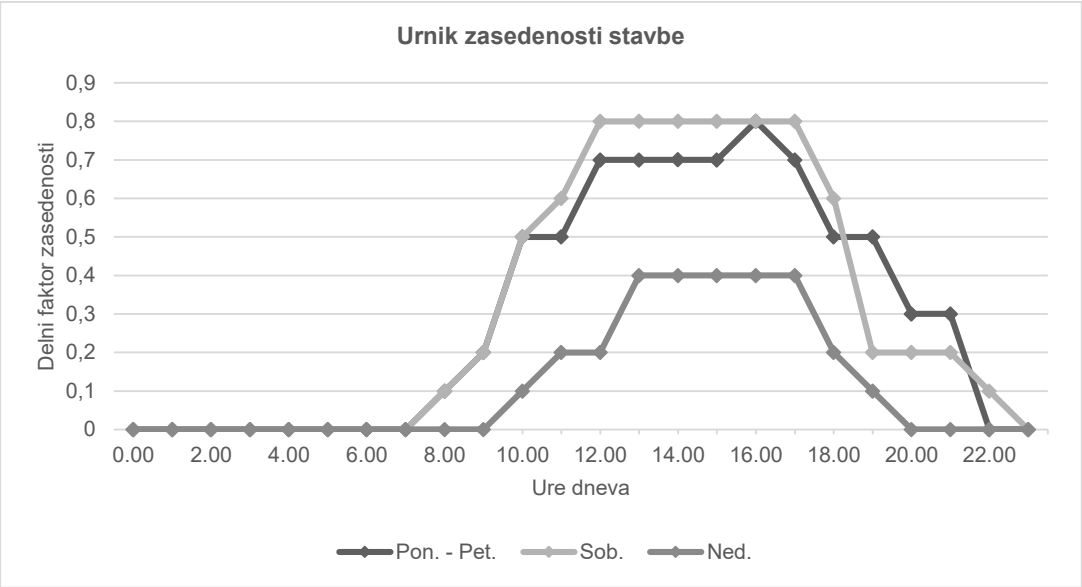
Preglednica 3: Referenčne temperature ogrevanja in hlajenja v toplotni coni.

	Referenčna temp. ogrevanja [°C]	Referenčna temp. hlajenja [°C]
Zasedena stavba	21	24
Nezasedena stavba	18	29

Referenčna temperatura ogrevanja v času, ko je stavba zasedena, je znašala 21°C, v času nezasedenosti pa 18°C. Referenčna temperatura hlajenja je v času, ko je stavba zasedena, znašala 24°C, v času nezasedenosti pa 29°C.

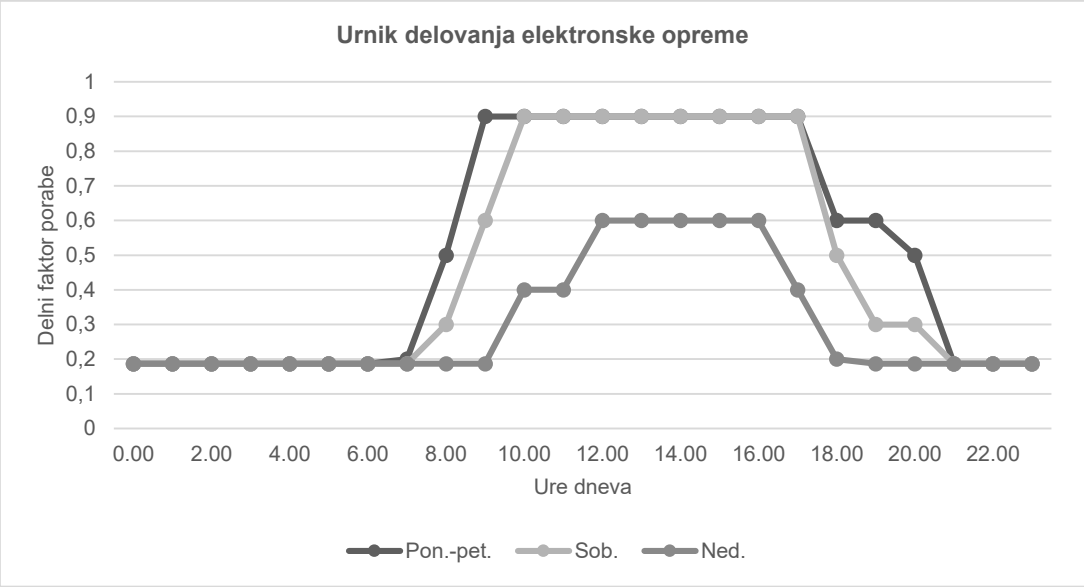
3.4.2.2 Urniki obratovanja

V simulaciji energijske analize se z urniki določa primerno upoštevanje različnih parametrov za vsako uro dneva, kar vpliva na porabo energije v stavbi. Urniki zasedenosti stavb so v Revitu že predpostavljeni in jih je možno delno prilagajati (ni možno ustvariti dodatnega urnika za sobote in nedelje), zato smo izbrali urnik, predviden za trgovske stavbe (Grafikon 2). Razdeljen je na dneve od ponedeljka do petka ter na sobote in nedelje. Med delovnikom je predvidena zasedenost od 7.00 do 22.00, ob sobotah od 7.00 do 23.00 in ob nedeljah od 9.00 do 20.00. Med delovnikom zasedenost narašča do 16.00, ko znaša 80% vseh predvidenih uporabnikov. Ob vikendih je največ predvidenih uporabnikov v soboto, in sicer zasedenost narašča od 7.00 do 12.00, ko znaša 80%, in začne upadati ob 17.00 do izpraznjenja stavbe ob 23.00. Nedelje so pričakovano najmanj zaseden dan, in sicer od 9.00 do 20.00, največja zasedenost stavbe pa znaša 40% in traja od 13.00 do 17.00. Urnike za vse tipe stavb, ki jih Revit obravnava, najdemo na spletni strani za pomoč uporabnikov programa Revit [50].



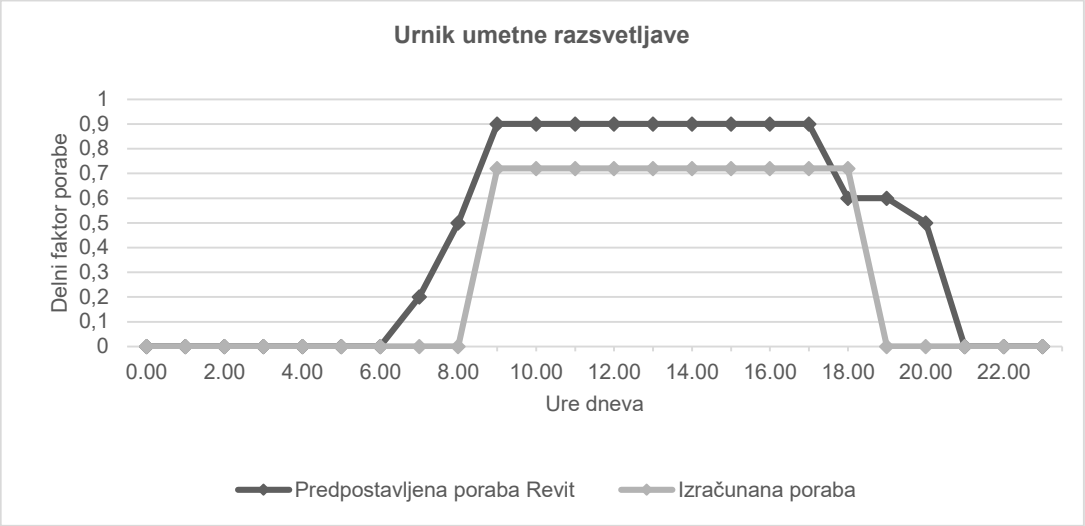
Grafikon 2: Urnik zasedenosti stavbe [50].

Poleg urnika zasedenosti stavbe je v sklopu energijske analize potrebno obravnavati še urnike umetne razsvetljave in urnike delovanja elektronske opreme (Grafikon 3). Med elektronsko opremo so razvrščeni razni avtomati za prodajo pijač, kavni avtomati, računalniška oprema itd., urnik pa se od urnika zasedenosti stavbe razlikuje v vrednostih, saj elektronske naprave delujejo tudi v času, ko v stavbi ni uporabnikov, vendar z zmanjšano močjo. Enako kot urnik zasedenosti stavbe ima tudi urnik elektronske opreme različen režim delovanja med delovnimi dnevi in vikendom.



Grafikon 3: Urnik delovanja elektronske opreme.

Urnik umetne razsvetljave (Grafikon 4) je možno v Revitu popolnoma prilagoditi svojim željam. Tako smo v zadnjo energijsko analizo vključili tudi umetno razsvetljavo, katere vrednosti smo določili v poglavju 4.5.1, prikazujemo pa jih v grafikonu 4 skupaj s privzetimi vrednostmi programa Revit, katere v izračunih niso bile uporabljene.



Grafikon 4: Urnik umetne razsvetljave.

3.4.2.3 Infiltracija zraka in prezračevanje

Izmenjane količine zunanjega zraka v stavbi lahko v osnovi razdelimo na prezračevanje in infiltracijo. Prezračevanje stavbe delimo na naravno in mehansko, oboje pa ima namen vnosa zunanjega zraka v stavbo. Naravno prezračevanje je tok zraka skozi odprta okna, vrata, rešetke in druge v stavbnem ovoju načrtovane odprtine kot posledica naravnih ali umetnih ustvarjenih tlačnih razlik. Mehansko prezračevanje predstavlja nameren tok zraka v in iz stavbe s pomočjo prezračevalnih naprav. Infiltracija (posledica netesnosti stavbnega ovoja) predstavlja pretok zunanjega zraka v zgradbo skozi razpoke in druge nenamerne odprtine, ter ob uporabi zunanjih vrat [57]. Stopnja infiltracije je znašala 0,4/h (izmenjav zraka na uro). Na stopnjo infiltracije v Revitu ne moremo vplivati, saj vrednost 0,4/h izhaja iz metodologije delovanja programa DOE-2 [58]. Za primerjavo vrednosti smo v knjigi Gradbena fizika [59] preverili stopnjo zrakotesnosti pasivnih hiš, ki mora znašati maksimalno 0,6/h ali manj. Privzete vrednosti za prezračevanje in infiltracijo najdemo na spletni strani za pomoč uporabnikov programa Revit [50], osnove za vrednosti pa najdemo v standardu ASHRAE 62.1 [51].

3.2.2.4 Notranji toplotni viri

Poleg ogrevalnih sistemov, ki dovajajo toploto v stavbe, toploto generirajo tudi ljudje v stavbi, umetna razsvetljava in elektronska oprema. Različni tipi stavb imajo tudi različne vrednosti moči notranjih virov.

Človek kot notranji vir oddaja toploto, zato program zahteva vrednosti toplotnih dobitkov ljudi, ločene na senzibilno in latentno toploto. Za trgovske stavbe so predvidene vrednosti 73 W senzibilne toplote in 59 W latentne toplote, skupaj torej 132 W. Potreben je še vnos števila uporabnikov glede na enoto površine ali skupno število ljudi v prostoru. Po lastni presoji smo v stavbi predvideli največ 40 ljudi, privzeta vrednost programa je bila 10,5 ljudi/m^2. Te vrednosti temeljijo na standardu ASHRAE 62.1 [51] in priročniku ASHRAE Handbook of Fundamentals [55].

Privzeta vrednost moči umetne razsvetljave je znašala 15 W/m^2, moč elektronske opreme, ki je ni mogoče spreminjati, pa znaša 1,61 kW. Vrednosti program povzame po standardu ASHRAE 90.1-2010 [52]. Vrednosti moči razsvetljave v analizah nismo upoštevali in smo vrednosti nastavili na 0 W/m^2, samo v zadnji izvedeni simulaciji smo dodali moč umetne razsvetljave, ko smo izračunali zahteve po dodatni osvetlitvi prostorov na podlagi analiz osvetljenosti z dnevno svetlobo. Ta vrednost je znašala 6 W/m^2.

3.2.2.5 Lastnosti stavbnega ovoja

V nalogi je bil 3D-model izdelan iz stavbnih elementov (stene, streha, tla, okna …) in ne kot konceptualni masni model. Če bi se odločili za uporabo konceptualnega masnega modela, bi bilo potrebno gradbeno-fizikalne in optične lastnosti sestavnih delov stavbnega ovoja izbrati iz vnaprej določenega seznama. Te lastnosti so določene v standardu ASHRAE 90.1-2010 [52]. Ker smo v simulacijah uporabe energije in dnevne osvetljenosti uporabili izračune za detajlno izdelane modele, smo gradbeno-fizikalne in optične lastnosti elementov stavbnega ovoja določali sami. Ker je postopek določanja teh lastnosti v programu različen za transparentni in netransparentni del stavbnega ovoja, bomo vsak del opisali posebej.

Netransparentni del:
Gradbeno-fizikalne lastnosti, ki jih je potrebno definirati materialom netransparentnega dela stavbnega ovoja (tla, stene, strop) za izvedbo simulacije energijske analize, so toplotna prevodnost λ [W/mK], specifična toplota materiala c [J/g°C] in gostota materiala ρ [kg/m^3]. Program na podlagi podatkov izračuna toplotni upor R [m^{2}K/W] konstrukcijskega sklopa in faktor toplotne prehodnosti U [W/m^{2}K] ter toplotno maso C [kJ/K].

V simulacijah uporabe energije smo uporabili tri sestave zunanjih sten z različnimi lastnostmi. Odločili smo se, da uporabimo fasadne toplotno izolativne panele proizvajalca Trimo [60] v dveh različnih debelinah in zidni sistem z opeko proizvajalca Wienerberger [61] v kombinaciji s toplotno izolacijo iz kamene volne proizvajalca Knauf Insulation [62].

Prvi sestav (v nadaljevanju: Konstrukcijski sklop 1) je bil fasadni toplotno izolativni panel proizvajalca Trimo debeline 20 cm. Fasadni toplotno izolativni panel je prefabriciran sistem, izdelan v nadzorovanem okolju, in ni izpostavljen vplivom gradbišča. Sestavljen je iz dveh obojestransko pocinkanih in pobarvanih jeklenih pločevin debeline 0,6 do 0,7 mm. Pločevina je vezana na jedro, ki je izdelano iz mineralne volne. Vsi trije sklopi tvorijo trden element. Je enostavna in hitra rešitev v primerjavi z večplastnimi konstrukcijami sten. Takšna gradnja ne zahteva dodatnega vgrajevanja toplotne in hidro izolacije, parne in vetrne zapore ipd. Gradbeno-fizikalne lastnosti konstrukcijskega sklopa 1 so prikazane v preglednici 4.

Preglednica 4: Gradbeno-fizikalne lastnosti konstrukcijskega sklopa 1.

Sestava zunanje stene	d [m]	λ [W/mK]	R [m^{2}K/W]	c [J/kgK]	ρ [kg/m^3]	U [W/m^{2}K]
Fasadni panel	0,20	0,04	5,00	1030,00	40,00	0,20

Drugi sestav (v nadaljevanju: Konstrukcijski sklop 2) je bil prav tako fasadni toplotno izolativni panel proizvajalca Trimo debeline 24 cm. Njegove gradbeno-fizikalne lastnosti konstrukcijskega sklopa 2 so prikazane v preglednici 5.

Preglednica 5: Gradbeno-fizikalne lastnosti konstrukcijskega sklopa 2.

Sestava zunanje stene	d [m]	λ [W/mK]	R [m^{2}K/W]	c [J/kgK]	ρ [kg/m^3]	U [W/m^{2}K]
Fasadni panel	0,24	0,04	6,00	1030,00	40,00	0,17

Tretji sestav (v nadaljevanju: Konstrukcijski sklop 3) je bil zidni sistem izdelan iz opeke ter na zunanji strani obdan s toplotno izolacijo iz kamene volne, skupna debelina konstrukcijskega sklopa je znašala 42 cm. Ta konstrukcijski sklop zaradi svojih lastnosti (specifična toplota c in visoka gostota ρ) omogoča večjo akumulacijo toplote v primerjavi s fasadnimi toplotno izolativnimi paneli, vendar ima enako vrednost U kot konstrukcijski sklop 1. Gradbeno-fizikalne lastnosti konstrukcijskega sklopa 2 so prikazane v preglednici 6.

Preglednica 6: Gradbeno-fizikalne lastnosti konstrukcijskega sklopa 3.

Sestava zunanje stene	d [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	c [J/kgK]	ρ [kg/m³]	U [W/m²K]
Modularni opečni blok	0,30	0,15	2,00	920,00	700,00	0,20
Kamena volna	0,12	0,04	3,00	1030,00	40,00	

Konstrukcijska sestava strehe in tal je bila skozi vse simulacije uporabe energije enaka. Na strehi smo uporabili strešne toplotno izolativne panele panele proizvajalca Trimo, debeline 24 cm. Sestavljeni so po enakem principu kot fasadni paneli s pločevino 0,6 do 0,7 mm znotraj in zunaj, ki je vezana na jedro iz kamene volne. Gradbeno-fizikalne lastnosti konstrukcijskega sklopa strehe so prikazane v preglednici 7.

Preglednica 7: Gradbeno-fizikalne lastnosti konstrukcijskega sklopa strehe.

Sestava strehe	d [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	c [J/kgK]	ρ [kg/m³]	U [W/m²K]
strešni panel	0,24	0,04	6,00	1030,00	40,00	0,17

Konstrukcijski sklop tal je bil sestavljen iz ekstrudiranega polistirena debeline 20 cm in armiranobetonske temeljne plošče debeline 20 cm. Gradbeno-fizikalne lastnosti konstrukcijskega sklopa talne konstrukcije so prikazane v preglednici 8.

Preglednica 8: Gradbeno-fizikalne lastnosti konstrukcijskega sklopa talne konstrukcije.

Sestava talne konstrukcije	d [m]	λ [W/mK]	R [m²K/W]	c [J/kgK]	ρ [kg/m³]	U [W/m²K]
Armirani beton	0,20	2,33	0,09	880,00	2500,00	0,17
Ekstrudirani polistiren	0,20	0,04	5,71	1500,00	32,00	

Optična lastnost, ki jo je potrebno določiti netransparentnemu delu, je refleksivnost površin, ki vpliva na rezultate osvetljenosti prostora z dnevno svetlobo. Dovolj je, da refleksivnost definiramo materialu, ki v konstrukcijskem sklopu meji na notranjost prostora. Vrednosti se za strope, stene in tla razlikujejo, določili pa smo jo tudi notranjim in zunanjim senčilom ter asfaltni površini v okolici stavbe. Refleksivnost materiala je v program potrebno podati kot kombinacijo komponent v barvnem prostoru RGB (angl. *red, green, blue*). V preglednici 9 prikazujemo vrednosti refleksivnosti posameznih sklopov stavbnega ovoja in pripadajoče vrednosti RGB.

Preglednica 9: Vrednosti refleksivnosti posameznih površin in pripadajoče vrednosti RGB z barvno lestvico.

	Refleksivnost [%]	R	G	B	Barva
Tla	30	77	77	77	
Stene	50	128	128	128	
Strop	70	179	179	179	
Zunanja senčila	50	128	128	128	
Notranja senčila	70	179	179	179	
Okolica-asfalt	20	50	50	50	

Transparentni del:

Pri definiranju gradbeno-fizikalnih in optičnih lastnosti netransparentnega dela vse podatke urejamo v lastnostih materiala, pri transparentnem delu pa je to nekoliko bolj zapleteno. Ko steklo definiramo kot material, mu je potrebno določiti samo faktor LT z ustrezno RGB-kombinacijo barve stekla. Uporabimo enak postopek kot pri definiranju refleksivnosti netransparentnega dela stavbnega ovoja, le da je potrebno vedeti debelino in število slojev modelirane zasteklitve.

Toplotno prehodnost in g-faktor zasteklitve je potrebno določiti zasteklitvi, ki je že vrisana v 3D model, tako da pod analitičnimi lastnostmi izberemo primerno zasteklitev. Ker pa so te vrednosti zasteklitve povzete po standardu ASHRAE 90.1.-2010 [52], so precej neprilagojene zasteklitvam, ki se uporabljajo v Evropi. Zato je potrebno v inštalacijski mapi programa poiskati datoteko Construction.xml in jo odpreti v programu, ki omogoča spreminjanje te datoteke. Poiskati je potrebno eno od zasteklitev ali zapisati kodo nove zasteklitve ter določiti faktorja U in g. Faktor g je potrebno definirati samo za vpadni kot sonca 0°, ostale vrednosti v simulaciji ne vplivajo na končni rezultat energijske analize.

V simulacijah uporabe energije smo uporabili dva različna tipa zasteklitve fasad in en tip za zasteklitev strehe, ki je bil skozi simulacije vedno enak.

V preglednici 10 prikazujemo gradbeno-fizikalne in optične lastnosti uporabljenih zasteklitev fasad (zasteklitev 1 in zasteklitev 2) ter strehe.

Preglednica 10: Gradbeno-fizikalne in optične lastnosti zasteklitve 1.

Izbira zasteklitve	Tip	g	LT	U [W/m^{2}K]
Zasteklitev 1	dvoslojna	0,41	0,69	1,1
Zasteklitev 2	troslojna	0,38	0,63	0,7
Zasteklitev streha	troslojna	0,47	0,68	1,00

Pri zasteklitvi fasad smo uporabili dvoslojno ali troslojno zasteklitev z vrednostjo U 1,10 W/m^{2}K (zasteklitev 1) ali 0,70 W/m^{2}K (zasteklitev 2), vrednost faktorjev LT so znašale LT = 0,69 (zasteklitev 1) in LT = 0,63 (zasteklitev 2). Vrednost g zasteklitve 1 je znašala g = 0,41, zasteklitve 2 pa g = 0,38. Zasteklitev na strehi je bila uporabljena samo v eni različici, z vrednostjo = U 1,00 W/m^{2}K, faktorjem LT = 0,68 in faktorjem g = 0,47.

3.5 Predstavitev uporabljene programske opreme

Osnovo programske opreme je v nalogi predstavljal program Revit, ki je s funkcijami za izvedbo simulacij uporabe energije (Energy Analysis) in dodatki, ki so omogočali izdelavo analiz osvetljenosti z dnevno svetlobo in prejetega sončnega sevanja (Insight 360), tvoril celovito programsko orodje za izdelavo študije zasnove visokoučinkovitega stavbnega ovoja.

3.5.1 Program Revit

Program Revit je razvilo podjetje Autodesk, prvič se je na trgu pojavil januarja leta 2000 in se od takrat nenehno razvija in dopolnjuje [63]. Program je namenjen načrtovanju zgradb in konstrukcij ter podpira način načrtovanja BIM. BIM pomeni proces izdelave in upravljanje digitalnega modela, s pomočjo katerega oblikujemo, gradimo in vzdržujemo objekt skozi celoten življenjski cikel [64]; sicer pod kratico BIM najdemo še številne druge definicije. Uporabljajo ga arhitekti, gradbeniki, strojniki in elektro inženirji. Projektantom omogoča izdelavo projektov od ideje do končnega 3D-modela z vsemi detajli in informacijami za vsak gradnik, ki tvori 3D-model [64]. Za uporabo je potrebna sklenitev letne naročnine ali letne najemnine licence. Gre za samostojen program, ki ga sestavljajo moduli za arhitekturo, konstrukcije, sisteme (elektro in strojne inštalacije), teren in analize (statika, energija, osvetljenost). Program je možno dograjevati še z dodatnimi vtičniki, ki so lahko plačljivi ali ne, ki so jih razvila različna podjetja.

3.5.2 Funkcija Energy Analysis

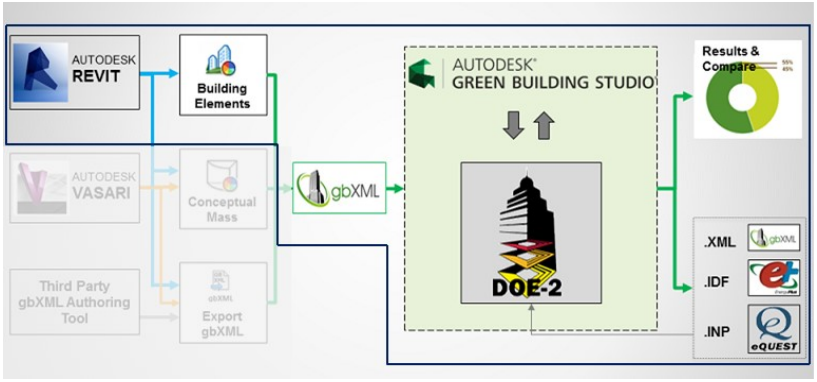
Funkcija Energy Analysis omogoča energijsko analizo stavb. Funkcija je sestavni del programskega okolja Revit in jo najdemo v orodni vrstici pod zavihkom Analyse. Simulacija izračunava pričakovano raven uporabe energije, izračun pa temelji na osnovi geometrije stavbe, klimatskih podatkov, tipa stavbe, karakteristikah stavbnega ovoja, aktivnih sistemov v stavbi HVAC in razsvetljave.

Energijska analiza deluje preko oblačne storitve GBS, katera za svoje delovanje uporablja program DOE-2.

GBS se lahko uporablja kot samostojen program in ni potrebna inštalacija na računalnik, ampak deluje kot spletna aplikacija. Za samostojno uporabo je precej okoren, uporabniški vmesnik pa se zdi nepregleden. Če ga želimo uporabljati kot samostojen program, je potrebno 3D-model, izdelan v programu BIM, izvoziti v formatu gbXML in nato uvoziti v GBS. Interoperabilnost z Revitom omogoča direktno pretvorbo modela oziroma uvoz formata gbXML v GBS in pregledovanje rezultatov znotraj Revita [47].

DOE-2 je brezplačni program, namenjen energijskim analizam vseh vrst stavb. Program v izračunu predvidi urno porabo energije stavbe in stroške energije. Podlaga za izračun so podatki o geometriji stavbe, klimatski podatki, urniki delovanja stavbe in predvideni sistemi HVAC. Glavna in najbolj pogosto uporabljena programa DOE-2 je verzija DOE-2.2. Program so razvili James J. Hirsch in sodelavci v sodelovanju z LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory), razvoj pa financira United States Department of Energy (USDOE) [48].

Simulacija energijske analize (Slika 16) poteka tako, da Revit pretvori podatke modela v format gbXML, ki jih nato pošlje v GBS, ta pa »komunicira« s programom DOE-2, kateri izvede dejanski izračun analize. Rezultate lahko pregledujemo v Revitu ali pa v GBS, kjer lahko po želji še optimiziramo porabo energije. Rezultate analize lahko izvozimo v treh različnih formatih, in sicer kot .xml, .idf ali .inp. Izračuni energijske analize in uporabe energije temeljijo na standardih ASHRAE.



Slika 16: Potek simulacije energijske analize [50].

Rezultati energijske analize se v Revitu izpišejo v obliki diagramov in tabelaričnih vrednosti, ki vsebujejo:

- letno in mesečno porabo električne energije in energenta (odvisno od izbranega HVAC sistema);
- uporabo energije in stroškov za energijo v življenjskem ciklu stavbe (za dobo 30 let ob upoštevanju zmanjšanja cene energentov v tem obdobju za 6,1%);
- letni potencial obnovljivih virov energije na lokaciji;
- letni ogljični odtis;
- letne stroški električne energije in izbranega energenta;
- pregled porabnikov električne energije in izbranega energenta ter porabljena energija vsakega posameznega porabnika;

- mesečne zahteve po ogrevanju in hlajenju stavbe (notranji viri, transmisijske izgube, prezračevalne izgube ali pritoki, solarni dobitki).

Za potrebe našega dela smo bili osredotočeni predvsem na mesečne zahteve po ogrevanju in hlajenju stavbe. Iz tako pridobljenih rezultatov težko razberemo velikost vrednosti posameznega vpliva, zato za bolj podroben pregled in interpretacijo rezultatov lahko celotno analizo pregledamo v .xml formatu, kjer lahko najdemo tudi vse vhodne podatke. Rezultate je možno najti tudi v formatu .csv, katerega podpira program Microsoft Excel, in so kot taki najbolj primerni za obdelavo.

3.5.3 Dodatek Insight 360

Insight 360 [65] je dodatek k Revitu, ki omogoča analize osvetljenosti z dnevno svetlobo in analize sončnega obsevanja. Zavihek Insight 360 prikazujemo na sliki 18 z označenima uporabljenima ukazoma Solar in Lighting. Rezultate analiz lahko izvozimo v formatu .csv za pregledovanje in urejanje v MS Excel-u. Ukaz Lighting [66] opravlja hitre in natančne analize osvetljenosti z dnevno svetlobo preko oblačne storitve Autodesk 360 Rendering [34], grafične rezultate si ogledamo znotraj Revit-a.

Algoritem, ki ga program uporablja za izvedbo analiz osvetljenosti z dnevno svetlobo, se imenuje Multidimensional Lightcuts [67]. Pri analizi osvetljenosti z dnevno svetlobo lahko izbiramo med Perezovim ali štirimi CIE tipi neba (jasno, kombinirano, oblačno in nespremenljivo nebo). Ukaz Solar za razliko od Lighting ni oblačna storitev, ampak deluje znotraj programa Revit. Rezultat, ki ga poda program, je količina prejetega sončnega sevanja na obravnavani površini v določenem časovnem obdobju. Za izračun uporablja Perezov model neba in ne ponuja izbire druge možnosti.

4.0 ANALIZA VPLIVA ZASNOVE STAVBNEGA OVOJA NA CELOSTNO ENERGIJSKO BILANCO STAVBE

V tem poglavju bomo predstavili praktični del naloge. Prikazali bomo analize dnevne osvetljenosti prostora in simulacije uporabe energije ter izračun energijske bilance stavbe. Tekom predstavitve analiz in simulacij bomo predstavili lastnosti uporabljenih računalniških 3D-modelov stavbe in njihove značilnosti, prikazali rezultate za vsak obravnavan model ter izvedli primerjavo dnevne osvetljenosti in uporabe energije med različno zasnovanimi modeli. Za posamezne modele, ki smo jih uporabili za analize dnevne osvetljenosti, bomo prikazali podatke o zastekljenih površinah za vsako orientacijo posebej, skupno površino zasteklitve, delež zasteklitve sten WWR (angl. Window to Wall Ratio) in/ali strehe SRR (angl. Skylight to Roof Ratio) ter delež zasteklitve glede na površino tal (DPT). Rezultate analiz dnevne osvetljenosti bomo prikazali grafično in tabelarično. Grafično podane rezultate bomo prikazali samo ob 12.00 dneva za vsak analiziran dan, ostale grafične rezultate bomo priložili v prilogo A na koncu naloge, saj gre za precejšnjo zbirko teh rezultatov, medtem ko bomo tabelarične rezultate prikazali za vsako obravnavano uro in dan.

Pred analizami dnevne osvetljenosti prostorov z dnevno svetlobo smo analizirali energijski potencial stavbnega ovoja. Prikazali bomo izračunane vrednosti prejetega sončnega sevanja na letni ravni za vsako površino stavbnega ovoja posebej (vse orientacije fasad in streho) ter analizo osenčenja obravnavane stavbe zaradi vpliva okoliških stavb, ki smo jo uporabili za lažje razumevanje izračunov prejetega sončnega sevanja na posamezne površine stavbnega ovoja. Tu smo na podlagi idejne zasnove računalniškega 3D-modela izdelali model brez zasteklitev in brez napuščev.

Za potrebe analiz osvetljenosti z dnevno svetlobo smo izdelali 6 modelov. Prvi model je bil izdelan na podlagi idejne zasnove stavbe in je predstavljal osnovo za primerjavo osvetljenosti površin z dnevno svetlobo z modelom 6, ki je predstavljal optimiziran model z vidika zasteklitve in osvetljenosti z dnevno svetlobo. Končno zasnovo modela 6 smo izdelali na podlagi predhodno analiziranih modelov 2, 3, 4 in 5. Model 2 je imel zasteklitev nameščeno na vseh fasadah; z njim smo preučili, kako na osvetljenost prostora vpliva zasteklitev fasad z vseh smeri neba. Model 3 smo izdelali z namenom analiziranja vpliva strešne zasteklitve na osvetljenost prostora z dnevno svetlobo; uporabili smo manjše zasteklitve v obliki pravokotnikov. Prvi koncept zasnove končnega optimiziranega modela z vidika osvetljenosti je predstavljal model 4, kjer smo površino zasteklitve fasad zmanjšali in spremenili obliko uporabljenih zasteklitev v primerjavi z modelom 1 ter uporabili strešno zasteklitev v obliki tristranih prizem. V modelu 5 smo površino zasteklitve fasad še nekoliko zmanjšali glede na model 4 ter preizkusili zasteklitev strehe s svetlobnimi trakovi, da bi ugotovili, s katero vrsto strešne zasteklitve dosežemo boljše rezultate osvetljenosti in bolj primerno distribucijo dnevne svetlobe po prostoru. V modelu 6 smo zasteklitev fasade še dodatno zmanjšali in razdrobili posamezne zasteklitve na manjše segmente, da bi zmanjšali toplotne dobitke zaradi sončnega sevanja, obenem pa izboljšali osvetljenost notranjosti z dnevno svetlobo. Na strehi smo uporabili zasteklitev v obliki tristranih prizem. Na koncu 1. sklopa smo izvedli primerjavo izračunanih vrednosti UDI* med modelom 1 in modelom 6.

Po opravljenih analizah osvetljenosti z dnevno svetlobo in definiranju zasteklitve smo nadaljevali z 2. sklopom, kjer smo s simulacijami uporabe energije analizirali odziv treh različnih sistemov zunanjih sten in dveh vrst zasteklitve glede toplotnih izgub in akumulacije toplote. Izvedli smo 4 simulacije za model E2 ter eno simulacijo za model E1 ter na koncu sklopa izvedli še primerjavo uporabe energije med obema modeloma z enakimi lastnostmi materialov stavbnega ovoja.

V 3. sklopu smo zaradi spremembe optičnih lastnosti zasteklitev v modelu E2 ponovno opravili analizo osvetljenosti z dnevno svetlobo ter izvedli primerjavo osvetljenosti z dnevno svetlobo med modelom 6 in modelom E2. V tem sklopu smo izdelali še model E3, ki je z dodatnimi senčili zunaj in znotraj stavbe

zadostil kriterijem metrik sDA + ASE, ter še enkrat izvedli analizo osvetljenosti z dnevno svetlobo, saj so dodana senčila spremenila vizualne pogoje v stavbi.

V 4. sklopu smo izdelali urnik uporabe umetne razsvetljave na podlagi letne analize osvetljenosti prostora z dnevno svetlobo in model E4, da bi uporabo energije stavbe karseda približali realnim pogojem med obratovanjem. Na koncu smo izvedli simulacijo uporabe energije modela E4 z definiranim urnikom in močjo umetne razsvetljave.

Vsem uporabljenim modelom so bile skupne značilnosti, opisane v preglednici 11.

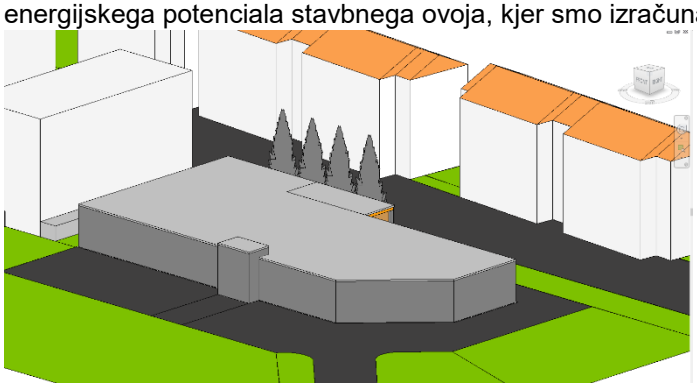
Preglednica 11: Prikaz bruto površin sten in neto površin strehe in tal.

Bruto površina fasad glede na orientacijo [m^2]	JV	JZ	SV	SZ	V
	334,60	226,74	141,14	420,20	105,40
Skupaj bruto površina fasad [m^2]	1227,99				
Neto površina strehe [m^2]	1584,00				
Neto površina tal [m^2]	1584,00				
Neto prostornina [m^3]	9883,00				

Bruto površina JV fasad je znašala 334,60 m^2, JZ fasad 226,74 m^2, SV fasad 141,14 m^2, SZ fasad 420,20 m^2 in V fasada 105,40 m^2. Skupna bruto površina fasad je znašala 1227,99 m^2. Neto površina strehe je znašala 1584,00 m^2, prav tako je neto površina tal znašala 1584,00 m^2, neto prostornina stavbe pa je bila 9883 m^3.

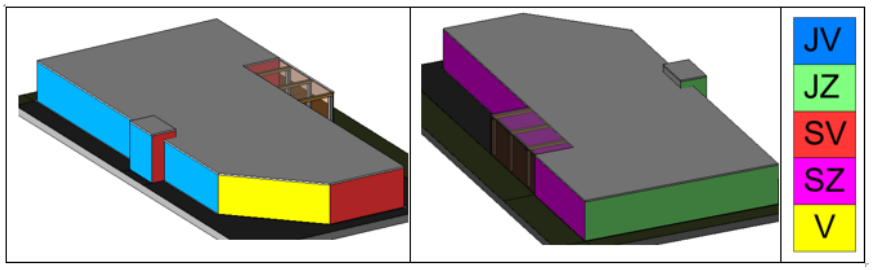
4.1 Energijski potencial stavbnega ovoja

Pred začetkom analiz dnevne osvetljenosti in simulacij uporabe energije smo izvedli kratko analizo energijskega potenciala stavbnega ovoja, kjer smo izračunali prejeto sončno sevanje. V ta namen smo izdelali 3D-model (Slika 17), ki je bil po velikosti identičen modelu 1 oz. izhodiščnemu modelu (model, predstavljen v nadaljevanju naloge), ki pa ni ni vseboval zasteklitev ter napuščev, saj smo načrtovali, da se bodo napušči tekom iskanja optimalne rešitve bodisi spreminjali, bodisi jih bomo popolnoma odstranili.



Slika 17: 3D model za analizo prejetega sončnega sevanja.

Analizo prejetega sončnega sevanja smo izračunali na letni ravni, posebej za vsako orientacijo fasad in streho (Slika 18). Z analizo prejetega sončnega sevanja smo si ustvarili podlago za nadaljnje načrtovanje zasteklitve stavbnega ovoja, saj ta analiza pokaže, kateri predeli imajo potencial za pridobitev toplotnih dobitkov v stavbi, na katerih predelih je potrebno razmišljati o uporabi senčil ter kakšen je vpliv sosednjih objektov na obravnavano stavbo.



Slika 18: Prikaz orientacije fasad glede na smer neba.

V preglednici 12 prikazujemo bruto površine fasad glede na orientacijo in skupno bruto površino ter bruto površino strehe brez strehe nadstrešnice na SZ strani stavbe.

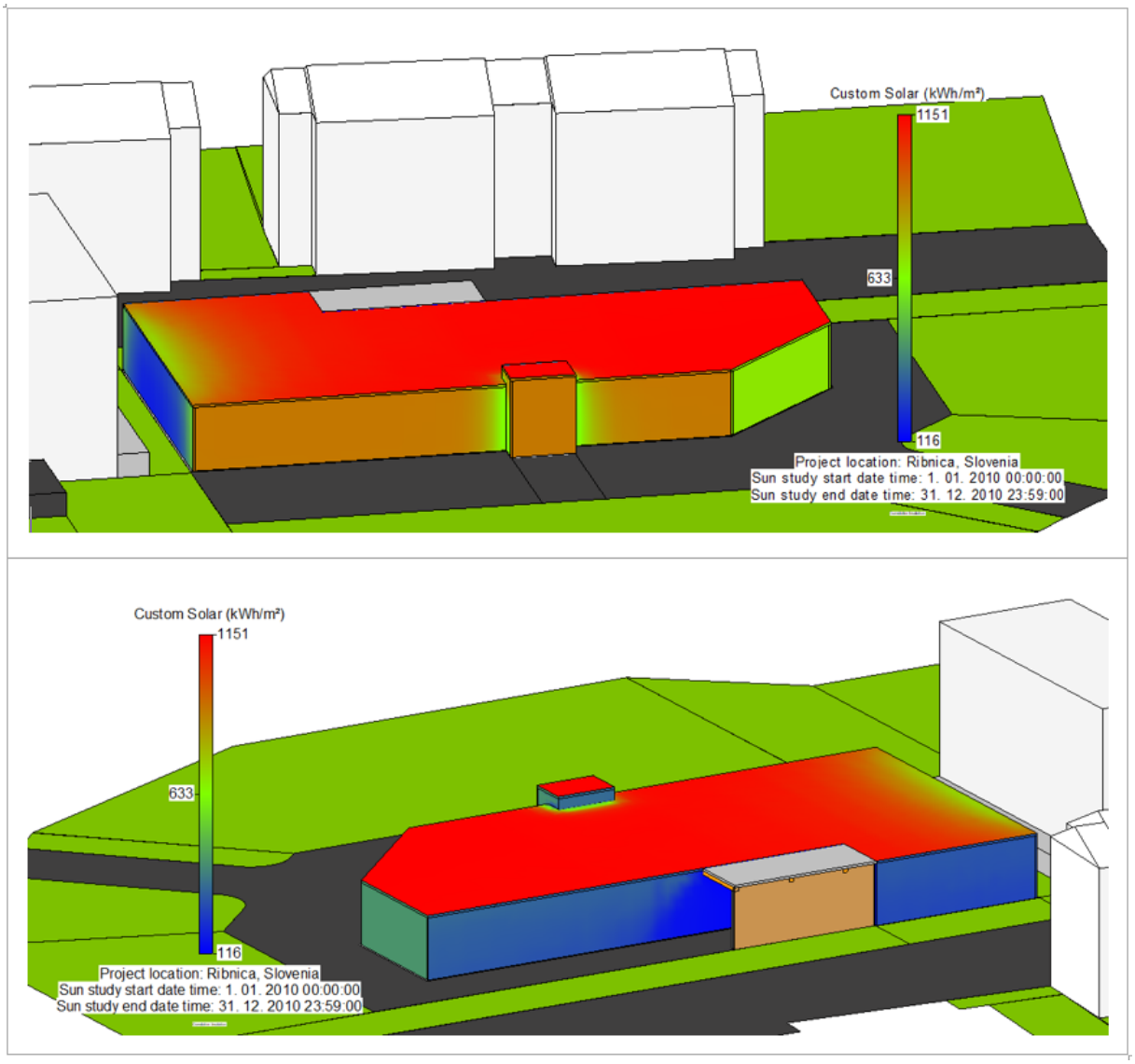
Preglednica 12: Bruto površine obravnavane stavbe za analizi osončenosti.

Bruto površina fasad glede na orientacijo [m^2]	JV	JZ	SV	SZ	V
	334,60	226,74	141,14	420,20	105,40
Skupaj bruto površina fasad [m^2]	1227,99				
Skupaj bruto površina strehe [m^2]	1606,40				

Iz preglednice 12 je razvidno, da JV orientirane fasade nanesejo 334,6 m^2, JZ fasade 226,7 m^2, SV fasade 141,1 m^2, SZ fasade 420,2 m^2 in V fasada 105,4 m^2. Skupna bruto površina fasade tako znaša 1228,0 m^2, kar je približno 30% manj od bruto površine strehe, ki znaša 1606,4 m^2. Ker gre za pritlični objekt z relativno velikim tlorisom, je površina strehe približno 30% večja od skupne površine vseh fasad, zato lahko na strehi pričakujemo večje kumulativne vrednosti prejetega sončnega sevanja kot na fasadah.

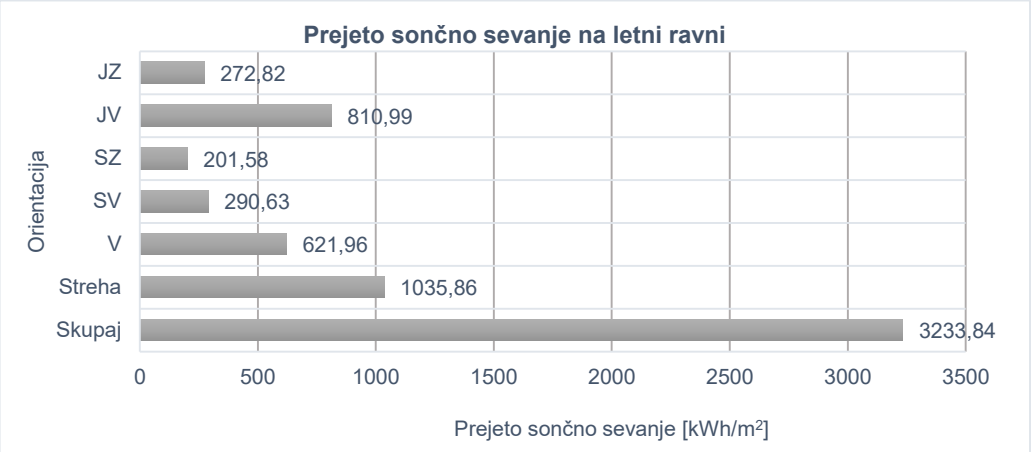
4.1.1 Prejeto sončno sevanje

Količino prejetega sončnega sevanja smo izračunali z ukazom Solar v dodatku Insight 360. Za želen interval analiziranja osončenosti je potrebno izbrati določen del dneva, leta ali celotno leto z ukazom Sun settings. Na sliki 19 prikazujemo grafični prikaz rezultatov prejetega sončnega sevanja stavbe na letni ravni.



Slika 19: Grafični prikaz osončenosti na letni ravni.

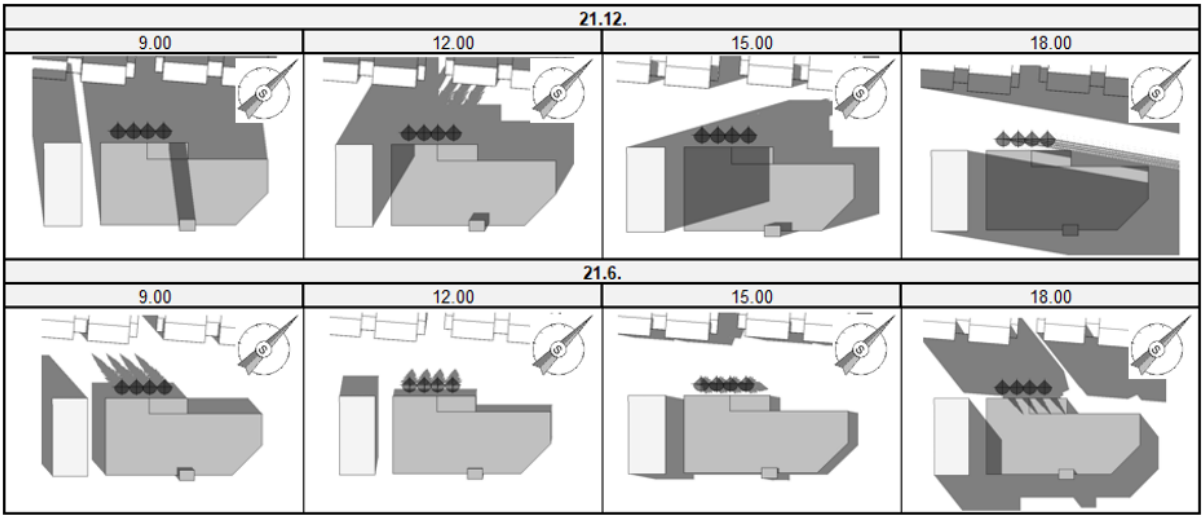
Omeniti velja, da na sliki 19 ni vidnih dreves ob SZ delu obravnavane stavbe, saj smo jih za lažjo predstavitev rezultatov skrili; steno in streho nadstrešnice smo prikazali brez pripadajočih vrednosti prejetega sončnega sevanja, saj jih ne štejemo h stavbnemu ovoju, imajo pa vpliv na senčenje stavbe. Površine, ki so obarvane z bolj hladnimi barvami, prejmejo manj sončnega sevanja kot tiste, ki so obarvane z bolj toplimi barvami. Največji delež sončnega sevanje prejme streha skoraj enakomerno po vsej svoji površini, le v skrajnem JZ delu zaradi bližine sosednje stavbe vrednosti padejo. Fasade, orientirane proti JV, prejmejo največjo količino sončnega sevanja, na V in SV orientirane fasade nekoliko manj, fasade na SZ in JZ pa najmanj. Vzrok, da JZ fasade prejmejo manj sočnega sevanja, je bližina sosednje stavbe, za SZ fasade pa je vzrok v majhnem prejetem sončnem sevanju pot sonca, saj je skozi leto ta stran stavbe najmanj obsijana s soncem, prav tako nanjo delno vplivajo tudi sosednji objekti in nadstrešnica. V grafikonu 5 prikazujemo povprečne vrednosti prejetega sončnega sevanja na letni ravni za vsako posamezno orientacijo fasad in strehe ter skupno prejeto sončno sevanje za celoten stavbni ovoj.



Grafikon 5: Prejeto sončno sevanje na letni ravni.

Fasade, orientirane na JV in V, skozi leto prejmejo bistveno več sončnega sevanja kot preostale fasade, in sicer prejmejo JV fasade 810,99 kWh/m^2 , V fasada pa 621,96 kWh/m^2. To pomeni, da za fasade s to orientacijo lahko predvidevamo največji delež zasteklitve, saj dobra osončenost pomeni tudi dobro predispozicijo za dobro osvetljenost prostorov stavbe z dnevno svetlobo, vendar pa ta ne sme biti previsok, hkrati pa je potrebno premisliti tudi o ustreznem senčenju takšne zasteklitve. Fasade, orientirane na SV, SZ in JZ, prejmejo bistveno manj sončnega sevanja; SV fasade prejmejo 290,63 kWh/m^2, SZ 201,58 kWh/m^2 in JZ fasade 272,82 kWh/m^2. Največ sončnega sevanja na letni ravni prejme streha, 1035,86 kWh/m^2. Celoten stavbni ovoj v celem letu prejme 3233,84 kWh/m^2 sončnega sevanja.

Izračunane vrednosti prejetega sončnega sevanja so lažje razumljive, če si ogledamo padanje senc na stavbo v zimskem (zimski solsticij 21.12.) in poletnem času (poletni solsticij 21.6.) (Slika 20). Sonce namreč v poletnem času prepotuje bistveno daljšo navidezno pot na nebu kakor pozimi. V poletnem času tako streha kot JV in V orientirane površine prejmejo več sončnega sevanja kot pozimi, ko v količini prejetega sončnega sevanja prevladujejo JV orientirane površine. Na podlagi teh analiz lahko zaključimo, da se na toplotne dobitke sončnega sevanja in osvetljenosti z dnevno svetlobo v zimskem času lahko zanesemo le na JV orientiranih fasadah, ne moremo pa se zanesti na strešno zasteklitev. V spomladanskem in jesenskem času lahko toplotne dobitke sončnega sevanja in osvetlitev z dnevno svetlobo pričakujemo tako na JV in V orientiranih fasadah, prav tako pa tudi v poletnem času.



Slika 20: Prikaz padanja senc ob dnevih 21.12. in 21.6.

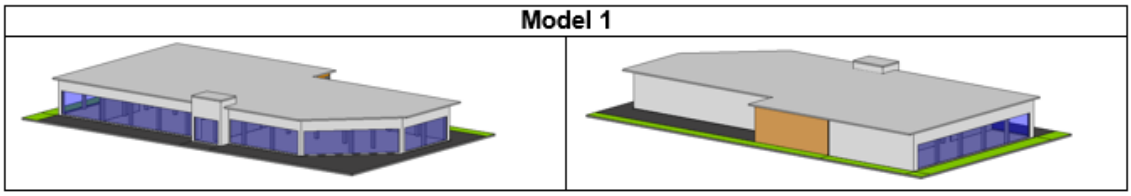
4.2 1. SKLOP: Analiza dnevne osvetljenosti

V prvem sklopu zasnove stavbnega ovoja smo analizirali dnevno osvetljenost prostora prvih šestih modelov, kjer smo definirali model, v nadaljevanju uporabljen za simulacijo uporabe energije. Tu bomo predstavili grafične in tabelarične vrednosti rezultatov osvetljenosti prostora z dnevno svetlobo. Grafični del izračunanih vrednosti smo prikazali le ob 12.00 za vsak analiziran dan, ostali grafični rezultati izvedeni ob 9.00, 15.00 in 18.00 so prikazani v prilogi A1, medtem ko so rezultati v preglednicah predstavljeni za vsak analiziran dan in vsako analizirano uro.

4.2.1 Model 1

4.2.1.1 Lastnosti modela 1

Model 1 (Slika 21) predstavlja izhodiščni model, zasnovan na osnovi pridobljene idejne zasnove. Zastekljene so vse fasade razen fasad s SZ in SV orientacijo. Zasteklitev fasad poteka po celotni dolžini sten, puščeni so le deli, kjer se stikata dve steni. Višina zasteklitve je na vseh fasadah enaka in meri 4,0 m s parapetom višine 0,2 m. Rezultati analize osvetljenosti modela 1 z dnevno svetlobo so nam predstavljali osnovo za primerjavo rezultatov, izračunanih za model 6, poleg tega so bili pokazatelj, kako globoko v prostor sega svetloba pri takšni poziciji zasteklitve.



Slika 21: 3D-prikaz modela 1.

V preglednici 13 prikazujemo podatke o zasteklitvi. V prvem delu preglednice so prikazane površine zasteklitve sten glede na orientacijo, vrednost LT ter deleža WWR in SRR za vsako orientacijo posebej. V drugem delu preglednice prikazujemo podatke o skupno zastekljeni površini sten in strehe, skupne vrednosti WWR in SRR ter DPT posebej za stene in streho ter skupno vrednost DPT.

Preglednica 13: Podatki o zastekljenih površinah modela 1.

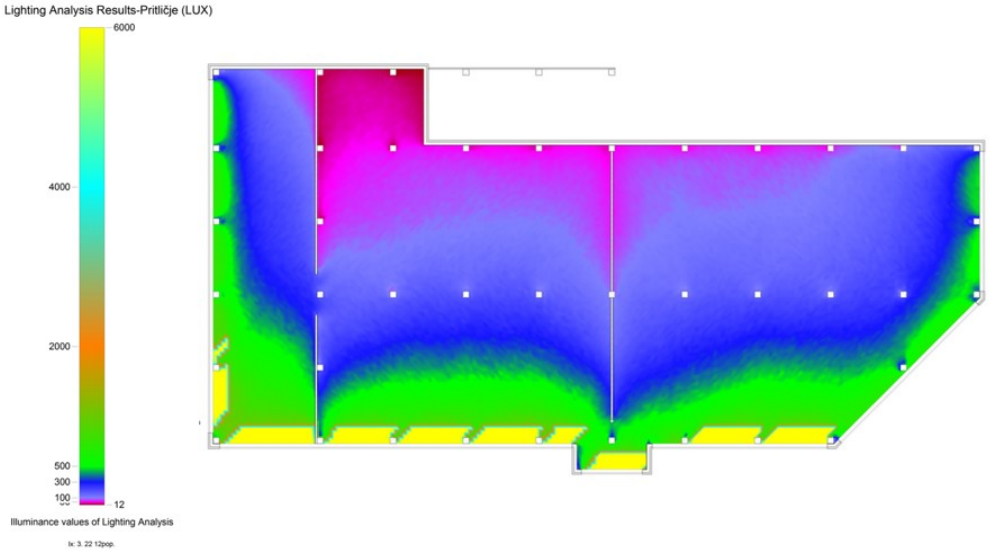
Model 1	JV	JZ	SV	SZ	V	Streha
Površina [m^2]	193,60	116,00	46,00	0,00	64,00	0,00
LT	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,00
WWR oz. SSR [%]	57,86	51,18	32,60	0,00	60,00	0,00

Skupaj zasteklitev fasad [m^2]:	419,60	Skupaj WWR [%]:	34,17	DPT [%]:	26,49
Skupaj zasteklitev streha [m^2]:	0,00	Skupaj SRR [%]:	0,00	DPT [%]:	0,00
Skupaj zasteklitev [m^2]:	419,60		Skupaj DPT [%]		26,49

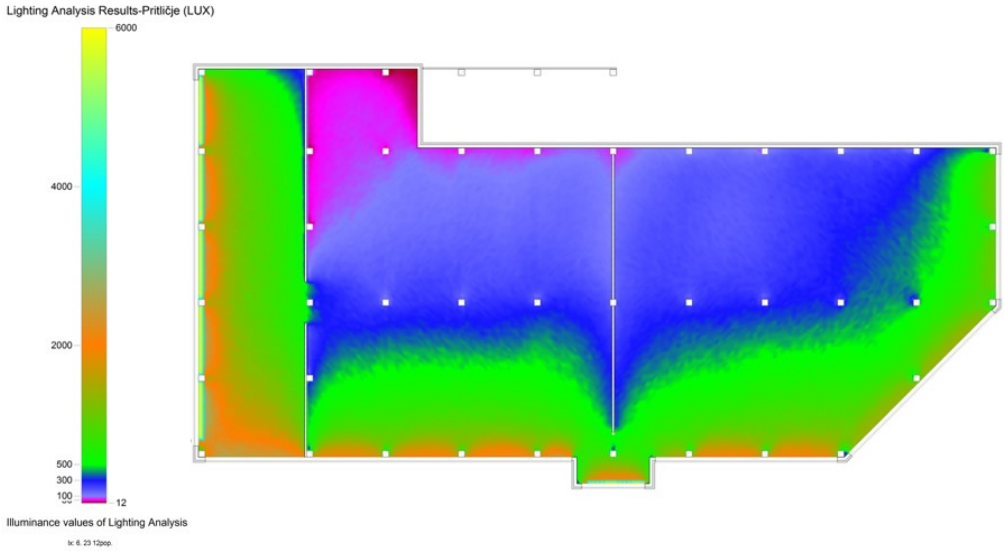
Vrednosti WWR posameznih fasad znašajo od 32,60% do 60,00% oz. od 46,00 m^2 do 193,60 m^2, skupna vrednost WWR celotne fasade znaša 34,17% (419,60 m^2), razmerje DPT 26,49%, zasteklitev strehe pa v tem modelu ni bila predvidena.

4.2.1.2 Osvetljenost z dnevno svetlobo – model 1

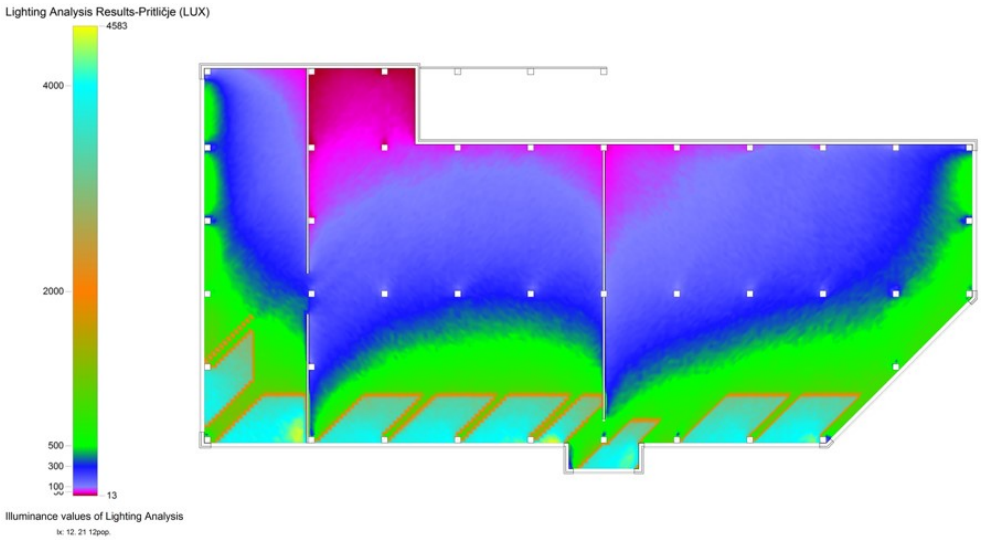
Na spodnjih slikah (Slika 22, Slika 23 in Slika 24) so prikazane grafične vrednosti osvetljenosti z dnevno svetlobo modela 1.



Slika 22: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 12.00 – model 1



Slika 23: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 12.00 – model 1



Slika 24: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 12.00 – model 1

Tabelarične rezultate osvetljenosti prostora z dnevno svetlobo prikazujemo v preglednici 14. Rezultati z odebeljeno zeleno barvo pisave predstavljajo odstotek površine prostora, ki zadosti kriteriju UDI*.

Preglednica 14: Osvetljenost prostora z dnevno svetlobo – model 1.

	Model 1				
	Osvetljenost [lx]	Osvetljena površina prostorov UDI* [%]			
		09.00	12.00	15.00	18.00
22.3.	<300	18	71	79	100
	300-2000	**52**	**25**	**21**	**0**
	>2000	30	4	0	0
23.6.	0-300	53	51	56	72
	300-2000	**40**	**46**	**43**	**27**
	>2000	7	3	1	1
21.12.	0-300	86	58	100	100
	300-2000	**14**	**28**	**0**	**0**
	>2000	0	14	0	0

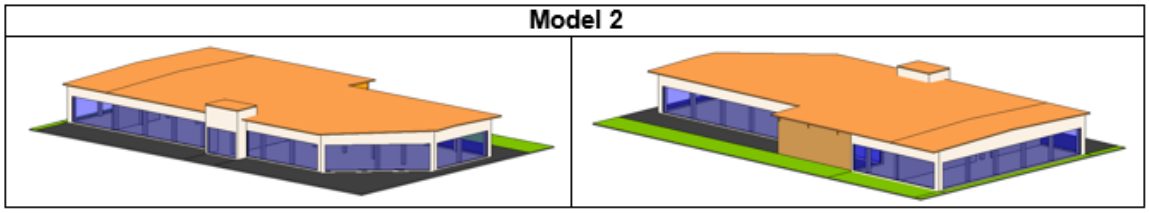
V modelu 1 je dobro osvetljen pas ob zasteklitvah, ki sega v poletnem času popoldan in zimskem ter spomladanskem času dopoldan približno do sredine prostora. Površine prostora, ki izpolnjujejo kriterij UDI* v dopoldanskem času dosegajo od 14% (21.12. ob 9.00) do 52% (22.3. ob 9.00), v popoldanskem času pa se vrednosti gibljejo od 0% (21.12. ob 15.00 in 18.00 in 21.3. ob 18.00) do 43% (23.6. ob 15.00).

Ob velikih zastekljenih površinah se pojavljajo površine prostora, ki so glede na kriterij UDI* predvsem v dopoldanskih urah v vseh treh obravnavanih dneh preveč osvetljene, razen ob 9.00 dne 21.12. Površine, ki so preveč osvetljene, znašajo od 3% do 30% (22.3. ob 9.00). V skoraj vseh analiziranih dnevih in urah je površina prostora, ki izpolnjuje zahteve UDI*, manjša od 50%, le dne 22.3. ob 9.00 je ta vrednost presežena in znaša 52%.

4.2.2 Model 2

4.2.2.1 Predstavitev modela 2

Model 2 (Slika 25) predstavlja model z zastekljenimi vsemi fasadami. Višina zasteklitve je na vseh fasadah enaka in meri 4,0 m s parapetom višine 0,2 m. Cilj modela je preučiti, kakšno in koliko osvetljenosti nam prinese zasteklitev za vse možne orientacije, kakšen je potencial, ki bi ga lahko izkoristili še pri drugih zasteklitvah fasad, ki v modelu 1 niso bile zastekljene.



Slika 25: 3D-prikaz modela 2.

V preglednici 15 prikazujemo podatke o zasteklitvi. V prvem delu preglednice so prikazane površine zasteklitve sten glede na orientacijo, vrednost LT ter deleža WWR in SRR za vsako orientacijo posebej. V drugem delu preglednice prikazujemo podatke o skupno zastekljeni površini sten in strehe, skupne vrednosti WWR in SRR ter DPT posebej za stene in streho ter skupno vrednost DPT.

Preglednica 15: Podatki o zastekljenih površinah – model 2.

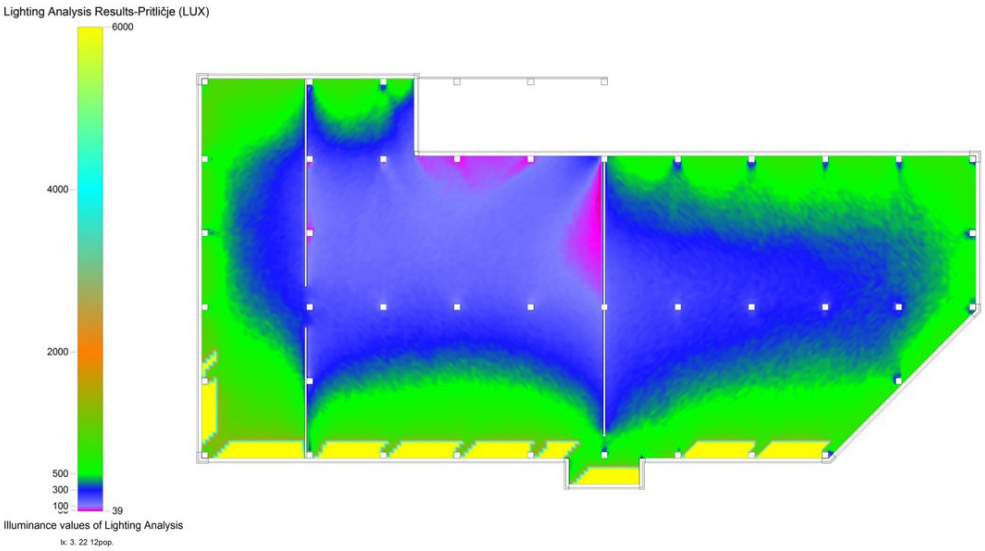
Model 2	JV	JZ	SV	SZ	V	Streha
Površina [m^2]	196,60	119,00	69,40	246,60	64,00	0,00
LT	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,00
WWR oz. SRR [%]	58,8	52,5	49,2	58,7	60,00	0,00

Skupaj zasteklitev fasad [m^2]:	695,60	WWR [%]:	56,60	DPT [%]	43,92
Skupaj zasteklitev streha [m^2]:	0,00	SRR [%]:	0,00	DPT [%]	0,00
Skupaj zasteklitev [m^2]:	695,60		Skupaj DPT [%]		43,92

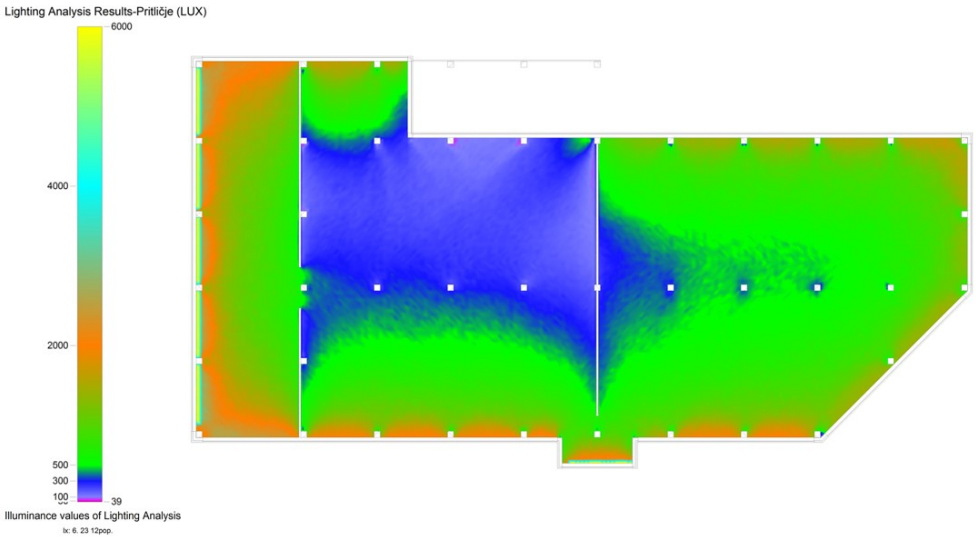
Vrednosti WWR posameznih fasad znašajo od 49,20% do 60,0%, skupna vrednost WWR celotne fasade znaša 56,60% (695,60 m^2), razmerje DPT pa 43,92%, zasteklitev strehe tu ni predvidena. V primerjavi z modelom 1 je skupna vrednost WWR večja za 21,90 odstotnih točk (276,00 m^2).

4.2.2.2 Osvetljenost z dnevno svetlobo – model 2

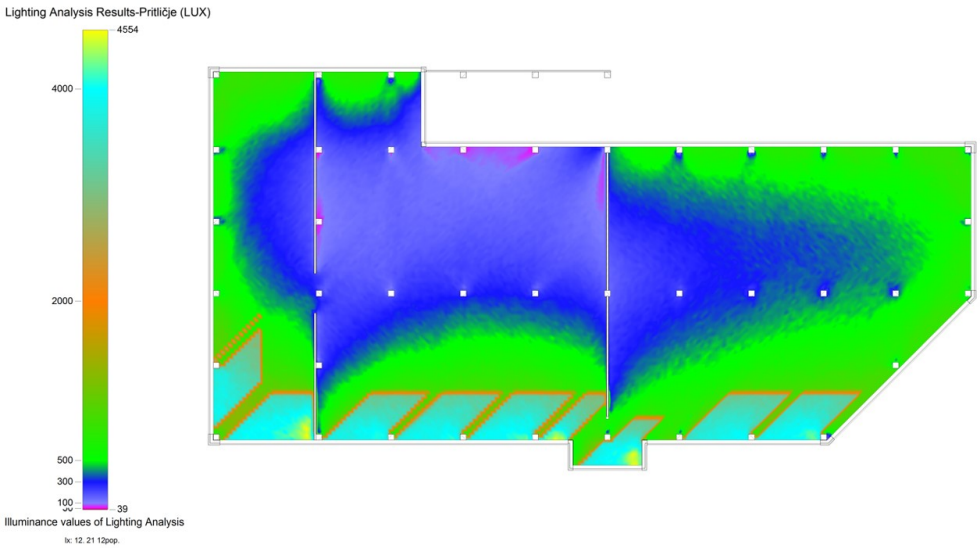
Na slikah (Slika 26, Slika 27 in Slika 28) so prikazane grafične vrednosti osvetljenosti z dnevno svetlobo modela 2.



Slika 26: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 12.00 – model 2.



Slika 27: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 12.00 – model 2.



Slika 28: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 12.00 – model 2.

Tabelarične rezultate osvetljenosti prostora z dnevno svetlobo prikazujemo v preglednici 16. Rezultati z odebeljeno zeleno barvo pisave predstavljajo odstotek površine prostora, ki zadosti kriteriju UDI*.

Preglednica 16: Osvetljenost prostora z dnevno svetlobo – model 2.

	Model 2				
	Osvetljenost [lx]	Osvetljena površina prostorov UDI*[%]			
		09.00	12.00	15.00	18.00
22.3.	<300	7	52	67	100
	300-2000	**54**	**44**	**33**	**0**
	>2000	39	4	0	0
23.6.	0-300	39	29	31	52
	300-2000	**54**	**68**	**64**	**46**
	>2000	7	3	5	2
21.12.	0-300	85	44	100	100
	300-2000	**15**	**46**	**0**	**0**
	>2000	0	10	0	0

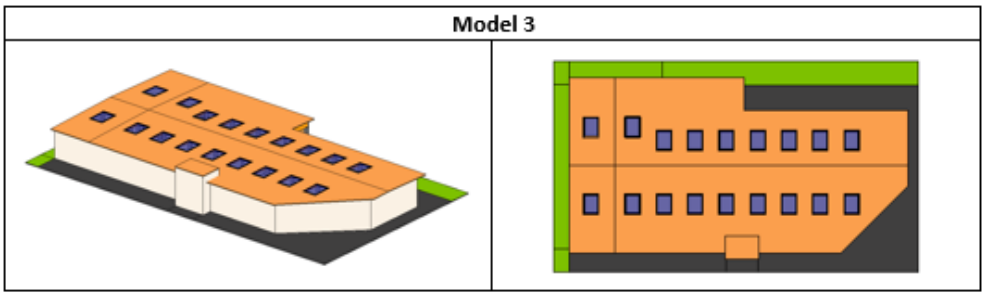
Osvetljenost z dnevno svetlobo modela 2 je dokaj visoka, vendar pa distribucija svetlobe ne sega globoko v prostor, razen v poletnem času. Površine prostora, ki izpolnjujejo kriterij UDI*, v dopoldanskem času dosegajo od 15% (21.12. ob 9.00) do 68% (23.6. ob 12.00), v popoldanskem času se vrednosti gibljejo od 0% (21.12. ob 15.00 in 18.00 in 21.3. ob 18.00) do 64% (23.6. ob 15.00).

Površine, katerih vrednosti osvetljenosti z dnevno svetlobo presegajo kriterije UDI*, se tudi v tem modelu pojavijo ob zastekljenih površinah. Najglobje v prostor dnevna svetloba prehaja 22.3. ob 9.00, vendar je velik delež prostora (39%) ob tem času preveč osvetljen. Večino časa je prostor v stavbi s takšno zasteklitvijo dobro osvetljen, še posebej kjer se nahaja trgovina 2. Previsoke vrednosti se v tem modelu pojavljajo predvsem na V in JV strani, ki prejme največ sončnega sevanja, SZ in SV strani osvetljuje večino leta le difuzna svetloba, zato se tu ne pojavijo preveč osvetljene površine; območja ob zasteklitvi dosegajo kriterij UDI*, vendar z vidika uporabe energije za severno orientirane fasade ni zaželeno, da so močno zastekljene.

4.2.3 Model 3

4.2.3.1 Predstavitev modela 3

Model 3 (Slika 29) predstavlja model, kjer je zastekljena samo streha. Vrednost SRR znaša 10%, v kombinaciji z zastekljenimi stenami je sicer priporočljivo, da SSR znaša med 3%-6% [22]. Ker stene v modelu 3 ne vsebujejo zasteklitve, smo se odločili, da za SSR upoštevamo približno 10%, kar znaša 159,12 m^2, velikost ene strešne zasteklitve meri 3,4 m x 2,6 m, skupaj je zasteklitev v modelu 18 in so približno enakomerno razporejene po površini strehe.



Slika 29: 3D prikaz modela 3.

V preglednici 17 prikazujemo podatke o zasteklitvi. V prvem delu preglednice so prikazane površine zasteklitve sten glede na orientacijo, vrednost LT ter deleža WWR in SRR za vsako orientacijo posebej. V drugem delu preglednice prikazujemo podatke o skupno zastekljeni površini sten in strehe, skupne vrednosti WWR in SRR ter DPT posebej za stene in streho ter skupno vrednost DPT.

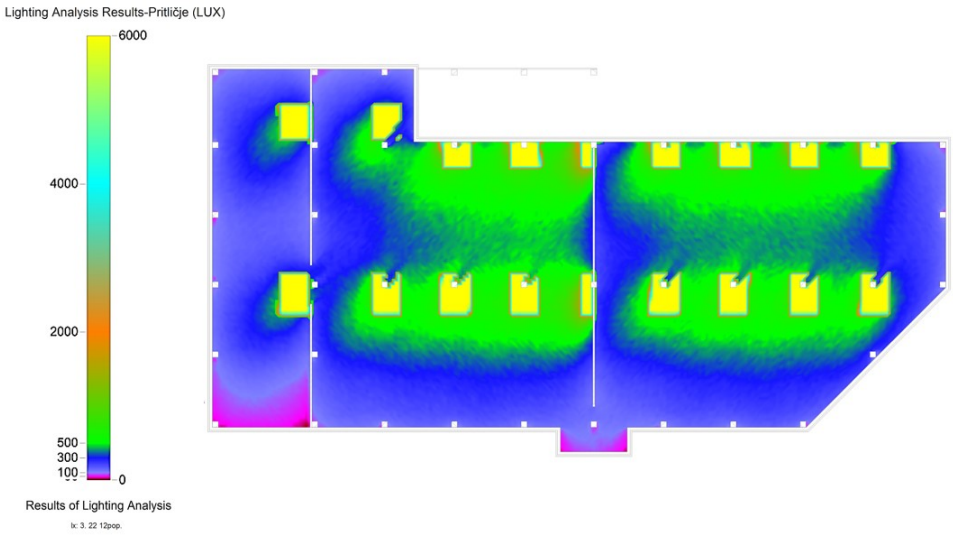
Preglednica 17: Podatki o zastekljenih površinah – model 3.

Model 3	JV	JZ	SV	SZ	V	Streha
Površina [m^2]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	159,12
LT	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,77
WWR oz. SRR [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,04

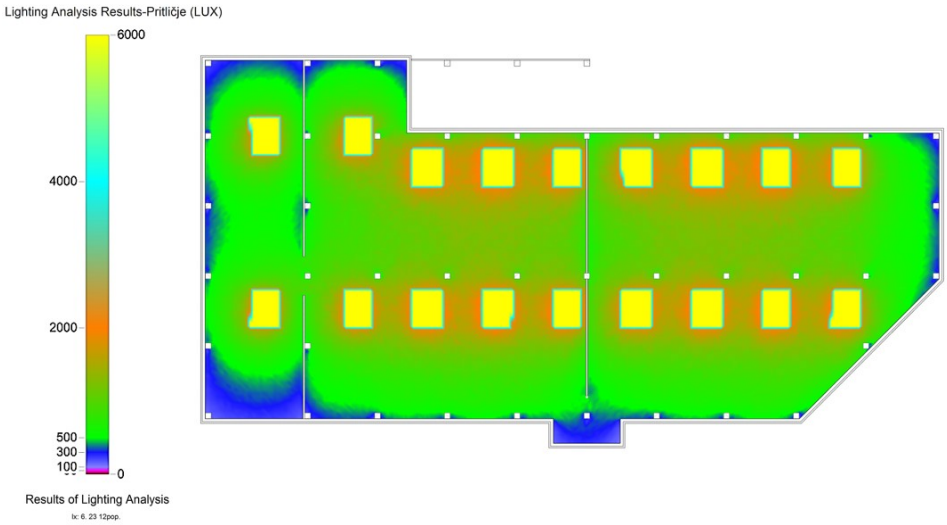
Skupaj zasteklitev fasad [m^2]:	0,00	WWR [%]:	0,00	DPT [%]	0,00
Skupaj zasteklitev streha [m^2]:	159,12	SRR [%]:	10,04	DPT [%]	10,04
Skupaj zasteklitev [m^2]:	159,12		Skupaj DPT [%]		10,04

4.2.3.2 Osvetljenost z dnevno svetlobo – model 3

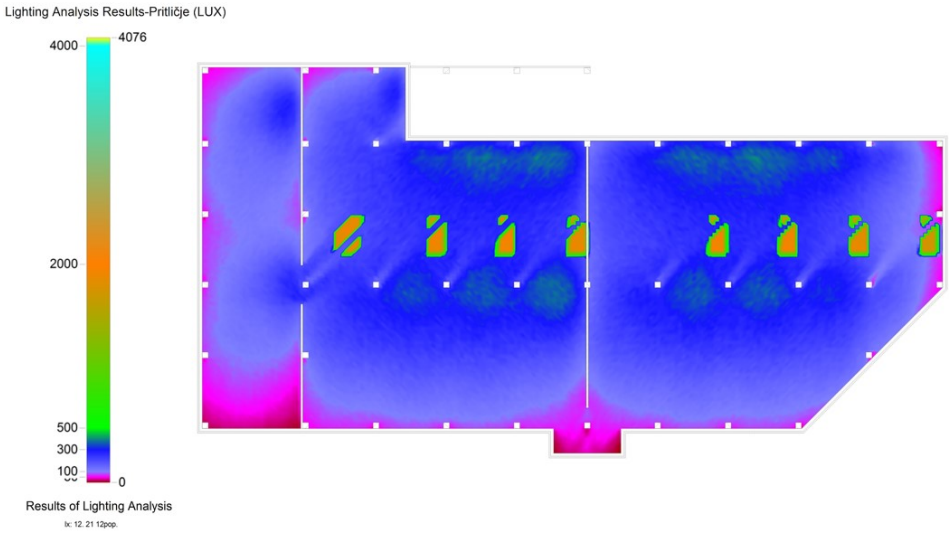
Na spodnjih slikah (Slika 30, Slika 31 in Slika 32) so prikazane grafične vrednosti osvetljenosti z dnevno svetlobo modela 3.



Slika 30: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 12.00 – model 3.



Slika 31: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 12.00 – model 3.



Slika 32: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 12.00 – model 3.

Tabelarične rezultate osvetljenosti prostora z dnevno svetlobo prikazujemo v preglednici 18. Rezultati z odebeljeno zeleno barvo pisave predstavljajo odstotek površine prostora, ki zadosti kriteriju UDI*.

Preglednica 18: Osvetljenost prostora z dnevno svetlobo – model 3.

	Model 3				
	Osvetljenost [lx]	Osvetljena površina prostorov UDI*[%]			
		09.00	12.00	15.00	18.00
22.3.	<300	61	56	100	100
	300-2000	**34**	**37**	**0**	**0**
	>2000	5	7	0	0
23.6.	0-300	15	10	20	30
	300-2000	**76**	**80**	**71**	**68**
	>2000	9	10	9	2
21.12.	0-300	100	90	100	100
	300-2000	**0**	**10**	**0**	**0**
	>2000	0	0	0	0

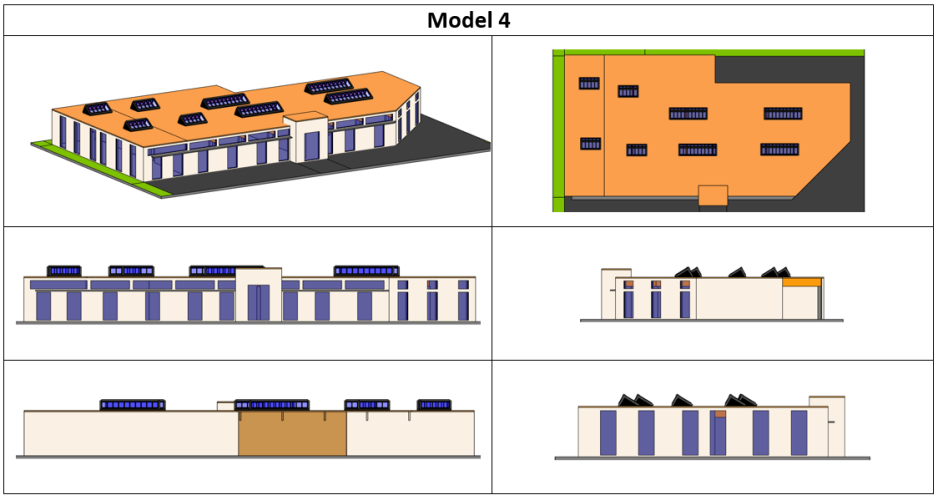
Osvetljenost z dnevno svetlobo modela 3 je visoka le v poletnem času tekom celega dne dan, medtem ko je spomladi precej nižja, pozimi pa zelo slaba. Površine prostora, ki izpolnjujejo kriterij UDI*, v dopoldanskem času dosegajo od 34% do 37% spomladi, pozimi pa zgolj 10%. Poleti je delež površine prostora, ki zadosti kriterijem UDI*, visok in znaša od 68% do 80%.

Distribucija in količina dnevne svetlobe v modelu je v zimskem času majhna, vrednosti osvetljenosti, ki ustrezajo UDI*, pa so po večini prostora med 300-500 lx, le površine, kjer sonce ob 12.00 doseže tako višino, da posije neposredno skozi zasteklitev, znašajo okrog 2000 lx. V zimskem času je potencial dnevne svetlobe že tako nizek, strešna zasteklitev pa ga izkoristi malo zaradi majhnih vpadnih kotov sončnih žarkov. Več dnevne svetlobe in bolj enakomerno distribucijo dosežemo dne 22.3. v dopoldanskih urah, medtem ko je ob 15.00 raven svetlobe že prenizka, da bi dosegli kriterij UDI*. Dne 23.6. so ob vseh urah dneva v tem primeru zasteklitve vrednosti UDI* zelo visoke, svetloba pa je dokaj enakomerno razporejena po vsem prostoru. Slaba lastnost je pojavljanje polj s preveliko osvetljenostjo pod strešnimi zasteklitvami zaradi vstopa direktne svetlobe skozi zasteklitve.

4.2.4 Model 4

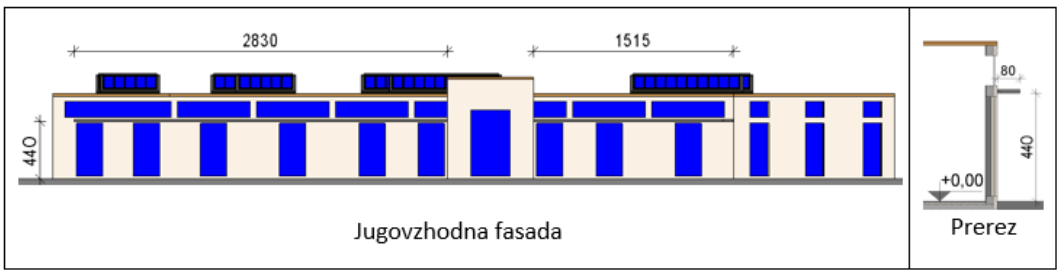
4.2.4.1 Predstavitev modela 4

Model 4 (Slika 33) je bil zasnovan kot prvi koncept na poti k zasnovi končnega optimiziranega modela. Predstavlja kombinacijo strešne zasteklitve in zastekljenih sten. Zasteklitev strehe smo oblikovali na podlagi rezultatov modela 3, kjer se je ta vrsta zasteklitve izkazala za učinkovito v spomladanskem in poletnem času. Zasteklitev je bila na enako orientiranih fasadah kot v modelu 1 (JZ, JV in V fasada), vendar je bila površina zasteklitve manjša. JV in V fasado smo zasteklili v dveh pasovih na različnih višinah z dodanim kratkim nadstreškom na JV fasadi.

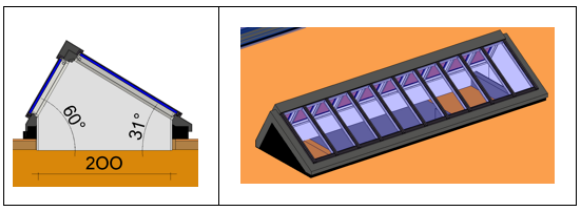


Slika 33: 3D-prikaz modela 4.

Spodnji pas zasteklitve JV fasade poleg funkcije dovajanja dnevne svetlobe v prostor opravlja tudi vlogo vpogleda v prodajni prostor obravnavane stavbe. Zgornji pas oken je namenjen dovajanju dnevne svetlobe v prostor. Spodnji in zgornji pas zasteklitve smo na JV steni ločili z nadstreškom širine 80 cm, po dolžini se razteza preko cele JV fasade, razen na območju vhoda v stavbo, kjer je nadstrešek prekinjen. Nadstrešek je namenjen senčenju spodnjega pasu zasteklitve (Slika 34).



Slika 34: Nadstrešek na JV strani objekta za namen senčenja spodnjega pasu zasteklitve.



Slika 35: Uporabljena strešna zasteklitev – model 4.

Na strehi smo za zasteklitev uporabili modularna strešna okna v smeri JZ-SV v obliki tristrane prizme z možnostjo nagiba zastekljenih ploskev z namenom, da v prostor dovedemo tudi difuzno svetlobo s SZ strani (Slika 35). Nagib stekla v SZ stran je znašal 60°, na JV pa 31°.

V preglednici 19 so predstavljene dimenzije uporabljenih zasteklitev na fasadah glede na orientacijo in strehi.

Preglednica 19: Dimenzije uporabljenih zasteklitev v modelu 4.

Model 4	Dimenzija posamezne zasteklitve	Število
JV	805 x 120 cm, $v_{parapet}$ = 465 cm	1
	550 x 120 cm, $v_{parapet}$ = 465 cm	5
	250 x 120 cm, $v_{parapet}$ = 465 cm	2
	200 x 400 cm, $v_{parapet}$ = 20 cm	9
	300 x 500 cm, $v_{parapet}$ = 20 cm	1
JZ	200 x 565 cm, $v_{parapet}$ = 20 cm	6
V	200 x 400 cm, $v_{parapet}$ = 20 cm	3
	200 x 120 cm, $v_{parapet}$ = 465 cm	3
Streha	200 x 390 cm (5 modulov)	4
	200 x 790 cm (10 modulov)	4

Dimenzije spodnjega pasu zasteklitve na JV fasadi so znašale 200 x 400 cm in 300 x 500 cm z višino parapeta 20 cm, uporabljene dimenzije zasteklitve zgornjega pasu so znašale 250 x 120 cm, 550 x 120 cm in 805 x 120 cm z višino parapeta 465 cm. Na JZ fasadi smo uporabili zasteklitve z dimenzijami 200 x 565 cm s parapetom 20 cm. Na V fasadi je bil spodnji pas zastekljen z zasteklitvami 200 x 400 cm in parapetom 20 cm, zgornji pas pa je bil zastekljen z manjšimi zasteklitvami 200 x 120 cm s parapetom višine 465 cm. Na strehi smo uporabili zasteklitve dveh različnih dimenzij, tlorisna projekcija manjših zasteklitev je bila 200 x 390 cm, večje pa 200 x 790 cm.

V preglednici 20 prikazujemo podatke o zasteklitvi. V prvem delu preglednice so prikazane površine zasteklitve sten glede na orientacijo, vrednost LT ter deleža WWR in SRR za vsako orientacijo posebej. V drugem delu preglednice prikazujemo podatke o skupno zastekljeni površini sten in strehe, skupne vrednosti WWR in SRR ter DPT posebej za stene in streho ter skupno vrednost DPT.

Preglednica 20: Podatki o zastekljenih površinah – model 4.

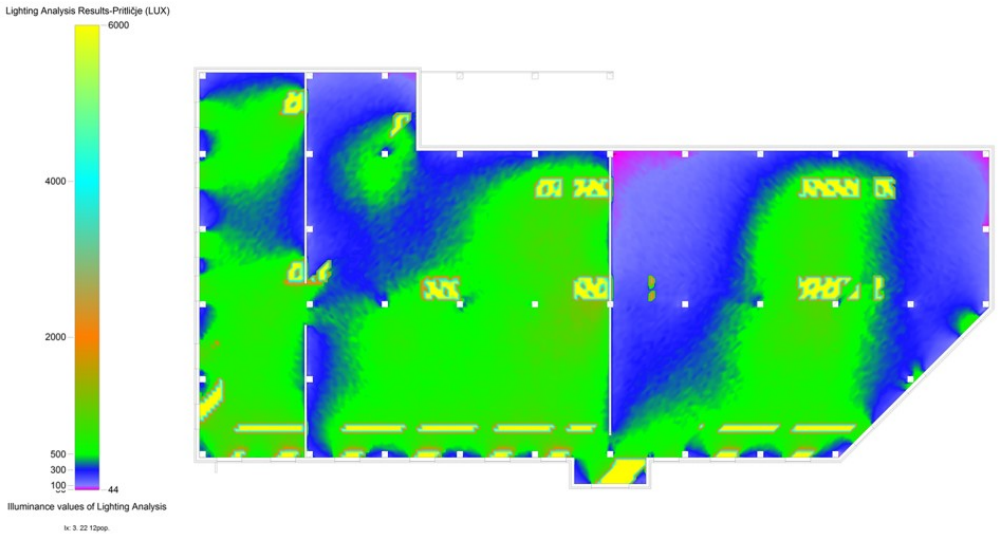
Model 4	JV	JZ	SV	SZ	V	Streha
Površina [m^2]	135,60	67,80	0,00	0,00	31,20	94,40
LT	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,77
WWR oz. SRR [%]	40,53	29,90	0,00	0,00	29,60	5,95

Skupaj zasteklitev fasad [m^2]:	234,60	WWR [%]:	19,10	DPT [%]	14,80
Skupaj zasteklitev streha [m^2]:	94,40	SRR [%]:	5,95	DPT [%]	5,95
Skupaj zasteklitev [m^2]:	329,00		Skupaj DPT [%]		20,80

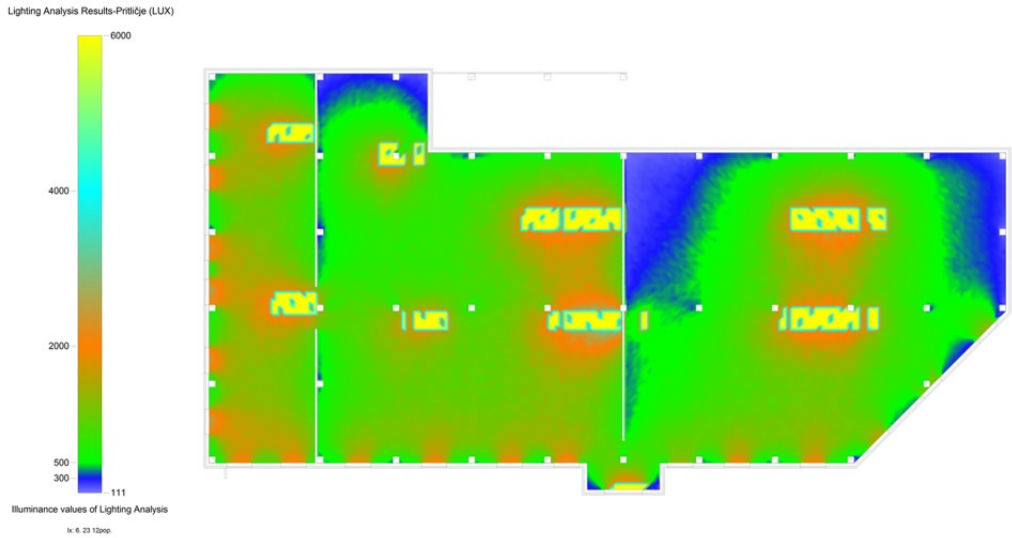
Skupna zastekljena površina modela 4 je znašala 329,00 m^2. JV stran stavbe je zastekljena z WWR 40,53% kar je zgornja meja, do katere je še smiselno zastekliti stene, JZ in V stena pa sta zastekljeni z WWR 29,90% oz. 29,60%, SRR znaša 5,95%. DPT v modelu 4 znaša 20,80%, kaj je 5,70% manj kot pri izhodiščnem modelu 1, skupna zasteklitev modela 4 pa je za 90,60 m^2 manjša kot v modelu 1, zasteklitev fasad je v modelu 4 manjša za 185,00 m^2 kot v modelu 1.

4.2.4.2 Osvetljenost z dnevno svetlobo – model 4

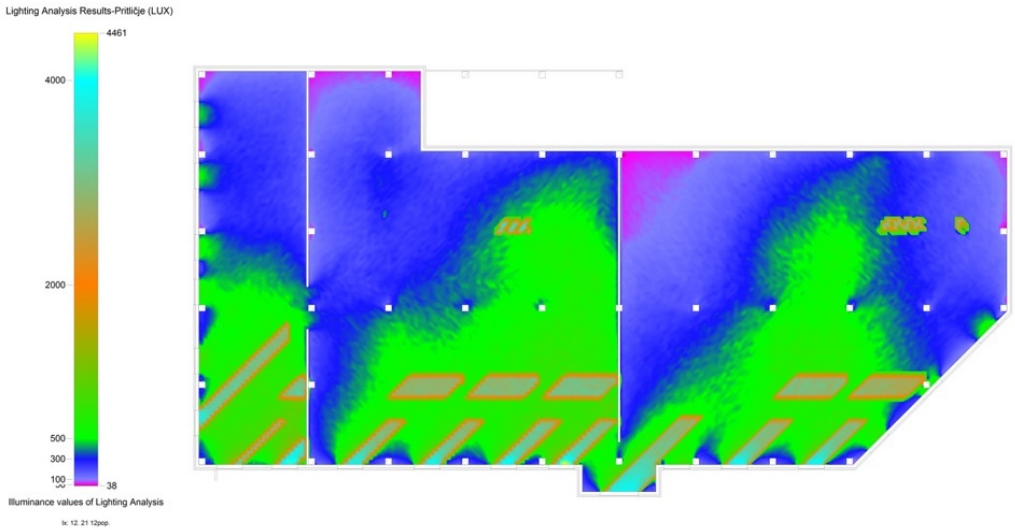
Na spodnjih slikah (Slika 36, Slika 37 in Slika 38) so prikazane grafične vrednosti osvetljenosti z dnevno svetlobo modela 4.



Slika 36: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 12.00 – model 4.



Slika 37: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 12.00 – model 4.



Slika 38: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 12.00 – model 4.

Tabelarične rezultate osvetljenosti prostora z dnevno svetlobo prikazujemo v preglednici 21. Rezultati z odebeljeno zeleno barvo pisave predstavljajo odstotek površine prostora, ki zadosti kriteriju UDI*.

Preglednica 21: Osvetljenost prostora z dnevno svetlobo – model 4.

	Model 4				
	Osvetljenost [lx]	Osvetljena površina prostorov UDI*[%]			
		09.00	12.00	15.00	18.00
22.3.	<300	1	42	82	100
	300-2000	**66**	**53**	**17**	**0**
	>2000	33	5	1	0
23.6.	0-300	32	12	17	43
	300-2000	**61**	**82**	**78**	**57**
	>2000	7	6	5	0
21.12.	0-300	97	56	100	100
	300-2000	**3**	**38**	**0**	**0**
	>2000	0	6	0	0

Osvetljenost z dnevno svetlobo modela 4 predstavlja nekakšen »presek« rezultatov osvetljenosti modela 1 in modela 3. Zaradi zasteklitve fasad je osvetljen pas ob zastekljenih stenah, ki sega do približno polovice globine prostora, zaradi strešne zasteklitve pa dosegamo dobro naravno osvetljenost tudi globje v prostoru proti SZ strani objekta.

Površine prostora, ki izpolnjujejo kriterij UDI*, v dopoldanskem času dosegajo od 53% (22.3. ob 12.00) do 66% (22.3. ob 9.00) spomladi in od 3% (21.12. ob 9.00) do 38% (21.12. ob 12.00) pozimi. Poleti je delež površine prostora, ki zadosti kriterijem UDI*, visok in znaša skozi cel dan od 57% (23.6. ob 18.00) do 82% (23.6. ob 12.00).

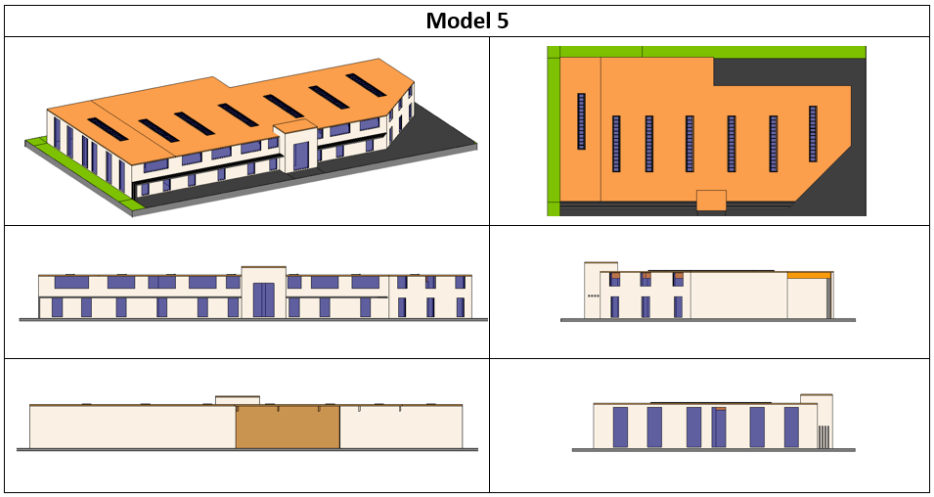
Dne 22.3. ob 9.00 zjutraj še vedno dobimo visok odstotek površin, kjer je presežen kriterij UDI*, vendar pa je obenem tudi visok odstotek vrednosti, ki ustrezajo kriteriju UDI*. Od 0% do 7% površin prejme previsoko osvetljenost z dnevno svetlobo v ostalih analiziranih dnevih, največ. 7%. se pojavi dne 23.6. ob 9.00.

V primerjavi z dnevno osvetljenostjo modela 1 smo v modelu 4 dosegli v večini analiziranih terminov višje vrednosti UDI*, nekoliko manjšo vrednost dosežemo le dne 22.3. ob 15.00 in 21.12. ob 9.00 zjutraj, kar je posledica zmanjšanja zasteklitve fasad. Distribucija svetlobe je v modelu 4 bolj enakomerno razporejena in sega globoko v prostor. Deleži s previsoko vrednostjo dnevne osvetljenosti so pri modelu 4 v vseh obravnavanih terminih višji kot v modelu 1, z izjemo termina 21.12. ob 12.00, ko je bila vrednost previsoke osvetljenosti višja v modelu 1.

4.2.5 Model 5

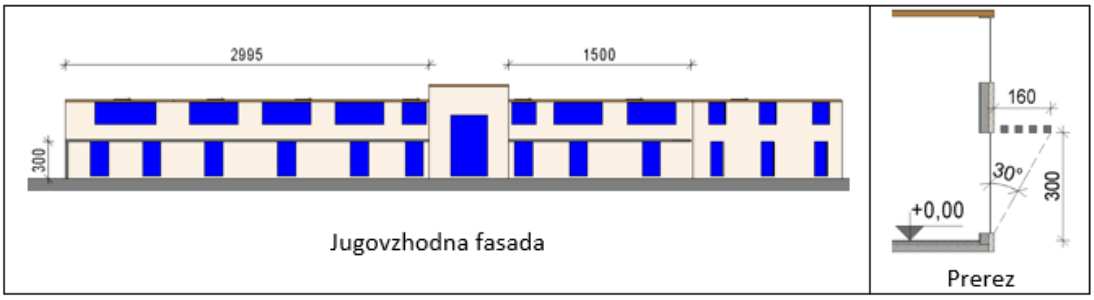
4.2.5.1 Predstavitev modela 5

V modelu 5 (Slika 39) smo za zasteklitev strehe uporabili svetlobne pasove; gre za modularno strešno zasteklitev, podobno kot v modelu 4, le da je zasteklitev v tem primeru pozicionirana v isti ravnini kot streha (izdelano kot ploskev). S tem modelom smo preizkusili drugačno obliko zasteklitve strehe. Svetlobni pasovi so postavljeni v smeri JV-SZ in so približno enakomerno razdeljeni vzdolž strehe. Površino zasteklitev sten smo predvsem na JV in V fasadah še nekoliko zmanjšali ter nadgradili senčenje spodnjega pasu oken (Slika 40).



Slika 39: 3D-prikaz modela 5.

Senčila spodnjega pasu so v modelu 5 postavljena na višini 3,0 m, široka pa so 1,6 m, s tem pa je vzpostavljen kot 30° med spodnjim robom zasteklitve spodnjega pasu in robom zadnje lamele senčil. Senčila so sestavljena iz petih lamel, tako da senčijo direktno komponento sončnega sevanja, vendar še vedno prepuščajo difuzno svetlobo, zato je prostor pod senčili bolj svetel.



Slika 40: Senčila, namenjena senčenju spodnjega pasu zasteklitve na JV fasadi.

V preglednici 22 so predstavljene dimenzije uporabljenih zasteklitev na fasadah glede na orientacijo in strehi.

Preglednica 22: Dimenzije uporabljenih zasteklitev v modelu 5.

Model 5	Dimenzija posamezne zasteklitve	Število
JV	500 x 180 cm, $v_{parapet}$ = 440 cm	1
	400 x 180 cm, $v_{parapet}$ = 440 cm	5
	200 x 180 cm, $v_{parapet}$ = 440 cm	2
	150 x 280 cm, $v_{parapet}$ = 20 cm	9
	300 x 500 cm, $v_{parapet}$ = 20 cm	1
JZ	200 x 565 cm, $v_{parapet}$ = 20 cm	6
V	200 x 180 cm, $v_{parapet}$ = 440 cm	3
	150 x 280 cm, $v_{parapet}$ = 20 cm	3
Streha	115 x 1200 cm (15 modulov)	7

Dimenzije spodnjega pasu zasteklitve na JV fasadi so znašale 150 x 280 cm in 300 x 500 cm z višino parapeta 20 cm, uporabljene dimenzije zasteklitve zgornjega pasu so znašale 200 x 180 cm, 400 x 180 cm in 500 x 180 cm z višino parapeta 440 cm. Na JZ fasadi smo uporabili zasteklitve z dimenzijami 200 x 565 cm s parapetom 20 cm. Na V fasadi je bil spodnji pas zastekljen z zasteklitvami 150 x 280 cm in parapetom 20 cm, zgornji pas pa je bil zastekljen z zasteklitvami 200 x 180 cm s parapetom višine 465 cm. Na strehi smo uporabili zasteklitve 115 x 1200 cm.

V primerjavi z modelom 4 smo zasteklitvam v zgornjem pasu JV in V fasade povečali višino, dolžino pa zmanjšali. Predvidevali smo, da se bo s tem količina svetlobe, ki prihaja v prostor preko zgornjega pasu oken, povečala, na ta račun pa bi zmanjšali vpliv spodnjega pasu oken na distribucijo dnevne svetlobe v prostor, saj nizko postavljena okna na fasadi ne zagotavljajo dobre distibucije dnevne svetlobe v prostor in so pri tem manj učinkovita kot višje postavljena okna. Dimenzije zasteklitve na JZ strani obravnavane stavbe se glede na model 4 niso spreminjale.

V preglednici 23 prikazujemo podatke o zasteklitvi. V prvem delu preglednice so prikazane površine zasteklitve sten glede na orientacijo, vrednost LT ter deleža WWR in SRR za vsako orientacijo posebej. V drugem delu preglednice prikazujemo podatke o skupno zastekljeni površini sten in strehe, skupne vrednosti WWR in SRR ter DPT posebej za stene in streho ter skupno vrednost DPT.

Preglednica 23: Podatki o zastekljenih površinah – model 5.

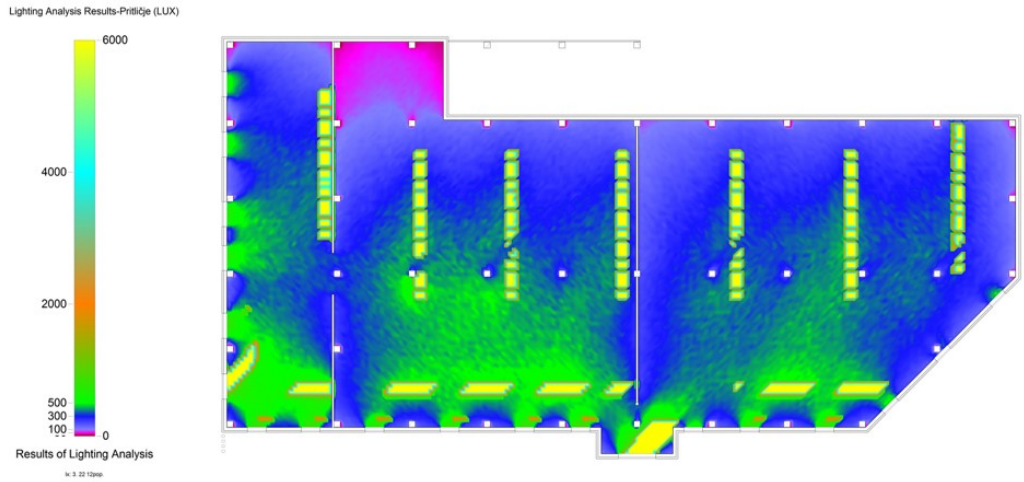
Model 5	JV	JZ	SV	SZ	V	Streha
Površina [m^2]	105,00	68,00	0,00	0,00	23,40	96,70
LT	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,77
WWR oz. SRR [%]	31,40	30,00	0,00	0,00	22,21	6,10

Skupaj zasteklitev fasad [m^2]:	196,40	WWR [%]:	16,00	DPT [%]	12,40
Skupaj zasteklitev streha [m^2]:	96,70	SRR [%]:	6,10	DPT [%]	6,10
Skupaj zasteklitev [m^2]:	291,40		Skupaj DPT [%]		18,50

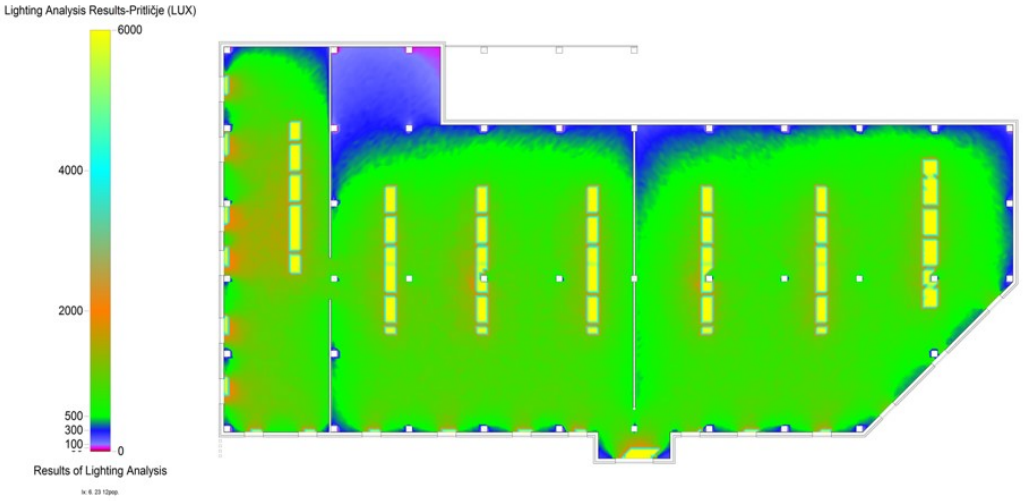
Površina zasteklitve strehe je za 2,3 m^2 večja kot v modelu 4, kar je znaša 0,1 odstotne točke in je zanemarljivo, površina zasteklitve sten pa je manjša za 38,20 m^2. Skupna površina zasteklitev v modelu 5 je 291,40 m^2 kar je 37,60 m^2 manj kot v modelu 4, WWR na JV in JZ fasadi znaša približno 31,40% oz. 30,00%, na V fasadi pa približno 22,21%. Vrednost DPT modela 4 je 18,50% in je manjša za 2,30 odstotne točke glede na model 4.

4.2.5.2 Osvetljenost z dnevno svetlobo – model 5

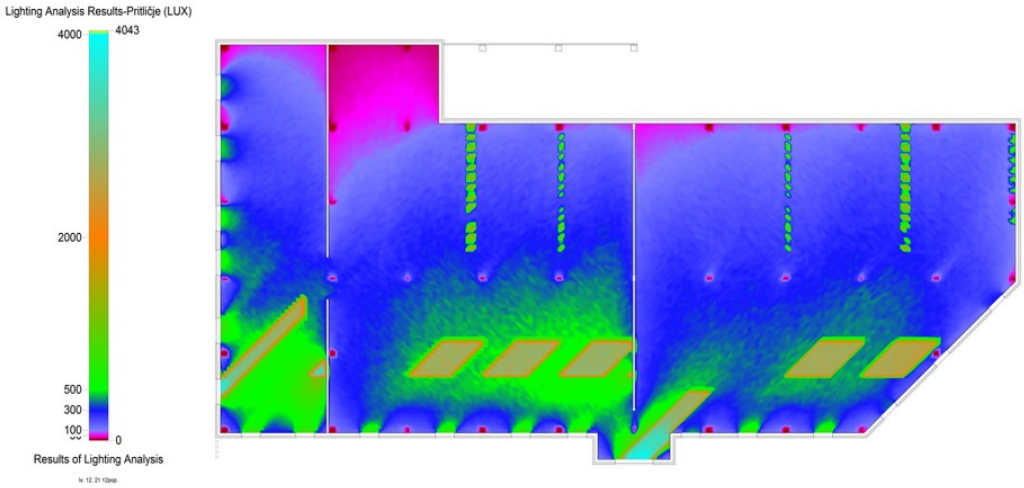
Na spodnjih slikah (Slika 41, Slika 42 in Slika 43) so prikazane grafične vrednosti osvetljenosti z dnevno svetlobo modela 5.



Slika 41: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 12.00 – model 5.



Slika 42: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 12.00 – model 5.



Slika 43: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 12.00 – model 5.

Tabelarične rezultate osvetljenosti prostora z dnevno svetlobo prikazujemo v preglednici 24. Rezultati z odebeljeno zeleno barvo pisave predstavljajo odstotek površine prostora, ki zadosti kriteriju UDI*.

Preglednica 24: Osvetljenost prostora z dnevno svetlobo – model 5.

	Model 5				
	Osvetljenost [lx]	Osvetljena površina prostorov UDI* [%]			
		09.00	12.00	15.00	18.00
22.3.	0-300	9	59	90	100
	300-2000	**79**	**35**	**9**	**0**
	>2000	12	6	1	0
23.6.	0-300	49	13	14	59
	300-2000	**44**	**82**	**82**	**41**
	>2000	7	5	4	0
21.12.	0-300	99	72	100	100
	300-2000	**1**	**24**	**0**	**0**
	>2000	0	4	0	0

V modelu 5 v zimskem času dosežemo relativno nizko vrednost osvetlitve z dnevno svetlobo, saj smo zasteklitev na JV in V fasadi, ki prinese pozimi v dopoldanskem času največ dnevne svetlobe v prostor, zmanjšali, zasteklitev na strehi pa, kot smo že ugotovili, v tem času ne prinese bistvenega izboljšanja osvetljenosti z dnevno svetlobo, zato znaša delež primerno osvetljenih površin 24%. Poleti v dopoldanskem času smo dosegli ustrezno osvetljenih površin 44% ob 9.00 in 82% ob 12.00. Ustrezno osvetljene površine v spomladanskem času so znašale 79% ob 9.00 in 35% ob 12.00. V popoldanskih urah so spomladi površine, ki ustrezajo kriteriju UDI*, znašale 9% ob 15.00 in 0% ob 18.00, poleti pa so bile vrednosti 82% ob 15.00 in 41% ob 18.00. Pozimi v popoldanski urah kriterija UDI* nismo dosegli.

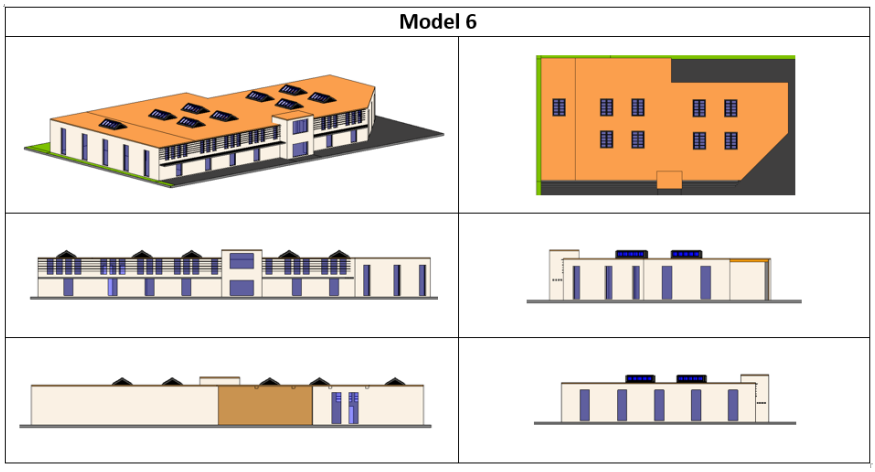
V primerjavi z modelom 4 smo v dopoldanskem času uspeli izboljšati osvetljenost z dnevno svetlobo samo 22.3. ob 9.00, ko je delež površine, ki ustreza kriteriju UDI*, znašal 79% oz. 13 odstotnih točk več kot v modelu 4. Prav tako smo v tem analiziranem času zmanjšali odstotek preveč osvetljenih površin, ki je znašal 12% oz. 21 odstotnih točk manj kot v modelu 4. Ostale vrednosti preveč osvetljenih površin se niso bistveno zmanjšale ali povečale, razlika je znašala od 0 do 2 odstotni točki. V popoldanskem času smo površine, ki so zadostno osvetljene z dnevno svetlobo, v primerjavi z modelom 4 povečali le 23.6. ob 15.00 za 4 odstotne točke, ostale vrednosti so bile manjše.

Dobra lastnost svetlobnih pasov na strehi je, da v kombinaciji s posodobljenimi senčili v spomladanskem času dopoldan zmanjša presežene vrednosti UDI*, s tem pa se UDI* poveča, drugih izboljšav glede osvetljenosti glede svetlobnih pasov v modelu 5 nismo zaznali. Tudi v poletnem času vrednosti UDI* niso bile tako visoke kot v modelu 4, razen ob 15.00, vrednosti ob 9.00 in 18.00 so bile bistveno nižje kot v modelu 4. Še vedno v modelu 5 prihaja do preseženih vrednosti UDI* v dopoldanskih urah v vseh analiziranih dnevih zaradi zgornjega pasu zasteklitve JV in V, ki ni zasenčen. Dobro so se v modelu 5 izkazala senčila in zmanjšanje zasteklitve spodnjega pasu JV in V fasade, kar je zmanjšalo visoke prekoračitve kriterija UDI*.

4.2.6 Model 6

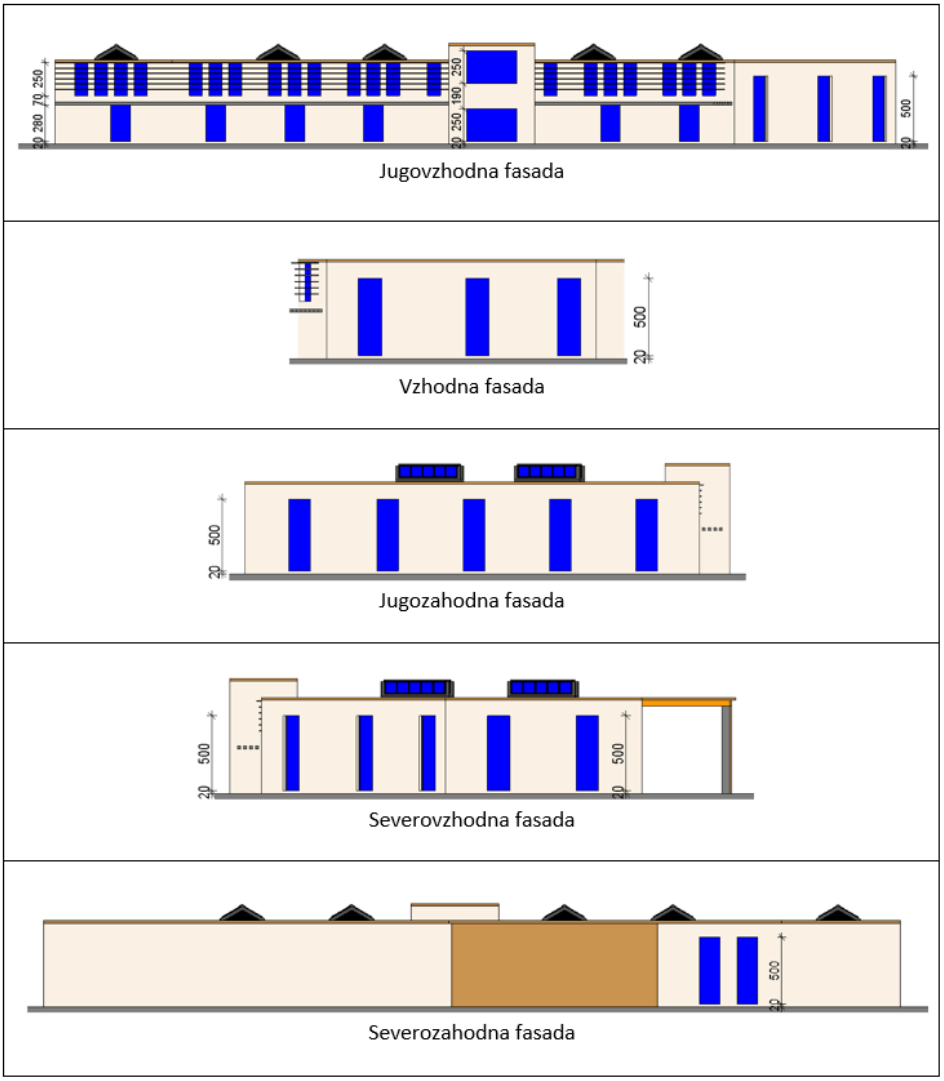
4.2.6.1 Predstavitev modela 6

Ocenili smo, da je model 6 (Slika 44) dovolj optimiziran glede na izhodiščni model z vidika dnevne osvetljenosti prostora. Površino zasteklitev fasad smo še zmanjšali v primerjavi z modelom 5, kljub temu da smo dodali manjšo površino zasteklitev še na SV in SZ zahodno fasado, saj smo želeli z dnevno svetlobo osvetliti še del prostora, ki prej ni bil dobro osvetljen. Na JV fasado, kjer je predviden vhod v stavbo, smo zasteklitev te stene razdelili na dva enaka dela, enega spodaj in enega zgoraj. Zasteklitev zgornjega pasu JV fasade smo razdelili na manjše enote ter na celoten zgornji pas zasteklitve dodali še senčila. Za zasteklitev strehe smo ponovno uporabili tristrane prizme z enakim naklonom stekel, vzdolžna smer prizem je bila orientirana od JV proti JZ, tako kot v modelu 5.



Slika 44: 3D-prikaz modela 6.

Ker je model 6 končni optimizirani model z vidika osvetljenosti dnevne svetlobe in s tem pripravljen za nadaljnje simulacije uporabe energije, vse zasteklitve na fasadah prikazujemo na sliki 45.



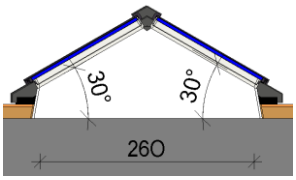
Slika 45: Prikazane fasade modela 6.

V preglednici 25 so predstavljene dimenzije uporabljenih zasteklitev na fasadah glede na orientacijo in strehi.

Preglednica 25: Dimenzije uporabljenih zasteklitev v modelu 6.

Model 6	Dimenzija posamezne zasteklitve	Število
JV	100 x 250 cm, $v_{parapet}$ = 370 cm	21
	380 x 250 cm, $v_{parapet}$ = 460 cm	1
	150 x 280 cm, $v_{parapet}$ = 20 cm	6
	380 x 250 cm, $v_{parapet}$ = 20 cm	1
V	150 x 500 cm, $v_{parapet}$ = 20 cm	3
JZ	150 x 500 cm, $v_{parapet}$ = 20 cm	5
SV	150 x 500 cm, $v_{parapet}$ = 20 cm	2
SZ	150 x 500 cm, $v_{parapet}$ = 20 cm	2
Streha	260 x 400 cm (5 modulov)	9

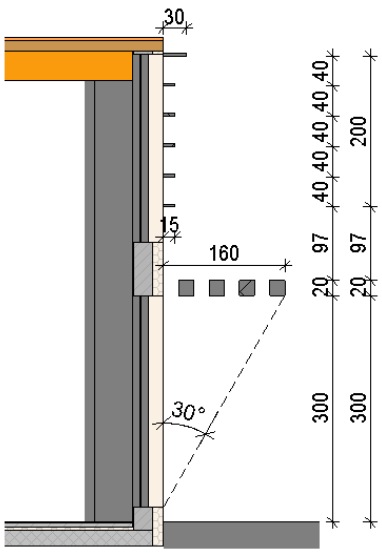
Dimenzije spodnjega pasu zasteklitve na JV fasadi so znašale 150 x 280 cm in 380 x 250 cm z višino parapeta 20 cm, uporabljene dimenzije zasteklitve zgornjega pasu so znašale 100 x 250 cm z višino parapeta 370 cm in 380 x 250 cm z višino parapeta 460 cm. Na V fasadi smo uporabili zasteklitve 150 x 500 cm in parapetom 20 cm. Na JZ fasadi smo uporabili zasteklitve z dimenzijami 200 x 565 cm s parapetom 20 cm. Dodane zasteklitve na SV in SZ fasadah so bile 150 x 500 cm s parapetom 20 cm, tlorisna projekcija zasteklitev na strehi je bila 260 x 400 cm.



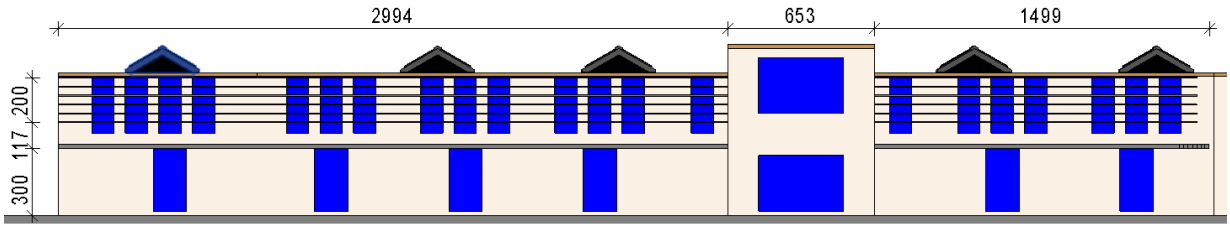
Za zasteklitev strehe smo uporabili modularne zasteklitve s 5 moduli na posamezno zasteklitev, kot je prikazano na sliki 46. Skupaj smo na strehi uporabil 9 kosov takšne zasteklitve.

Slika 46: Prerez zasteklitve na strehi.

Senčila spodnjega pasu (Slika 47) oken so ostala enakih dimenzij kot v modelu 5, po celotni dolžini JV fasade z izjemo vhoda v objekt (Slika 48). Za senčenje zgornjega pasu oken smo v modelu 6 izdelali lamelna senčila. Izdelali smo 6 lamel, od tega je prvih pet lamel (gledano od spodaj navzgor) širine 15 cm, najvišje postavljena šesta lamela pa je široka 30 cm. Lamele so v vertikalni smeri postavljene na razmaku 40 cm. Senčila so zasnovana tako, da v zimskem času, ko so potrebe po toplotnih dobitkih sončnega sevanja velike, dovoljujejo vpad sončnih žarkov na steklo, v poletnih mesecih pa je vpad sončnih žarkov preprečen.



Slika 47: Prerez senčil v modelu 6.



Slika 48: Prikaz senčil na JV fasadi modela 6.

V preglednici 26 prikazujemo podatke o zasteklitvi. V prvem delu preglednice so prikazane površine zasteklitve sten glede na orientacijo, vrednost LT ter deleža WWR in SRR za vsako orientacijo posebej. V drugem delu preglednice prikazujemo podatke o skupno zastekljeni površini sten in strehe, skupne vrednosti WWR in SRR ter DPT posebej za stene in streho ter skupno vrednost DPT.

Preglednica 26: Podatki o zastekljenih površinah – model 6.

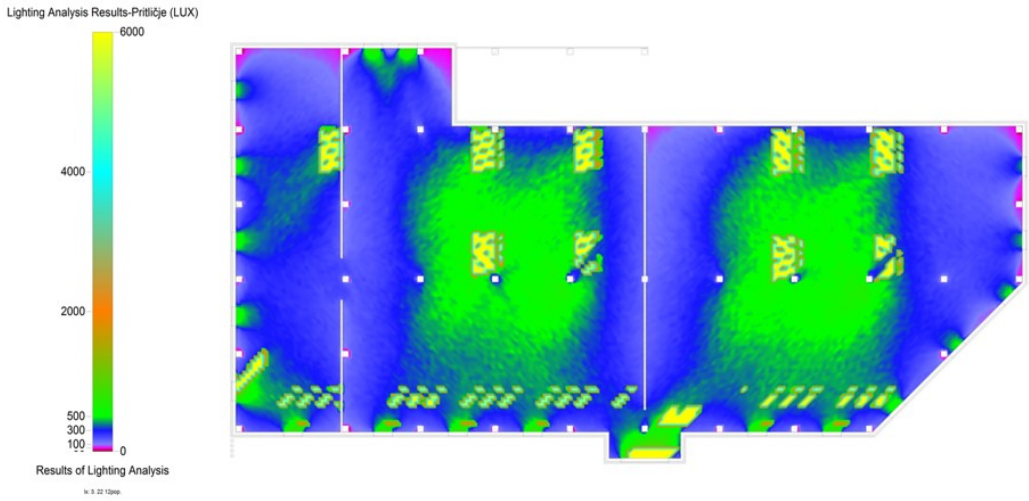
Model 6	JV	JZ	SV	SZ	V	Streha
Površina [m^2]	96,70	37,50	15,00	15,00	22,50	93,60
LT	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,77
WWR oz. SRR [%]	28,90	16,54	10,63	3,67	21,34	5,91

Skupaj zasteklitev fasad [m^2]:	186,70	WWR [%]:	15,20	DPT [%]	11,79
Skupaj zasteklitev streha [m^2]:	93,60	SRR [%]:	5,91	DPT [%]	5,91
Skupaj zasteklitev [m^2]:	280,30		Skupaj DPT [%]		17,70

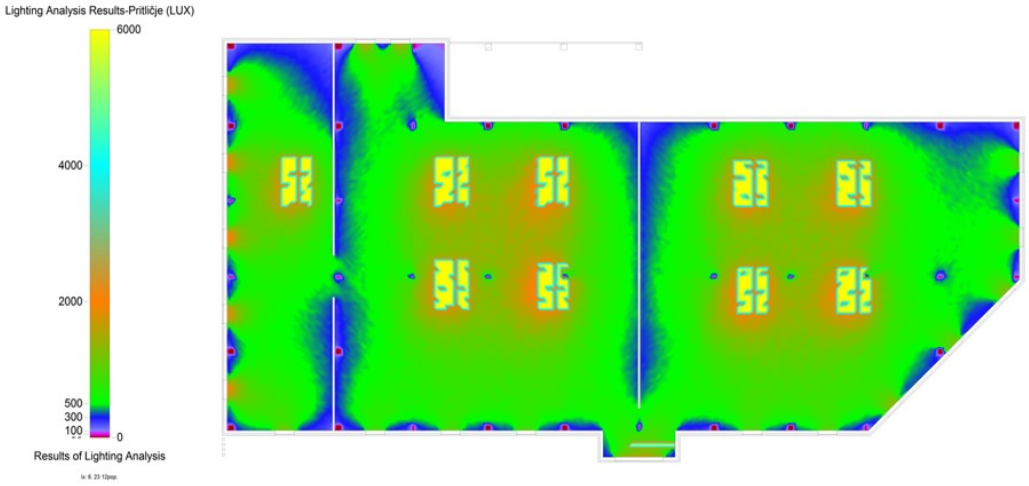
Skupna površina zasteklitve modela 6 je znašala 280,30 m^2 , kar je 11,10 m^2 manj od modela 5. S tem se zmanjša DPT na 17,7% (DPT modela 5 je 18,50 %). Skupni delež zasteklitve fasad WWR je bil 15,20% oz. 186,70 m^2 in je 10 m^2 manj kot v modelu 5, zasteklitev strehe pa znaša 93,60 m^2. Vrednost WWR JV fasade znaša 28,90%, JZ fasade 16,54%, SV fasade 10,63 %, SZ fasade 3,67% in V fasade 21,34%. Vrednost SRR znaša 5,91%.

4.2.6.2 Osvetljenost z dnevno svetlobo – model 6

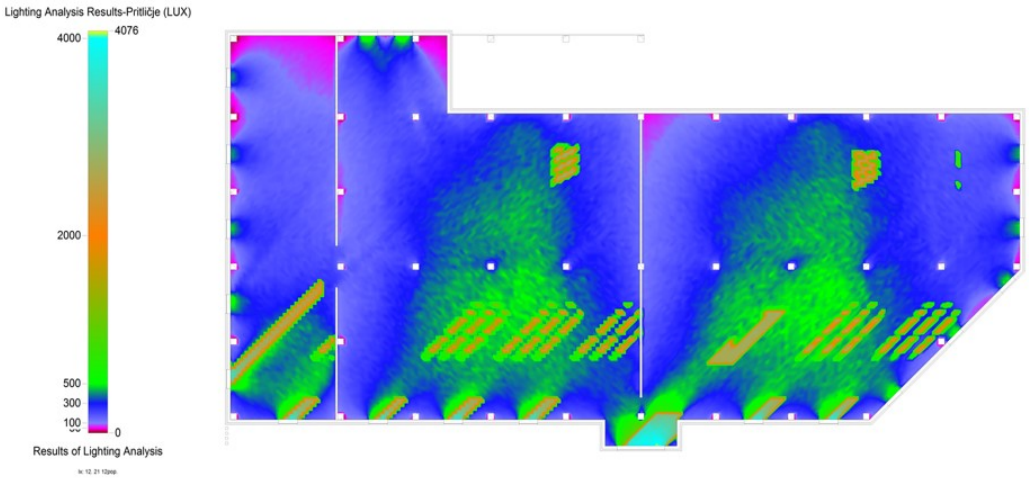
Na spodnjih slikah (Slika 49, Slika 50 in Slika 51) so prikazane grafične vrednosti osvetljenosti z dnevno svetlobo modela 6.



Slika 49: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 12.00 – model 6.



Slika 50: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 12.00 – model 6.



Slika 51: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 12.00 – model 6.

Tabelarične rezultate osvetljenosti prostora z dnevno svetlobo prikazujemo v preglednici 27. Rezultati z odebeljeno zeleno barvo pisave predstavljajo odstotek površine prostora, ki zadosti kriteriju UDI*.

Preglednica 27: Osvetljenost prostora z dnevno svetlobo – model 6.

	Model 6				
	Osvetljenost [lx]	Osvetljena površina prostorov UDI*[%]			
		09.00	12.00	15.00	18.00
22.3.	<300	8	61	78	100
	300-2000	**83**	**35**	**20**	**0**
	>2000	9	4	2	0
23.6.	0-300	48	15	12	55
	300-2000	**48**	**80**	**79**	**45**
	>2000	4	5	9	0
21.12.	0-300	99	66	100	100
	300-2000	**1**	**27**	**0**	**0**
	>2000	0	7	0	0

V modelu 6 smo dosegli zelo enakomerno distribucijo dnevne svetlobe po celotnem prostoru ter vrednosti osvetljenosti, ki presegajo kriterije UDI*, zmanjšali pod 10%. Z uporabo senčil smo sicer ob nekaterih analiziranih časovnih obdobjih nivo osvetljenosti z dnevno svetlobo nekoliko zmanjšali, predvsem pozimi, vendar smo s tem predvideli manjše pregrevanje stavbe v poletnem času.

Površine prostora, ki izpolnjujejo kriterij UDI*, so v dopoldanskem času dosegle od 35% (22.3. ob 12.00) do 83% (22.3. ob 9.00) spomladi in od 1% (21.12. ob 9.00) do 27% (21.12. ob 12.00) pozimi. Poleti je bil delež površine prostora, ki zadosti kriterijem UDI*, dopoldan od 48% (23.6. ob 9.00) do 80% (23.6. ob 12.00). V popoldanskem času so bile vrednosti površin, ki so zadostile kriteriju UDI*, 20% spomladi (22.3. ob 15.00), poleti so znašale 79% ob 15.00 in 45% ob 18.00. Pozimi so bile popoldanske vrednosti osvetljenosti z dnevno svetlobo manjše od vrednosti zahtevanih v UDI*. Presežene vrednosti UDI* so se pojavile zaradi zasteklitve fasad v dopoldanskem času pozimi, spomladi in poleti zaradi nizke pozicije sonca na nebu predvsem spomladi, poleti pa zaradi strešnih zasteklitev, ko je sonce najvišje na nebu, vendar pa so bile presežene vrednosti nizke, od 2% do 9%.

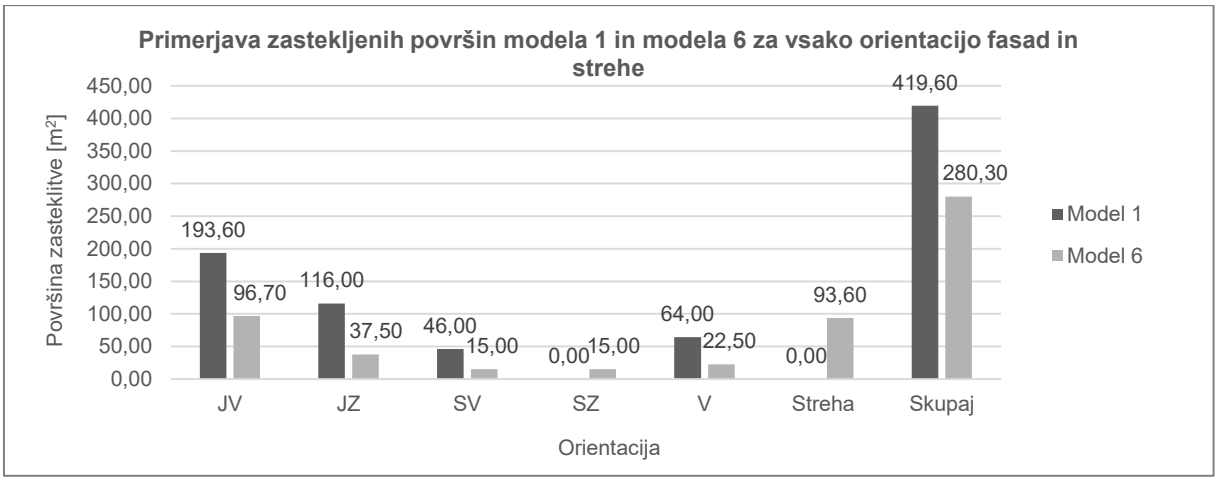
V primerjavi z modelom 4 se je delež površin, ki zadostujejo kriteriju UDI*, dne 22.3. ob 9.00 povišal za 17 odstotnih točk, ob 12.00 so se vrednosti znižale za 18 odstotnih točk ter ob 15.00 povišale za 3 odstotne točke. Dne 23.6. so vrednosti osvetljenosti z dnevno svetlobo v modelu 6 bile v vseh analiziranih urah nižje od vrednosti v modelu 4 od 2 (ob 12.00) do 13 odstotnih točk (ob 9.00), razen ob 15.00 smo v modelu 6 izračunali za 1 odstotno točko višjo vrednost. Dne 21.12. smo ravno tako izračunali nižje vrednosti kot v modelu 4, in sicer 2 odstotni točki manj ob 9.00 in 11 odstotnih točk manj ob 12.00, popoldanske vrednosti so v obeh primerih bile 0%. V večini analiziranih časov se je v primerjavi z modelom 4 nivo osvetljenosti z dnevno svetlobo znižal, kar smo pričakovali ob zmanjšanju površine zasteklitve fasad. Vendar smo kljub temu uspeli nekatere dele prostorov dodatno osvetliti (SV in SZ deli prostorov) teh ohraniti čim bolj enakomerno osvetljenost površin, zmanjšali smo površine, ki so bile preveč osvetljene z dnevno svetlobo, ter s tem zmanjšali možnost bleščanja in pregrevanja prostorov.

4.2.7 Primerjava osvetljenosti z dnevno svetlobo modela 1 in modela 6

V tem poglavju bomo izvedli primerjavo dnevne osvetljenosti prostora med izhodiščnim modelom 1 in optimiziranim modelom 6. Primerjali bomo zastekljene površine fasad glede na njihovo orientacijo, WWR in SRR, skupno zastekljeno površino obeh modelov, DPT ter UDI*. Cilj modela 6 je bil, da z njim izboljšamo UDI* glede na vrednosti iz modela 1. Ob predpostavki, da je model 1 slabo osvetljen z dnevno svetlobo in hkrati nagnjen k pregrevanju v poletnem času, smo stremeli k temu, da končni model zasteklitve stavbnega ovoja zasnujemo tako, da izboljšamo osvetljenost z dnevno svetlobo, obenem pa zmanjšamo možnost pregrevanja poleti z zmanjšanjem zastekljenih površin. Z zmanjšanjem

zastekljenih površin se zmanjšujejo tudi toplotne izgube skozi zasteklitev pozimi in v nočnem času, ko so zunanje temperature nižje od temperatur v notranjosti stavbe, vendar to vpliva tudi na zmanjšanje toplotnih dobitkov sončnega sevanja v zimskem času.

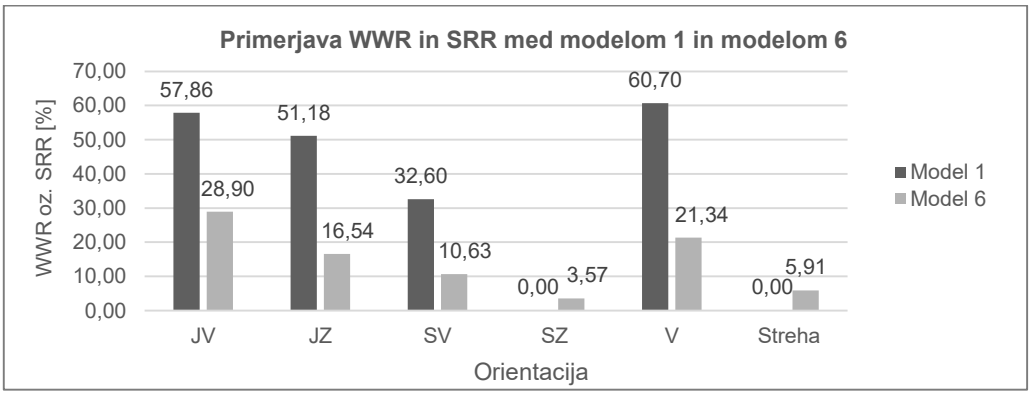
Grafikon 6 prikazuje primerjavo površine zasteklitve fasade in strehe med modelom 1 in modelom 6 glede na orientacijo fasad in strehe.



Grafikon 6: Primerjava površine zasteklitve fasad in strehe med modelom 1 in modelom 6.

Površino zasteklitve na JV fasadi smo v modelu 6 zmanjšali za 96,90 m^2, kar je 50,00% manj kot v modelu 1. Zasteklitev na JZ fasadi smo zmanjšali za 78,60 m^2 oz. 68,02%, na SV fasadi smo površino zasteklitve zmanjšali za 31,00 m^2 oz. 67,00%, V fasada pa vsebuje 41,50 m^2 oz. 65,00% manj zastekljene površine od modela 1. Zasteklitev SZ fasade se je v modelu 6 povečala za 15,00 m^2, saj model 1 te fasade ni imel zastekljene, prav tako se je povečala površina zasteklitve strehe za 93,60 m^2, ki prav tako ni bila zastekljena v modelu 1. Skupna površina zasteklitve je v modelu 6 manjša za 139,00 m^2 (33,10%), sama zasteklitev fasad pa je v modelu 6 manjša za 232,90 m^2 oz. 44,49%.

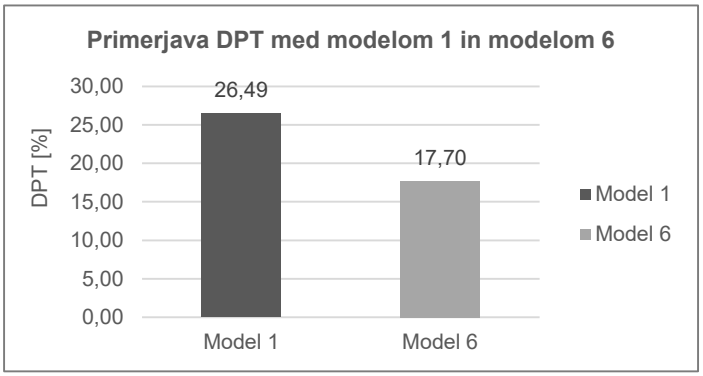
Na grafikonu 7 prikazujemo vrednosti WWR in SRR, ki odražajo vrednosti zastekljenih površin za model 1 in model 6 v odstotkih.



Grafikon 7: Primerjava WWR in SRR med modelom 1 in modelom 6.

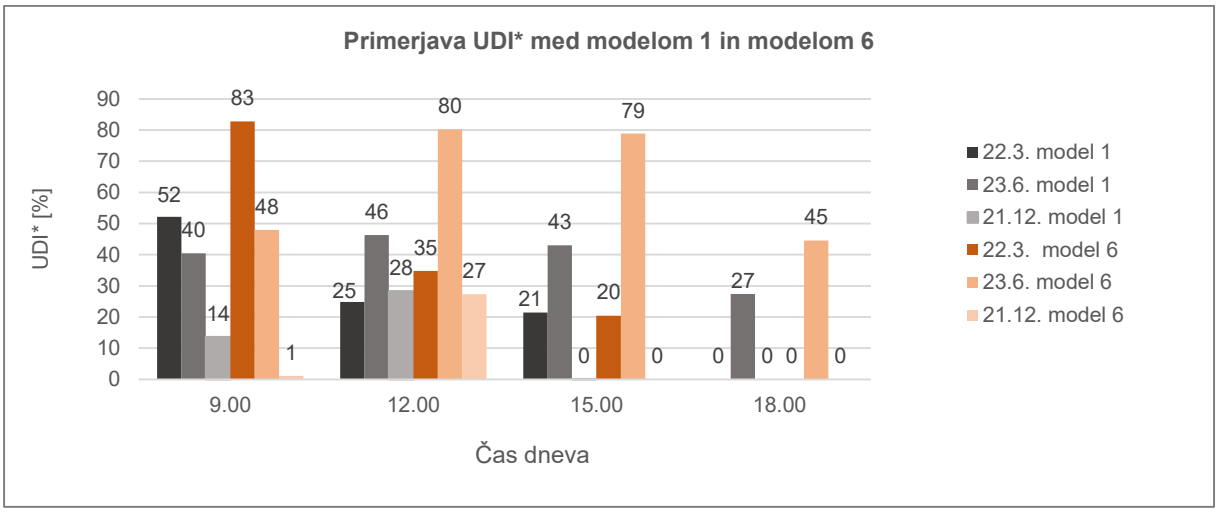
Vrednosti WWR v modelu 6 nikdar ne presežejo 30,00%, kar je skladno z ugotovitvami v raziskavi [16], kjer je sicer zgornja meja WWR, do katere je še optimalno zastekliti posamezno steno, 40,49%. V modelu 1 se pojavijo vrednosti WWR tudi nad 60,00%. Največja razlika med vrednostmi WWR na posameznih fasadah se je pojavila na V orientirani fasadi, ko je v modelu 1 znašala 60,70%

Podatek, ki dobro opiše učinkovito zasnovo zasteklitve stavbnega ovoja (ob predpostavki, da s tem dosežemo dobro osvetlitev z dnevno svetlobo), je DPT. Dobro osvetljenost je težje doseči z nizko vrednostjo DPT, kar nam je po našem mnenju dobro uspelo, saj smo dosegli DPT v modelu 6 17,70 %, v modelu 1 pa je ta znašal 26,50 %, kot prikazujemo na grafikonu 8.



Grafikon 8: Primerjava DPT med modelom 1 in modelom 6.

Na grafikonu 9 prikazujemo primerjavo UDI* med modelom 1 in modelom 6.



Grafikon 9: Primerjava UDI* med modelom 1 in modelom 6.

Kljub konkretnemu zmanjšanju površine zasteklitve modela 6 v primerjavi z modelom 1 smo vrednosti UDI* v vseh analiziranih časih uspeli zvišati ali pa so vrednosti ostale vsaj približno enake, le dne 21.12. ob 9.00 je UDI* višji v modelu 1 kot v modelu 6, saj je sonce ob tem času zelo nizko na nebu, površina zasteklitve modela 1 na JV fasadi, kamor v tem času pade največ sončnega sevanja, pa je bistveno večja kot v modelu 6. Dne 21.12. ob 12.00 smo v obeh modelih dosegli skoraj enko vrednost UDI* 27% (model 6) oz. 28% (model 1), hkrati pa smo v modelu 6 zmanjšali preseženo vrednost UDI* za 7 odstotnih točk.

Dne 22.3. ob 9.00 smo v modelu 1 povišali UDI* za 31 odstotnih točk glede na model 1 in zmanjšali presežene vrednosti za 21 odstotnih točk. Ob 12.00 je bil UDI* modela 6 višji za 10 odstotnih točk glede na model 1 in je znašal 35%, medtem ko smo ob 15. uri dosegli skoraj enake vrednosti UDI*, in sicer 20 % (oz. 21 % v modelu 1). Če v zimskem času uporaba strešne zasteklitve ni vplivala na zvišanje vrednosti UDI*, pa so se na dan 22.3. vrednosti UDI* na račun strešne zasteklitve izboljšale kljub nižjim vrednostim zastekljene površine sten.

Dne 23.6. smo v modelu 6 v vseh obravnavanih urah dosegli bistveno povišanje vrednosti UDI* v primerjavi z modelom 1. Najmanj so se zvišale vrednost UDI*, ob 9.00 ko je bila le 8 odstotnih točk višja

od vrednosti v modelu 1, ob 12.00 je UDI* znašala 80% v modelu 6 oz. 34 odstotnih točk več kot v modelu 1, ob 15.00 pa 36 odstotnih točk več kot v modelu 1, in sicer 79%. Ob 18.00 je vrednost UDI* v modelu 6 znašala 45%, v modelu 1 pa 27%. Tu je najbolj do izraza prišla uporaba strešne zasteklitve, ki je bistveno zvišala vrednosti UDI*.

V modelu 6 je osvetljenost z naravno svetlobo bolj enakomerno razporejena po celotnem prostoru z nizkim deležem preveč osvetljenih površin. Tako smo izdelali optimiziran model zasteklitve, katerega bomo uporabili za nadaljnje simulacije uporabe energije stavbe.

4.3 2. SKLOP: Energijska analiza

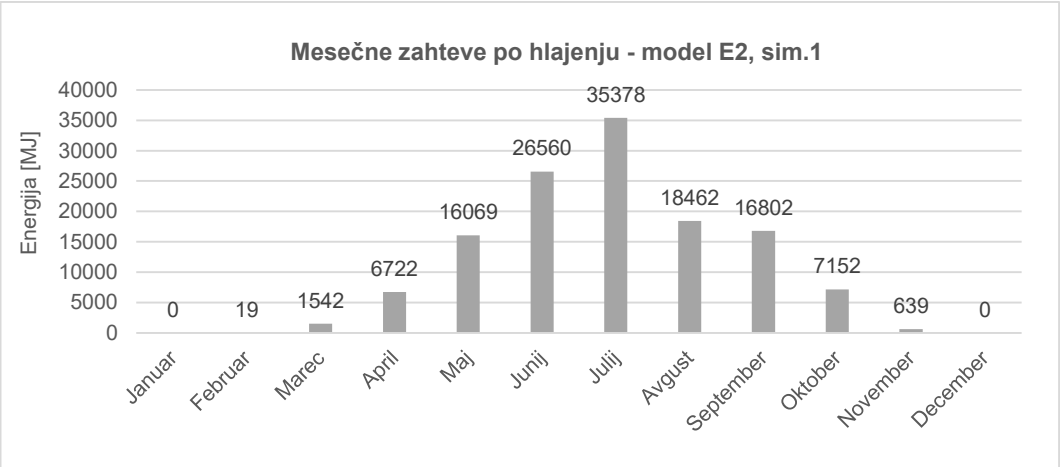
V tem sklopu bomo izvedli simulacijo uporabe energije najprej na modelu E2, nato pa za primerjavo uporabe energije še na modelu E1. Izvedli smo skupno 5 simulacij, od tega 4 simulacije na modelu 6. V simulacijah smo ugotavljali vpliv uporabe različnih konstrukcijskih sklopov, opisanih v poglavju 3.2.2.5 Lastnosti stavbnega ovoja v kombinaciji z dvoslojno in troslojno uporabo zasteklitve fasad na porabo energije za ogrevanje in hlajenje stavbe. Sestava konstrukcijskih sklopov strehe in talne konstrukcije se v simulacijah ni spreminjala, prav tako nismo spreminjali lastnosti zasteklitve na strehi, ki je bila vseskozi enaka. V simulaciji 5 smo na izhodiščni model aplicirali enake konstrukcijske sklope, kot smo jih uporabili na modelu E2 v četrti simulaciji, v kateri smo določili, da je uporabljen konstrukcijski sklop primeren za uporabo z vidika uporabe energije stavbe.

4.3.1 Simulacija uporabe energije

4.3.1.1 Simulacija 1

Prvo simulacijo uporabe energije smo izvedli na modelu E2. Stavbni ovoj je bil sestavljen iz konstrukcijskega sklopa 1 (fasadni toplotno izolativni panel debeline 20 cm) in zasteklitev 1 (dvoslojna zasteklitev). Konstrukcijski sklop tal je bil sestavljen iz ekstrudiranega polistirena debeline 20 cm in armiranobetonske temeljne plošče debeline 20 cm, na strehi smo uporabili strešne toplotno izolativne panele debeline 24 cm.

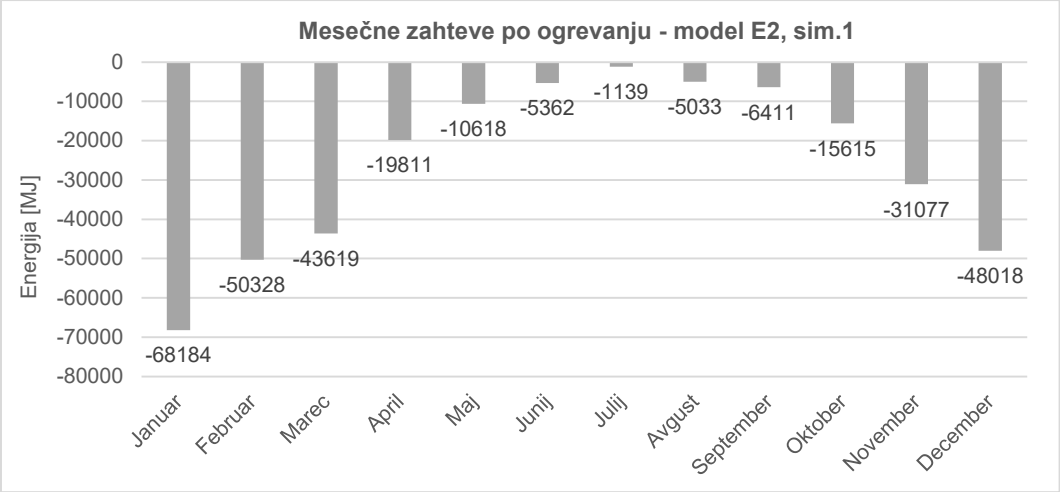
Mesečno porabo energije, potrebno za hlajenje stavbe prikazujemo na grafikonu 10.



Grafikon 10: Prikaz mesečne uporabe energije za hlajenje stavbe – model E2, simulacija 1.

Kot je bilo pričakovano, so največje potrebe za hlajenje v poletnih mesecih, najbolj izstopajo meseci od maja do septembra z najvišjo doseženo vrednostjo 35378 MJ. V času od novembra do marca so potrebe

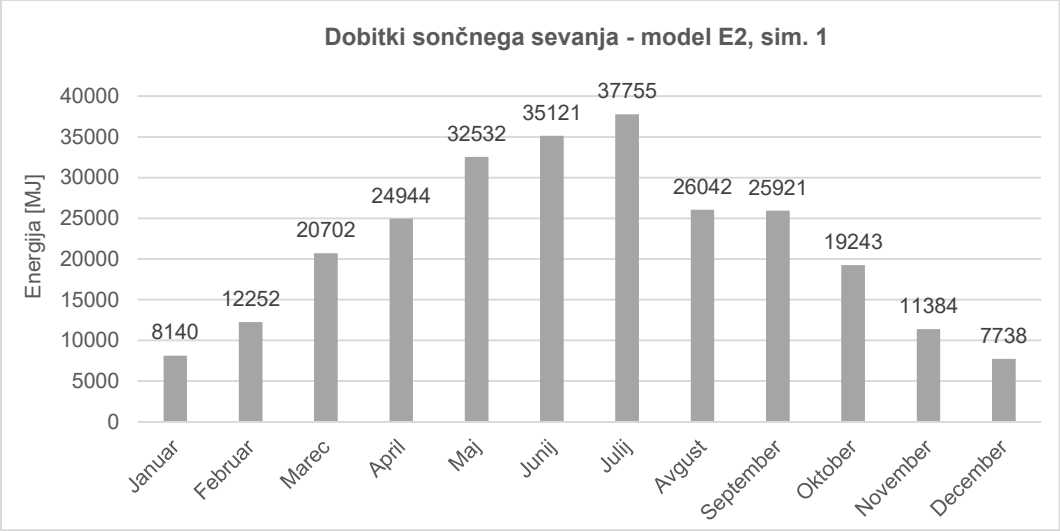
po hlajenju zelo nizke oziroma jih sploh ni. Skupna potrebna energija za hlajenje na letni ravni znaša 129344 MJ (81,66 MJ/m^2).
Mesečno porabo energije, potrebno za ogrevanje stavbe prikazujemo na grafikonu 11.



Grafikon 11: Prikaz mesečne uporabe energije za ogrevanje stavbe – model E2, simulacija 1.

Potrebe so najmanjše poleti, ko se temperatura ponoči spusti pod določeno referenčno temperaturo prostora in znašajo 1139 MJ ter se vztrajno povečejujo do meseca januarja ko vrednost zraste do 68184 MJ. Skupna vrednost zahtev po ogrevanju stavbe znaša 305215 MJ (192,69 MJ/m^2), kar je bistveno več kot so energijske potrebe stavbe za hlajenje.

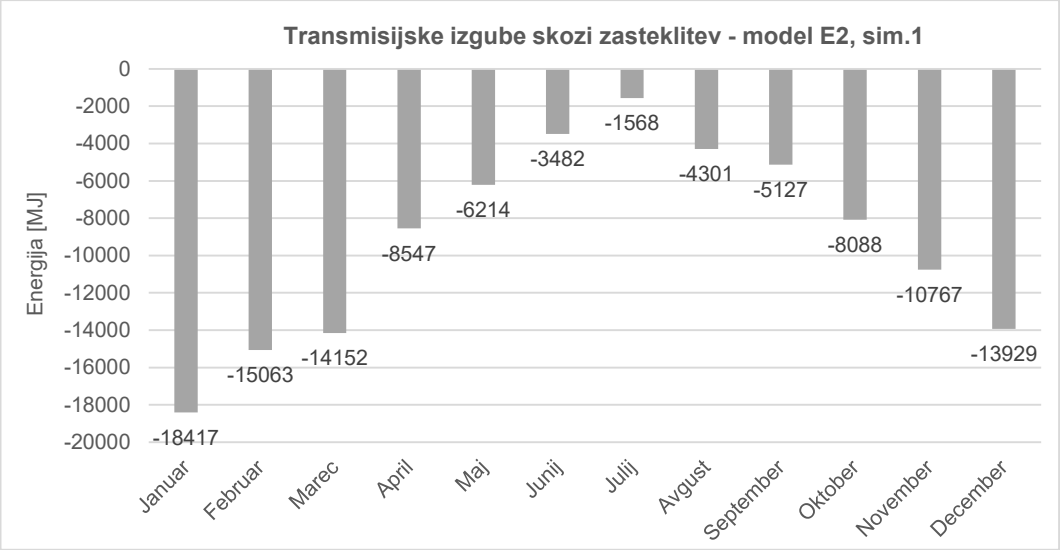
Toplotne dobitke sončnega sevanja prikazujemo na grafikonu 12.



Grafikon 12: Prikaz dobitkov sončnega sevanja – model E2, simulacija 1.

Vrednosti toplotnih dobitkov v stavbi zaradi sončnega sevanja so najvišje v poletnih mesecih, ko v juliju dosežejo vrednost 37755 MJ, najnižjo vrednost pa meseca decembra, ko je potencial sončnega sevanja najnižji v letu in je dosežena vrednost toplotnih dobitkov 7738 MJ. Dobitki sončnega sevanja skozi vse leto znašajo skupaj 261774 MJ (165,26 MJ/m^2).

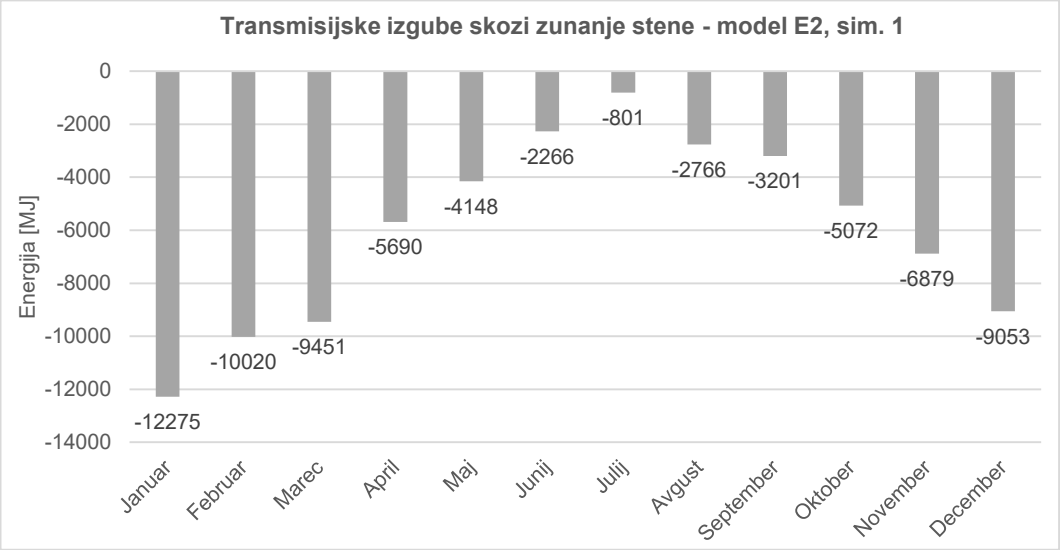
Transmisijske izgube skozi zasteklitev prikazujemo na grafikonu 13.



Grafikon 13: Transmisijske izgube skozi zasteklitev – model E2, simulacija 1.

Transmisijske izgube toplote skozi zasteklitev stavbe so največje v zimskih mesecih, najvišje vrednosti so v mesecu januarju in znašajo 18417 MJ, najnižje pa v juliju 1568 MJ. Skupna vrednost transmisijskih izgub skozi zasteklitev znaša 109656 MJ (69,23 MJ/m^2).

Transmisijske izgube skozi zunanje stene prikazujemo na grafikonu 14.



Grafikon 14: Transmisijske izgube skozi zunanje stene – model E2, simulacija 1.

Transmisijske izgube skozi netransparenten del stavbnega ovoja (fasadni panel) v simulaciji 1, se po razporeditvi velikosti ujemajo s tistimi skozi zasteklitev, le da so vrednosti nekoliko manjše. Najvišje so izgube v januarju 12275 MJ, najnižje v juliju 801 MJ, skupno vrednosti transmisijskih izgub skozi zunanje stene 71767 MJ (45,31 MJ/m^2).

V preglednici 28 povzemamo skupne zahteve po hlajenju in ogrevanju stavbe na letni ravni.

Preglednica 28: Letne vrednosti zahtev po hlajenju in ogrevanju stavbe v simulaciji 1.

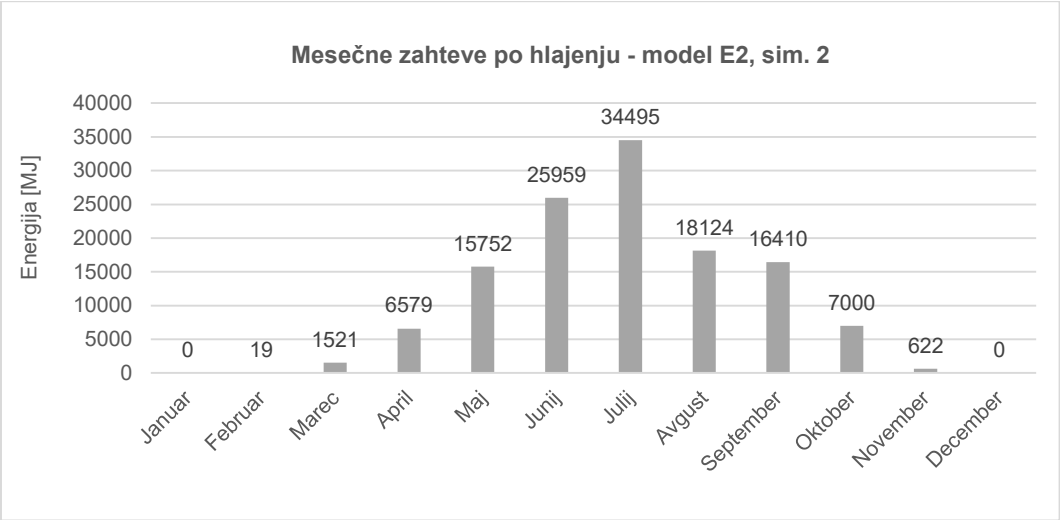
Simulacija 1	Vrednost v MJ	Vrednost v MJ/m^2
Potreba po hlajenju	129344	81,66
Potreba po ogrevanju	305215	192,69

Letne potrebe po hlajenju stavbe v simulaciji 1 so znašale 129344 MJ (81,66 MJ/m^2), letne potrebe po ogrevanju stavbe pa so znašale 305215 MJ (192,69 MJ/m^2).

4.3.1.2 Simulacija 2

Drugo simulacijo uporabe energije smo tudi izvedli na modelu E2. Stavbni ovoj je bil sestavljen s konstrukcijskega sklopa 1 (fasadni toplotnoizolacijski panel debeline 20 cm) in zasteklitve 2 (troslojna zasteklitev). Konstrukcijski sklop tal je bil sestavljen iz ekstrudiranega polistirena debeline 20 cm in armiranobetonske temeljne plošče debeline 20 cm, na strehi smo uporabili strešne toplotno izolativne panele debeline 24 cm. Namen simulacije 2 je oceniti učinkovitost troslojne zasteklitve v primerjavi z rezultati dobljenimi v simulaciji 1, kjer smo uporabili dvoslojno zasteklitev fasad.

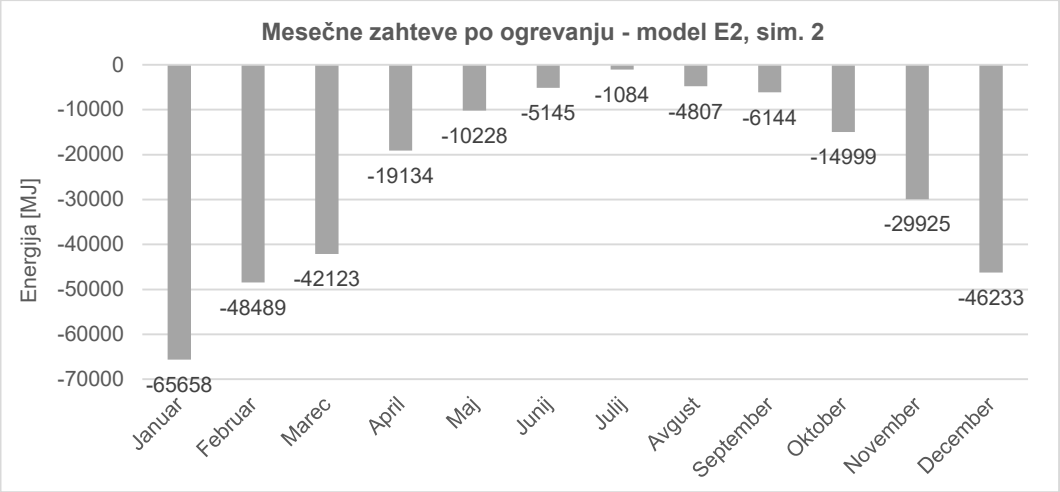
Mesečno porabo energije, potrebno za hlajenje stavbe prikazujemo na grafikonu 15.



Grafikon 15: Prikaz mesečne uporabe energije za hlajenje stavbe – model E2, simulacija 2.

Mesečne zahteve po energiji potrebni za hlajenje stavbe se zmanjšajo le minimalno v primerjave s tistimi v simulaciji 1. Skupna potrebna energija za hlajenje na letni ravni tu znaša 126481 MJ (79,85 MJ/m^2) in je le 2863 MJ oz. 2,2% manjša kot v simulaciji 1. Najvišja uporaba energije je v mesecu juliju ko znaša 34495 MJ.

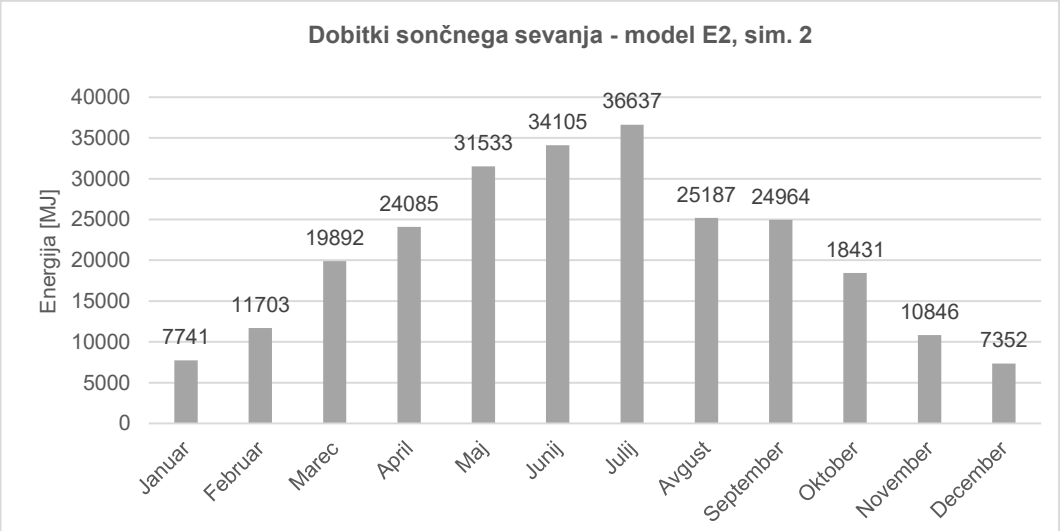
Mesečno porabo energije, potrebno za ogrevanje stavbe prikazujemo na grafikonu 16.



Grafikon 16: Prikaz mesečne uporabe energije za ogrevanje stavbe – model E2, simulacija 2.

Nekoliko več prihrankov se na račun troslojne zasteklitve pokaže v energiji potrebni za ogrevanje stavbe in sicer je uporaba manjša za 11247 MJ oz. 3,7%. Skupna potrebna energija za ogrevanje v simulaciji 2 tako znaša 293969 MJ (185,59 MJ/m^2). Na mesečni ravni je najvišja dosežena vrednost potrebne energije 65658 MJ v mesecu januarju, najnižja pa 1084 MJ meseca julija.

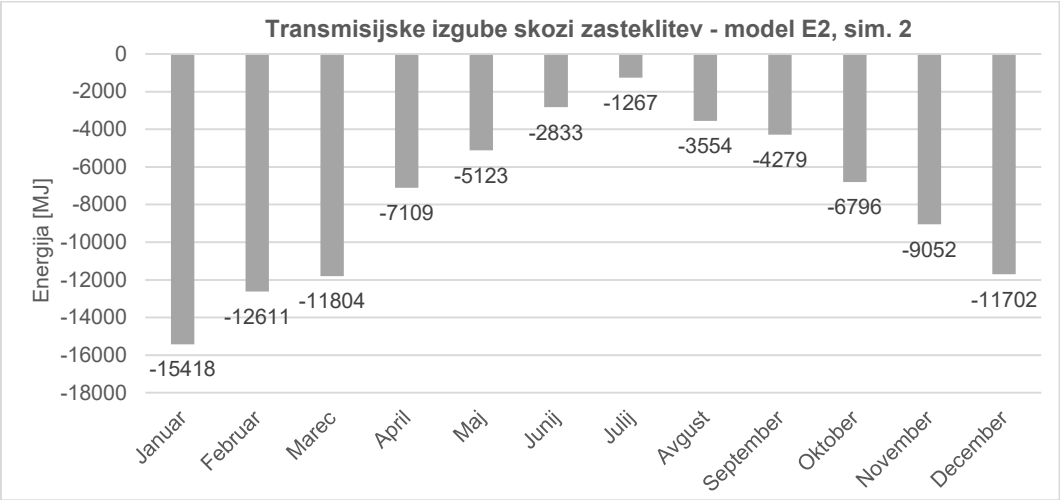
Toplotne dobitke sončnega sevanja v prikazujemo na grafikonu 17.



Grafikon 17: Prikaz dobitkov sončnega sevanja – model E2, simulacija 2.

Troslojna zasteklitev ima v primerjavi z dvoslojno zasteklitvijo nižji faktor g, kar pomeni da ne dopušča toplotnih dobitkov sončnega sevanja v stavbo v tolikšni meri kot dvoslojna zasteklitev z višjim faktorjem g. Toplotni dobitki sončnega sevanja v simulaciji 2 so 9297 MJ (3,5%) nižji od dobitkov v simulaciji 1, skupna vrednost dobitkov sončnega sevanja v simulaciji 2 pa znaša 252476 MJ (159,39 MJ/m^2).

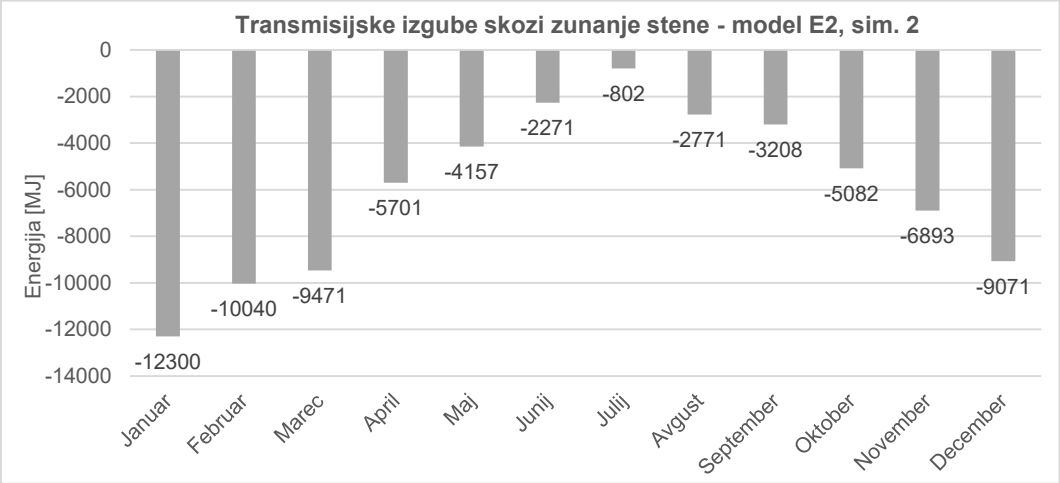
Transmisijske izgube skozi zasteklitev prikazujemo na grafikonu 18.



Grafikon 18: Transmisijske izgube skozi zasteklitev – model E2, simulacija 2.

Skupne transmisijske izgube skozi zasteklitev v simulaciji 2 znašajo 91546 MJ (57,79 MJ/m^2). V primerjavi s simulacijo 1 so te vrednosti 18110 MJ (16,5%) nižje, kar je posledica nižjega U faktorja troslojne zasteklitve.

Transmisijske izgube skozi zunanje stene prikazujemo na grafikonu 19.



Grafikon 19: Transmisijske izgube skozi zunanje stene – model E2, simulacija 2.

Transmisijske izgube skozi zunanje stene znašajo 71767 MJ (45,31 MJ/m^2). Razlika med transmisijskimi izgubami v simulaciji 1 je zanemarljiva in znaša 145 MJ. Takšne rezultat je bil tudi pričakovan, saj sestave zunanjih sten nismo spreminjali.

V preglednici 29 povzemamo skupne zahteve po hlajenju in ogrevanju stavbe na letni ravni.

Preglednica 29: Letne vrednosti zahtev po hlajenju in ogrevanju stavbe v simulaciji 2.

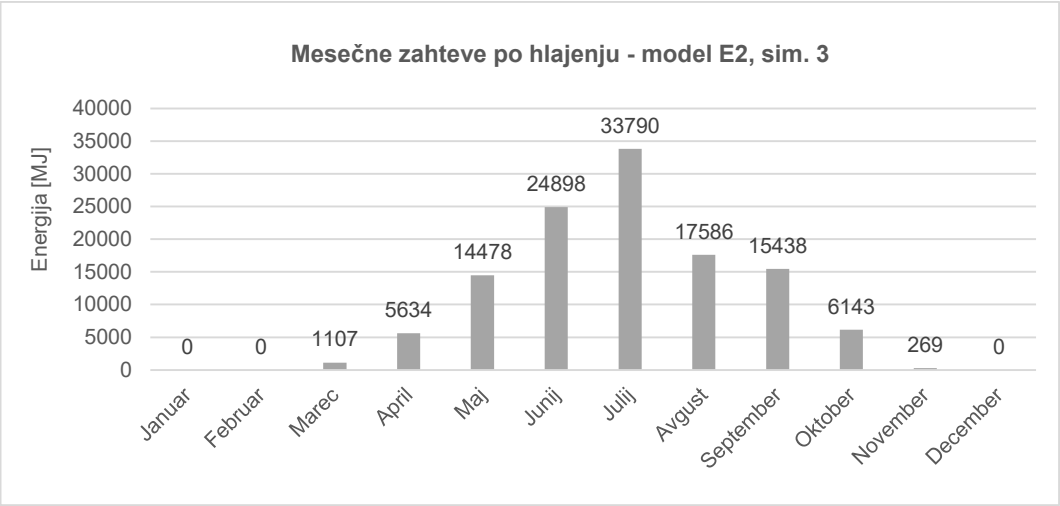
Simulacija 2	Vrednost v MJ	Vrednost v MJ/m^2
Potreba po hlajenju	126481	79,85
Potreba po ogrevanju	293969	185,59

Letne potrebe po hlajenju stavbe v simulaciji 2 so znašale 126481 MJ (79,85 MJ/m^2), letne potrebe po ogrevanju stavbe pa so znašale 293969 MJ (185,59 MJ/m^2).

4.3.1.3 Simulacija 3

Tretjo simulacijo uporabe energije smo tudi izvedli na modelu E2. Stavbni ovoj je bil sestavljen s konstrukcijskega sklopa 3 (opeka s toplotno izolacijo skupne debeline 42 cm) in zasteklitve 2 (troslojna zasteklitev). Konstrukcijski sklop tal je bil sestavljen iz ekstrudiranega polistirena debeline 20 cm in armiranobetonske temeljne plošče debeline 20 cm, na strehi smo uporabili strešne toplotno izolativne panele debeline 24 cm. Simulacija 3 je namenjena primerjavi med panelnimi stenami, ki imajo nizko zmožnostjo akumulacije toplote, in opečnimi zunanjimi stenami z večjo gostoto in večjo zmožnostjo akumulacije toplote.

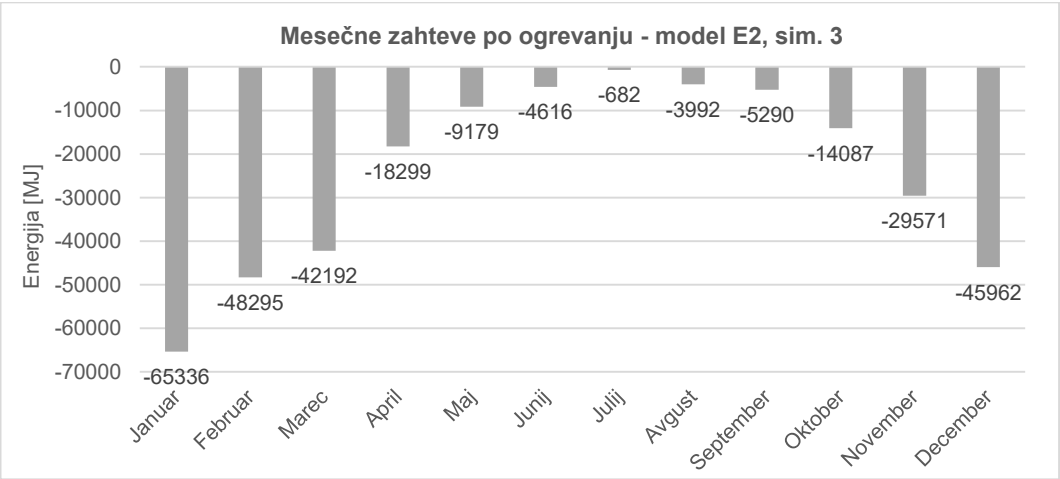
Mesečno porabo energije, potrebno za hlajenje stavbe, prikazujemo na grafikonu 20.



Grafikon 20: Prikaz mesečne uporabe energije za hlajenje stavbe – model E2, simulacija 3.

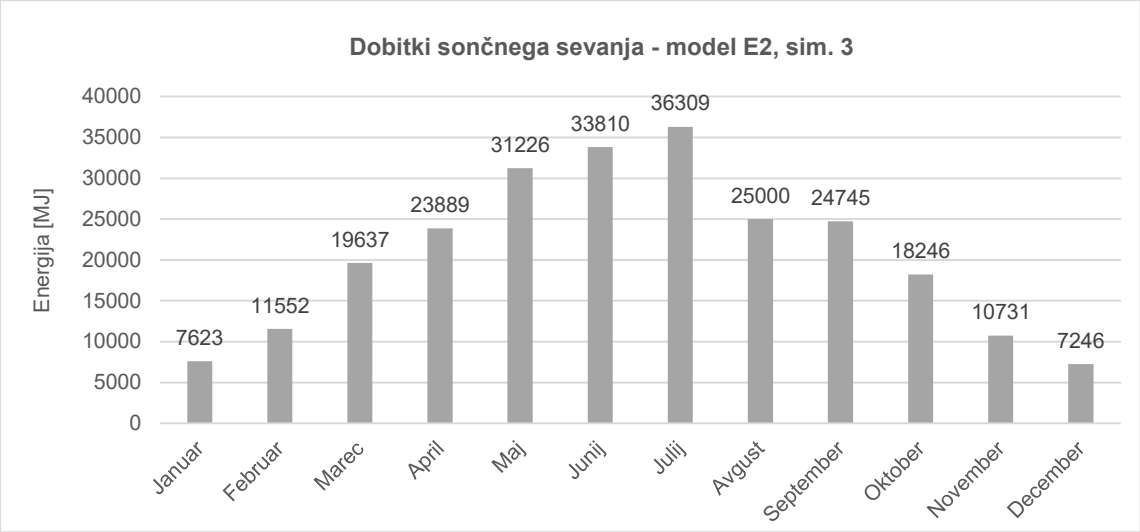
Mesečne zahteve po hlajenju stavbe v simulaciji 3 znašajo skupaj 119343 MJ (75,34 MJ/m^2). Zmanjšanje teh potreb glede na simulacijo 2 je 7138 MJ oz. 6,1%.

Mesečno porabo energije, potrebno za ogrevanje stavbe, prikazujemo na grafikonu 21.



Grafikon 21: Prikaz mesečne uporabe energije za ogrevanje stavbe – model E2, simulacija 3.

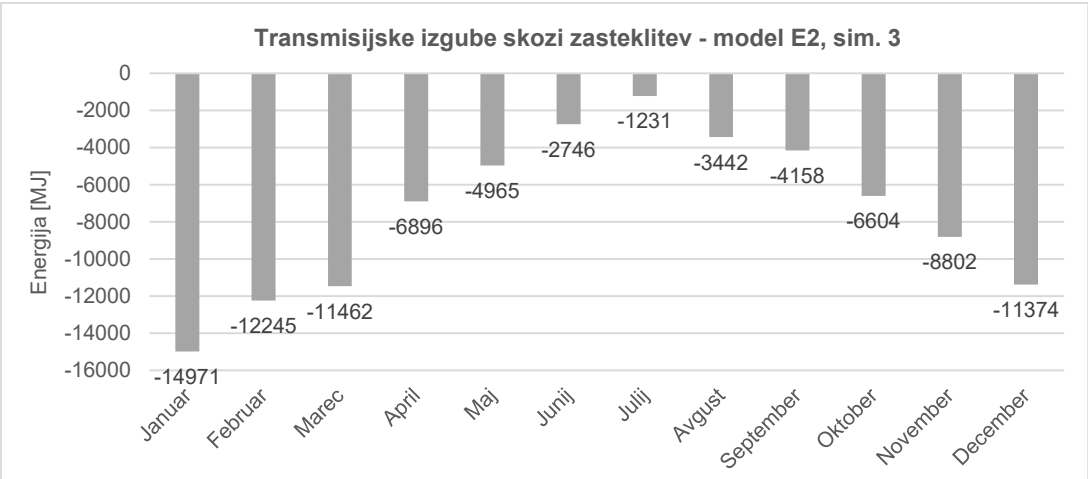
V primerjavi s simulacijo 2 so se potrebe po ogrevanju stavbe zmanjšale za 6469 MJ oz. 2%, skupaj na letni ravni znašajo 287500 MJ (181,50 MJ/m^2).
Toplotne dobitke sončnega sevanja v prikazujemo na grafikonu 22.



Grafikon 22: Prikaz dobitkov sončnega sevanja – model E2, simulacija 3.

Dobitki sončnega sevanja se v simulaciji 3 zmanjšajo za 1% glede na dobitke, dobljene v simulaciji 2. Skupaj znašajo 250014 MJ (157,84 MJ/m^2), v simulaciji 2 pa so višji za 2462 MJ. Zmanjšanje je zelo majhno, kar pripisujemo temu, da so bile stene v simulaciji 3 debelejše, zasteklitve pa so ostale na enakem mestu kot v simulaciji 2; s tem so bile malo bolj zasenčene in posledično so bili dobitki sončnega sevanja manjši zaradi pojava nasebnega senčenja.

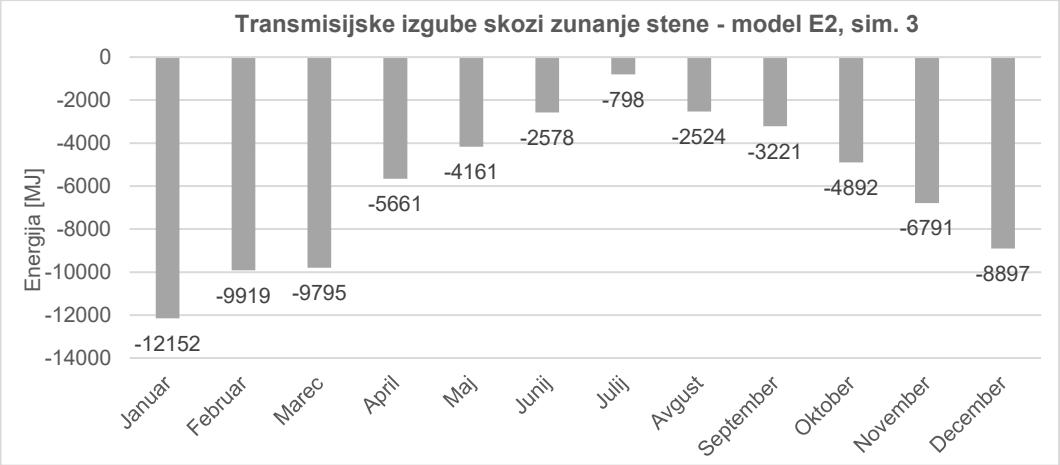
Transmisijske izgube skozi zasteklitev prikazujemo na grafikonu 23.



Grafikon 23: Transmisijske izgube skozi zasteklitev – model E2, simulacija 3.

Transmisijske izgube skozi zasteklitev se zmanjšajo za 2652 MJ v primerjavi z izgubami v simulaciji 2, kjer so znašale 91546 MJ (57,79 MJ/m^2); skupaj izgube znašajo 88895 MJ (56,12 MJ/m^2). Zmanjšanje teh izgub sicer ni veliko, najverjetneje je to posledica manjšega nihanja in nižje notranje temperature.

Transmisijske izgube skozi zunanje stene prikazujemo na grafikonu 24.



Grafikon 24: Transmisijske izgube skozi zunanje stene – model E2, simulacija 3.

Skoraj nespremenjene glede na simulacijo 2 ostajajo transmisijske izgube skozi zunanje stene. Skupno znašajo 71389 MJ (45,07 MJ/m^2), kar je 378 MJ manj kot v simulaciji 2.

V preglednici 30 povzemamo skupne zahteve po hlajenju in ogrevanju stavbe na letni ravni.

Preglednica 30: Letne vrednosti zahtev po hlajenju in ogrevanju stavbe v simulaciji 3.

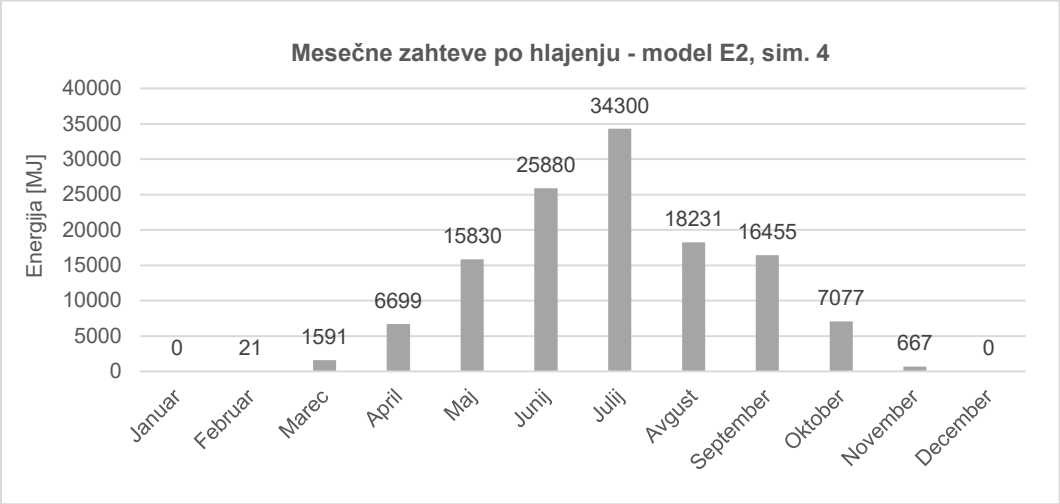
Simulacija 3	Vrednost v MJ	Vrednost v MJ/m^2
Potreba po hlajenju	119343	75,34
Potreba po ogrevanju	287500	181,50

Letne potrebe po hlajenju stavbe v simulaciji 3 so znašale 119343 MJ (75,34 MJ/m^2), letne potrebe po ogrevanju stavbe pa so znašale 287500 MJ (181,50 MJ/m^2).

V simulaciji 3 smo v primerjavi s simulacijo 2 dosegli zmanjšanje potrebo po hlajenju stavbe kot tudi potreb po ogrevanju stavbe. Model s takšno sestavo sten se kasneje odzove na spremembo zunanje temperature, saj zadržuje toploto, s tem pa ne povzroči hitrega povišanja ali znižanja notranje temperature prostora.

4.3.1.4 Simulacija 4

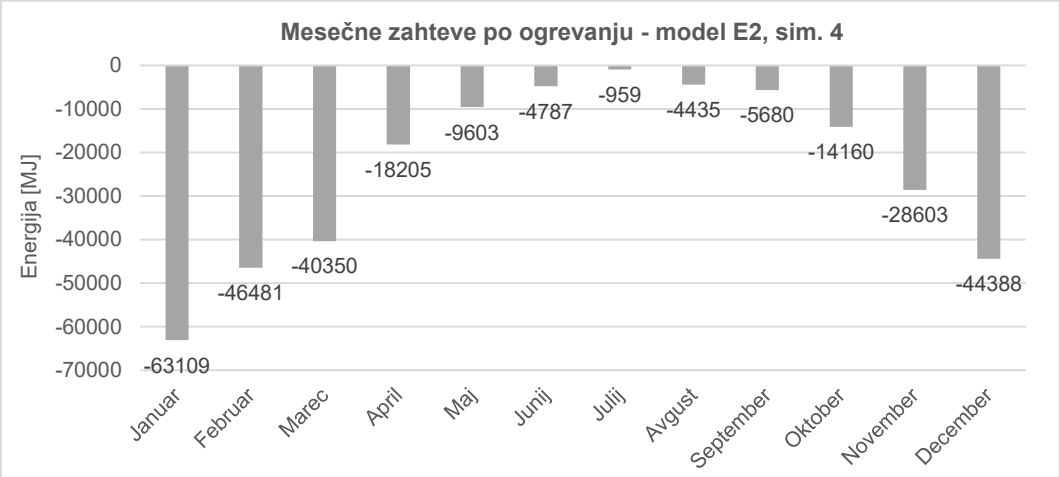
V prejšnjih simulacijah uporabe energije smo ugotovili, da z izboljšanjem gradbeno-fizikalnih in optičnih lastnosti zasteklitve bistveno ne moremo zmanjšati potrebne energije za hlajenje, nekoliko bolj lahko zmanjšamo potrebo po ogrevanju stavbe. Površine in pozicija zasteklitve so zasnovane tako, da je razmerje med pridobljeno in izgubljeno toploto skozi stekla karseda optimalno. V simulaciji 3 smo ugotovili, da z večjo akumulacijo toplote v zunanjih stenah stavbe lahko še znižamo potrebno energijo za hlajenje in ogrevanje stavbe. Ker je za tip obravnavane stavbe (trgovski center) opečna gradnja nekoliko nenavadna in neracionalna, smo v simulaciji 4 ponovno za zunanje stene uporabili fasadni toplotno izolativni panel. Uporabili smo konstrukcijski sklop 2 (fasadni toplotno izolativni panel debeline 24 cm) in zasteklitev 2 (troslojna zasteklitev). Konstrukcijski sklop tal je bil sestavljen iz ekstrudiranega polistirena debeline 20 cm in armiranobetonske temeljne plošče debeline 20 cm, na strehi pa smo uporabili strešne toplotno izolativne panele debeline 24 cm. Izračunane vrednosti uporabe energije, potrebne za ogrevanje in hlajenje stavbe, smo primerjali z rezultati dobljenimi v simulaciji 2.
Mesečno porabo energije, potrebno za hlajenje stavbe, prikazujemo na grafikonu 25.



Grafikon 25: Prikaz mesečne uporabe energije za hlajenje stavbe – model E2, simulacija 4.

Izkaže se, da se potrebna energija za hlajenje stavbe tokrat ne spremeni v primerjavi z rezultati iz simulacije 2, kjer smo uporabili fasadni panel debeline 20 cm. Razlika je zelo majhna in znaša 270 MJ, kar je lahko tudi posledica računske netočnosti vsake posamezne simulacije. Skupna potrebna energije za hlajenje stavbe tako znaša 126751 MJ (80,02 MJ/m^2).

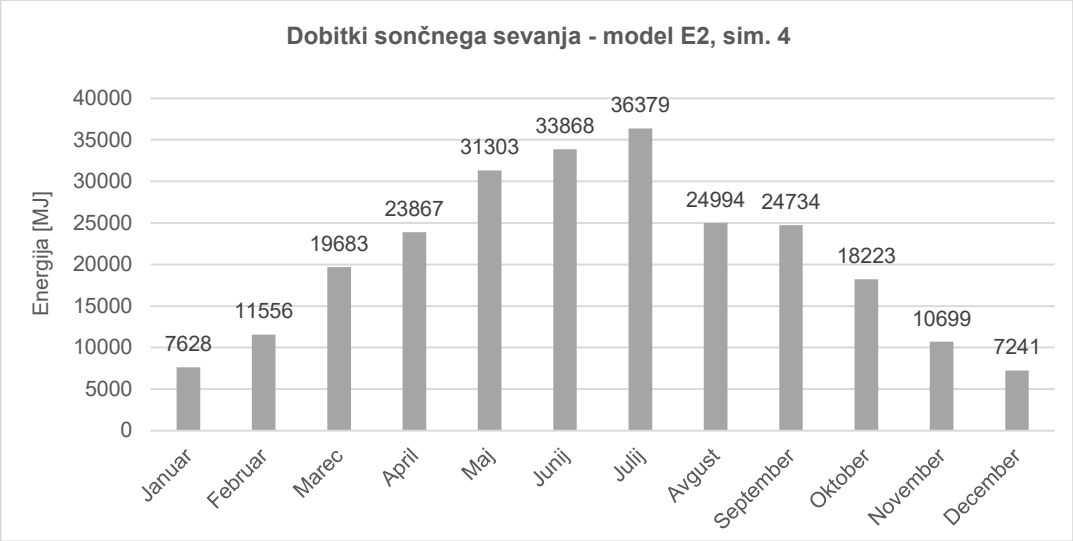
Mesečno porabo energije, potrebno za ogrevanje stavbe, prikazujemo na grafikonu 26.



Grafikon 26: Prikaz mesečne uporabe energije za ogrevanje stavbe – model E2, simulacija 4.

Z izbiro debelejšega fasadnega panela smo uspeli zmanjšati potrebno energijo za ogrevanje stavbe za 5%, kar je posledica predvsem izboljšanja faktorja U in s tem zmanjšanje transmisijskih izgub skozi zunanje stene. Prihranki znašajo 13209 MJ v primerjavi s simulacijo 2, skupaj zahteve po ogrevanju na letni ravni znašajo 280760 MJ (177,25 MJ/m^2).

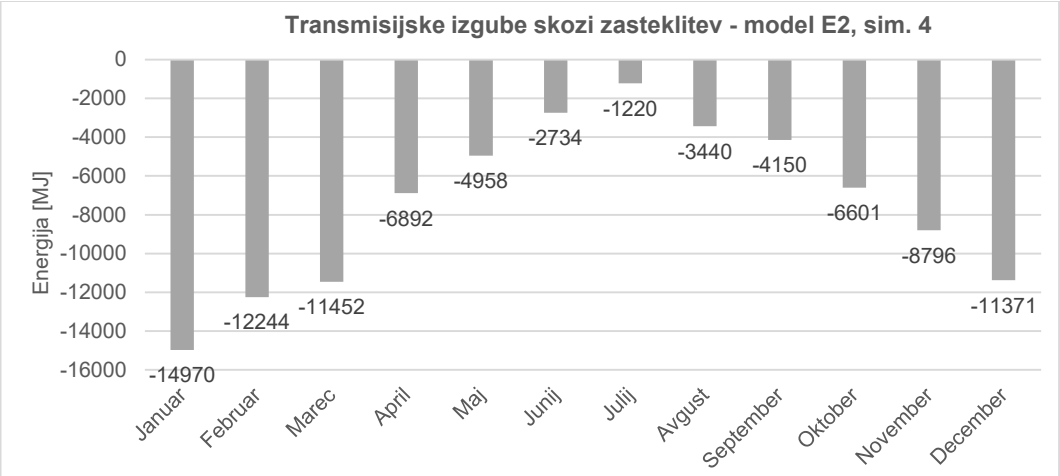
Toplotne dobitke sončnega sevanja v prikazujemo na grafikonu 27.



Grafikon 27: Prikaz dobitkov sončnega sevanja – model E2, simulacija 4.

Dobitki sončnega sevanja v simulaciji 4 znašajo skupaj na letni ravni 250174 MJ (157,93 MJ/m^2), v simulaciji 2 pa so višji za 2303 MJ. Zmanjšanje je zelo majhno, kar pripisujemo temu, da so bile stene v simulaciji 4 debelejše, zasteklitve pa so ostale na enakem mestu kot v simulaciji 2; s tem so bile malo bolj zasenčene in posledično so bili dobitki sončnega sevanja manjši.

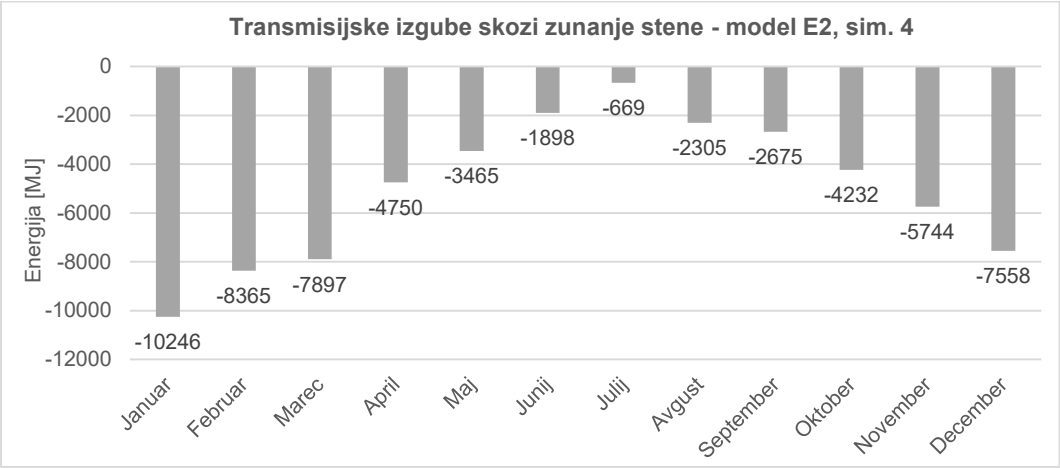
Transmisijske izgube skozi zasteklitev prikazujemo na grafikonu 28.



Grafikon 28: Transmisijske izgube skozi zasteklitev – model E2, simulacija 4.

Transmisijske izgube skozi zasteklitev se zmanjšajo za 2718 MJ v primerjavi z izgubami v simulaciji 2, kjer so znašale 91546 MJ (57,79 MJ/m^2); skupaj transmisijske izgube skozi zasteklitev znašajo 88828 MJ (56,08 MJ/m^2).

Transmisijske izgube skozi zunanje stene prikazujemo na grafikonu 29.



Grafikon 29: Transmisijske izgube skozi zunanje stene – model E2, simulacija 4.

Zmanjšanje transmisijskih izgub skozi zunanje stene zaradi izboljšanega faktorja U fasadnih panelov znaša 11962 MJ v primerjavi s simulacijo 2 oz. 17,0%, skupaj tako transmisijske izgube skozi zunanje stene znašajo 59804 MJ (37,76 MJ/m^2).

V preglednici 31 povzemamo skupne zahteve po hlajenju in ogrevanju stavbe na letni ravni.

Preglednica 31: Letne vrednosti zahtev po hlajenju in ogrevanju stavbe v simulaciji 4.

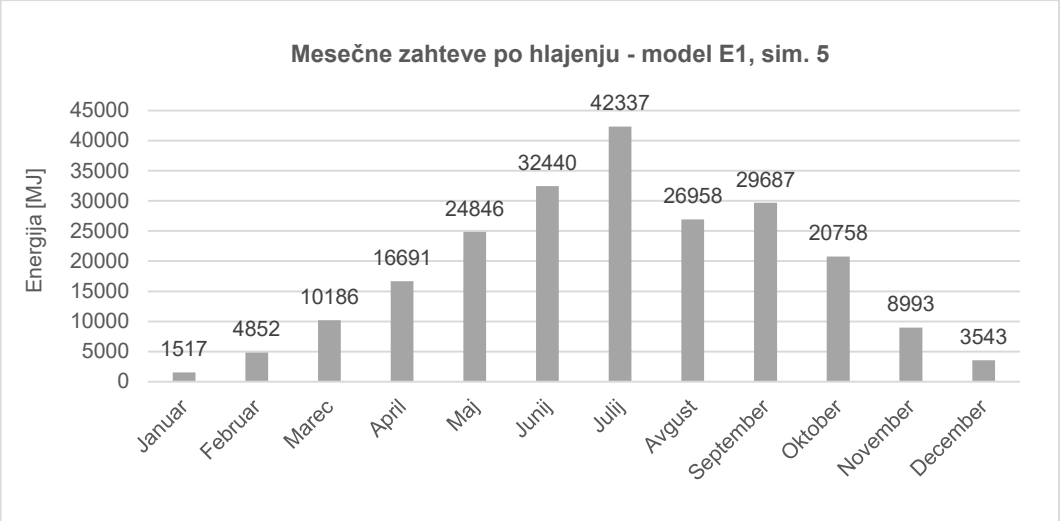
Simulacija 4	Vrednost v MJ	Vrednost v MJ/m^2
Potreba po hlajenju	126751	80,02
Potreba po ogrevanju	280760	177,25

Letne potrebe po hlajenju stavbe v simulaciji 4 so znašale 126751 MJ (80,02 MJ/m^2), letne potrebe po ogrevanju stavbe pa so znašale 280760 MJ (177,25 MJ/m^2). Z uporabo toplotno izolativnih fasadnih panelov debeline 24 cm in troslojno zasteklitvijo fasad smo v simulaciji 4 dosegli najnižje zahteve po energiji, potrebni za ogrevanje stavbe. Potrebna energija za hlajenje stavbe je bila nižja le v simulaciji 3, medtem ko je bila v simulaciji 2 praktično enaka, v simulaciji 1 pa je bila potrebna energija za hlajenje stavbe najvišja izmed vseh simulacij.

4.3.1.5 Simulacija 5

Zadnjo simulacijo uporabe energije v 2. sklopu zasnove visoko učinkovitega stavbnega ovoja smo izvedli na izhodiščnem modelu, ki smo ga poimenovali model E1. Lastnosti transparentnega in netransparentnega stavbnega ovoja so enake, kot smo jih uporabili v simulaciji 4 na modelu E2, troslojna zasteklitev fasad in toplotno izolativni fasadni paneli debeline 24 cm. Konstrukcijski sklop tal je bil sestavljen iz ekstrudiranega polistirena debeline 20 cm in armiranobetonske temeljne plošče debeline 20 cm, na strehi smo uporabili strešne toplotno izolativne panele debeline 24 cm.

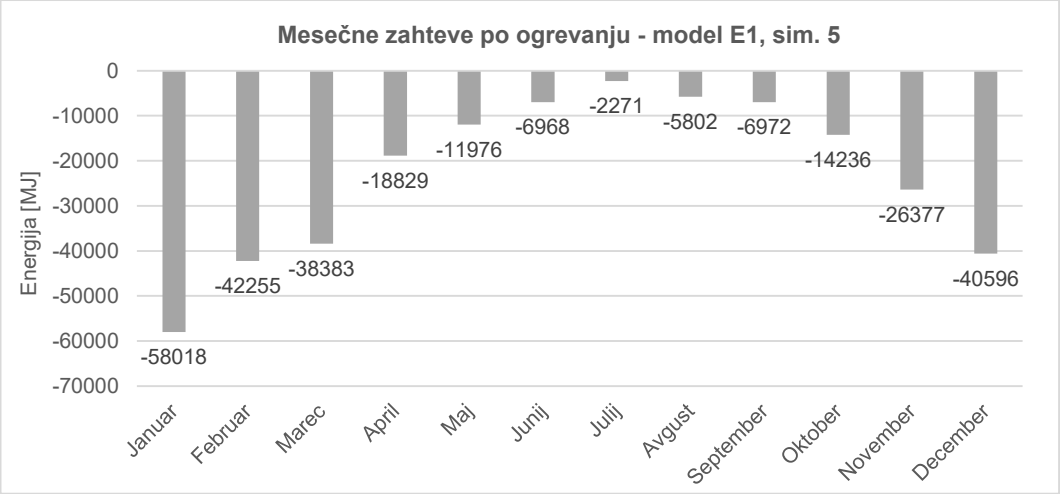
Mesečno porabo energije, potrebno za hlajenje stavbe, prikazujemo na grafikonu 30.



Grafikon 30: Prikaz mesečne uporabe energije za hlajenje stavbe – model E1, simulacija 5.

Mesečne potrebe po hlajenju izhodiščnega modela naraščajo skladno z zunanjimi temperaturami posameznih mesecev od januarja, ko znašajo 1517 MJ, do julija, ko so zahteve po hlajenju 42337 MJ. Od julija do decembra zahteve po hlajenju stavbe začnejo padati do decembrskih zahtev 3543 MJ. Skupna vrednost zahtev po hlajenju znaša 222807 MJ (140,66 MJ/m^2).

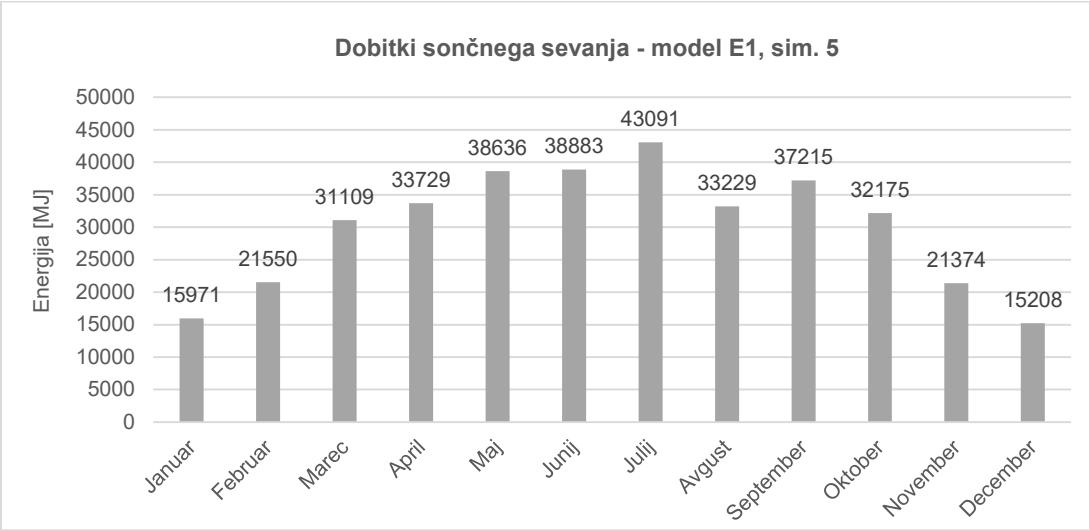
Mesečno porabo energije, potrebno za ogrevanje stavbe, prikazujemo na grafikonu 31.



Grafikon 31: Prikaz mesečne uporabe energije za ogrevanje stavbe – model E1, simulacija 5.

Obratno kakor naraščajo mesečne zahteve po hlajenju, naraščajo oz. padajo potrebe po energiji za ogrevanje stavbe. Najnižje zahteve se po pričakovanjih pojavijo v mesecu juliju, ko znašajo 2271 MJ, ter so najvišje v mesecu januarju, in sicer 58018 MJ, skupaj na letni ravni pa znašajo 272684 MJ (172,15 MJ/m^2).

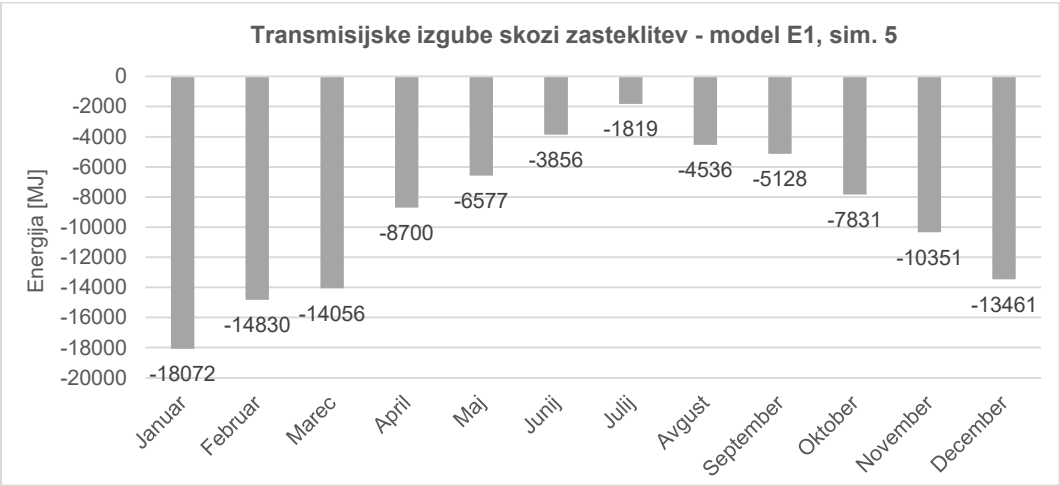
Toplotne dobitke sončnega sevanja prikazujemo na grafikonu 32.



Grafikon 32: Prikaz dobitkov sončnega sevanja – model E1, simulacija 5.

Zaradi velikih zastekljenih površin je model E1 nagnjen k visokim toplotnim dobitkom sončnega sevanja, ki v simulacij 5 na letni ravni znašajo 362172 MJ (228,64 MJ/m^2). Najnižji dobitki sončnega sevanja so na mesečni ravni v mesecu decembru 15208 MJ, najvišji pa julija 43091 MJ. Visoki toplotni dobitki sončnega sevanja predstavljajo tudi velik del potreb po hlajenju stavbe.

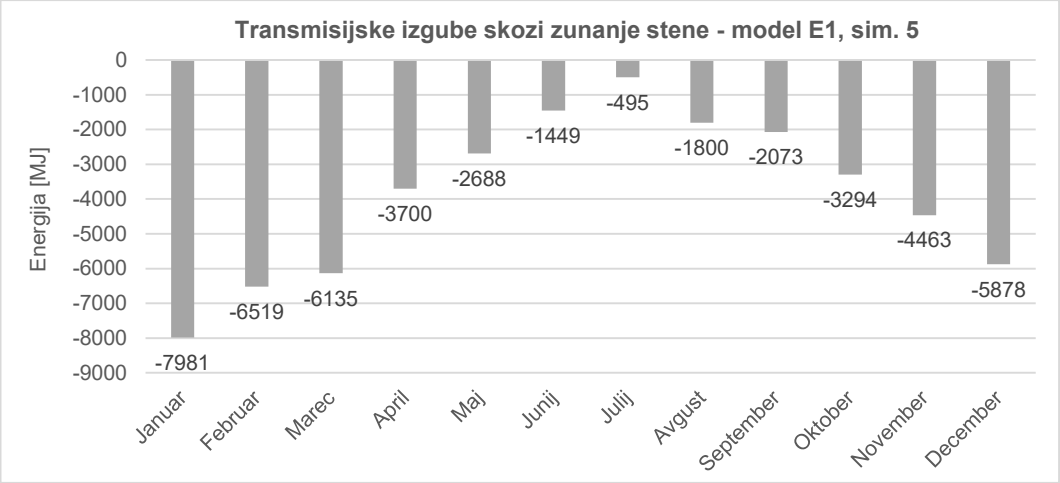
Transmisijske izgube skozi zasteklitev prikazujemo na grafikonu 33.



Grafikon 33: Transmisijske izgube skozi zasteklitev – model E1, simulacija 5.

Velike zastekljene površine pa poleg visokih toplotnih dobitkov sončnega sevanja povzročijo tudi relativno visoke transmisijske izgube skozi zasteklitev, ki na letni ravni znašajo 109217 MJ (68,95 MJ/m^2).

Transmisijske izgube skozi zunanje stene prikazujemo na grafikonu 34.



Grafikon 34: Transmisijske izgube skozi stene – model E1, simulacija 5.

Transmisijske izgube skozi zunanje stene na letni ravni znašajo 46474 MJ.

V preglednici 32 povzemamo skupne zahteve po hlajenju in ogrevanju stavbe na letni ravni.

Preglednica 32: Letne vrednosti zahtev po hlajenju in ogrevanju stavbe v simulaciji 5.

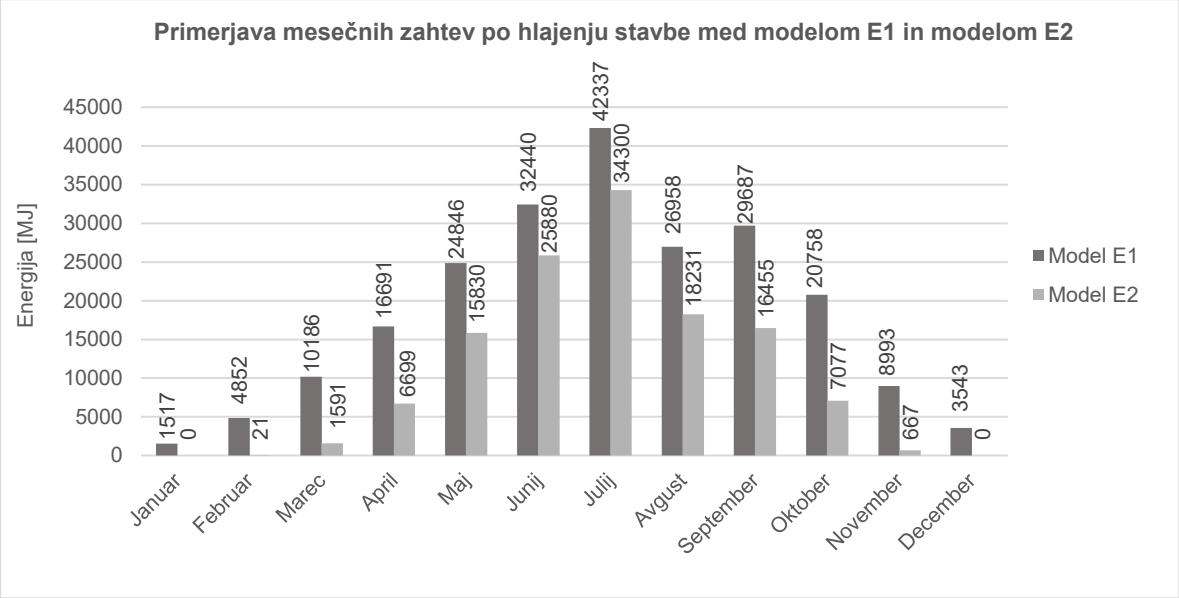
Simulacija 5	Vrednost v MJ	Vrednost v MJ/m^2
Potreba po hlajenju	222807	140,66
Potreba po ogrevanju	272084	172,15

Letne potrebe po hlajenju stavbe v simulaciji 5 so znašale 222807 MJ (140,66 MJ/m^2), letne potrebe po ogrevanju stavbe pa so znašale 272084 MJ (172,15 MJ/m^2).

4.3.2 Primerjava uporabe energije med modeloma E1 in E2

Primerjavo uporabe energije obravnavane stavbe smo izvedli med modeloma E1 (simulacija 5) in E2 (simulacija 4). Oba obravnavana modela imata sestavo stavbnega ovoja z enakimi lastnostmi, kot je bilo prikazano v simualcijah 4 in 5. S primerjavo uporabe energije bomo prikazali pozitivne in negativne lastnosti obeh obravnavanih modelov. Primerjali smo uporabo potrebne energije za hlajenje stavbe in uporabo potrebne energije za ogrevanje stavbe ter toplotne dobitke zaradi sončnega sevanja, saj imajo največji vpliv na toplotno okolje v stavbi. Na koncu smo primerjali še kumulativno energijo, kjer smo sešteli potrebe po hlajenju in potrebe po ogrevanju stavbe.

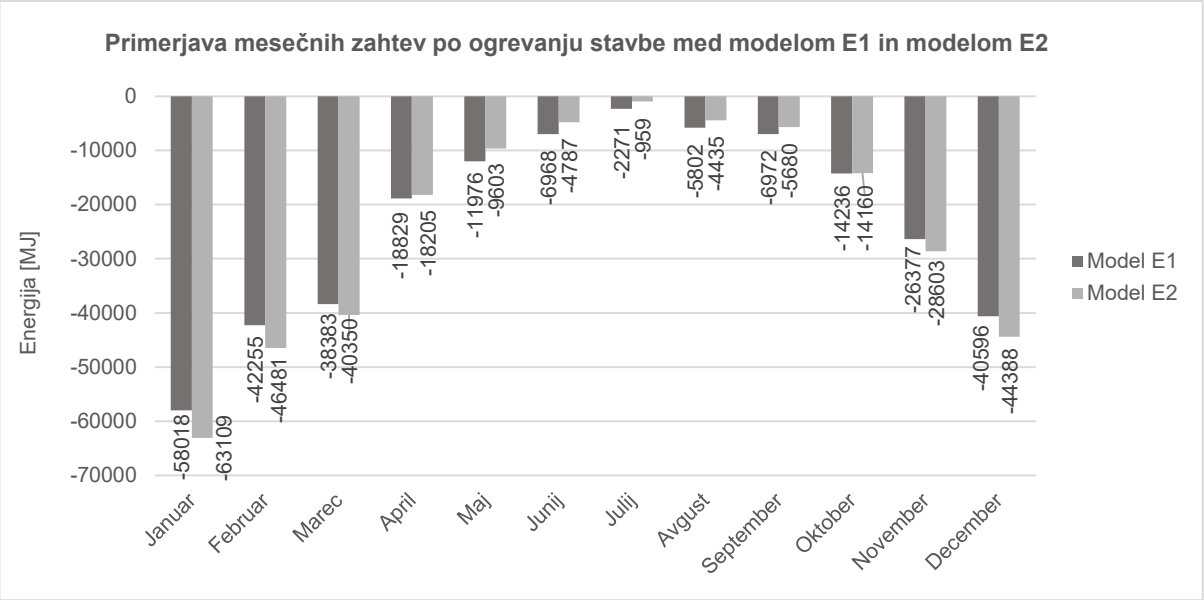
Na grafikonu 35 prikazujemo primerjavo zahtev po hlajenju stavbe na mesečni ravni med modelom E1 in modelom E2.



Grafikon 35: Prikaz primerjave mesečnih zahtev po hlajenju stavbe med modelom E1 in modelom E2.

Potrebna energija za hlajenje stavbe je na mesečni ravni vseskozi nižja v modelu E2. Razlike so najbolj očitne spomladi (marec, april) in jeseni (september, oktober in november), ko je pot sonca relativno nizka, intenziteta sončnega sevanja pa je višja kot v zimskih mesecih. Uporaba energije je v tem času v modelu E2 v posameznih mesecih nižja od 45% do 85% v primerjavi z modelom E1. Model E1 zaradi velikih zastekljenih površin fasade v tem času prejme višje količine sončnega sevanja kot model E2, zato lahko že v teh mesecih v modelu E1 pričakujemo, da se prej pojavi pregrevanje stavbe kot v modelu E2. V poletnih mesecih (od maja do avgusta) se razlike zmanjšujejo in so v modelu E2 v posameznih mesecih nižje od 19-35% od uporabe v modelu E1. Meseca julija, ko so zahteve po energiji za hlajenje stavbe najvišje, znašajo v modelu E1 42337 MJ, v modelu E2 pa 34300 MJ, kar znese 8037 MJ oz. 19% razlike. Razlike v uporabi potrebne energije se v poletnih mesecih zmanjšujejo zaradi vpliva strešne zasteklitve, ki je nameščena v modelu E2, saj je pot sonca v poletnih mesecih višja, s tem pa skozi strešno zasteklitev pridobimo več toplotnih dobitkov sončnega sevanja kot bi ga v primeru, da strešne zasteklitve nebi bilo. Še vedno so zastekljene površine v modelu E2 toliko manjše, da potrebna energija za hlajenje nikdar v letu ne preseže vrednosti iz modela E1.

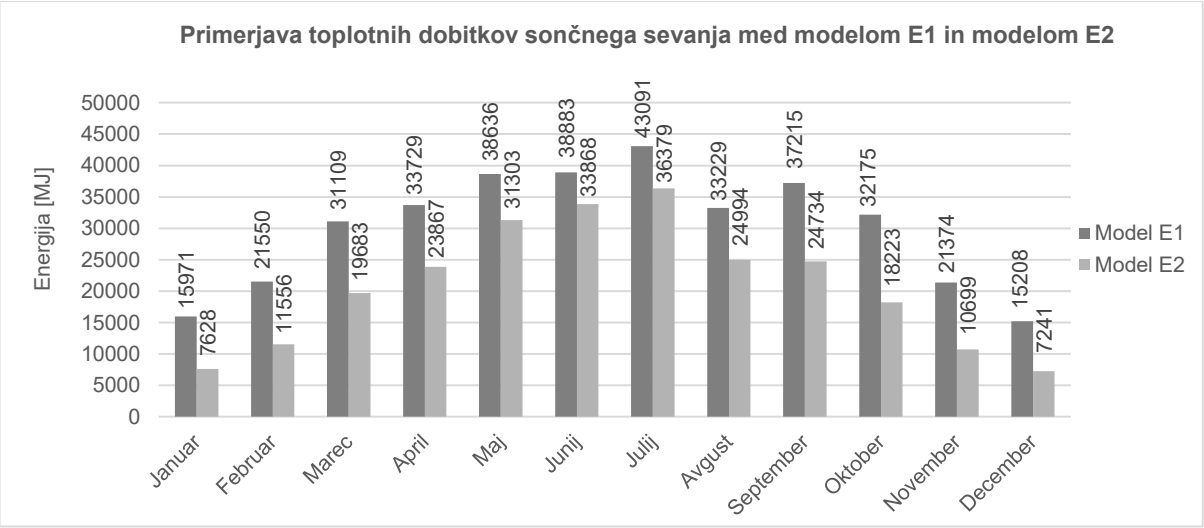
Na grafikonu 36 prikazujemo primerjavo zahtev po ogrevanju stavbe na mesečni ravni med modelom E1 in modelom E2.



Grafikon 36: Prikaz primerjave mesečnih zahtev po ogrevanju stavbe med modelom E1 in modelom E2.

V primerjavi potrebne energije za ogrevanje stavbe ugotovimo, da v času od oktobra do marca, ko so zunanje temperature nizke in je potrebno večino na območju Slovenije stavb grajenih ogrevati, model E1 dosega nižje zahteve po energiji za ogrevanje od modela E2, in sicer so vrednosti v posameznih mesecih nižje od 0-8% v primerjavi z izračunanimi vrednostmi modela E2. Najvišje zahteve po energiji za ogrevanje so v mesecu januarju, ko v modelu E2 dosežejo 63109 MJ, v modelu E1 pa 58018 MJ; razlika znaša 5091 MJ oz. 8%. Največje razlike se tudi tu pojavijo zaradi toplotnih dobitkov sončnega sevanja, ko model E1 v zgoraj omenjenih mesecih zaradi velikih zastekljenih površin na fasadah prejme večjo količino sončnega sevanja.

Na grafikonu 37 prikazujemo primerjavo toplotnih dobitkov sončnega sevanja na mesečni ravni med modelom E1 in modelom E2.



Grafikon 37: Prikaz primerjave toplotnih dobitkov sončnega sevanja med modelom E1 in modelom E2.

Iz grafikona 37 je razvidno, da so dobitki skozi celo leto nižji v modelu E2, kar pomeni manjše pregrevanje stavbe poleti, vendar se pozimi pojavi večja potreba po energiji, potrebni za ogrevanje stavbe. Manjši toplotni dobitki sončnega sevanja so posledica zmanjšanja površine zasteklitve v modelu E2. Če predvidimo, da zimski čas traja v mesecih od oktobra do vključno meseca marca (ta čas predvidoma traja tudi kurilna sezona), toplotni dobitki v zimskem času v modelu E2 znašajo 75030 MJ in so manjši za 62357 MJ (45%) od tistih v modelu E1, ki znašajo 137387 MJ. Preostali del leta (izven predvidene kurilne sezone) od meseca aprila do vključno meseca septembra toplotni dobitki sončnega sevanja v modelu E2 znašajo 175145 MJ in so manjši za 49638 MJ (22%) od tistih v modelu E1, ki znašajo 224783 MJ.

V preglednici 33 smo zbrali celoletne vrednosti toplotnih dobitkov sončnega sevanja, energije, potrebne za hlajenje in ogrevanje stavbe za modela E1 in E2, ter kumulativne energije (ogrevanje + hlajenje).

Preglednica 33: Primerjava toplotnih dobitkov sončnega sevanja, energije, potrebne za hlajenje, in energije, potrebne za ogrevanje stavbe, na letni ravni med modeloma E1in E2, ter kumulativne energije.

	Toplotni dobitki sončnega sevanja [MJ]	Energija potrebna za hlajenje [MJ]	Energija potrebna za ogrevanje [MJ]	Kumulativna energija [MJ]
Model E1	362172	222807	272684	495491
Model E2	250174	126751	280760	407511
Razlika v MJ	111998	96056	8076	87980
Razlika %	31	43	3	18

Toplotni dobitki sončnega sevanja znašajo 362172 MJ (228,64 MJ/m^2) v modelu E1 in 250174 MJ (157,94 MJ/m^2) v modelu E2, razlika znese 111998 MJ. Dobitke sončnega sevanja smo z ustreznim zmanjšanjem zastekljenih površin uspeli zmanjšati za 31%.

Energija za hlajenje stavbe na letni ravni v modelu E1 znaša 222807 MJ (140,66 MJ/m^2), v modelu E2 smo potrebno energijo za hlajenje zmanjšali za 96056 MJ in dosegli končno vrednost 126751 MJ (80,01 MJ/m^2). Prihranek energije, potrebne za hlajenje, je 43%. S tem rezultatom smo uspeli dokazati prvi del hipoteze našega dela, da je stavba nagnjena k pregrevanju, s premišljenim načrtovanjem zasteklitve stavbnega ovoja pa smo nagnjenost stavbe k pregrevanju konkretno zmanjšali.

Energija za ogrevanje pa v modelu E2 presega vrednosti iz modela E1 za 3% oz. 8076 MJ. Skupna letna potrebna energija za ogrevanje stavbe v modelu E1 znaša 272684 MJ (172,15 MJ/m^2), v modelu E2 pa 280760 MJ (177,25 MJ/m^2). Najvišje potrebe po ogrevanju so seveda v zimskem času, ko so vrednosti toplotnih dobitkov sončnega sevanja v modelu E2 nizke v primerjavi z vrednostmi v modelu E1 zaradi zmanjšanja površine zasteklitve.

Kumulativna energija modela E1 znaša 495491 MJ (267,25 MJ/m^2), modela E2 pa 407511 MJ (257,67 MJ/m^2). Predvideni prihranek kumulativne energije smo uspeli zmanjšati za 87980 MJ oz. 18%.

Vrednosti potrebne energije za hlajenje in ogrevanje predstavljajo koristno energijo, ki jo mora prejeti obravnavana stavba. V primeru hlajenja mora klimatska naprava proizvesti toliko hladu, kot so zahteve energije za hlajenje, da dosežemo referenčno temperaturo v prostoru. Za delovanje klimatskih naprav pa je potrebna električna energija, ki nastaja v elektrarnah (vetrne, nuklearne, hidro, termo …) iz primarne energije (premog, veter, jedrske reakcije …) in jo je potrebno dovesti na lokacijo stavbe do klimatske naprave, kjer kot končna energija hladi prostor. S tem ko se energija pretvarja iz ene v drugo, se ustvarjajo tudi izgube. V primeru ogrevanja stavbe pa je teh izgub lahko bistveno manj, saj se v

primeru ogrevanja z biomaso ne izgubi tako velik del energije, saj je proizvodnja toplote proizvedena neposredno na lokaciji ali pa v bližnji toplarni.

4.4 3. SKLOP: Analiza dnevne osvetljenosti modela E2 in zadostitev kriterijem metrik sDA + ASE

V poglavju 4.3 smo model 6, kjer smo zasnovali optimizirano zasteklitev z vidika dnevne osvetljenosti, obravnavali še z vidika uporabe energije. V ta namen smo izdelali model E2, kjer smo spremenili tip zasteklitve, ki je bila v modelu 6 dvoslojna s faktorjem LT = 0,72, v modelu E2 smo se zaradi zmanjšanja uporabe energije odločili za troslojno zasteklitev z LT = 0,63. Zasteklitev z nižjim LT faktorjem v prostor prepušča manj dnevne svetlobe, zato smo ponovno analizirali energijski model E2 z manjšim LT faktorjem kot je znašal v modelu 6 z vidika dnevne osvetljenosti.

4.4.3 Analiza dnevne osvetljenosti modela E2 in primerjava osvetljenosti z modelom 6

V preglednici 34 prikazujemo rezultate osvetljenosti prostora z dnevno svetlobo modela E2. Rezultati z odebeljeno zeleno barvo pisave predstavljajo odstotek površine prostora, ki zadosti kriteriju UDI*.

Preglednica 34: Osvetljenost prostora z dnevno svetlobo – model E2.

	Model E2				
	Osvetljenost [lx]	Osvetljena površina prostorov UDI* [%]			
		09.00	12.00	15.00	18.00
22.3.	<300	9	70	85	100
	300-2000	**82**	**26**	14	0
	>2000	9	4	1	0
23.6.	0-300	58	19	16	60
	300-2000	**37**	**76**	**80**	**40**
	>2000	5	5	4	0
21.12.	<300	99	64	100	100
	300-2000	**1**	**22**	**0**	**0**
	>2000	0	14	0	0

Površine prostora, ki izpolnjujejo kriterij UDI*, v dopoldanskem času dosegajo od 26% (22.3. ob 12.00) do 82% (22.3. ob 9.00) spomladi in od 1% (21.12. ob 9.00) do 22% (21.12. ob 12.00) pozimi. Poleti je delež površine prostora, ki zadosti kriterijem UDI*, v dopoldanskem času od 37% (23.6. ob 9.00) do 76% (23.6. ob 15.00).

V popoldanskem času so dne 22.3. ob 15.00 zadostno osvetljene površine znašale 14% prostora, ob 18.00 kriterij UDI* ni bil izpolnjen. V poletnem času je dne 23.6. ob 15.00 delež primerno osvetljenega prostora znašal 80% in 40% ob 18.00. Pozimi v popoldanskem času kriterij UDI* ni bil dosežen.

Največji delež prostora, ki je presegel vrednosti UDI*, je bil 14 %, in sicer dne 22.12. ob 12.00, nato sledi dan 22.3. ob 9.00 z 9%, ter nato še vrednosti od 1% do 5% izmerjenih v spomladanskem in poletnem času.

Izmerjene vrednosti osvetljenosti z dnevno svetlobo modela E2 smo primerjali z vrednostmi, izmerjenimi v modelu 6 v preglednici 35. Zaradi nižjega LT faktorja uporabljene zasteklitve v modelu E2 smo pričakovali znižanje deleža površine prostora, ki izpolnjuje kriterij UDI*. V preglednici 35 smo z rdečo barvo pisave označili zmanjšanje deleža površin prostora, ki ni več dosegel kriterija UDI*, z zeleno barvo pisave pa smo označili povečanje deleža teh površin.

Preglednica 35: Prikaz primerjave UDI* med modeloma 6 in E2.

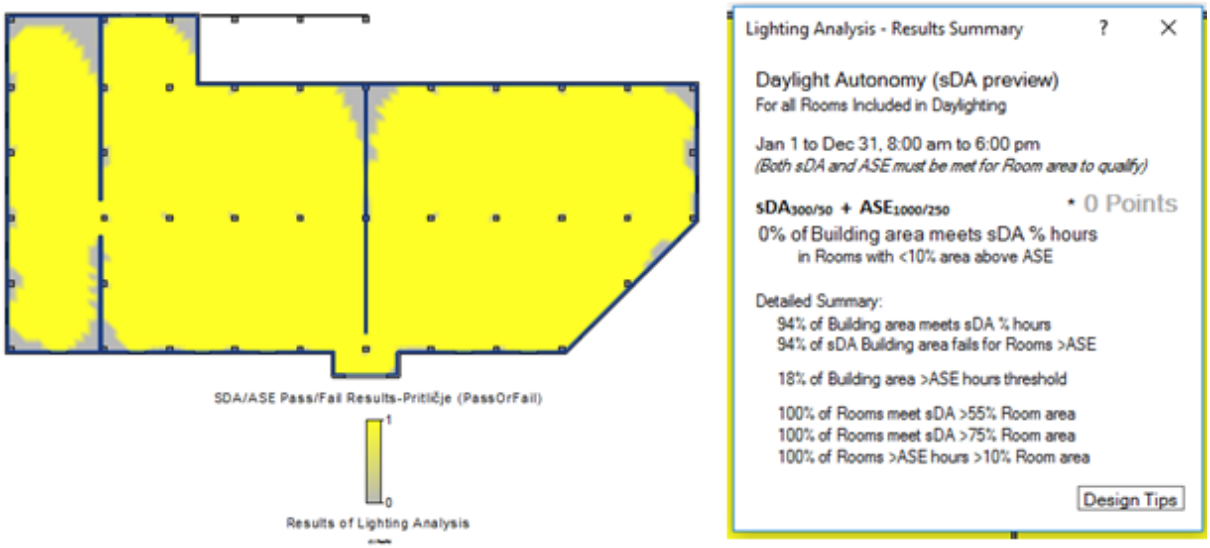
		Primerjava UDI* Model 6 in Model E2					
Ura dneva ->		09.00			12.00		
Datum	UDI* [%]	Model 6	Model E2	Razlika	Model 6	Model E2	Razlika
22.3.	300-2000	83	82	-1	35	26	-8
23.6.	300-2000	48	37	-11	80	76	-4
21.12.	300-2000	1	1	0	27	22	-5
Ura dneva ->		15.00			18.00		
Datum	UDI* [%]	Model 6	Model E2	Razlika	Model 6	Model E2	Razlika
22.3.	300-2000	20	14	-6	0	0	0
23.6.	300-2000	79	80	1	45	40	-5
21.12.	300-2000	0	0	0	0	0	0

Vrednosti dnevne osvetljenosti, ki ustrezajo kriterijem UDI*, so se v modelu E2 zmanjšale od 1 do 11 odstotnih točk. Dne 22.3. je bilo zmanjšanje najbolj očitno ob 12.00 in 15.00, in sicer 8 oz. 6 odstotnih točk, medtem ko je ob 9.00 znašalo 1 odstotno točko, ob 18.00 pa kriterij UDI* nikdar ni bil dosežen. Dne 23.6. ob 9.00 je bila izguba vrednosti največja, in sicer 11 odstotnih točk, medtem ko je bila ob 12.00 in 18.00 nižja za 4 oz. 5 odstotnih točk, ob 15.00 pa je bila za 1 odstotno točko višja vrednost UDI* v modelu E2 kot v modelu 6. Dne 21.12. smo izgubili 5 odstotnih točk UDI* v modelu E2 ob 12.00, vrednosti ob ostalih urah so ostale nespremenjene.

Zmanjšanje deleža površin, ki dosegajo kriterij UDI*, je bil pričakovan, saj smo zaradi cilja, da zmanjšamo toplotne dobitke v stavbi, povzročene s strani sončnega sevanja, ter obenem zmanjšamo transmisijske izgube skozi zasteklitev, izbrali zasteklitev, ki v prostor prepušča manj sončnega sevanja. Če bi izbrali zasteklitev z izredno nizkim g-faktorjem, s katerim bi še znižali toplotne dobitke sončnega sevanja, bi hkrati tudi močno poslabšali UDI*, vendar smo izbrali kompromis med faktorjema g in LT in izbrali zasteklitev, ki pregrevanje stavbe nekoliko omili, zmanjša transmisijske izgube in UDI* drastično ne zniža.

4.4.4 Zadostitev kriterijem metrik sDA + ASE

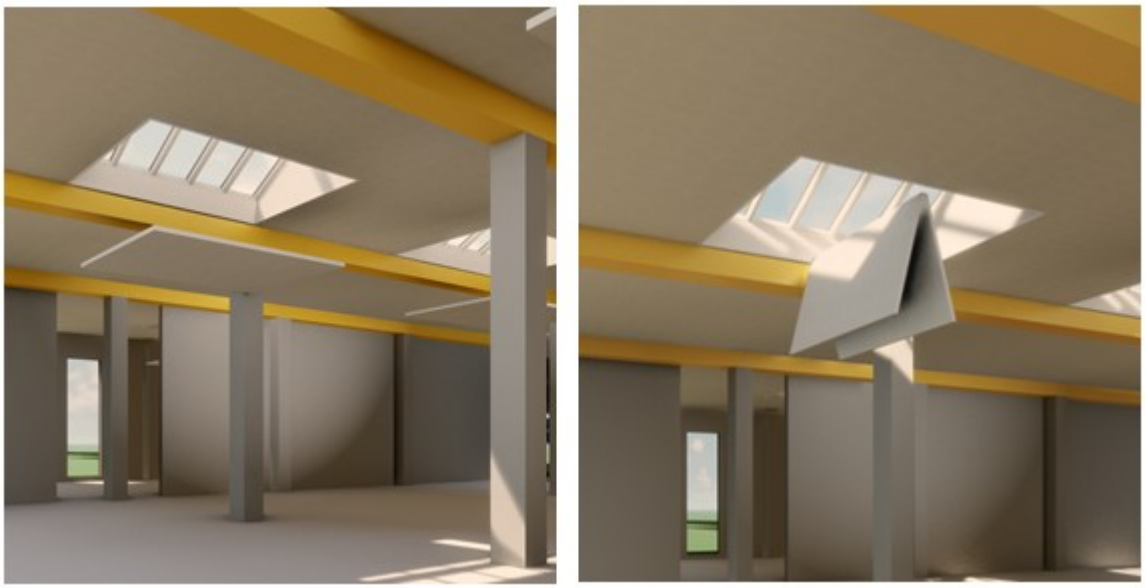
V nadaljevanju naloge smo si zadali cilj, da naknadno analiziramo model E2 še z vidika metrik sDA + ASE, ki jih je možno preveriti s programom Revit. V ukazu Lighting smo izbrali analizo Daylight Autonomy. Rezultat, ki ga program izpiše, je v grafični obliki, in prikazuje območja, ki zadostijo kriterijem sDA + ASE, ter območja, ki ne zadostijo obema kriterijema. Poleg v obliki grafičnega izpisa se rezultat pojavi tudi v pogovornem oknu (Slika 52), kjer se izpiše površina, ki zadosti kriterijem sDA, in površina, ki zadosti kriterijem ASE.



Slika 52: Prikaz rezultatov sDA + ASE za model E2 (levo grafični prikaz, desno pogovorno okno).

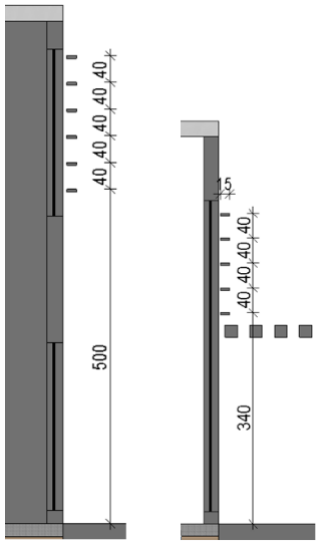
Prvi rezultati modela E2 so pokazali, da kriterijem obeh metrik nismo zadostili. Zadovoljivi so bili rezultati metrike sDA, kjer je 94% prostora več kot polovico analiziranih ur presegalo osvetljenost 300 lx, vendar je 18% površine osvetljene z več kot 1000 lx več kot 250 ur na leto, kar je več, kot dovoljuje kriterij ASE.

Da bi zadostili tako pogojem sDA kot ASE, smo izdelali nov model, ki smo ga poimenovali model E3. Ker smo z modelom E2 pogojem sDA že zadostili, je bilo potrebno izvesti ukrepe, ki zmanjšajo površine prostora, ki so osvetljene s previsokimi vrednostmi. Kritične površine s previsoko osvetljenost so se skozi vse leto pojavljale v prostoru na območjih pod strešnimi zasteklitvami, ob zasteklitvah V fasade in na območju vhoda v stavbo na JV strani stavbe. V ta namen smo pod strešnimi okni na višini 4,75 m nad tlemi v model vrisali senčila dimenzij 2,5 m x 3,7 m (Slika 53), ki reflektirajo svetlobo, ki pride v prostor, nazaj v strop, nato pa se svetloba od stropa razprši nazaj v prostor, poleg tega se senčila lahko v dneh, ko je svetlobe skozi strešna okna manj, zložijo (Slika 53).

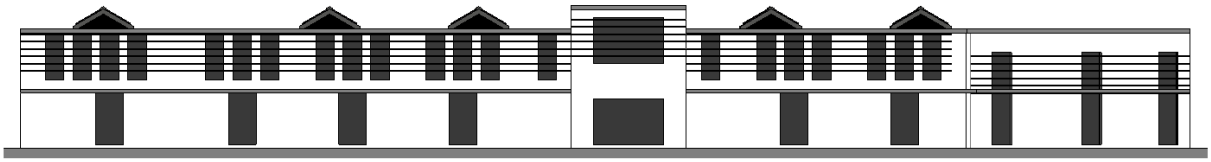


Slika 53: Senčila pod strešnimi okni (levo-razširjena senčila, desno-zložena senčila).

Vertikalne zasteklitve na delu vhoda na JV fasadi in zasteklitve na V fasadi smo zasenčili s senčili na način, uporabljen v modelu 6 (Slika 54). Na zgornjo zasteklitev vhoda v stavbo smo namestili 6 lamelnih senčil 5,0 m nad tlemi v medsebojnem razmaku 0,40 m, širina lamel je znašala 0,15 m. Na V fasadi smo senčila spodnjega pasu oken iz JV fasade podaljšali še na V, ter nad ta senčila dodali še 5 lamelnih senčil na višini 3,40 m od tal na medsebojnem razmaku 0,40 m, širina lamel je tudi tukaj znašala 0,15 m. Senčila v pogledu na celotni JV in V fasadi prikazujemo na sliki 55.

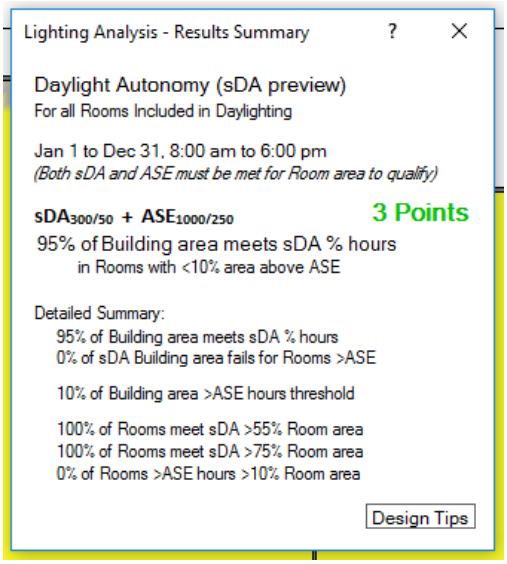


Slika 54: Prerez senčil na JV fasadi (vhod) na sliki levo, prerez senčil na V fasadi na sliki desno.



Slika 55: Pogled na senčila na JV in V fasadi.

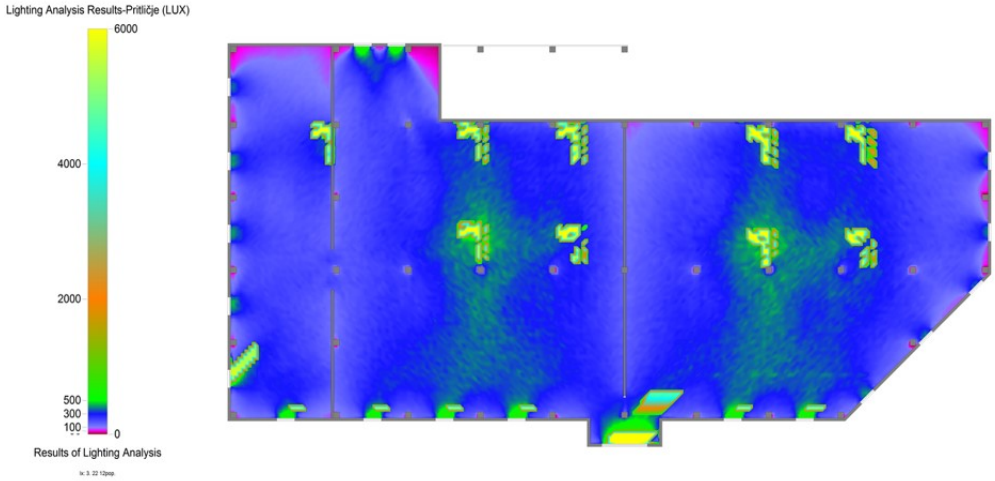
S temi ukrepi smo uspeli zmanjšati preveč osvetljene površine, ki so presegale kriterije ASE za 8 odstotnih točk, tako da so te znašale le še 10% površine prostora, kar je bil pogoj za izpolnitev kriterijev ASE, kriteriju sDA pa je zadostilo 95% površine prostora. S tem smo dosegli skupen kriterij sDA + ASE (Slika 58), definiran po kriteriju certifikacijskega sistema za ocenjevanje stavb LEED za osvetljenost stavb.



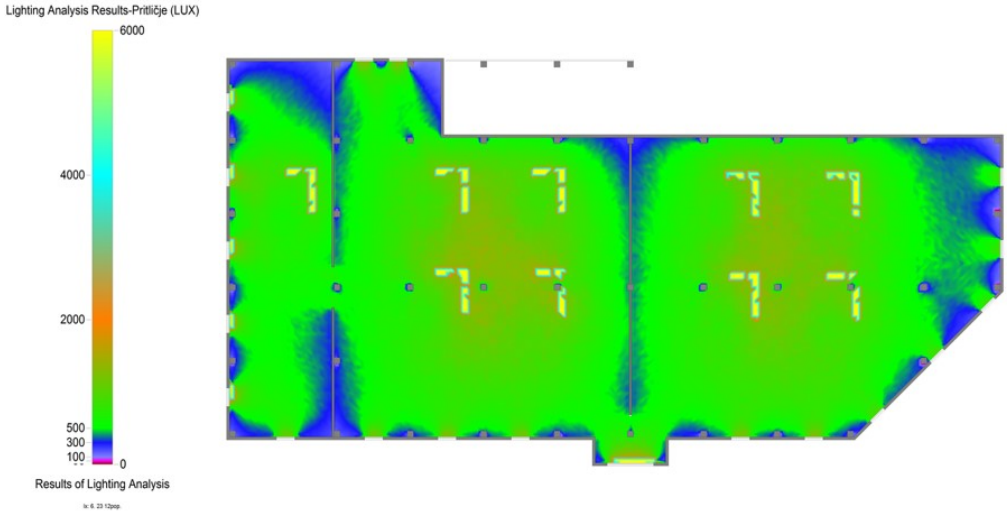
Slika 56: Prikaz rezultatov, s katerimi smo zadostili kriterijem sDA + ASE.

4.4.5 Analiza dnevne osvetljenosti modela E3

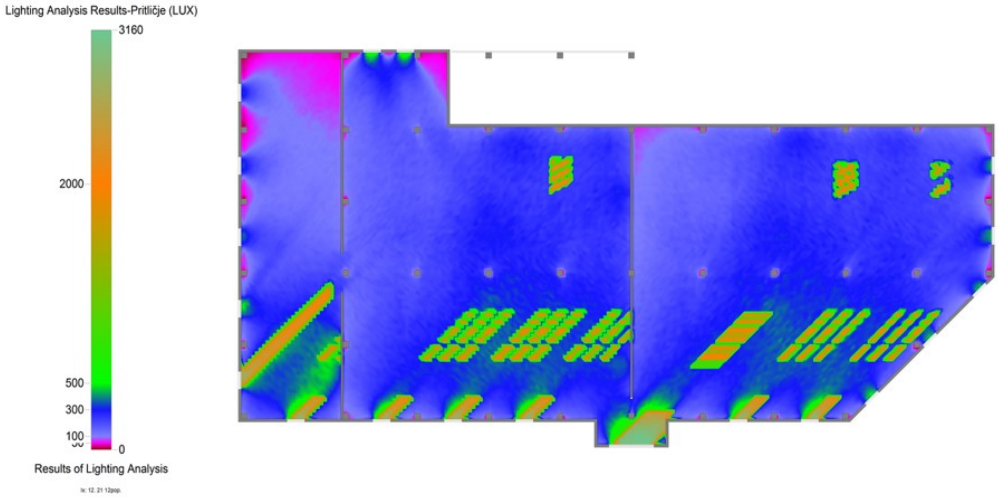
Ker smo v modelu E3 uporabili dodatna senčila, še posebej pod strešnimi zasteklitvami, je bilo smiselno ponovno preveriti vrednosti UDI* ter distribucijo dnevne svetlobe v prostoru. Grafične rezultate ob 12.00 ob dnevih 22.3, 23.6. in 21.12 prikazujemo na slikah 57, 58 in 59, preostali rezultati so prikazani v prilogi A.



Slika 57: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 12.00 – model E3.



Slika 58: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 12.00 – model E3.



Slika 59: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 12.00 – model E3.

V preglednici 36 prikazujemo tabelarične vrednosti osvetljenosti z dnevno svetlobo za modela E2 in E3 ter primerjavo vrednosti med njima. Zeleno napisane vrednosti govorijo v korist modela E3, rdeče napisane vrednosti pa pomenijo poslabšanje vrednosti osvetljenosti z dnevno svetlobo modela E3 v primerjavi z modelom E2.

Preglednica 36: Primerjava vrednosti osvetljenosti z dnevno svetlobo med modelom E2 in modelom E3.

		Primerjava UDI* Model E2 in Model E3					
Ura dneva ->		09.00			12.00		
Datum	UDI* [%]	Model E2	Model E3	Razlika	Model E2	Model E3	Razlika
22.3.	<300	9	8	-1	70	78	9
	300-2000	82	83	1	26	20	-7
	>2000	9	9	0	4	2	-2
23.6.	<300	58	67	9	19	14	-4
	300-2000	37	30	-7	76	84	7
	>2000	5	3	-2	5	2	-3
21.12.	<300	99	99	0	64	82	18
	300-2000	1	1	0	22	14	-8
	>2000	0	0	0	14	4	-10
Ura dneva ->		15.00			18.00		
Datum	UDI* [%]	Model E2	Model E3	Razlika	Model E2	Model E3	Razlika
22.3.	<300	85	94	9	100	100	0
	300-2000	14	5	-9	0	0	0
	>2000	1	1	0	0	0	0
23.6.	<300	16	13	-3	60	80	20
	300-2000	80	84	4	40	20	-20
	>2000	4	3	-1	0	0	0
21.12.	<300	100	100	0	100	100	0
	300-2000	0	0	0	0	0	0
	>2000	0	0	0	0	0	0

Z dodatnimi senčili smo v vseh analiziranih časih ali znižali delež prekomerno osvetljenih površin ali pa je ostal nespremenjen, največje znižanje prekomerno osvetljenih površin smo dosegli dne 21.12. ob 12.00, in sicer za 10 odstotnih točk. Delež površin, ki je z osvetljenostjo dnevne svetlobe ustrezal zahtevam UDI*, se je v poletnem času zaradi dodanih senčil pod strešnimi zasteklitvami dne 23.6. ob 12.00 in 15.00 povišal za 7 oz. 4 odstotnih točk, saj je svetloba, ki prodira skozi strešne zasteklitve, v tem času najintenzivnejša, senčila pa z reflektiranjem svetlobe v strop in nato nazaj v prostor razpršijo svetlobo še na del območij, ki so bila premalo osvetljena. Vendar takšen ukrep prinese tudi negativne posledice, saj se je delež površin osvetljenosti z dnevno svetlobo, ki zadovolji kriterij UDI*, dne 22.3. ob 12.00 znižal za 7 odstotnih točk, ob 15.00 pa za 9 odstotnih točk. Prav tako se je znižal delež primerno osvetljenih površin 21.12. ob 12.00 za 8 odstotnih točk ter dne 23.6 ob 9.00 za 7 odstotnih točk in ob 18.00 za 20 odstotnih točk. Pri analiziranju osvetljenosti nismo upoštevali možnosti, da se notranja senčila pod strešnimi zasteklitvami tudi zložijo. V tem primeru bi nekatere vrednosti lahko ostale višje.

4.5 4. SKLOP: Energijska analiza

V zadnjem sklopu izdelave modela z visoko učinkovitim stavbnim ovojem smo določili urnik delovanja in potrebno moč umetne razsvetljave za čas, ko je osvetljenost prostora z dnevno svetlobo prenizka. Z znanimi vrednostmi moči umetne razsvetljave smo modelu v Revitu izdelali urnik delovanja umetne razsvetljave in nato še enkrat izvedli simulacijo uporabe energije z modelom E3.

4.5.1 Definiranje urnika delovanja umetne razsvetljave

Urnik delovanja umetne razsvetljave smo definirali na podlagi analiz celoletne dnevne osvetljenosti prostora, katere smo izvedli za vsak mesec v letu ob določenih dnevih, definiranih v poglavju 3.1. Kot pri vseh analizah dnevne osvetljenosti smo tudi tukaj upoštevali, da so zadostno osvetljene površine tiste, ki zadostijo pogojem metrike UDI*. V preglednici 37 prikazujemo rezultate celoletne analize osvetljenosti prostora z dnevno svetlobo.

Preglednica 37: Celoletna analiza osvetljenosti prostora z dnevno svetlobo modela E3.

	Model E3 (celoletna osvetljenost)										
	Osvetljenost [lx]	Osvetljena površina prostorov UDI*[%]					Osvetljenost [lx]	Osvetljena površina prostorov UDI*[%]			
		09.00	12.00	15.00	18.00			09.00	12.00	15.00	1800
28.1.	<300	78	32	100	100	27.7.	<300	5	5	12	81
	300-2000	22	62	0	0		300-2000	88	92	85	19
	>2000	0	6	0	0		>2000	7	3	3	0
22.2.	<300	67	81	99	100	25.8.	<300	62	77	95	100
	300-2000	25	16	1	0		300-2000	33	21	2	0
	>2000	8	3	0	0		>2000	5	2	3	0
22.3.	<300	8	78	92	100	18.9.	<300	65	82	69	100
	300-2000	83	20	5	0		300-2000	30	16	29	0
	>2000	9	2	3	0		>2000	5	2	2	0
19.4.	<300	61	53	41	100	21.10.	<300	30	84	99	100
	300-2000	35	45	55	0		300-2000	59	12	1	0
	>2000	4	2	4	0		>2000	11	4	0	0
24.5.	<300	66	77	91	100	22.11.	<300	81	82	100	100
	300-2000	30	22	7	0		300-2000	19	15	0	0
	>2000	4	1	2	0		>2000	0	3	0	0
23.6.	<300	67	14	13	80	21.12.	<300	99	82	100	100
	300-2000	30	84	84	20		300-2000	1	14	0	0
	>2000	3	2	3	0		>2000	0	4	0	0

Na podlagi letne analize dnevne osvetljenosti prostora smo za vsak analiziran dan z linearno interpolacijo izračunali delež površine prostora, ki je bil osvetljen manj kot je bil kriterij UDI*. Izračune smo izvedli za vsako polno uro dneva od 9.00 zjutraj do 18.00 zvečer (Preglednica 38). Vrednosti, ki so v letni analizi dnevne osvetljenosti prostora pod mejo 300 lx, predstavljajo odstotek površin, ki so premalo osvetljene z dnevno svetlobo in jih je zato potrebno osvetliti s pomočjo umetne razsvetljave. V preglednici 38 smo izračunali najprej za vsak analiziran dan kolikšen je povprečen odstotek prostora, ki je osvetljen z manj kot 300 lx, ter nato še povprečje teh vrednosti za celo leto.

Preglednica 38: Izračun premalo osvetljenih površin v prostoru na letni ravni.

Ura / Dan	09.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	Povpr. na dan [%]	Povpr. v letu [%]
28.1.	78	63	48	32	55	78	100	100	100	100	75	72
22.2.	67	72	77	81	87	93	99	100	100	100	87	
22.3.	8	31	55	78	83	88	92	95	97	100	73	
19.4.	61	58	55	53	49	45	41	60	80	100	60	
24.5.	66	69	73	77	81	86	91	94	97	100	83	
23.6.	67	50	32	14	13	12	13	36	58	80	37	
27.7.	5	5	5	5	8	10	12	35	58	81	22	
25.8.	62	67	72	77	83	89	95	97	98	100	84	
18.9.	65	71	77	82	77	73	69	79	89	100	78	
21.10.	30	48	66	84	89	94	99	99	100	100	81	
22.11.	81	81	82	82	88	94	100	100	100	100	91	
21.12.	99	94	88	82	88	94	100	100	100	100	95	

Izkaže se, da je na letni ravni pod mejo 300 lx, ki je določena s kriterijem UDI*, v povprečju 72% površine celotnega prostora, ki jo je potrebno osvetliti z umetno razsvetljavo. V preglednici 39 prikazujemo izdelan predviden urnik umetne razsvetljave, katerega smo vnesli v lastnosti 3D-modela in na podlagi tega urnika je program izračunal toplotne dobitke v stavbi, ki so nastali kot posledica uporabe umetne razsvetljave.

Preglednica 39: Urniki delovanja umetne razsvetljave.

Urnik delovanja umetne razsvetljave									
09.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
72%	72%	72%	72%	72%	72%	72%	72%	72%	72%

Za smiseln izračun toplotnih dobitkov, povzročenih zaradi uporabe umetne razsvetljave, smo morali določiti še moč uporabljenih svetilk. Izračun moči umetne razsvetljave smo izvedli tako, da smo na spletni strani prodajalca svetilk Intralighting [68] pridobili podatke o lastnostih predvidenih svetilk (Preglednica 40), ki so primerne za vgradnjo v trgovske stavbe.

Preglednica 40: Podatki o lastnostih izbranih svetilk.

Svetlobni tok Φ [lm]:	6540
Kot osvetlitve φ [°]	30
Moč svetilke [W]:	72

Vgradnja svetilk je predvidena na višini h = 4,75 m nad tlemi, kot osvetlitve φ znaša 30°, svetlobni tok, ki ga oddajajo predvidene svetilke, znaša 6540 lm, moč svetilke pa znaša 72 W. Za izračun števila potrebnih svetilk, ki lahko osvetlijo celotno površino tal 1584,00 m^2, smo morali najprej izračunati površino, katero lahko osvetli ena svetilka. To smo izračunali s pomočjo enačbe (3).

$$A_s = \tan\varphi \cdot h^2 \cdot \pi = \tan 30° \cdot 4{,}75m^2 \cdot \pi = 23{,}6m^2. \quad (3)$$

Površina (krog), ki jo osvetli ena svetilka znaša A_s = 23,6 m^2. Naslednji korak je bil izračun osvetljenosti E na površini A_s, ki jo zmore ena izbrana svetilka. Osvetljenost E smo izračunali po enačbi (4).

$$E = \Phi/A_s = (6540\ lm)/(23{,}6\ m^2\ ) = 277\ lx. \quad (4)$$

Osvetljenost E z izbrano svetilko na površini A_s torej znaša 277 lx. Zahtevana osvetljenost na višini 1,0 m je bila 500 lx, kar pomeni, da za osvetlitev površine A_s potrebujemo skupaj dve svetilki, ki osvetlita površino A_s s 554 lx (tu nismo upoštevali spodnje meje osvetlitve 300 lx, ki smo jo določili v UDI*) skupna moč dveh svetilk znaša 144 W. Skupno število potrebnih svetilk izračunamo kot količnik med celotno površino prostora (1584 m^2) in osvetljeno površino tal A_s. Število potrebnih svetilk v prostoru je tako znašalo 134, moč umetne razsvetljave na enoto površine je potemtakem znašala 6 W/m^2.

4.5.2 Simulacija uporabe energije modela E3 in modela E4

Za konec smo izvedli še zadnjo simulacijo uporabe energije, najprej za model E3 in nato še za model z dodanimi toplotnimi dobitki umetne razsvetljave v stavbi, katerega smo poimenovali model E4.

V preglednici 41 smo zbrali celoletne vrednosti toplotnih dobitkov sončnega sevanja, energije, potrebne za hlajenje in ogrevanje stavbe za modela E1 in E2, ter kumulativne energije (ogrevanje + hlajenje). Primerjali smo podatke o porabi energije med modeloma E2 in E3, saj je bilo pričakovati, da se bodo zmanjšali toplotni dobitki sončnega sevanja zaradi dodatnih zunanjih senčil.

Preglednica 41: Primerjava toplotnih dobitkov sončnega sevanja, energije potrebne za hlajenje in energije potrebne za ogrevanje stavbe na letni ravni med modeloma E2 in E3, ter kumulativne energije.

	Toplotni dobitki sončnega sevanja [MJ]	Energija. potrebna za hlajenje [MJ]	Energija, potrebna za ogrevanje [MJ]	Kumulativna energija [MJ]
Model E2	250174	126751	280760	407511
Model E3	236808	119309	277905	397214
Razlika v MJ	13365	7441	2855	10297
Razlika %	5	6	1	3

Toplotni dobitki sončnega sevanja so bili v modelu E3 manjši za 13365 MJ. kar predstavlja 5-% znižanje v primerjavi z modelom E2, energija, potrebna za hlajenje stavbe, pa je bila v modelu E3 nižja za 7441 MJ oz. 6%. Energija, potrebna za ogrevanje stavbe, se je v modelu E3 zmanjšala za 7441 MJ oz. 1%. Kumulativna energija modela E3 je znašala 397214 MJ, kar je za 10297 MJ (3%) manj kot pri modelu E2.

V model, ki smo ga poimenovali model E4, smo vnesli urnik in podatke o moči razsvetljave. V preglednici 42 prikazujemo rezultate simulacije uporabe energije modela E3 in E4.

Preglednica 42: Primerjava rezultatov uporabe energije za hlajenje in ogrevanje ter kumulativne energije med modeloma E3 in E4.

	Energija, potrebna za hlajenje [MJ]	Energija, potrebna za ogrevanje [MJ]	Kumulativna energija [MJ]
Model E3	119309	277905	397214
Model E4	170979	241414	412393
Razlika v MJ	51669	36491	15179
Razlika %	30	13	4

Zaradi umetne razsvetljave se je potrebna energija za hlajenje v stavbi povišala za 51669 MJ oz. za 30%. Končna vrednost potrebne energije za hlajenje je tako znašala 170979 MJ. Ugodno so toplotni dobitki umetne razsvetljave vplivali na porabo energije za ogrevanje stavbe, saj se je le ta zmanjšala za 13%, končna vrednost je znašala 241414 MJ. Kumulativna energija modela E4 je znašala 412393 MJ in je bila višja za 15179 MJ oz. 4% od kumulativne energije modela E3.

Izračunane vrednosti potrebne energije za ogrevanje stavbe smo primerjali z zahtevami PURES-a (Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah) [10], ki za nestanovanjske stavbe predpisuje največjo dovoljeno letno potrebno toploto za ogrevanje Q_{NH} stavbe, preračunano na enoto kondicionirane površine A_u oziroma prostornine V_e stavbe. Dovoljena letna uporaba energije za ogrevanje ne sme preseči vrednosti, izračunane z enačbo (5).

$$Q_{NH}/V_e \leq 0{,}32 \cdot (45 + 60 \cdot f_0 - 4{,}4 \cdot T_L). \quad (5)$$

Pri tem je f_0 faktor oblike, ki predstavlja razmerje med površino toplotnega ovoja stavbe in neto ogrevano prostornino stavbe. T_L je povprečna letna temperatura zraka in znaša za Kočevje T_L = 8,3°C [34]. Faktor f_0 je določen z izrazom (6)

$$f_0 = A/V_e = 1227\ m^2 + 1584\ m^2 + 1584\ m^2 / 9883\ m^3 = 0{,}444. \quad (6)$$

Dovoljena letna potrebna toplota za ogrevanje po zahtevah PURES-a (Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah) [10] znaša

$$Q_{NH}/V_e \leq 0{,}32 \cdot (45 + 60 \cdot 0{,}444 - 4{,}4 \cdot 8{,}3) = 11{,}16 \frac{kWh}{m^3 a}.$$

Potrebna energija za ogrevanje stavbe v modelu E4 je znašala 241414 MJ oz. 6,79 kWh/m^{3}a. Izračunana uporaba energije. potrebne za ogrevanje stavbe na enoto prostornine v modelu E4. kaže na to, da največje dovoljene vrednosti, predpisane v PURES-u (Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah) [10]. nismo presegli in je znotraj dovoljenih mej.

5.0 ZAKLJUČEK

Stavbe, ki se nahajajo na lokacijah in podnebjih kot naš obravnavani trgovski center, v zimskem času potrebujejo vir ogrevanja zaradi nizkih zunanjih temperatur. Eden od ukrepov, izveden na stavbnem ovoju, ki privede do zmanjšanja potrebne energije za ogrevanje stavbe, je ta, da skozi velike zastekljene površine povečamo toplotne dobitke sončnega sevanja v stavbi. Vendar ta ukrep ob nepravilnem apliciranju na stavbni ovoj v toplejših dnevih povzroča nevšečnosti zaradi previsokih temperatur v notranjih prostorih in najverjetneje tudi preveč osvetljene dele v prostorih, kar povzroča bleščanje in neudobje uporabnikov v stavbi.

Predmet obravnave v magistrskem delu je bil projekt idejne zasnove trgovskega centra Kovinar v Ribnici. Namen dela je bil, da na osnovi pridobljenega idejnega projekta poskušamo izboljšati in optimizirati osvetljenost z dnevno svetlobo ter hkrati reducirati porabo energije stavbe za ogrevanje in hlajenje. Obenem je bil namen, posredno preko vseh izvedenih analiz osvetljenosti z dnevno svetlobo in simulacij uporabe energije stavbe, preveriti učinkovitost in smiselnost uporabe programa Revit ter dodatkov za analizo dnevne osvetljenosti in energijske analize v začetnih fazah projektiranja.

V magistrskem delu smo preverjali naslednje delovne hipoteze:

1. Obstoječa izhodiščna zasnova stavbe bo zaradi velikih nesenčenih transparentnih površin orientiranih predvsem proti V, JV in JZ v poletnem času nagnjena k pregrevanju.
2. Izhodiščna zasnova stavbe bo neprimerno osvetljena z dnevno svetlobo.
3. Z optimizacijo transparentnih elementov stavbnega ovoja je možno doseči boljšo osvetljenost stavbe z naravno svetlobo.
4. Z optimizacijo stavbnega ovoja je možno zmanjšati potrebo po energiji za hlajenje stavbe, vendar zaradi zmanjšanja velikih steklenih površin povečamo potrebno energijo za ogrevanje stavbe, kumulativna uporaba energije je kljub temu manjša od izhodiščne zasnove stavbe.

Najprej smo z izvedenimi analizami osvetljenosti prostorov z dnevno svetlobo v podpoglavju 4.2.1.2 potrdili drugo delovno hipotezo, ko smo z analizo dnevne osvetljenosti izhodiščnega modela (model 1) ugotovili, da so prostori zelo neenakomerno osvetljeni po globini prostora. Osvetljenost je bila dovolj visoka le ob zastekljenih površinah fasad, velikokrat so bile vrednosti osvetljenosti z dnevno svetlobo tudi previsoke glede na zastavljen kriterij UDI*. Tretjo delovno hipotezo smo potrdili v podpoglavju 4.2.7 s primerjavo osvetljenosti z dnevno svetlobo med modelom 1 in modelom 6. Prvo in četrto hipotezo smo potrdili v podpoglavju 4.3.2, ko smo z ukrepi z zmanjšanjem zastekljenih površin izračunali nižje potrebe po energiji za hlajenje stavbe v modelu E2 v primerjavi z modelom E1, ki je predstavljal izhodiščni model v simulacijah uporabe energije.

Najprej smo analizirali energijski potencial stavbe, kjer smo izračunali vrednosti prejetega sončnega sevanja na letni ravni za vsako površino stavbnega ovoja posebej – vse orientacije fasad in streho, ter analizo padanja senc na obravnavano stavbo zaradi vpliva okoliških stavb, ki smo jo uporabili za lažje razumevanje izračunov prejetega sončnega sevanja na posamezne površine stavbnega ovoja.

Na podlagi analiz osvetljenosti z dnevno svetlobo modelov od 1 do 3 smo izdelali model 4, ki je bil z vidika dnevne osvetljenosti in zasteklitve prvi koncept optimiziranega modela. Na strehi modela 4 smo poleg zasteklitve fasad uporabili še strešne zasteklitve v obliki tristranih prizem, ki so se v modelu 3 izkazale kot dobra rešitev, saj smo z nizko vrednostjo DPT dosegli dobre rezultate osvetljenosti z dnevno svetlobo. V modelu 5 smo analizirali drugačno vrsto strešne zasteklitve (svetlobni trakovi) ter uporabili manjši delež zasteklitve fasad kot v modelu 4. Strešna zasteklitev v obliki svetlobnih trakov se ni izkazala za tako učinkovito kot tristrane prizme, zato smo model 6 ponovno zasnovali s strešnimi zasteklitvami v

obliki prizem, delež zasteklitve fasad pa še zmanjšali ter uporabili manjše dimenzije posameznih uporabljenih segmentov kot v preostalih modelih. Skupno površine zasteklitve smo v modelu 6 zmanjšali za 139,00 m^2 (33,10%) glede na izhodiščni model. V modelu 6 smo dosegli vsaj enak ali večji delež prostora, osvetljenega z dnevno svetlobo v primerjavi z modelom 1, ki je zadostila kriteriju UDI*, le dne 21.12. ob 9.00 smo v modelu 6 izmerili nižje vrednosti osvetljenosti kot v modelu 1. Svetloba je bila v modelu 6 bistveno bolj enakomerno porazdeljena in je segala globoko v prostore stavbe.

Na osnovi pridobljenega predznanja o učinkoviti rabi energije na magistrskem študiju Stavbarstvo in izvedenih simulacij uporabe energije za hlajenje in ogrevanje stavbe smo se odločili, da v energijskem modelu E2 uporabimo troslojne zasteklitve tako na fasadah kot na strehi, za netransparentni del stavbnega ovoja pa smo uporabili toplotno izolacijske fasadne in strešne panele debeline 24 cm. Z enakimi toplotnimi in optičnih lastnosti stavbnega ovoja kot v modelu E2 smo z vidika uporabe energije analizirali tudi izhodiščni model. V primerjavi z izhodiščnimi modelom smo v optimiziranem modelu dosegli zmanjšanje potreb po energiji za hlajenje stavbe za 96056 MJ, ter je tako znašala 126751 MJ oz. 43% manj, dobitki sončnega sevanja pa so se zmanjšali za 111998 MJ oz. 31%. Potrebna energija za ogrevanje stavbe se je v končnem modelu pričakovano povečala in sicer za 8076 MJ oz. 3%. Kumulativna energija v končnem modelu je znašala 407511 MJ, kar pomeni 87980 MJ oz. 18% manj kot je znašala za izhodiščni model.

V nadaljevanju smo za končni model dodatno izvedli še zadostitev kriterijem metrik sDA + ASE, kjer smo morali uporabiti dodatna senčila na stavbnem ovoju, tako zunaj na zasteklitvah fasade in tudi v notranjosti pod strešnimi zasteklitvami. Izdelali smo še urnik delovanja umetne razsvetljave in moči svetilk, ter nato te vrednosti uporabili v zadnji simulaciji uporabe energije. Vrednost uporabe energije, potrebne za hlajenje, je znašala 170979 MJ, vrednost energije, potrebne za ogrevanja, pa 241414 MJ, medtem ko je kumulativna energija znašala 412393 MJ. Vrednosti energije, potrebne za hlajenje stavbe, so se pričakovano povišale, vrednosti energije, potrebne za ogrevanje, pa so se znižale, saj umetna razsvetljava med svojim delovanjem v stavbi zvišuje notranje toplotne dobitke.

Načrtovanje stavb mora zadostiti veliko različnim vidikom. Pri načrtovanju je potrebno izbrati kompromis med zahtevami uporabnikov in zakonov ter idejami arhitektov. Kljub temu mora stavba zagotavljati udobje in zdravje uporabnikov, biti mora energijsko učinkovita, hkrati pa tudi prijetna na pogled. Verjamemo, da bi obravnavano stavbo lahko zasnovali tudi precej drugače, predstavili smo samo eno izmed neštetih možnosti. Vendar predstavljena optimizirana varianta predstavlja stavbo, kjer se bodo njeni uporabniki počutili dobro, zaposleni bodo zaradi dobre osvetljenosti z dnevno svetlobo tako produktivnejši.

Z izbiro teme naloge in uporabljene programske opreme sem izpolnil svojo željo, da poizkusim raziskati in uporabiti del programske opreme, ki omogoča analiziranje osvetljenosti z dnevno svetlobo in energijske analize ter s tem izdelati študijo, katere rezultate bi lahko uporabil tudi v vsakodnevnem načrtovanju stavb.

VIRI

[1] Globalno segrevanje in podnebne spremembe. http://www.24ur.com/globalno-segrevanje-in-podnebne-spremembe-ki-so-posledica-cloveka.html (Pridobljeno 28.8.2017).

[2] Evropska energetska strategija 2050. https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/2050-energy-strategy (Pridobljeno 26.8.2017).

[3] Evropska energetska strategija 2020. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_sl (Pridobljeno 1.3.2017).

[4] Evropska energetska strategija 2030. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_sl (Pridobljeno 28.8.2017).

[5] Energetska učinkovitost stavb v Evropski Uniji. https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings (Pridobljeno 28.8.2017).

[6] Chen, Y. et al. 2014. Experimental and simulation study on the performance of daylightingin an industrial building and its energy saving potential. Energy and Buildings 73 (2014) 184–191.

[7] Autodesk Sustainability Workshop. Načrtovanje stavbnega ovoja. https://sustainabilityworkshop.autodesk.com/building-design/concepts (Pridobljeno 25.6.2017).

[8] Spletna stran standardov ASHRAE. https://www.ashrae.org/ (Pridobljeno dne 27.9.2016).

[9] Tehnična smernica za graditev TSG-1-004 Učinkovita raba energije.

[10] Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah. Ur. L. RS, št 52/2010: 7840.

[11] Program Autodesk Revit 2017. http://www.autodesk.com/products/revit-family/free-trial. (Pridobljeno 23.6.2016).

[12] Spletna stran Science Direct. http://www.sciencedirect.com/ (Pridobljeno 1.3.2016).

[13] Krstić-Furundžić, A., Kosić, T. 2015. Assesment of energy and environmental performance of office buildings models: A case study. Energy an Buildings 115 (2016) 11-22.

[14] Capeluto, G. 2002. Energy performance of the self-shading building envelope. Energy and Buildings 35 (2003) 327-336.

[15] Zhang, A., Bokel, R., van den Dobbelsteen, A., Sun, Y., Huang, Q., Zhang, Q. 2016. Optimization of thermal and daylighting performance of school buildings based on a multi-objecitve genetic algorithm in the cloud climate of China. Energy and Buildings 139 (2017) 371–384.

[16] Košir, M., Eržen, J. 2015. Dinamične metrike za oceno dnevne osvetljenosti in njihova uporaba pri analizi učilnic v slovenskih osnovnih šolah.

[17] Singh, R., Lazarus, I.J, Kishore, V.V.N. 2015. Effect of internal woven roller shadeand glazing on the energy and daylighting performances o fan office building in the cold climate of Shillong. Applied Energy 159 (2015) 317–333.

[18] Negendagh, K., Nielsen, T.R. 2015. Building energy optimization in the early design stages:A simplified method. Energy and Buildings 105 (2015) 88–99.

[19] Košir, M. 2014. Predavanja pri predmetu Učinkovita raba energije. Stavbni ovoj-netransparenten del. Študijsko gradivo (UNI ST-B II. stopnja).

[20] Spletna stran Metroblogs. Visokoučinkovit stavbni ovoj. http://blog.worldarchitecturenews.com/?p=3831 (Pridobljeno 2.9.2017).

[21] Spletna stran Buildings. Visokoučinkovit stavbni ovoj: Kar je zunaj to šteje. http://www.buildings.com/article-details/articleid/3060/title/high-performance-fa%C3%A7ades-it-s-what-s-outside-that-counts-1-of-4- (Pridobljeno 3.9.2017).

[22] Autodesk Sustainability Workshop. Delež zasteklitve. https://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/aperture-placement-area (Pridobljeno 2.4.2017).

[23] Uporaba stekla v gradbeništvu. Gradbeni inštitut ZRMK. http://gcs.gi-zrmk.si/Svetovanje/Clanki/Grobovsek/PT155.htm (Pridobljeno 2.4.2017).

[24] Slika oken. Spletna stran podjetja M Sora. http://www.m-sora.si/si/ (Pridobljeno 2.4.2017).

[25] Kristl, Ž. 2013. Predavanja pri predmetu Dnevna svetloba. Dnevna svetloba 2.del. Študijsko gradivo (UNI ST-B II. stopnja).

[26] Slika senčil. http://www.crl-arch.com/product_page/architectural_metals/exterior_sun_control_devices.html#extruded-sun-control-panels (Pridobljeno 9.9.2017).

[27] Slika masivna konstrukcija stavbe. http://www.gradnje-nikolic.si/ (Pridobljeno 31.3.2017).

[28] Slika skeletna konstrukcija stavbe. http://www.harco.si (Pridobljeno 31.3.2017).

[29] Google maps. Podatki o lokaciji. https://www.google.si/maps/@45.6734626,14.7449582,13z (Pridobljeno 11.3.2017).

[30] Spletna stran Občine Ribnica. http://www.ribnica.si (Pridobljeno dne 12.8.2017).

[31] Podnebja v Sloveniji. http://www.o-4os.ce.edus.si/gradiva/geo/podnebje/pod_zmernocelin.html (Pridobljeno 11.3.2017).

[32] Podnebje dinarskih pokrajin. http://www.gis.si/egw/GOS_T12_P04/index.html (Pridobljeno 11.3.2017).

[33] Meteorološka postaja Kočevje. http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/stations/kocevje.pdf (Pridobljeno 11.3.2017).

[34] Klimatski podatki za dolgoletno povprečje v Kočevju. Agencija republike Slovenije za okolje. http://www.arso.gov.si/vreme/napovedi%20in%20podatki/kocevje.htm (Pridobljeno 20.8.2017).

[35] Autodesk Climate Server in opis vremenskih postaj. https://knowledge.autodesk.com/search-result/caas/CloudHelp/cloudhelp/ENU/BPA-Help/files/GUID-DDF449B0-058E-465C-AFF4-7E45917B08EF-htm.html (Pridobljeno 19.03.2017).

[36] Klimatski podatki za leto 2006 v Kočevju. Agencija republike Slovenije za okolje. http://www.arso.gov.si/vreme/podnebje/Kocevje06.pdf (Pridobljeno 20.8.2017).

[37] Kristl, Ž. 2013. Predavanja pri predmetu Dnevna svetloba. Dnevna svetloba 2.del. Študijsko gradivo (UNI ST-B II. stopnja).

[38] Košir, M., Eržen, J. 2015. Dinamične metrike za oceno dnevne osvetljenosti in njihova uporaba pri analizi učilnic v slovenskih osnovnih šolah.

[39] Podatki o lastnosti strešne zasteklitve. Spletna stran podjetja Velux. http://www.velux.si/ (Pridobljeno 17.7.2016).

[40] Podatki o lastnostih zasteklitve fasade. Spletna stran podjetja Ertlglas. http://www.ertl-glas.at/?lang=sl (Pridobljeno 17.7.2016).

[41] Standard ÖNORM EN 12464-1:2002(E): Light and lighting – Lighting of work places Part 1: Indoor work places.

[42] Nabil, A., Mardaljevic, J. 2012. Useful Daylight Illuminances: A Replacement for Daylight Factors. Institute of Energy and Sustainable Development De Montfort University.

[43] Predstavitev avtonomije dnevne osvetljenosti v dodatku Insight 360. http://blogs.autodesk.com/insight/leed-sda-ase-studies-with-insight-revit-2017-plugin/ (pridobljeno 9.4.2017).

[44] Spletna stran certifikacijskega sistema LEED. http://www.usgbc.org/leed (pridobljeno 9.4.2017).

[45] Spletna stran Archlighting: http://www.archlighting.com/technology/annual-daylighting-performance-metrics-explained_o (Pridobljeno 24.1.2017).

[46] Standard IES LM-83-12. 2012. Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE).

[47] Oblačna storitev Green Building Studio. https://gbs.autodesk.com/GBS/ (Pridobljeno 14.3.2017).

[48] Program DOE-2. http://doe2.com/ (Pridobljeno 14.3. 2017).

[49] DOE-2.1982. Engineers manual. Version 2.1A. Energy and Environment Division Building Energy Simulation Group, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, CA 94720.

[50] Autodesk spletna stran za pomoč in informacije o programu: http://help.autodesk.com. (Pridobljeno 1.3.2017).

[51] ASHRAE standard 62.1-2010: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.

[52] ASHRAE standard 90.1-2010: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings.

[53] IZS. 2014. Slovenski prevod ASHRAE standard 90.1-2013: Energijski standard za stavbe razen za nižje stanovanjske, poglavje 6 in poglavje 7.

[54] Predogled standarda ASHRAE 90.2-2007. https://ashrae.iwrapper.com/ViewOnline/Standard_90.2-2007 (Pridobljeno 11.4.2017).

[55] Priročnik 2009 ASHRAE Handbook: Fundamentals.

[56] Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb. 2002. Uradni list RS, št. 42/2002: 4139.

[57] Lenassi M. 2015. Osnovno o infiltraciji zraka. Spletna stran IZS: http://www.izs.si (Pridobljeno 15.4.2017).

[58] Gowri, K., Winiarski, D., Jarnagin, R. 2009. Infiltration Modeling Guidelines for Commercial Building Energy Analysis. U.S. Department of Energy.

[59] Medved, S. 2014. Gradbena fizika. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo: 328 str.

[60] Fasadni in strešni toplotno izolacijski paneli. Spletna stran podjetja Trimo. https://trimo-group.com/si/trimo/ (pridobljeno dne 12.4.2017).

[61] Zidni sistem z opeko. Spletna stran proizvajalca Wienerberger. http://wienerberger.si/ (Pridobljeno dne 12.4.2017).

[62] Toplotna izolacija sten. Spletna stran proizvajalca Knauf Insulation. http://www.knaufinsulation.si/ (Pridobljeno dne 12.4.2017).

[63] Zgodovina programa Autodesk Revit. https://en.wikipedia.org/wiki/Autodesk_Revit (Pridobljeno 16.03.2017).

[64] Spletna stran podjetja Arhinova. http://www.arhinova.si/bim.html (Pridobljeno 12.3.2017).

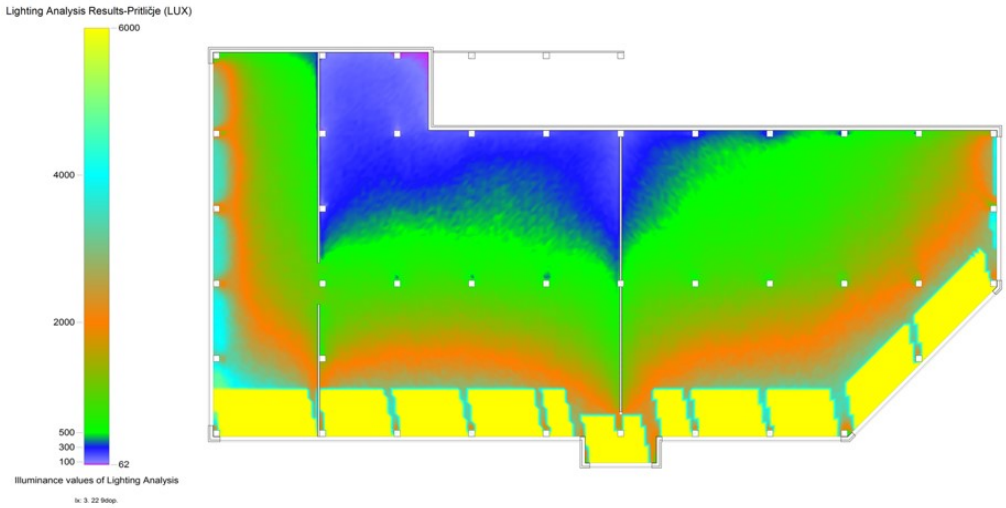
[65] Programski dodatek Insight 360. https://insight360.autodesk.com/oneenergy/ (Pridobljeno 28.8.2016).

[66] O dodatku Light Analysis Revit. https://knowledge.autodesk.com/support/green-building-studio/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/ENU/BPA-PerformanceStudies/files/GUID-5AE6A81D-B170-47A5-8BF8-190235F25287-htm.html (Pridobljeno 28.8.2016).

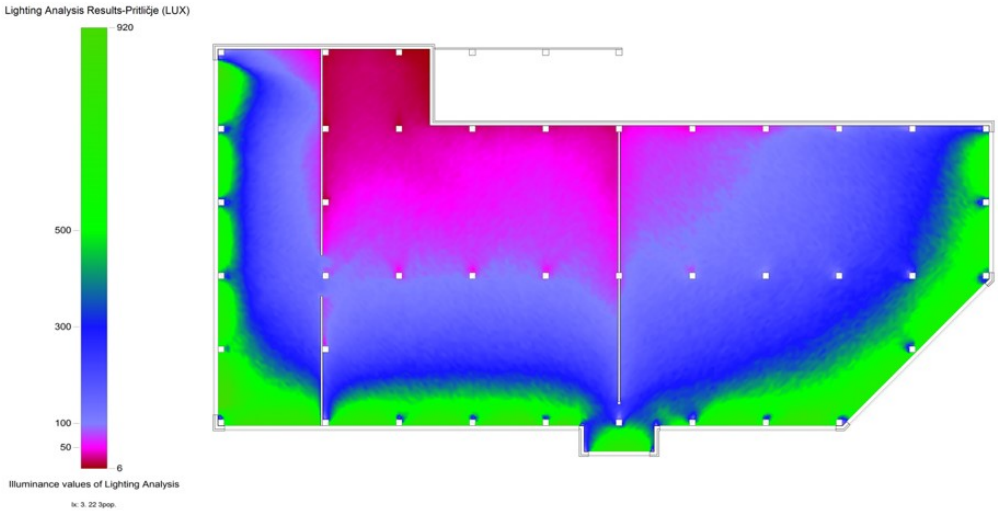
[67] Algoritem za izračun analiz dnevne osvetljenosti Multidimensional Lightcuts. http://www.graphics.cornell.edu/~bjw/mdlc.pdf (Pridobljeno 28.8.2016).

[68] Spletna stran podjetja Intralighting. http://www.intra.si. (Pridobljeno 21.2.2017).

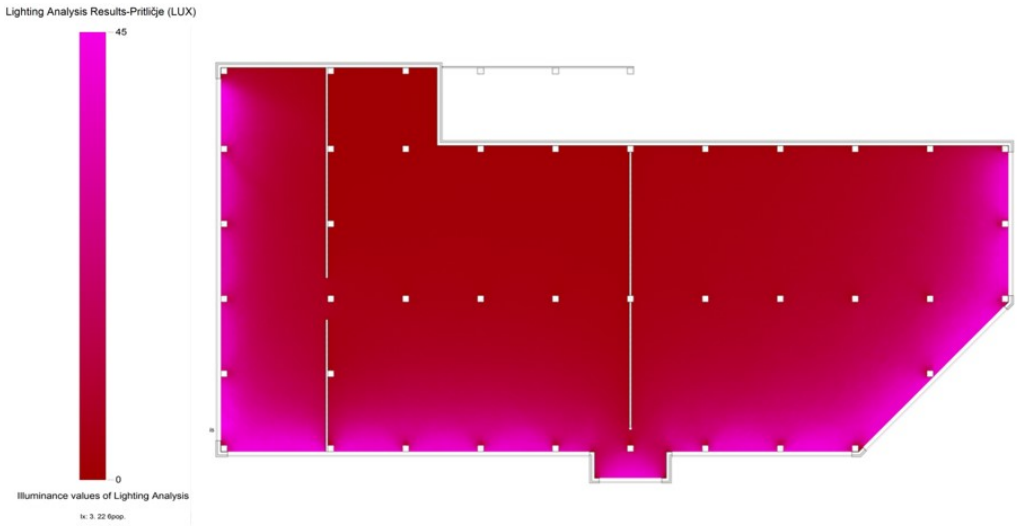
PRILOGA A: REZULTATI ANALIZ OSVETLJENOSTI Z DNEVNO SVETLOBO OB 9.00, 15.00 IN 18.00 URI



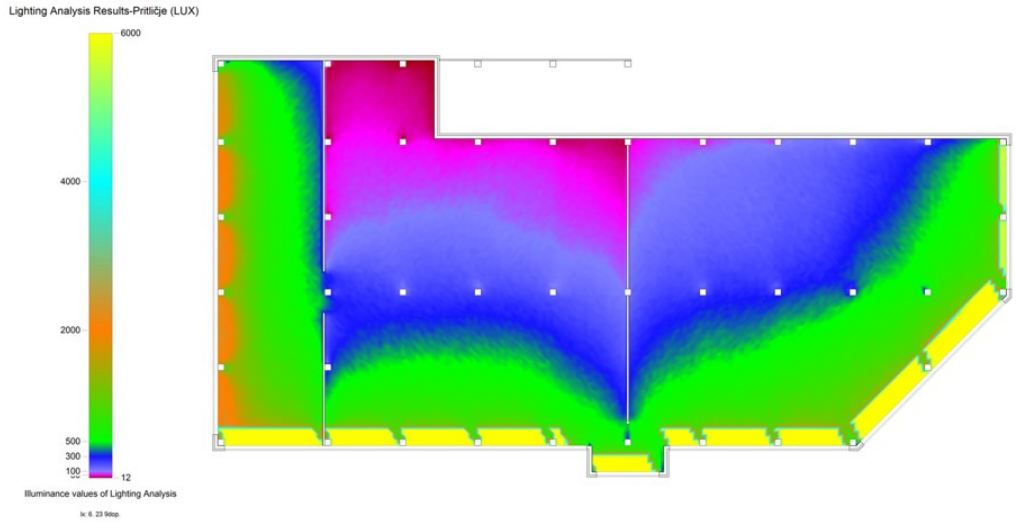
Slika A1: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 09.00 – model 1.



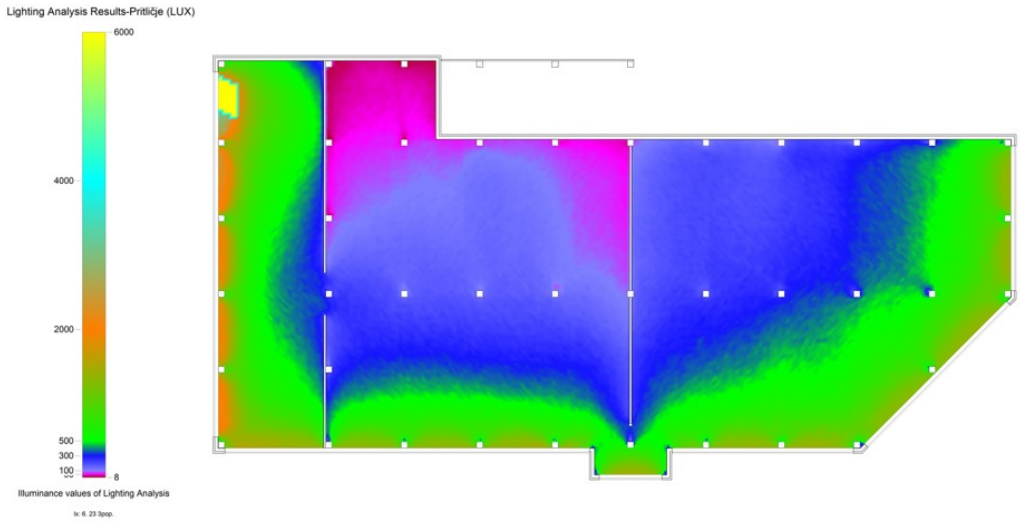
Slika A2: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 15.00 – model 1.



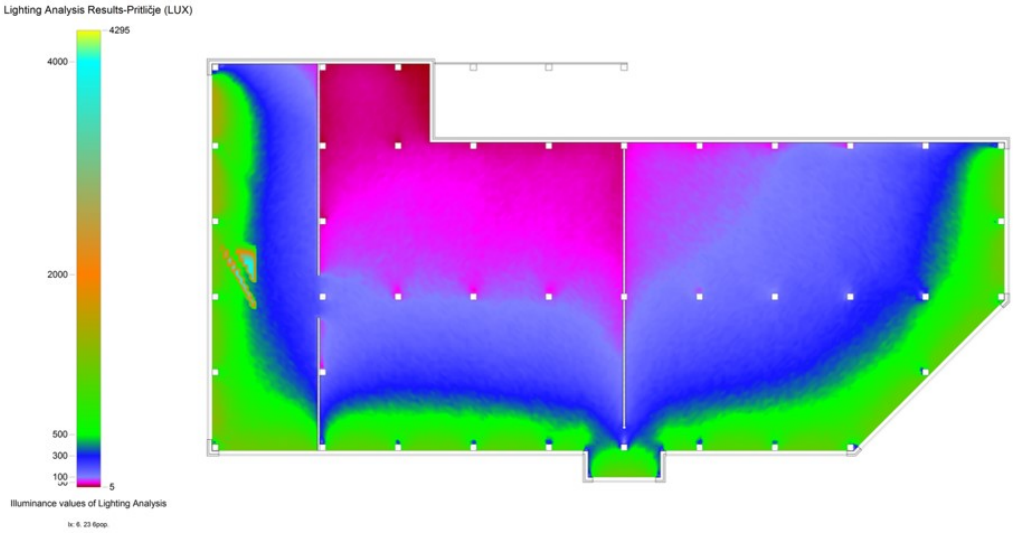
Slika A3: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 18.00 – model 1.



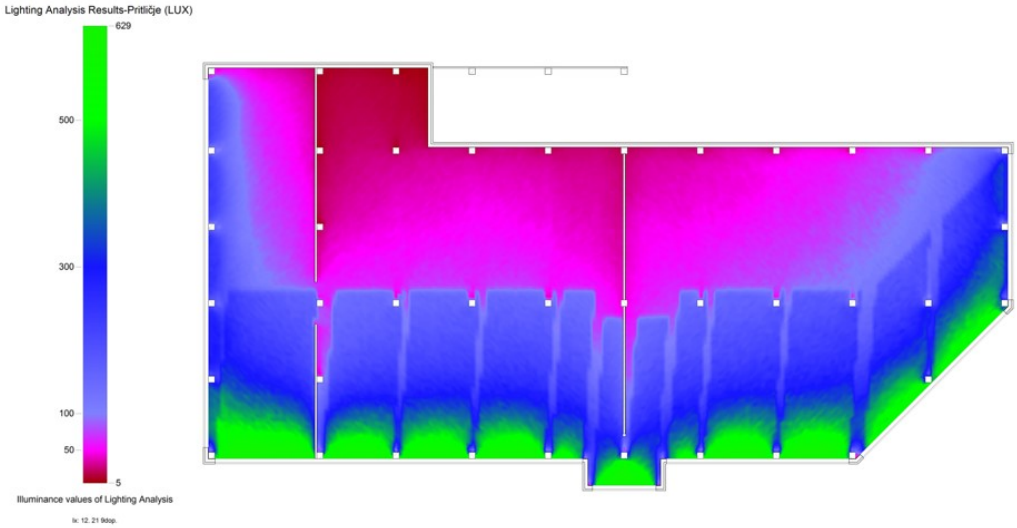
Slika A4: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 09.00 – model 1.



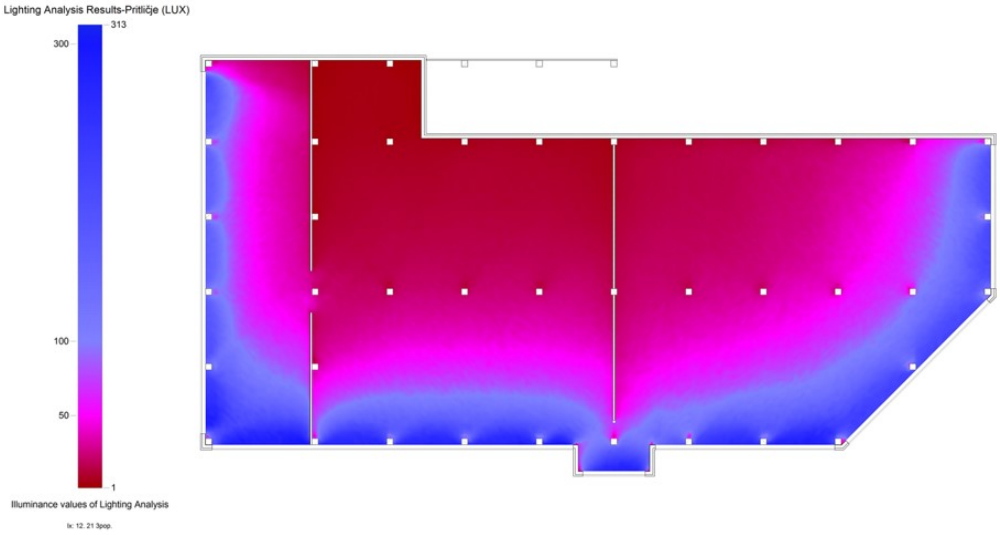
Slika A5: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 15.00 – model 1.



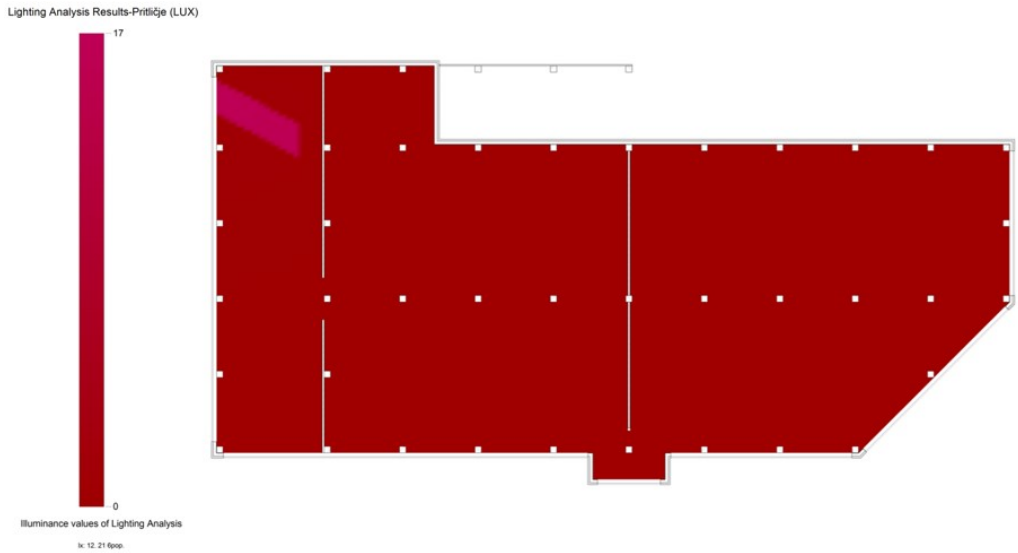
Slika A6: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 18.00 – model 1.



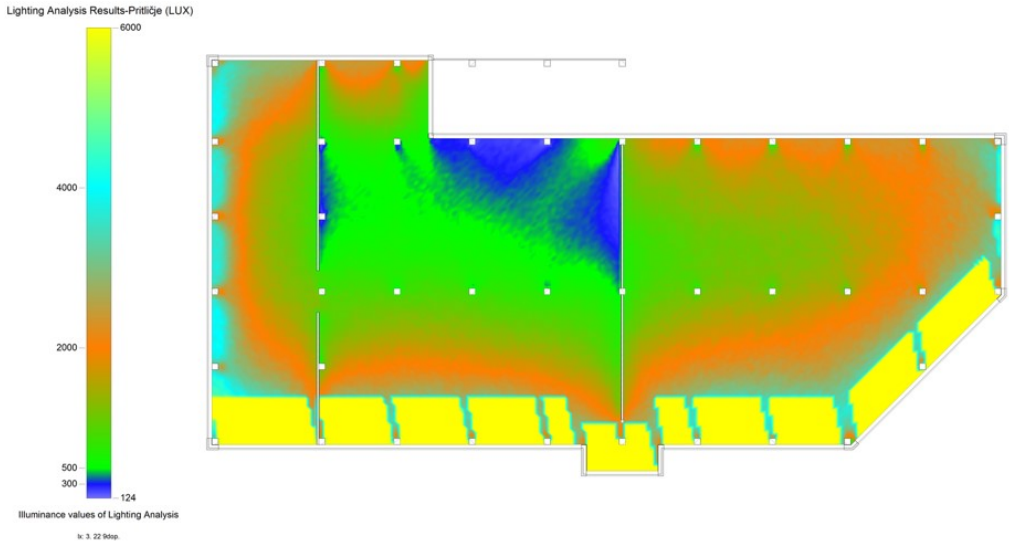
Slika A7: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 09.00 – model 1.



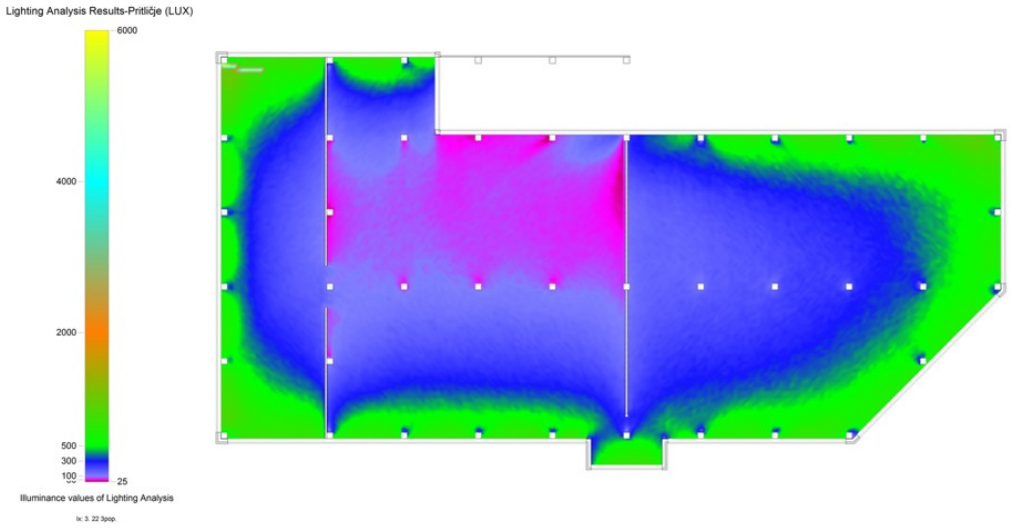
Slika A8: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 15.00 – model 1.



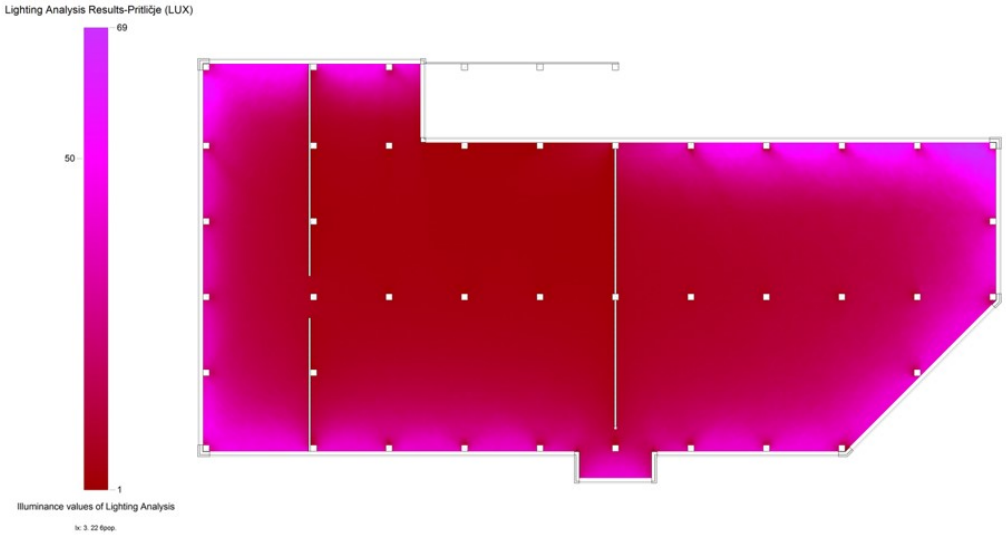
Slika A9: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 18.00 – model 1.



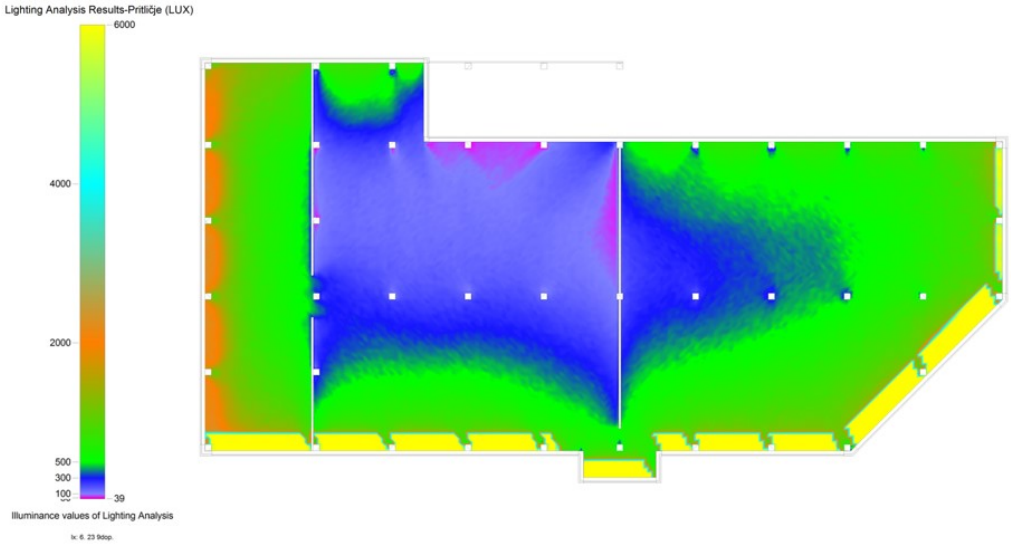
Slika A10: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 09.00 – model 2.



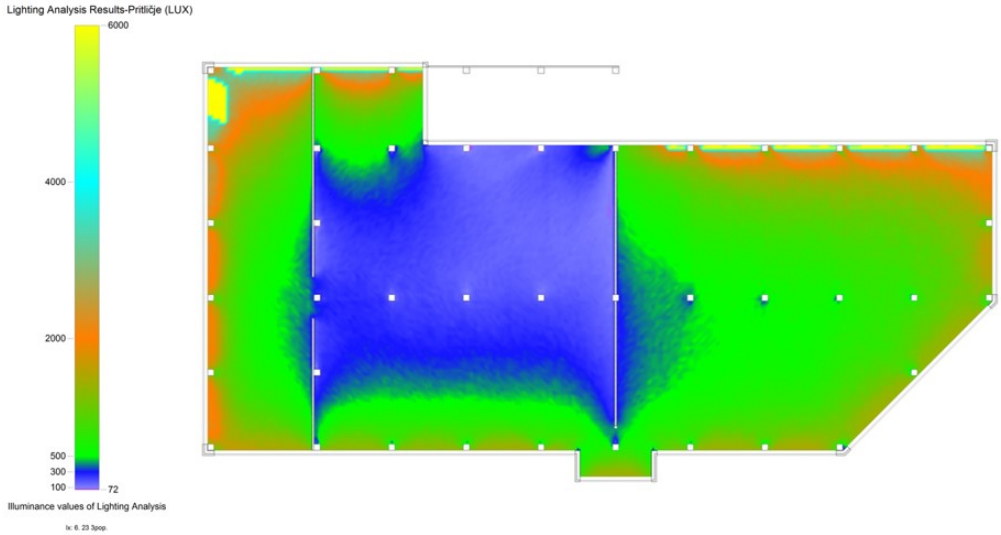
Slika A11: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 15.00 – model 2.



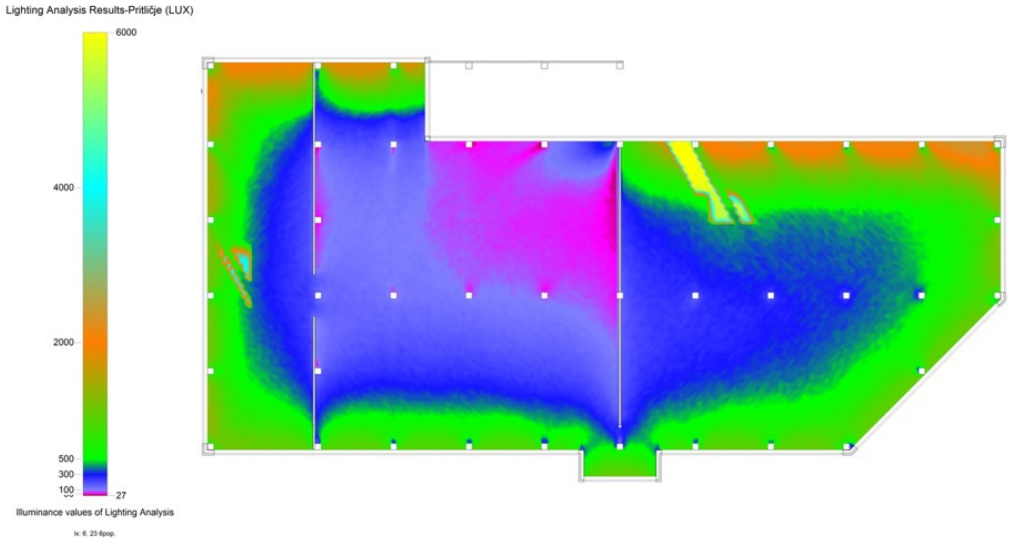
Slika A12: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 18.00 – model 2.



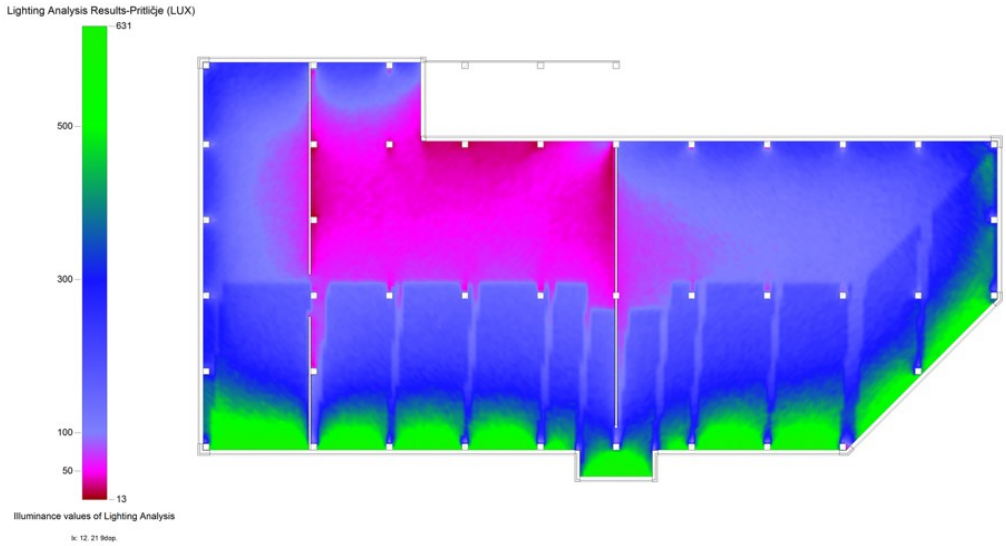
Slika A13: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 09.00 – model 2.



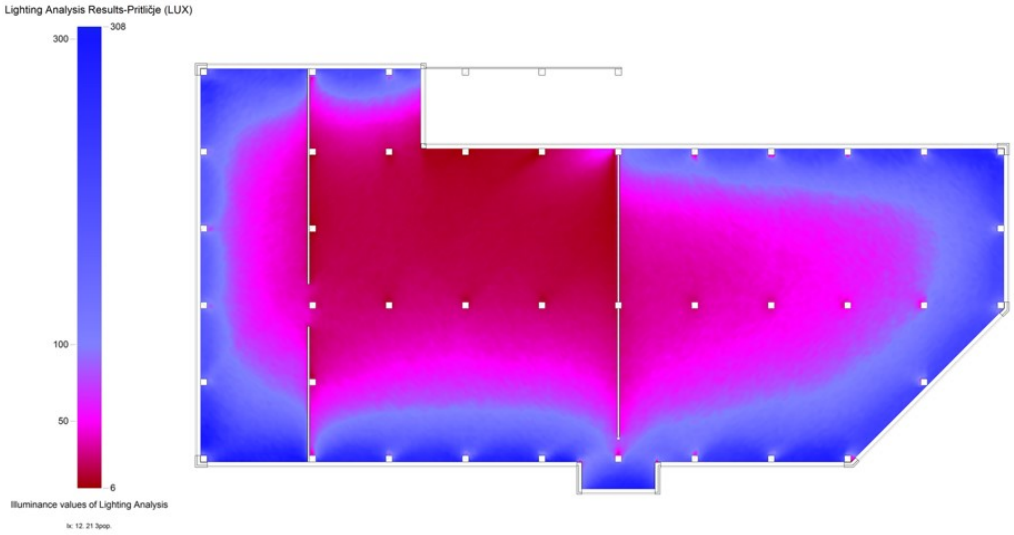
Slika A14: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 15.00 – model 2.



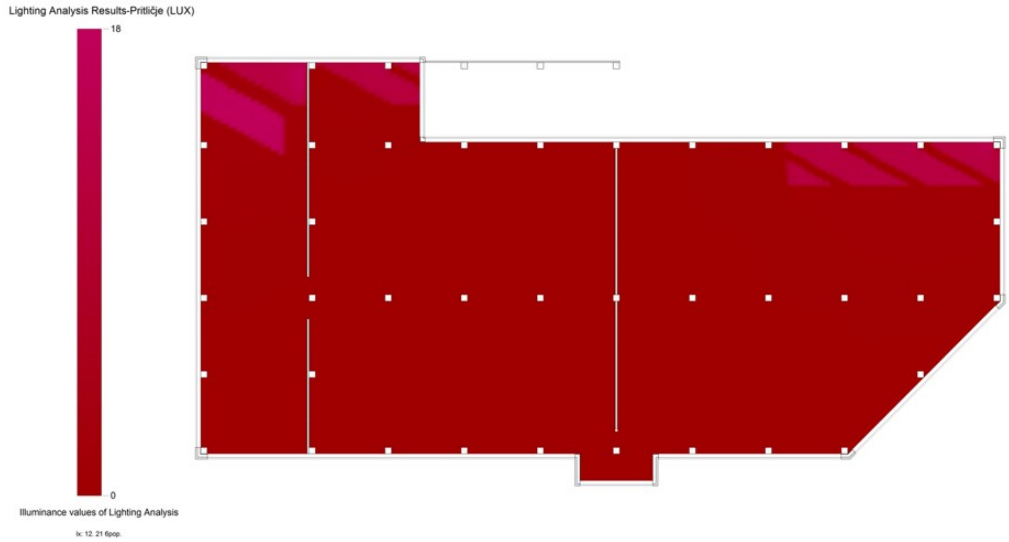
Slika A15: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 18.00 – model 2.



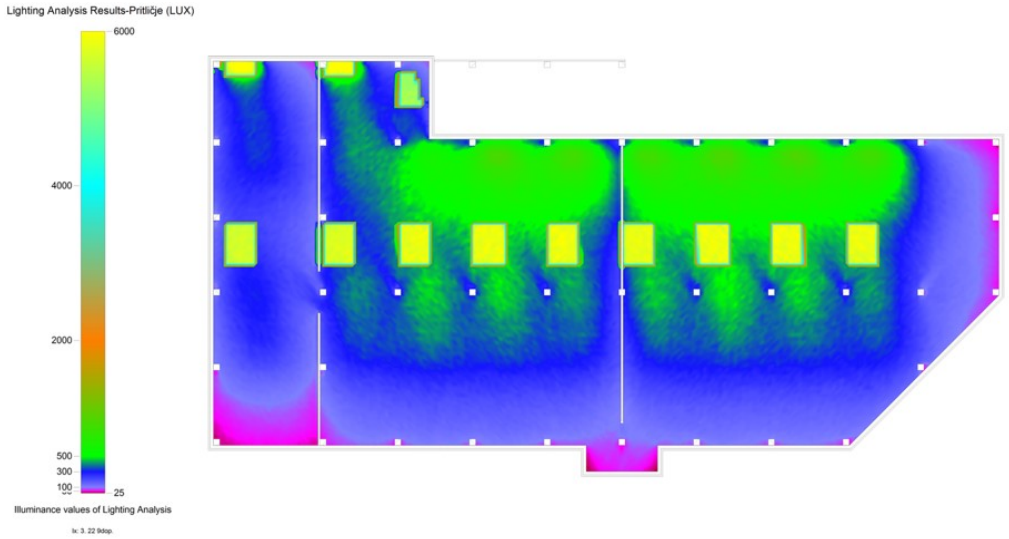
Slika A16: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 09.00 - model 2.



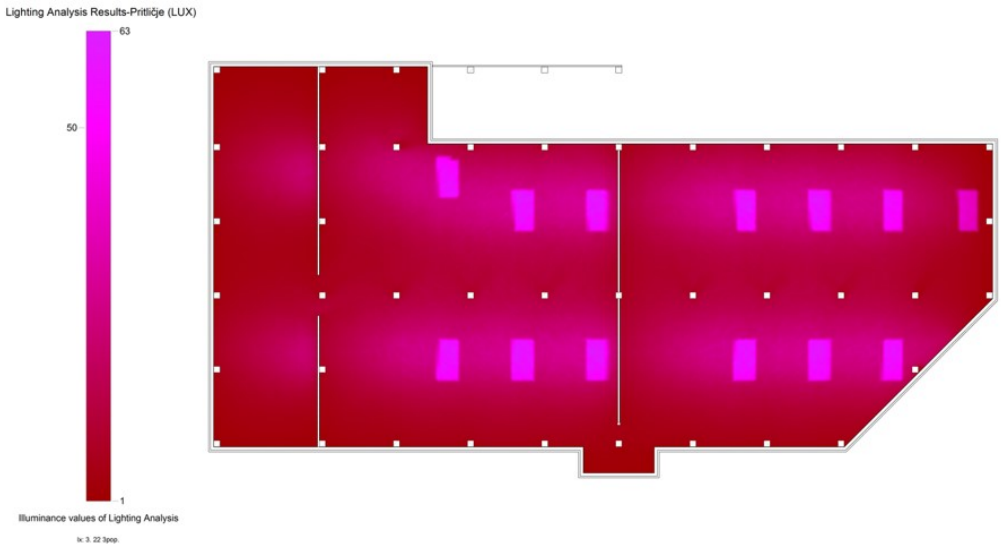
Slika A17: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 15.00 – model 2.



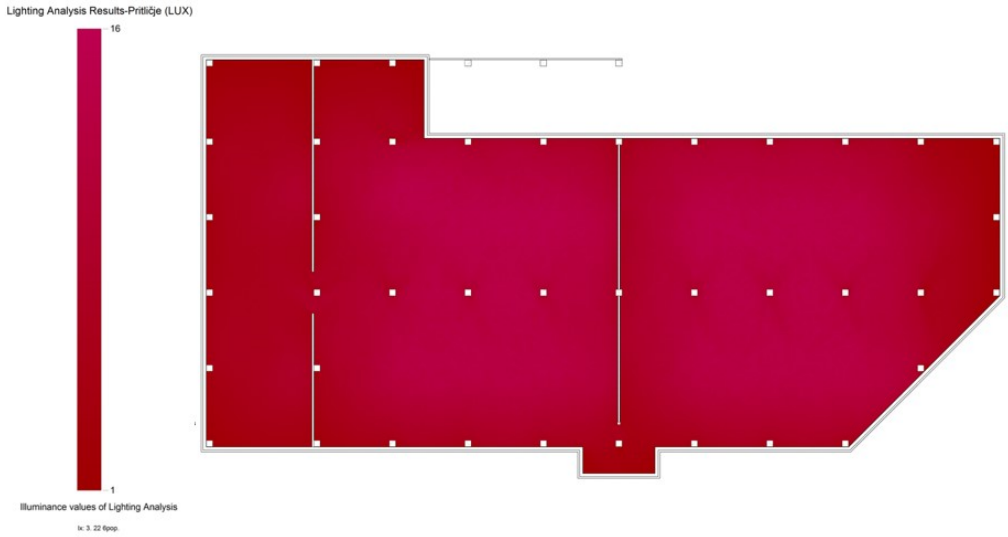
Slika A18: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 18.00 – model 2.



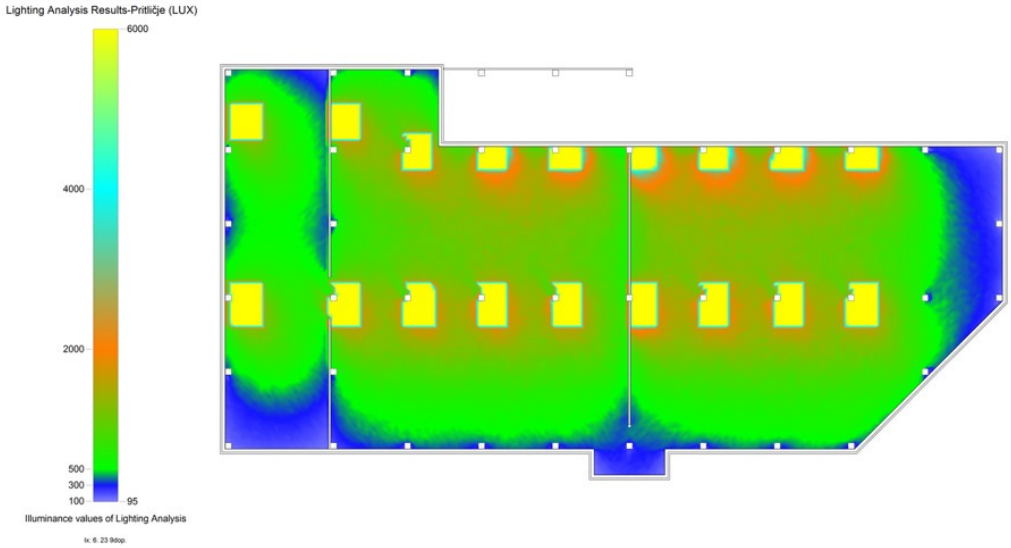
Slika A19: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 09.00 – model 3.



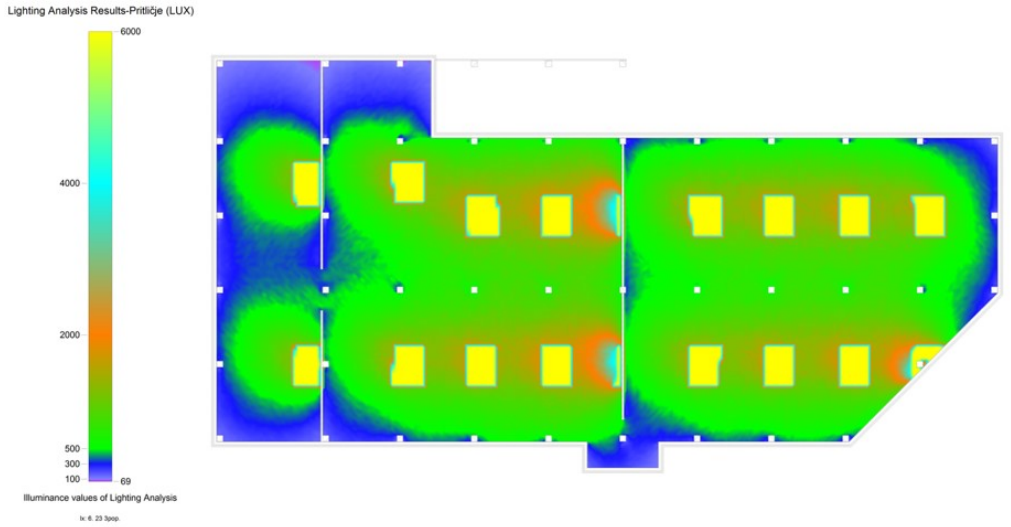
Slika A20: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 15.00 – model 3.



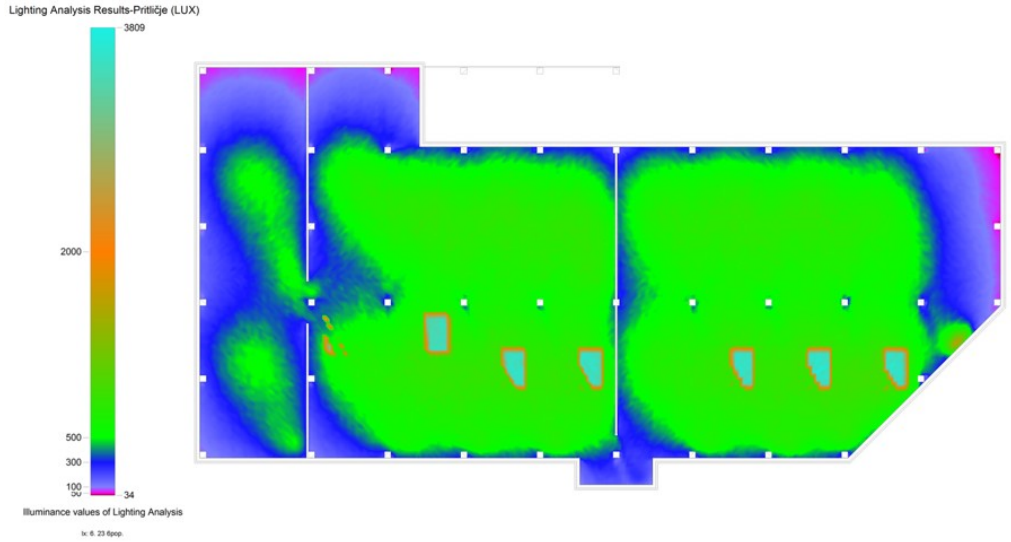
Slika A21: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 18.00 – model 3.



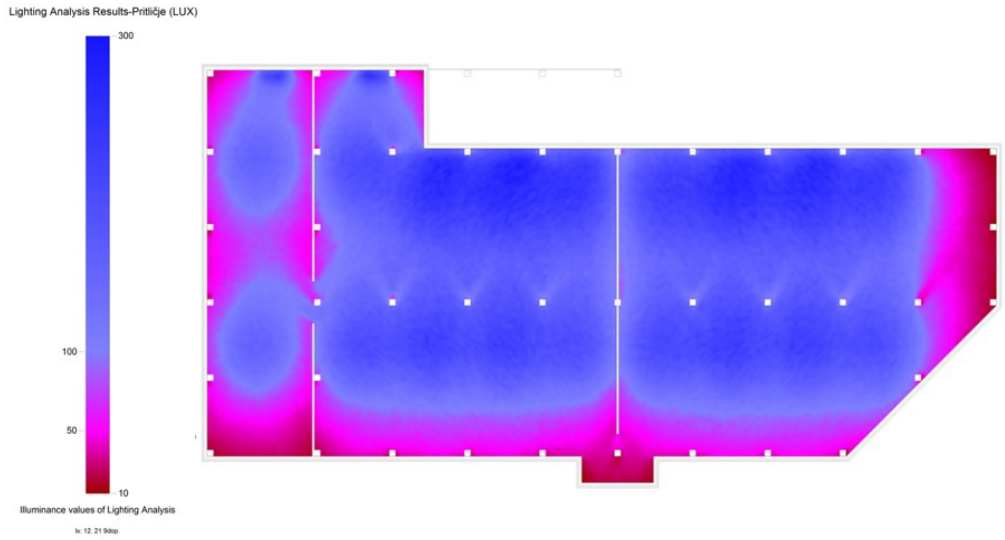
Slika A22: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 09.00 – model 3.



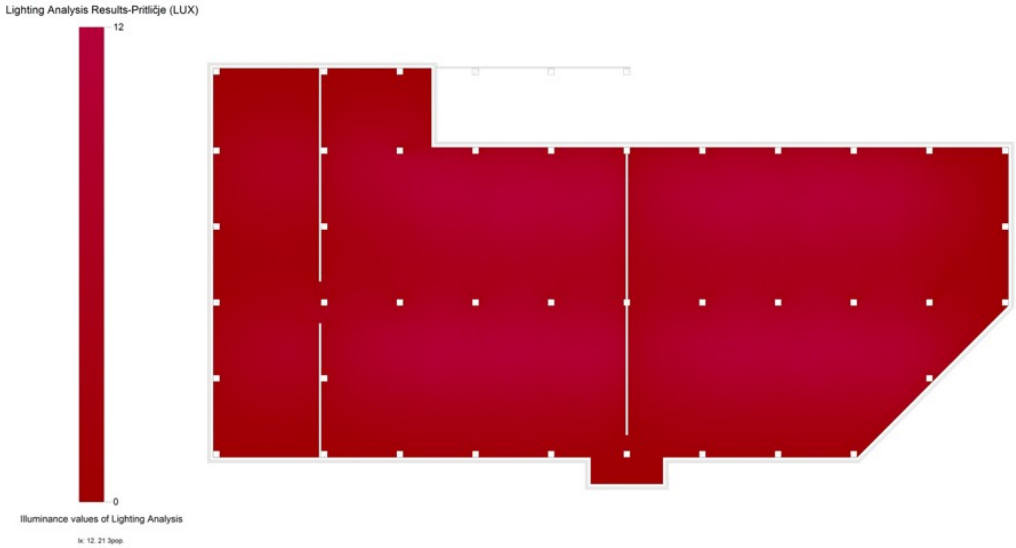
Slika A23: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 15.00 – model 3.



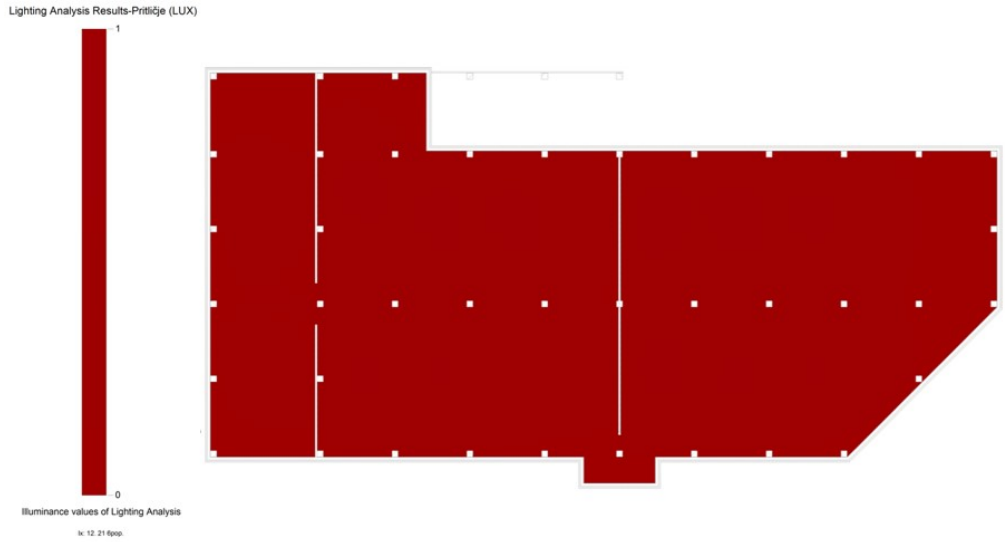
Slika A24: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 18.00 – model 3.



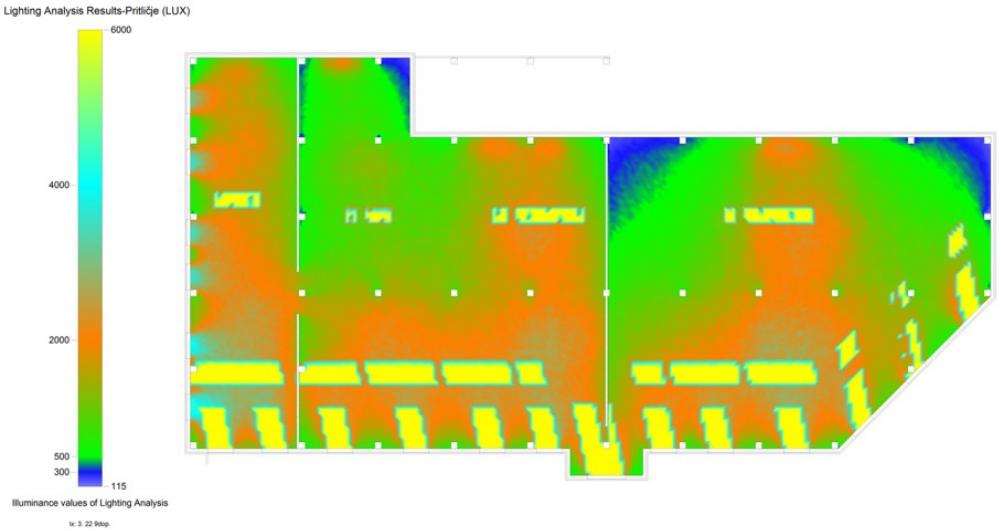
Slika A25: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 09.00 – model 3.



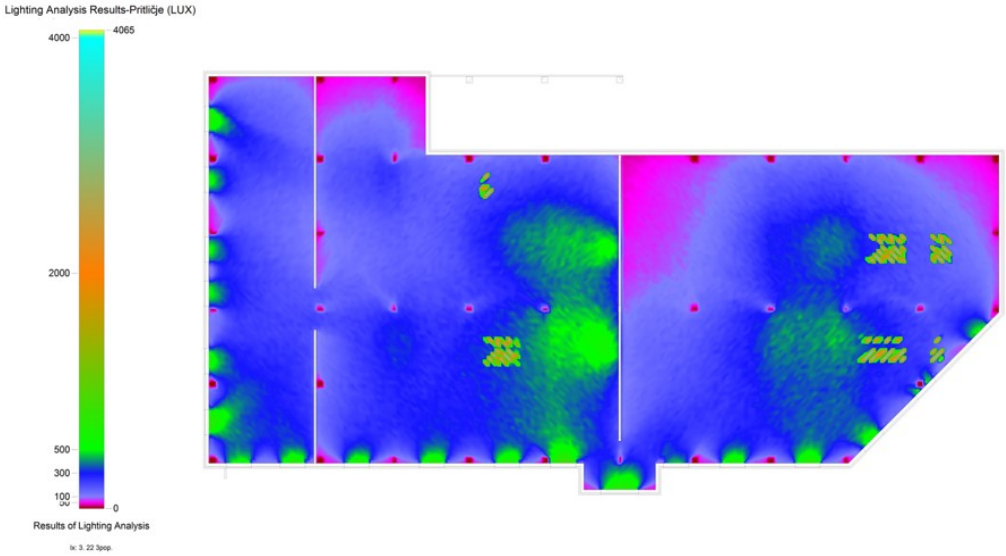
Slika A26: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 15.00 – model 3.



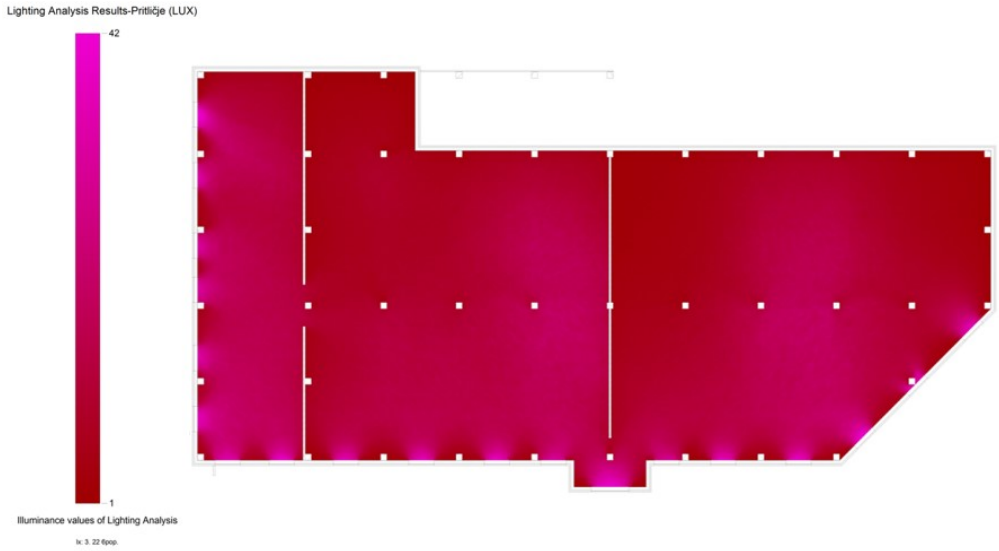
Slika A27: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 18.00 – model 3.



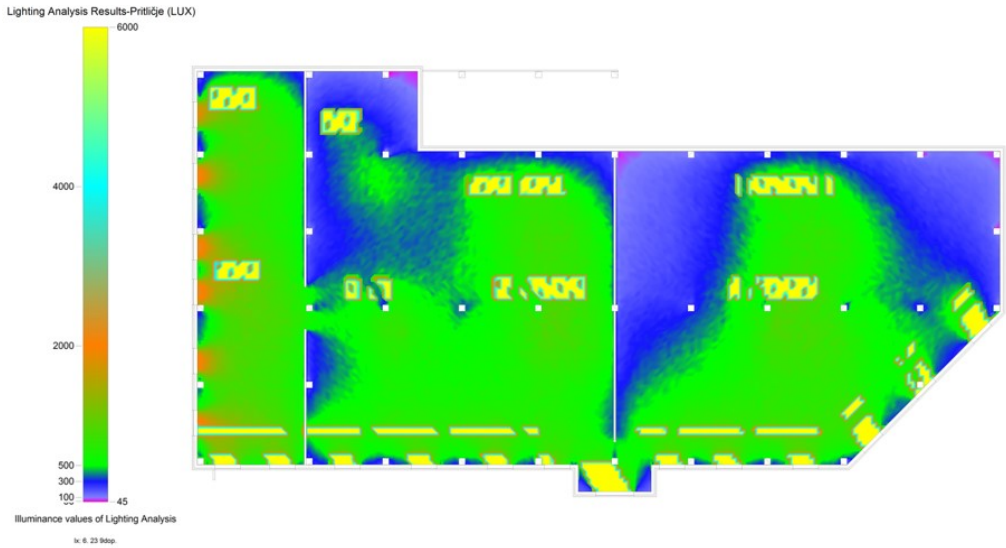
Slika A28: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 09.00 – model 4.



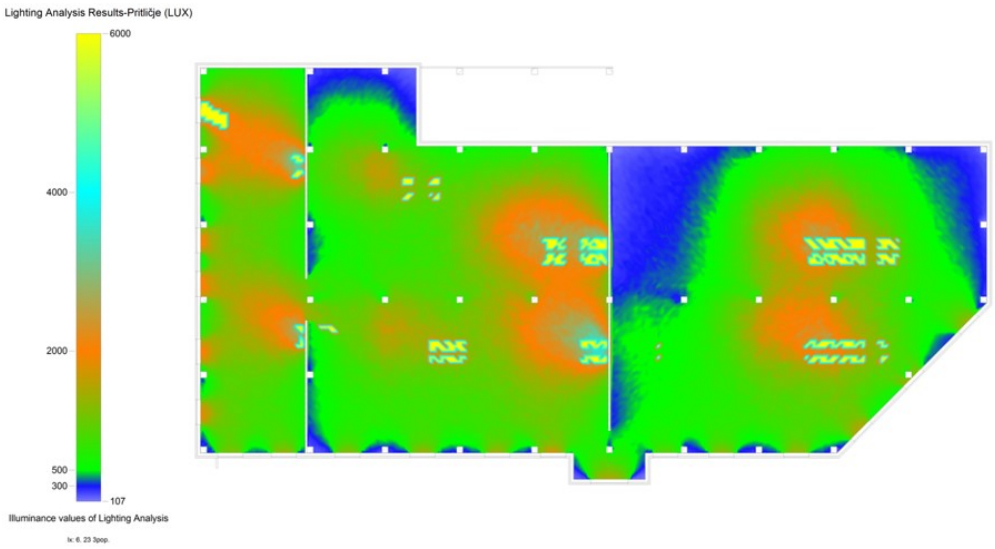
Slika A29: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 15.00 – model 4.



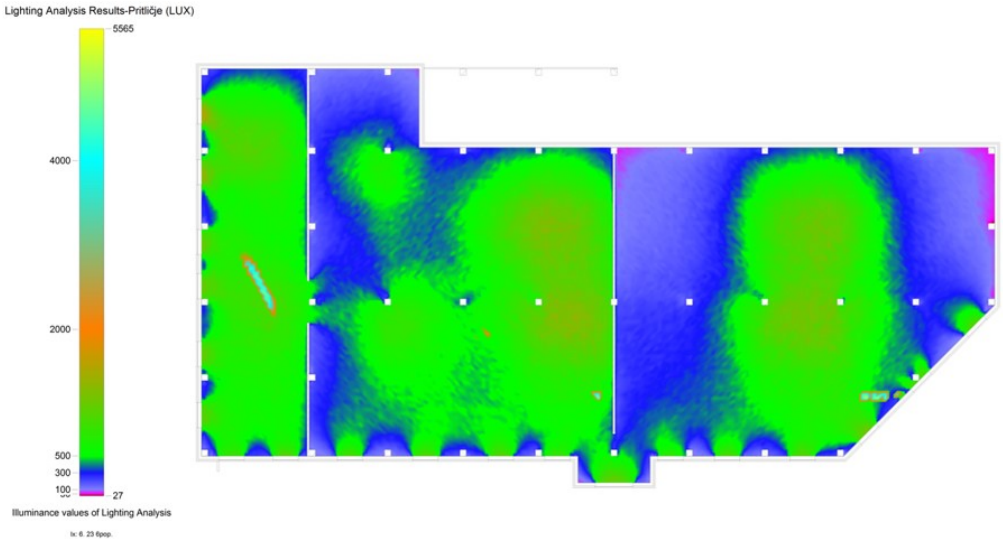
Slika A30: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 18.00 – model 4.



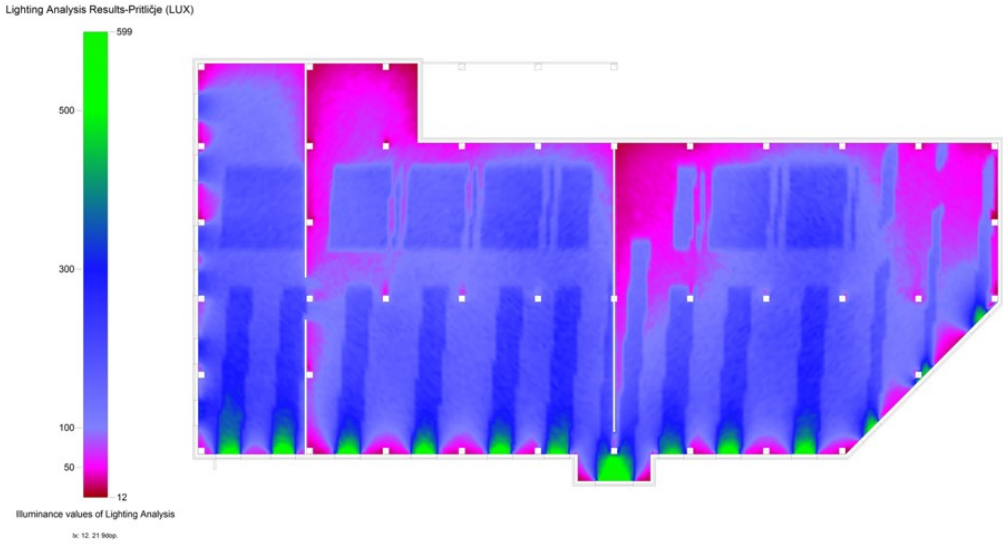
Slika A31: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 09.00 – model 4.



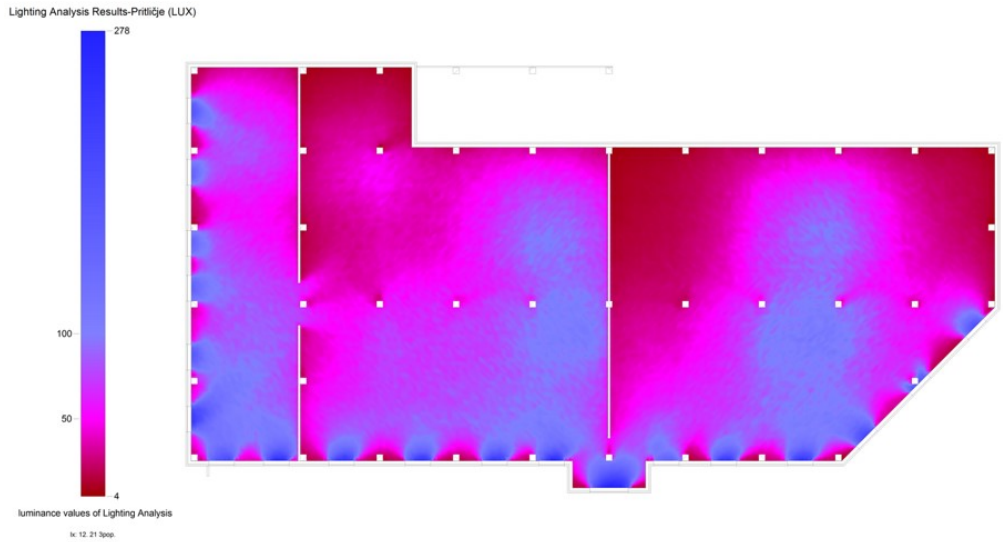
Slika A32: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 15.00 – model 4.



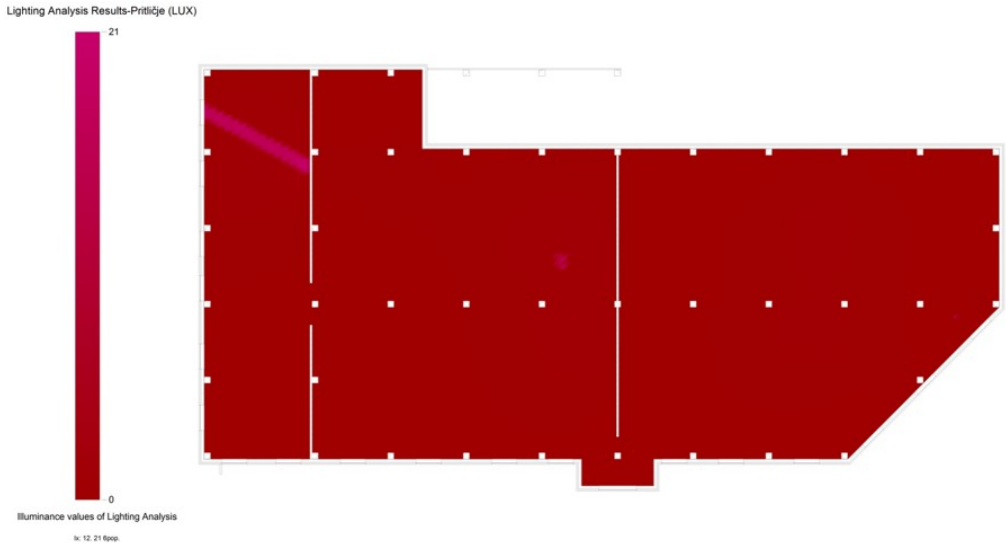
Slika A33: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 18.00 – model 4.



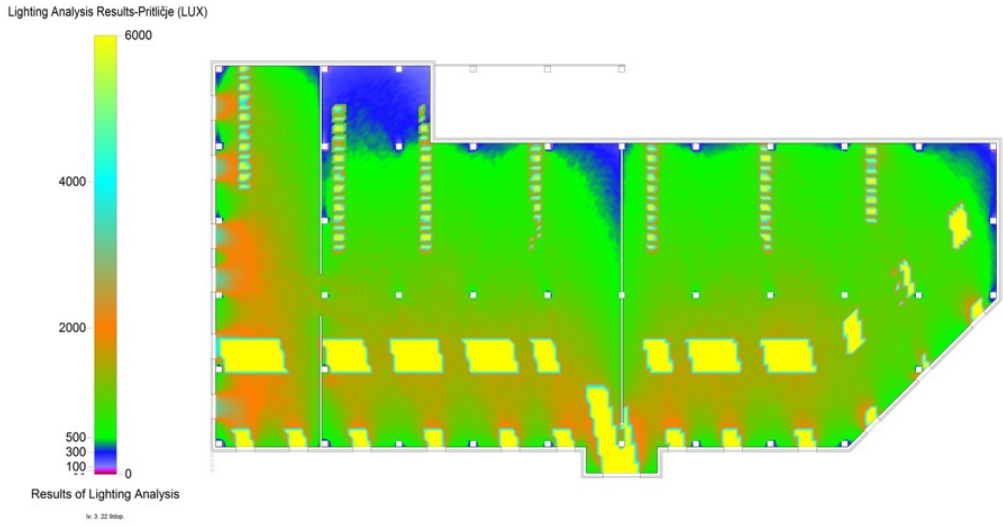
Slika A34: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 09.00 – model 4.



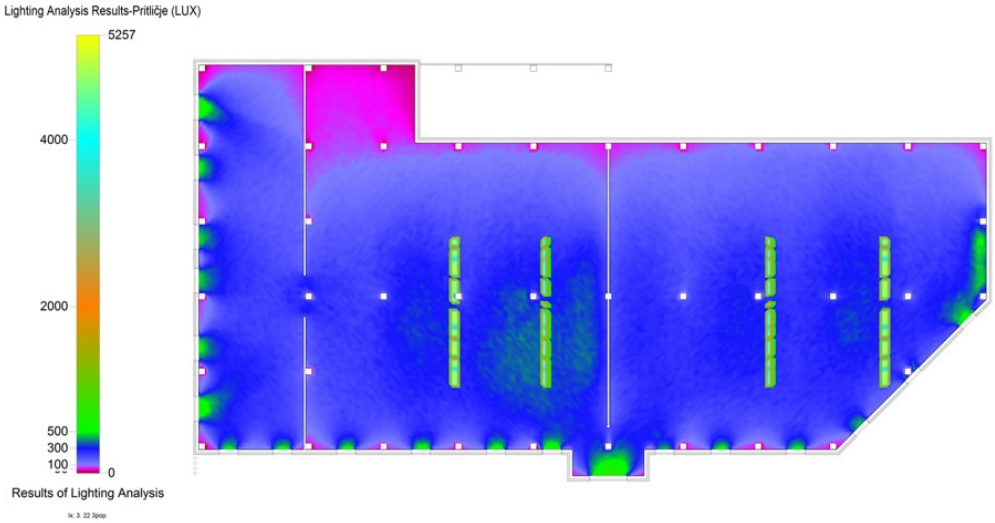
Slika A35: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 15.00 – model 4.



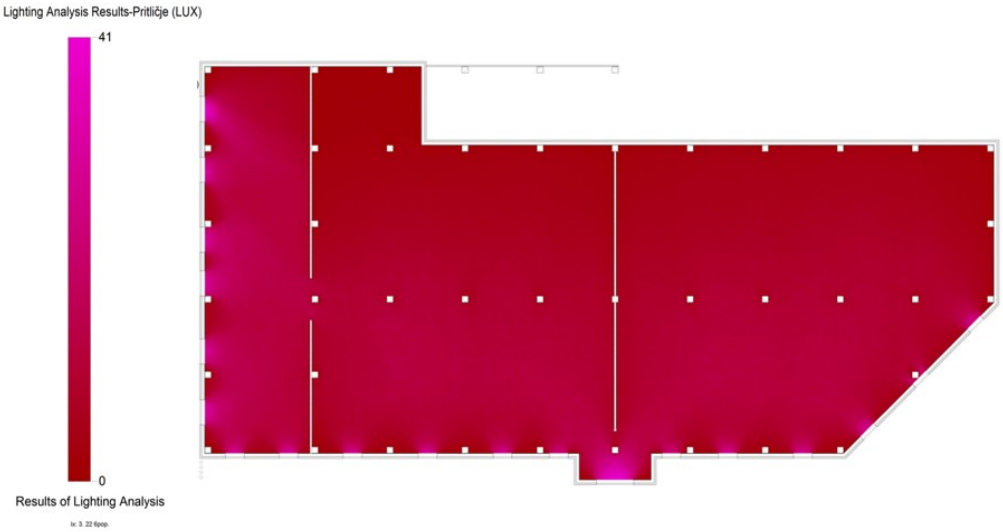
Slika A36: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 18.00 – model 4.



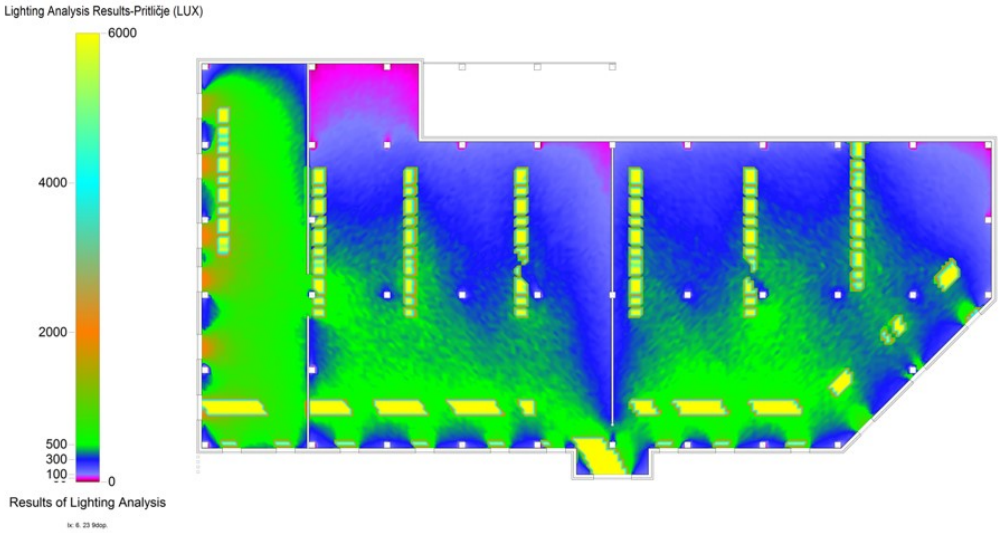
Slika A37: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 09.00 – model 5.



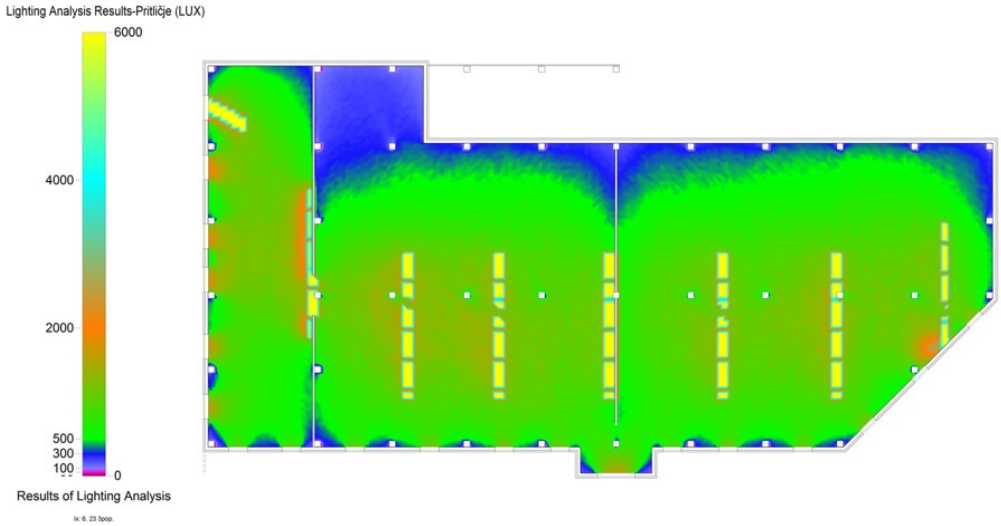
Slika A38: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 15.00 – model 5.



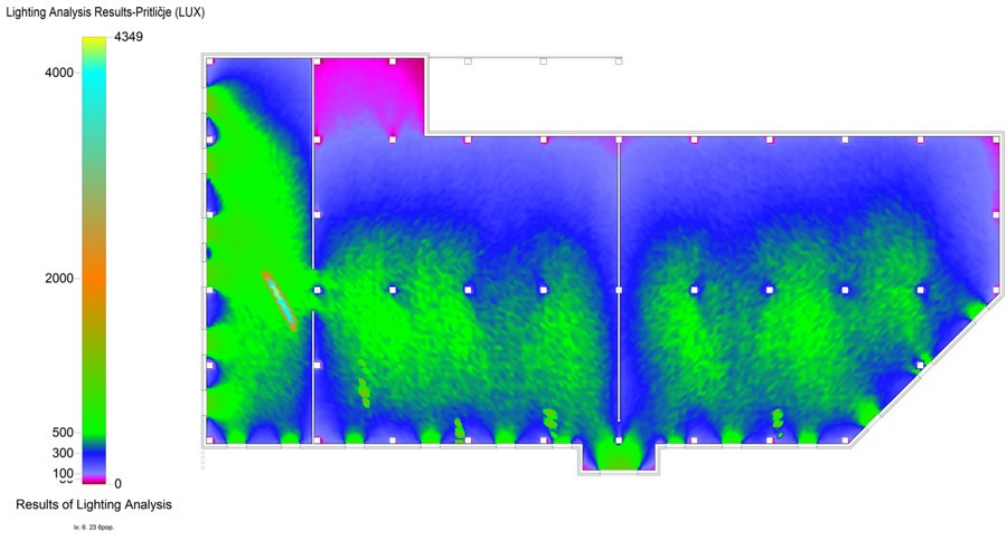
Slika A39: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 18.00 – model 5.



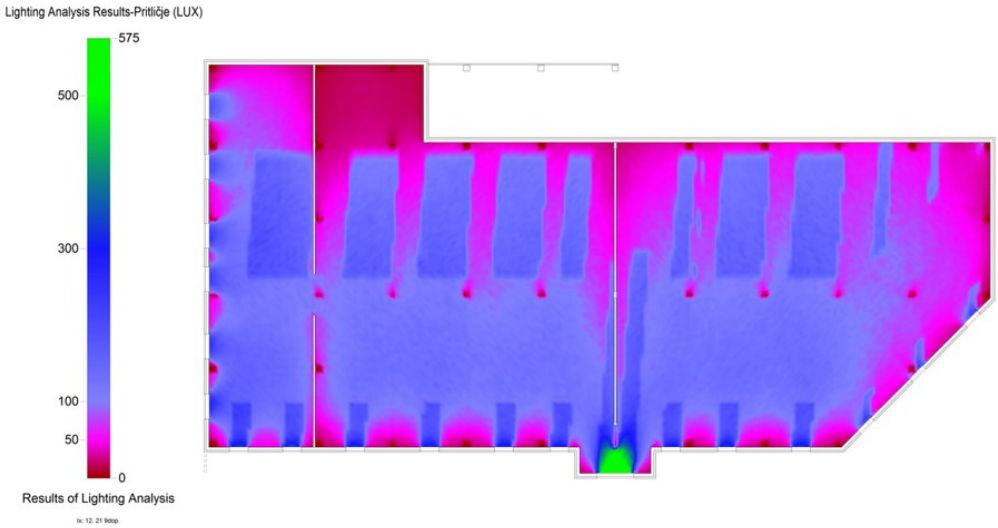
Slika A40: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 09.00 – model 5.



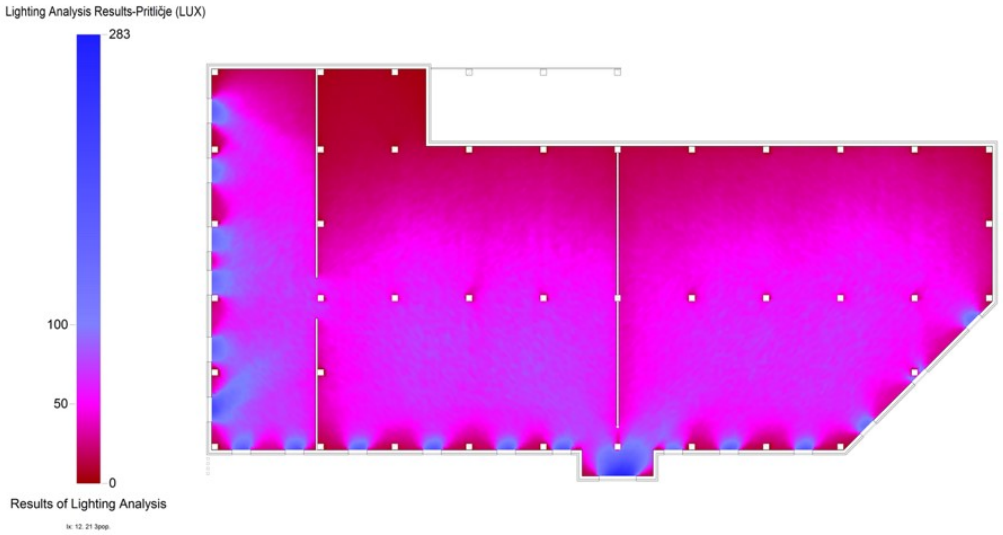
Slika A41: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 15.00 – model 5.



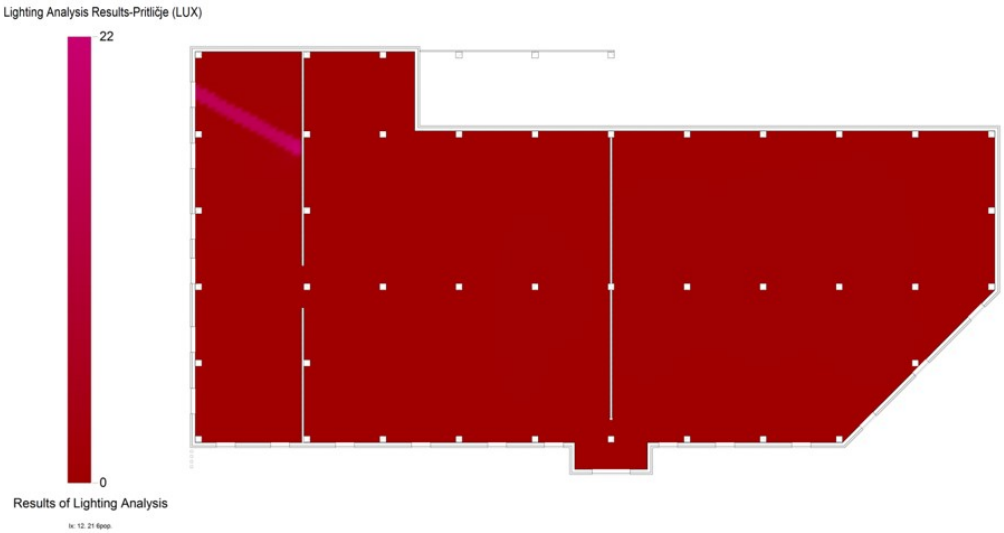
Slika A42: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 18.00 – model 5.



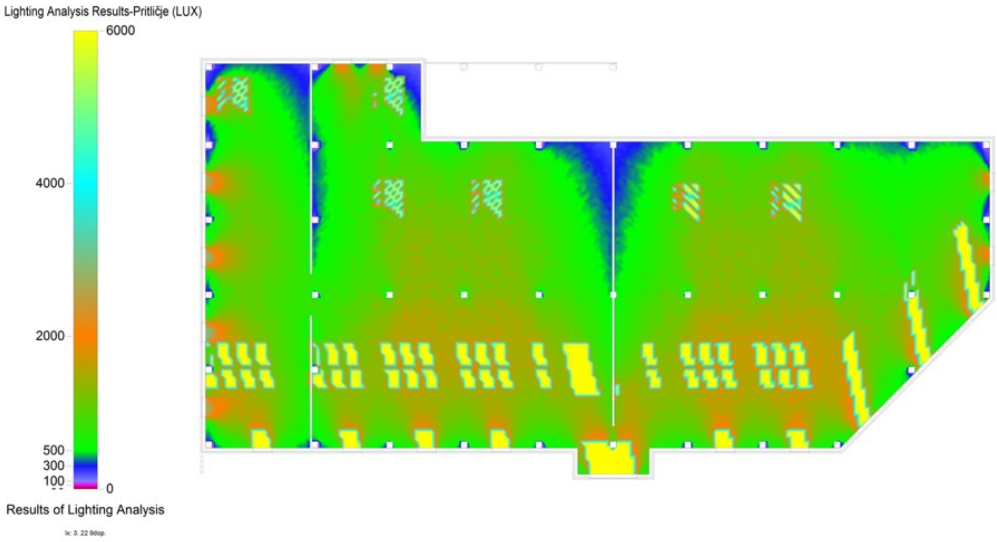
Slika A43: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 09.00 – model 5.



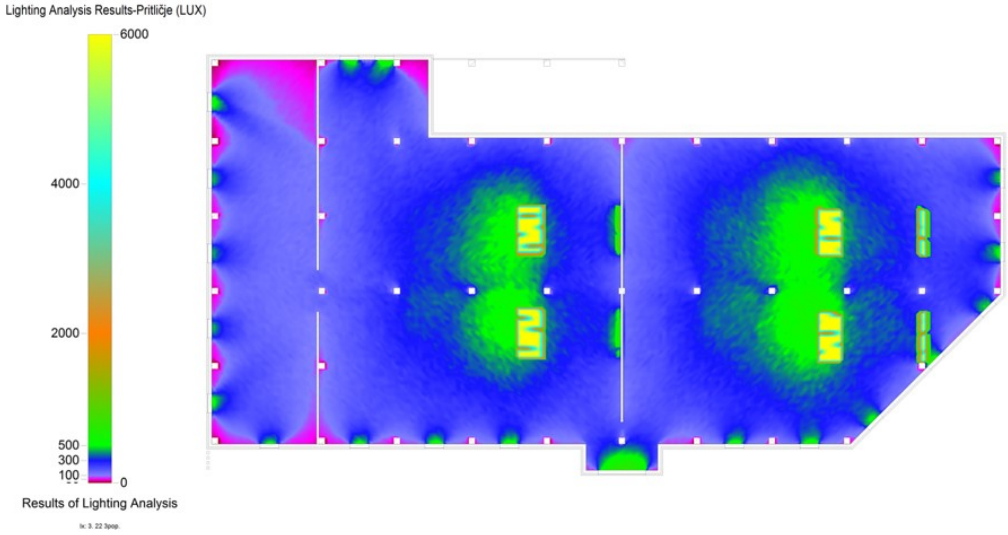
Slika A44: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 15.00 – model 5.



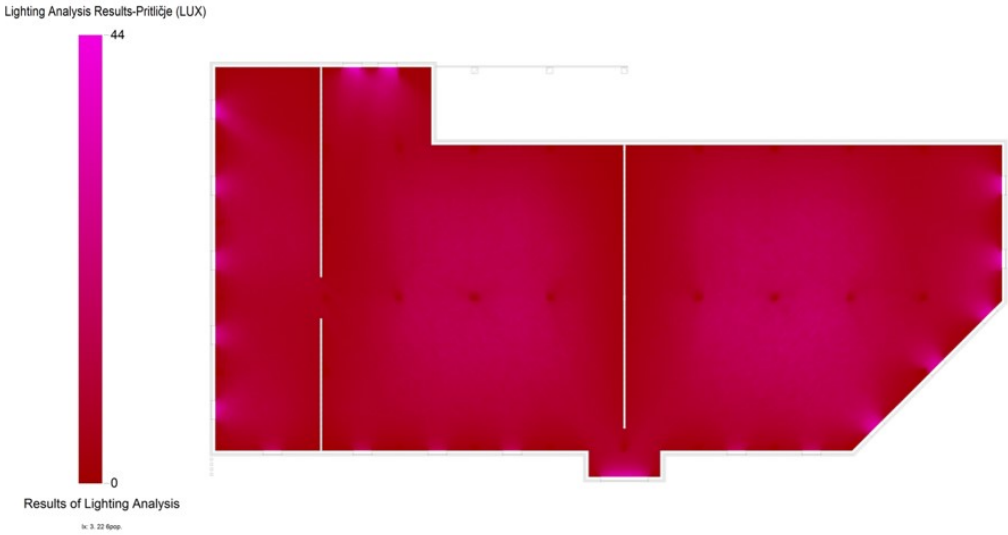
Slika A45: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 18.00 – model 5.



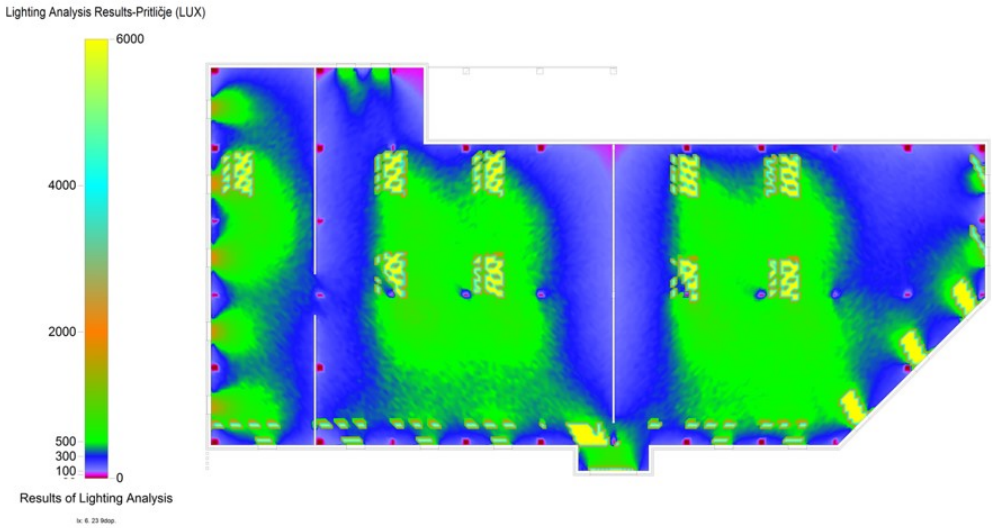
Slika A46: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 09.00 – model 6.



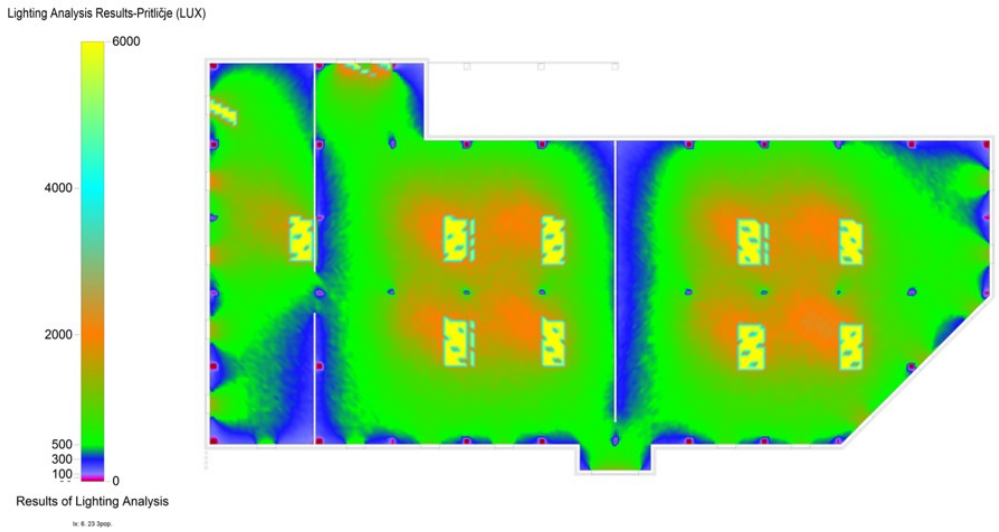
Slika A47: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 15.00 – model 6.



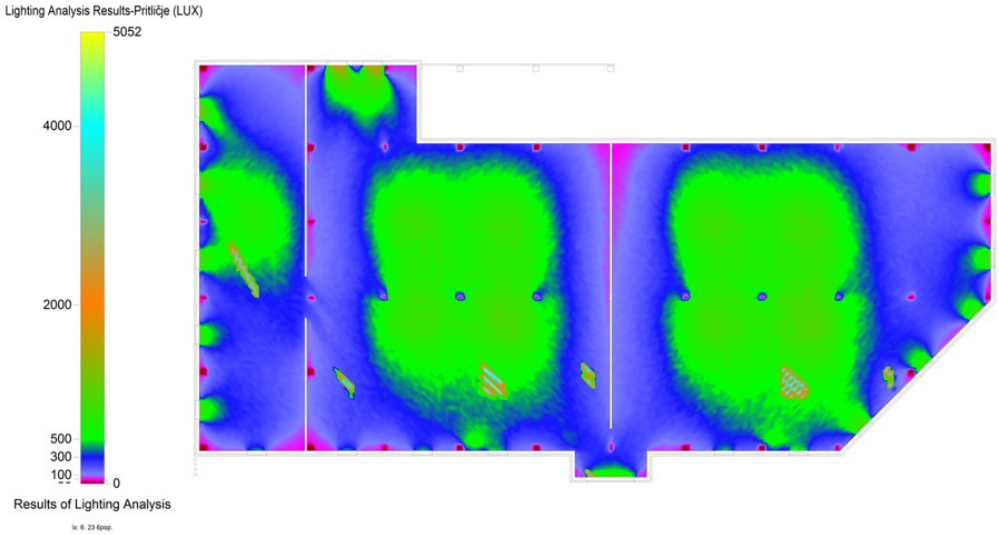
Slika A48: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 18.00 – model 6.



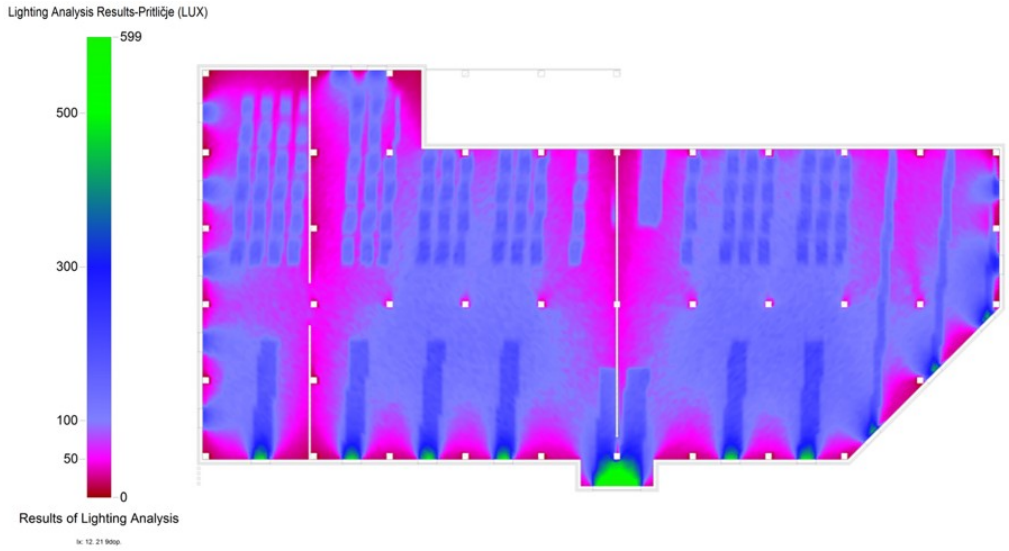
Slika A49: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 09.00 – model 6.



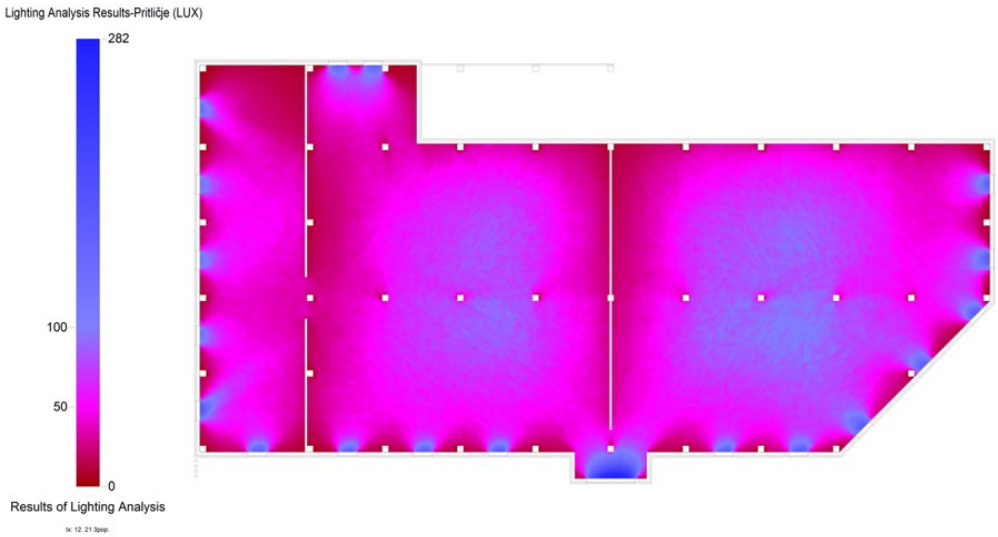
Slika A50: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 15.00 – model 6.



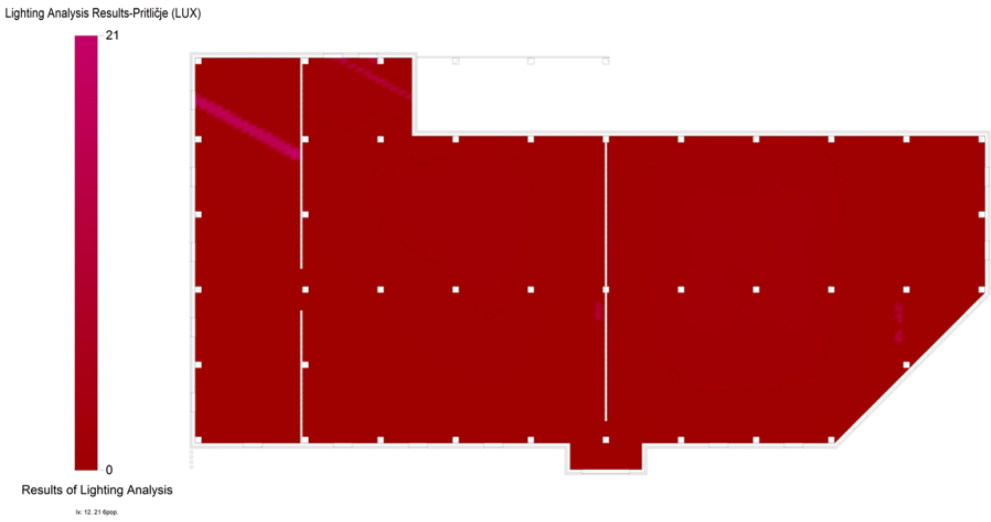
Slika A51: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 18.00 – model 6.



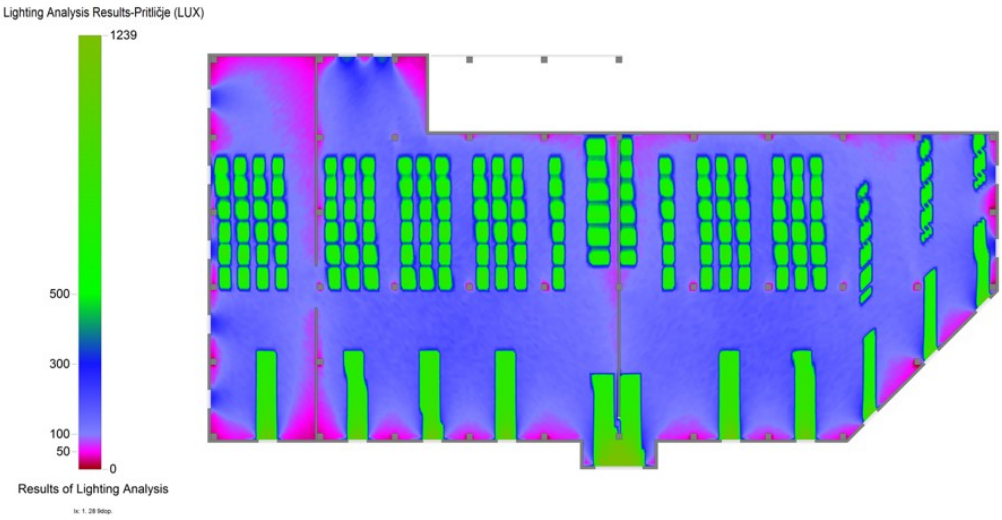
Slika A52: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 09.00 – model 6.



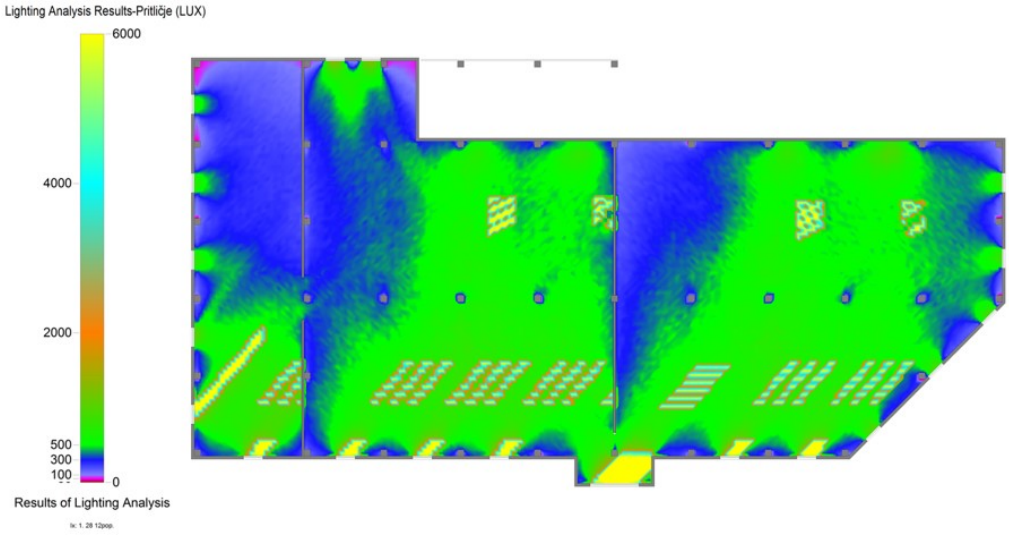
Slika A53: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 15.00 – model 6.



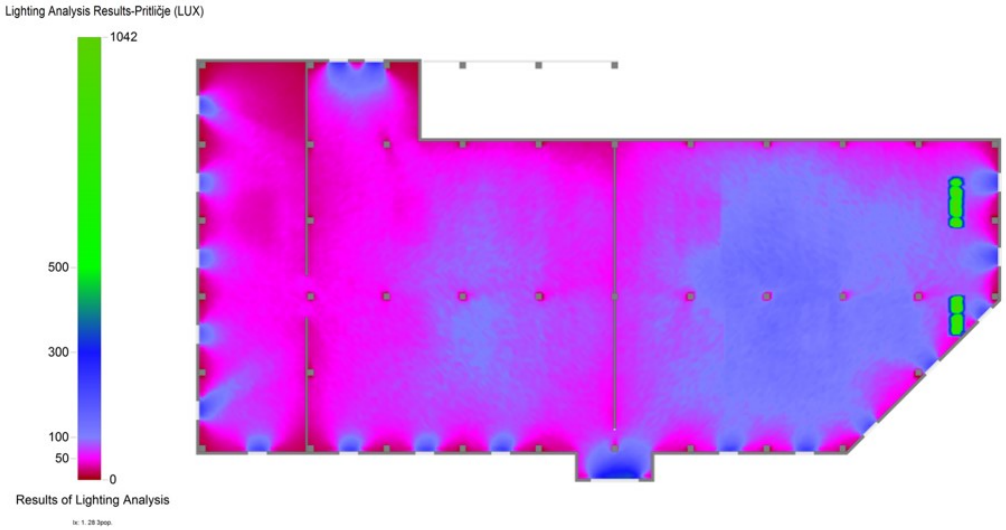
Slika A54: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 18.00 – model 6.



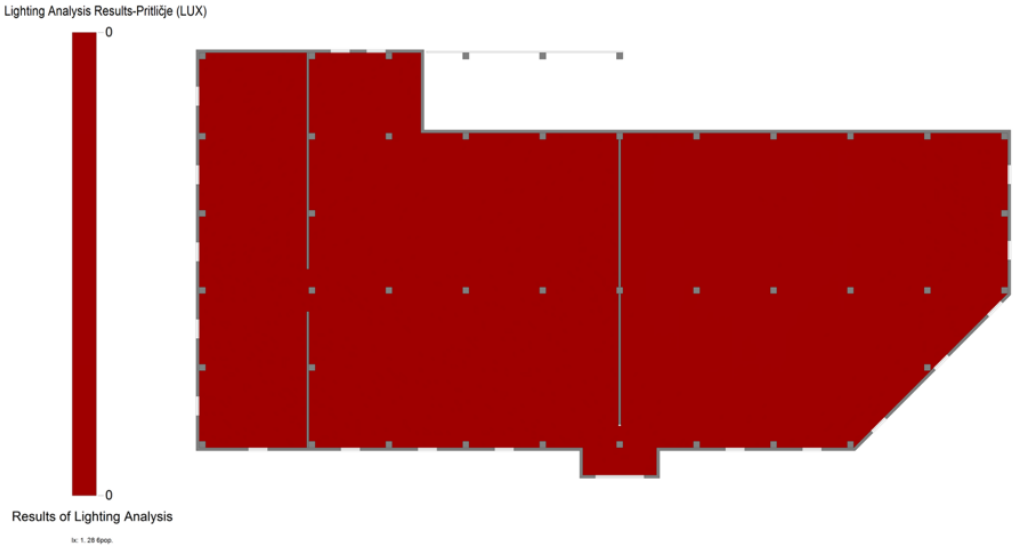
Slika A55: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 28.1. ob 09.00 – model E3.



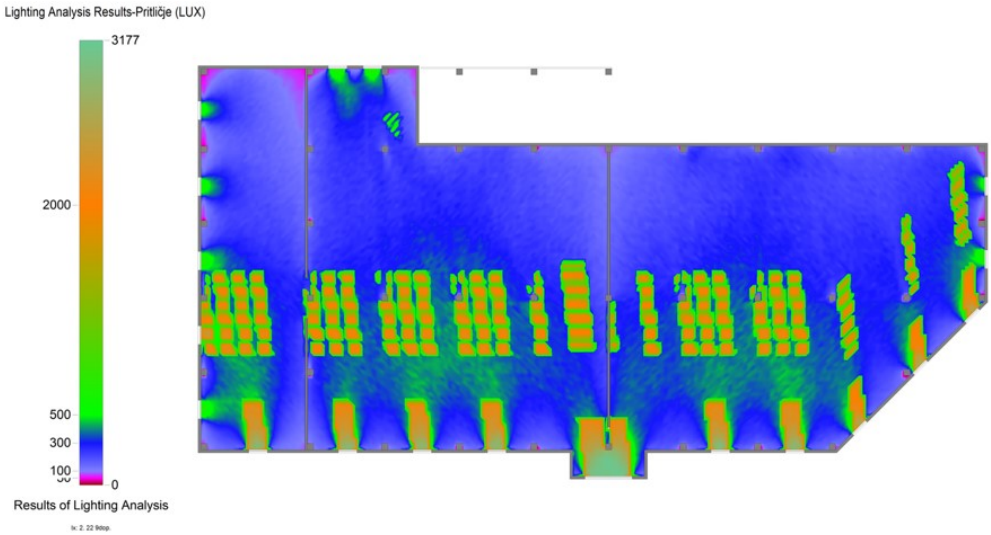
Slika A56: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 28.1. ob 12.00 – model E3.



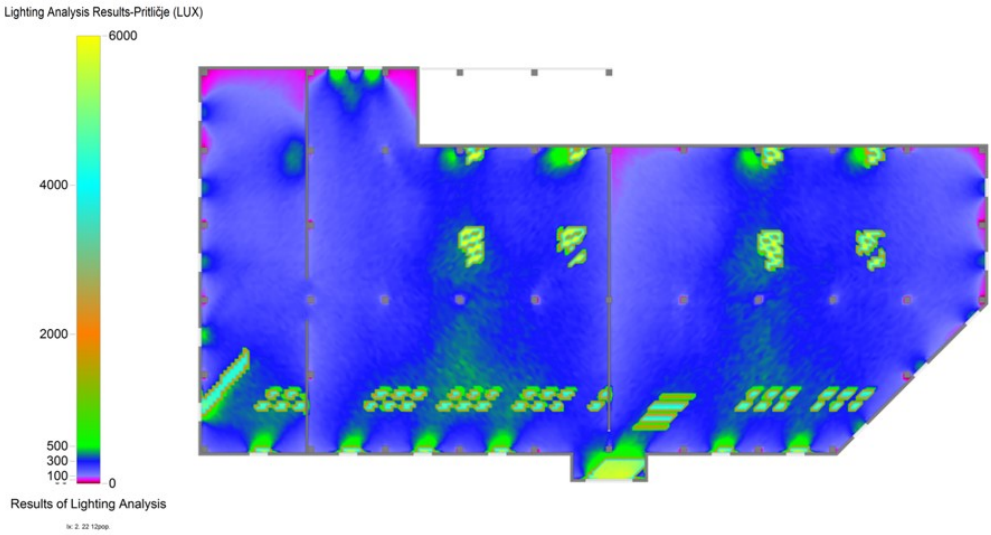
Slika A57: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 28.1. ob 15.00 – model E3.



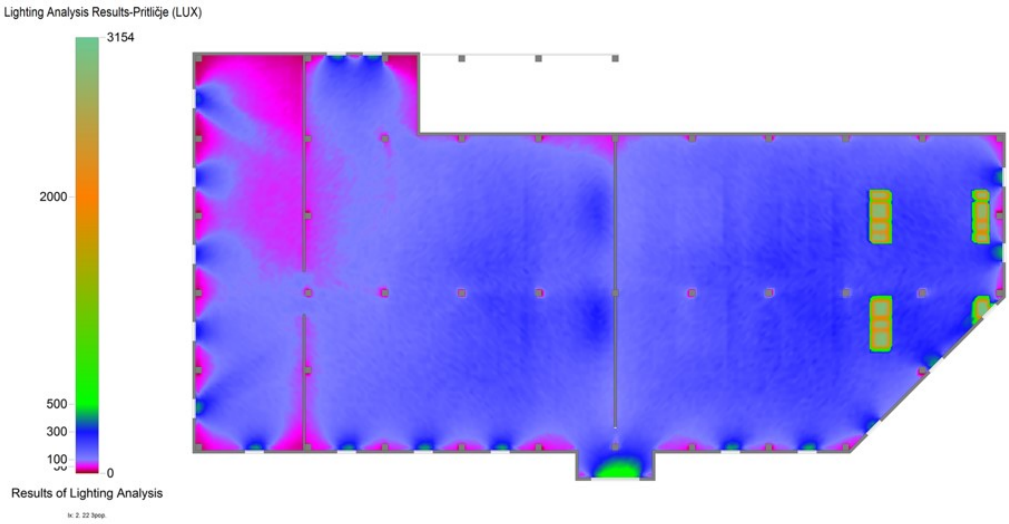
Slika A58: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 28.1. ob 18.00 – model E3.



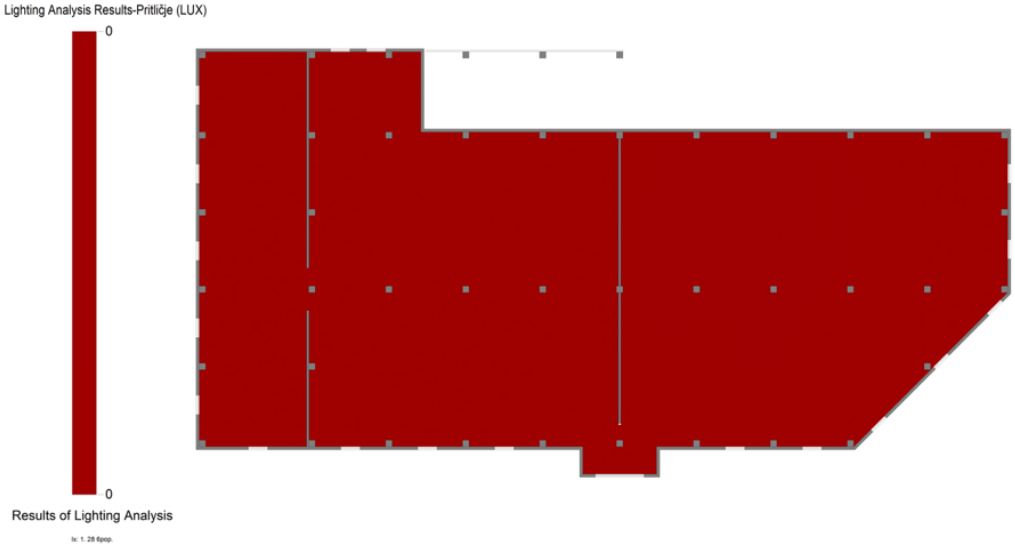
Slika A59: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.2. ob 09.00 – model E3.



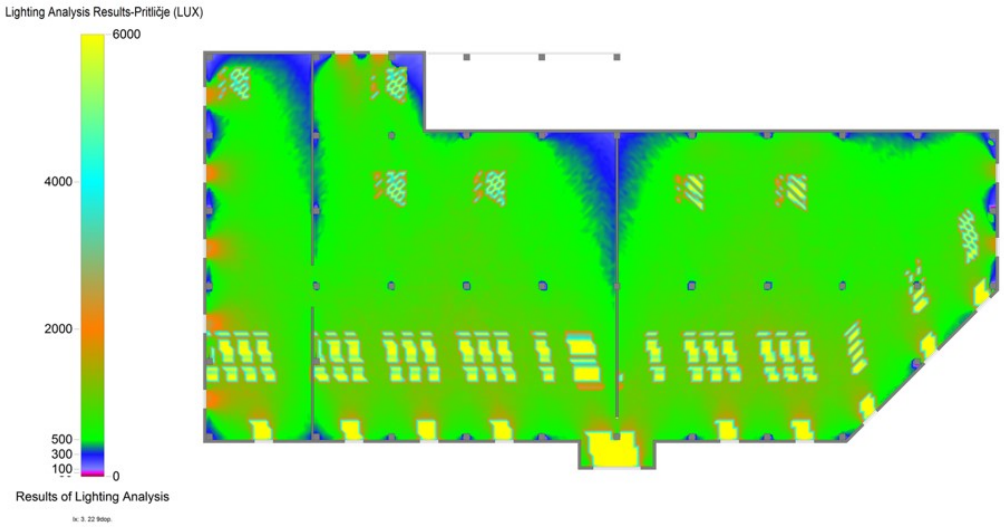
Slika A60: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.2. ob 12.00 – model E3.



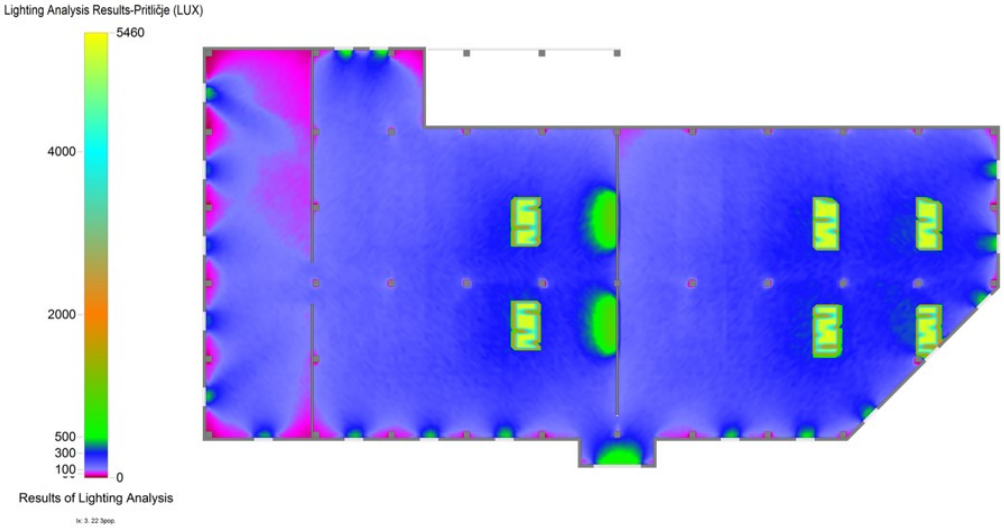
Slika A61: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.2. ob 15.00 – model E3.



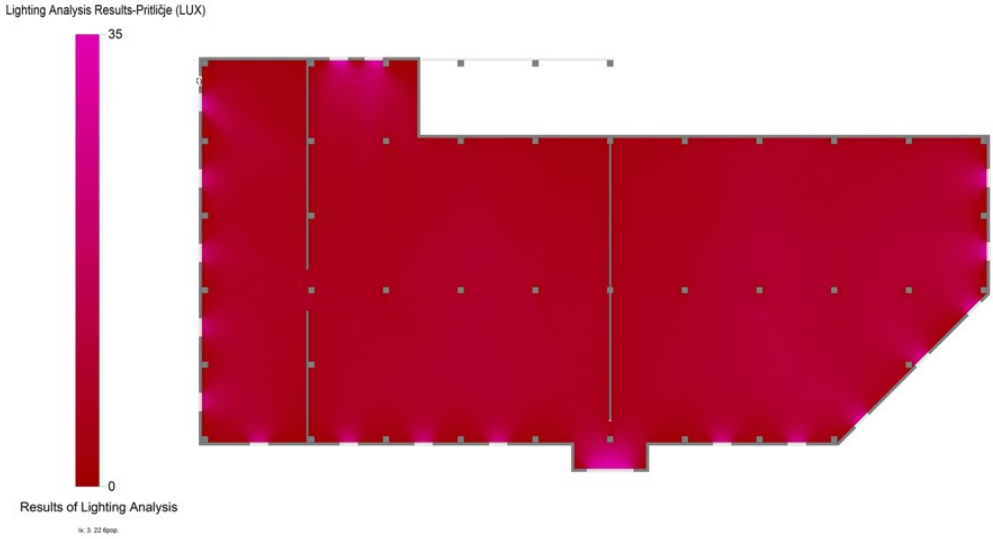
Slika A62: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.2. ob 18.00 – model E3.



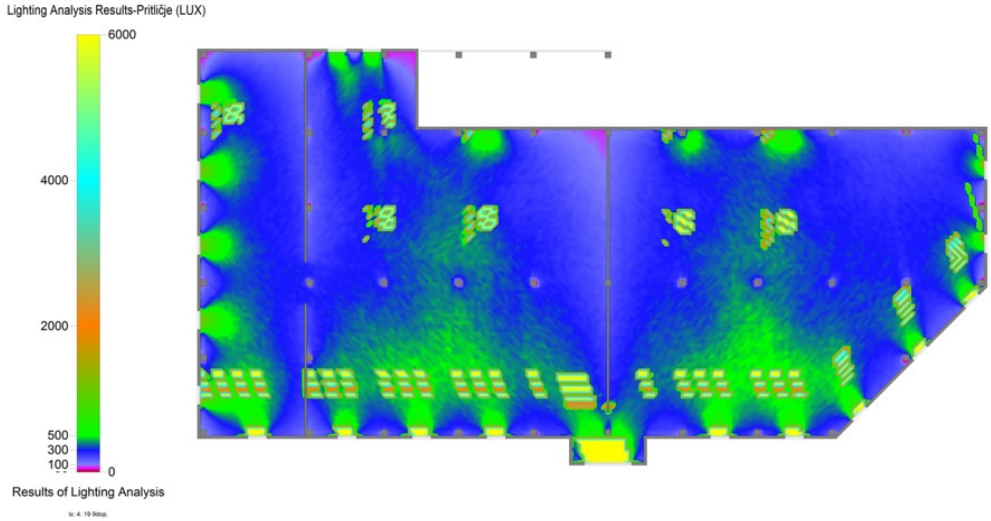
Slika A63: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 09.00 – model E3.



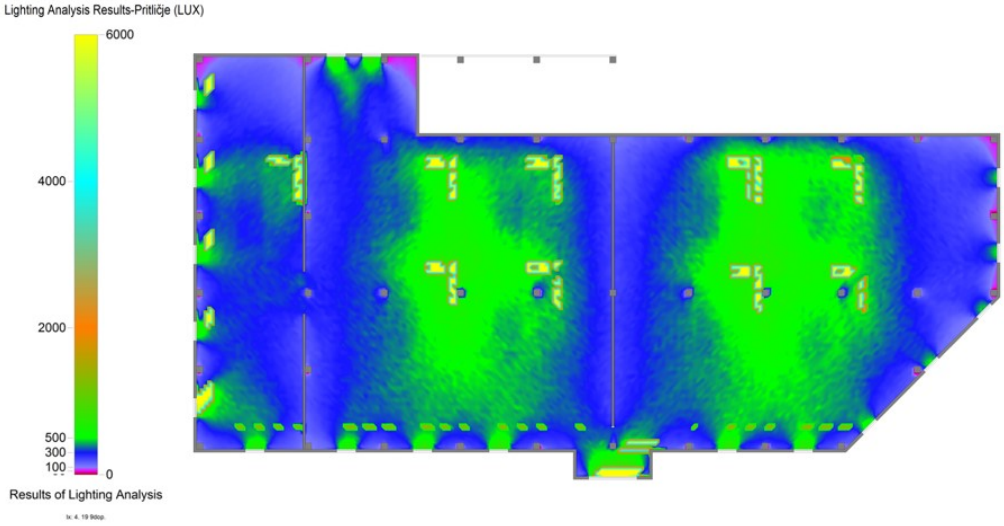
Slika A64: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 15.00 – model E3.



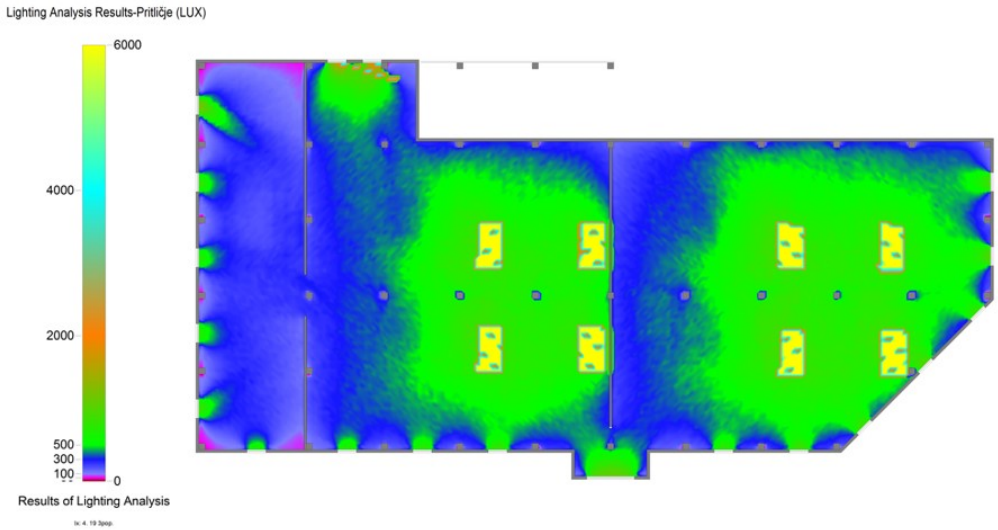
Slika A65: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.3. ob 18.00 – model E3.



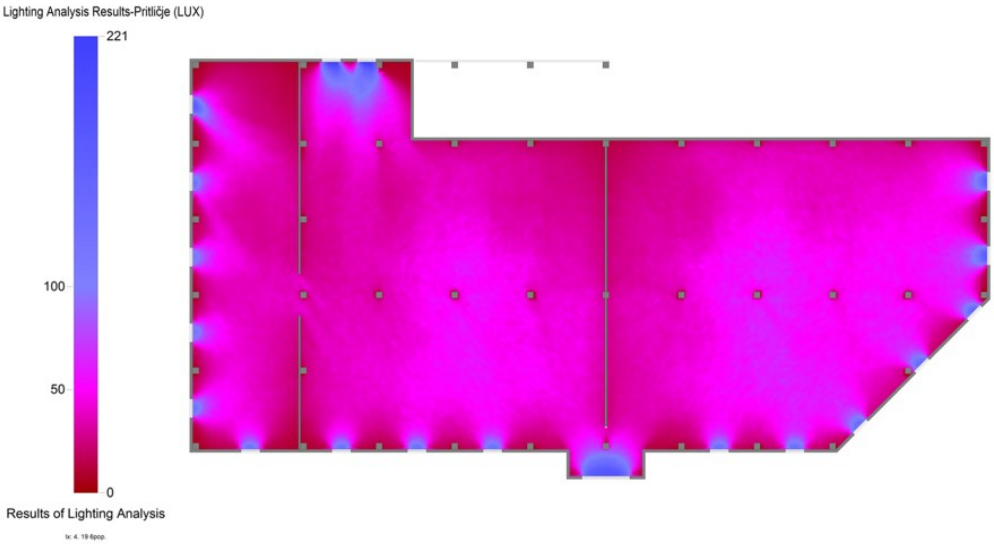
Slika A66: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 19.4. ob 09.00 – model E3.



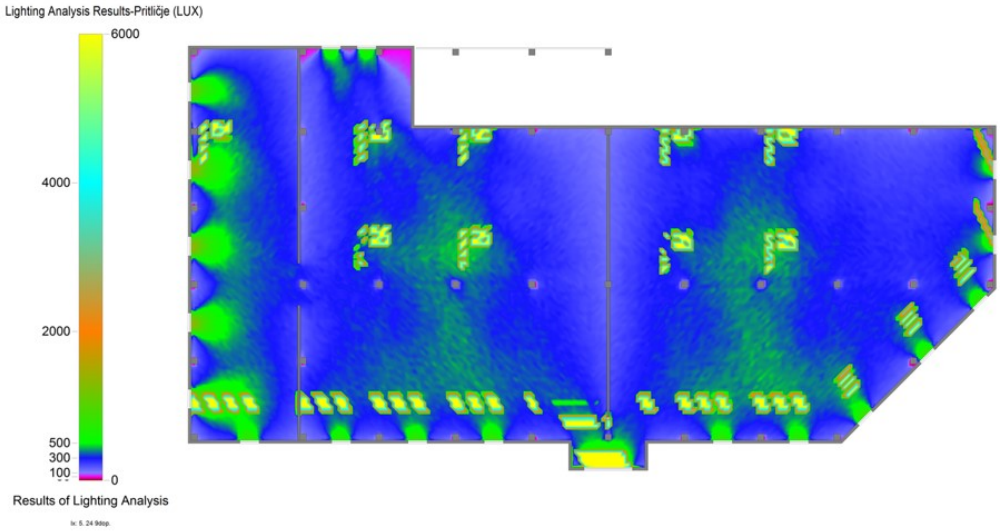
Slika A67: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 19.4. ob 12.00 – model E3.



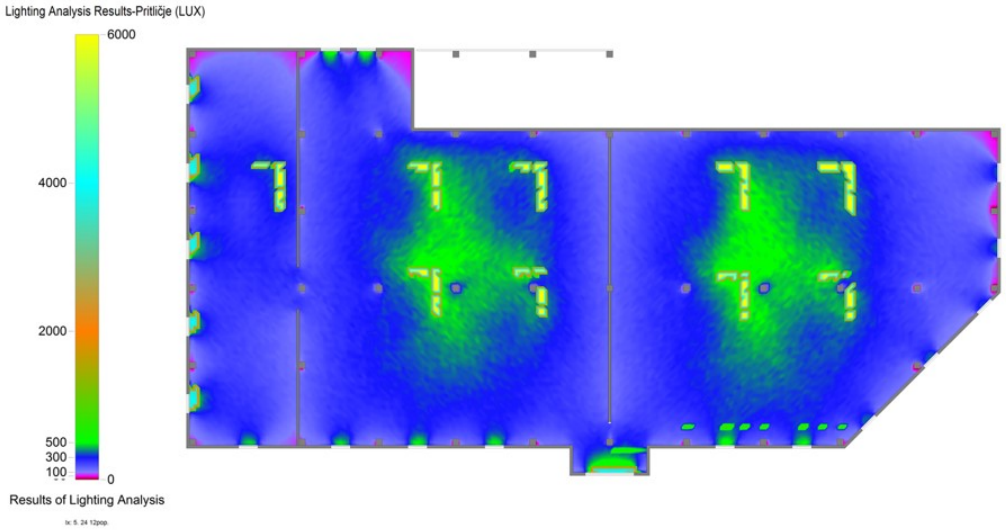
Slika A68: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 19.4. ob 15.00 – model E3.



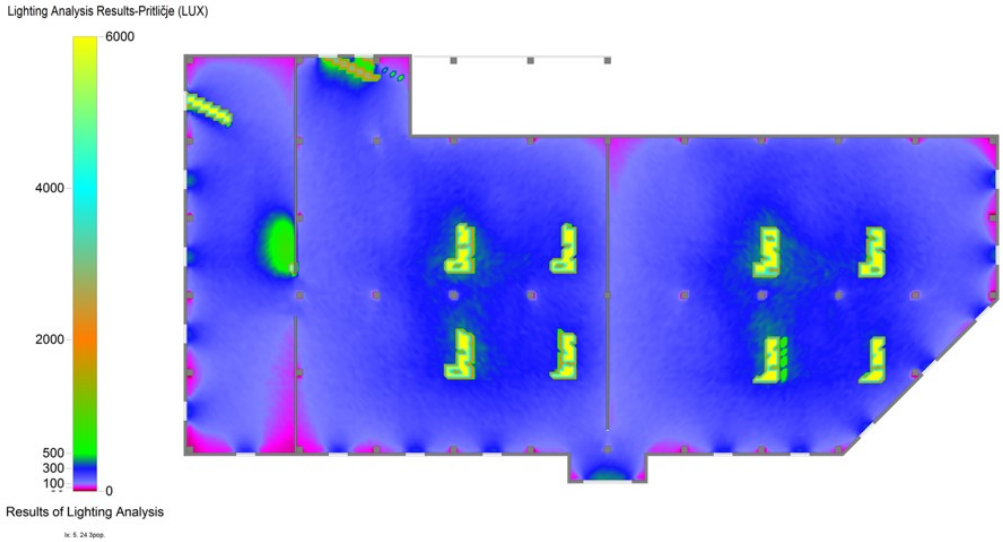
Slika A69: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 19.4. ob 18.00 – model E3.



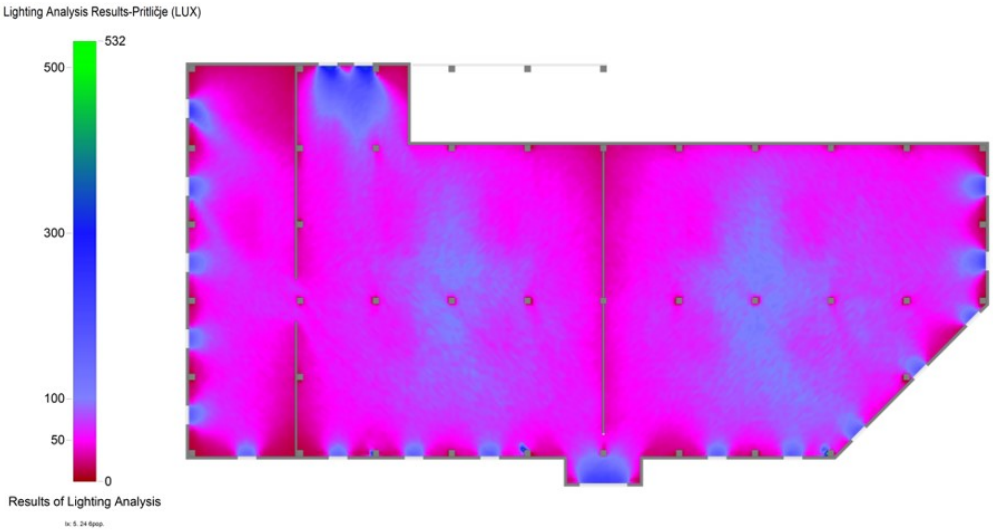
Slika A70: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 24.5. ob 09.00 – model E3.



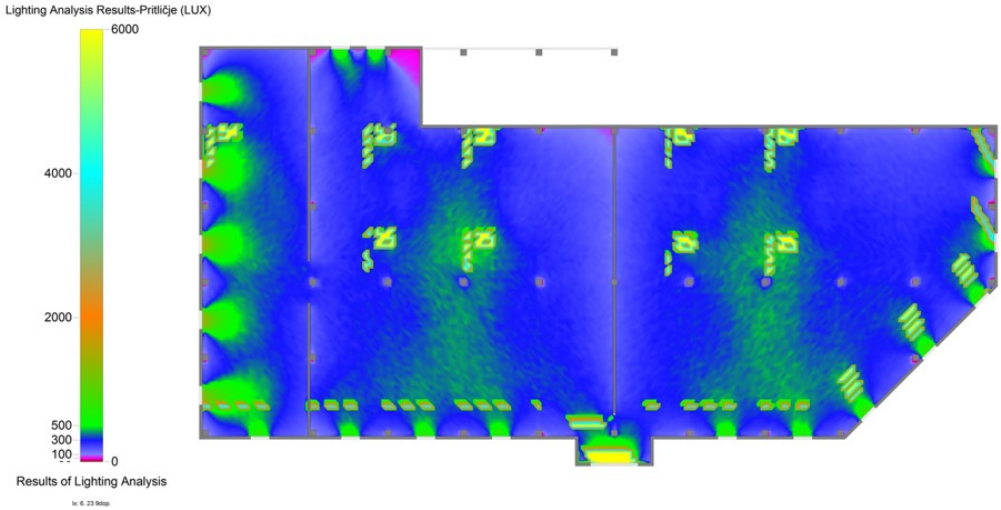
Slika A71: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 24.5. ob 12.00 – model E3.



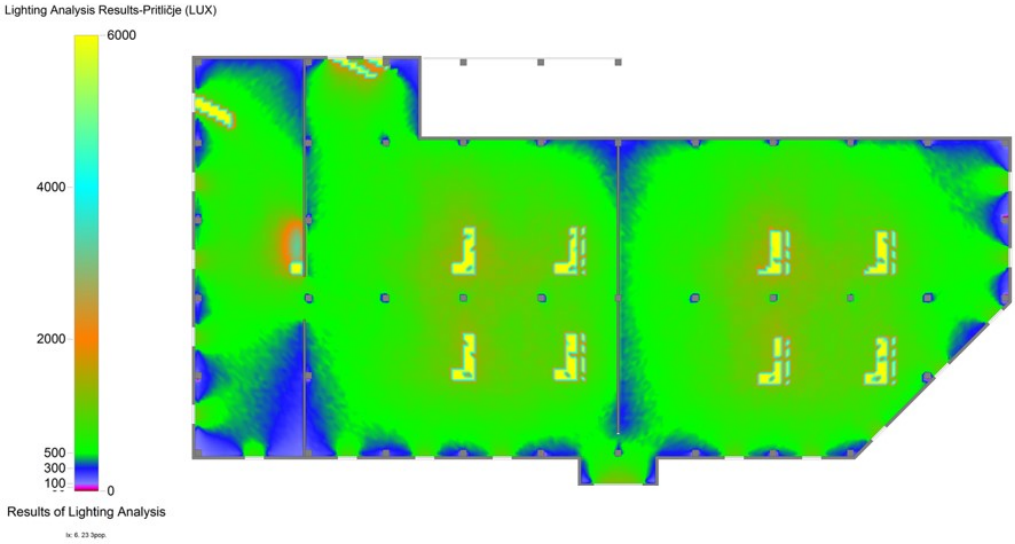
Slika A72: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 24.5. ob 15.00 – model E3.



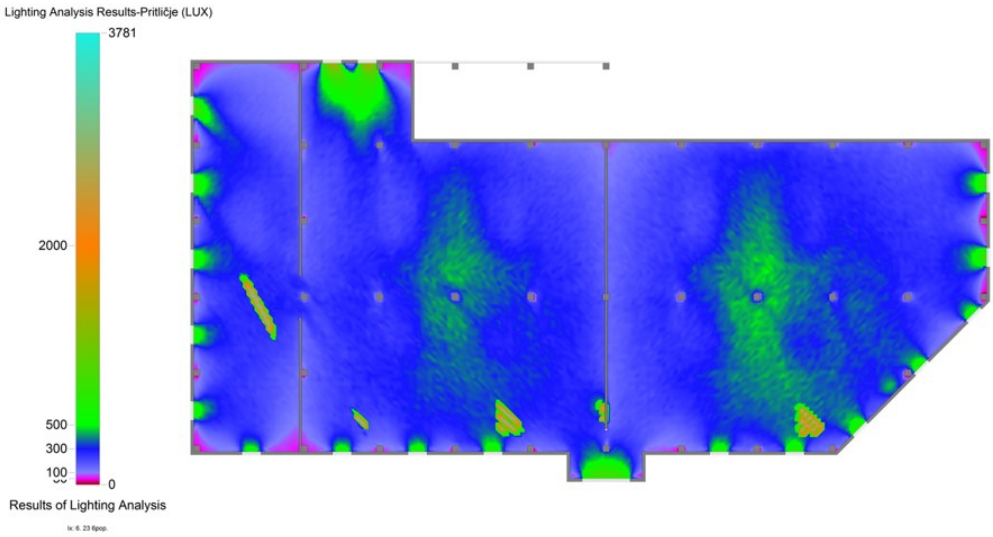
Slika A73: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 24.5. ob 18.00 – model E3.



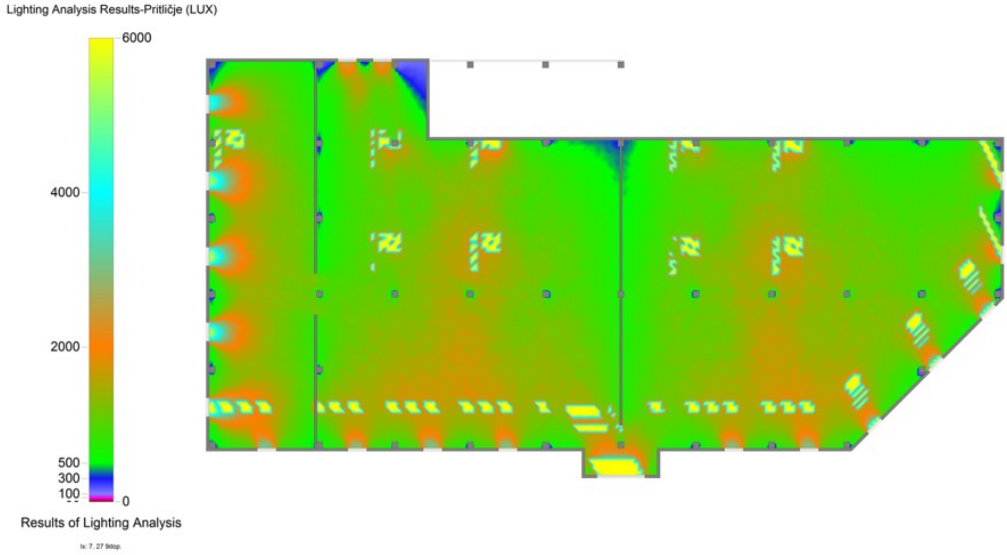
Slika A74: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 09.00 – model E3.



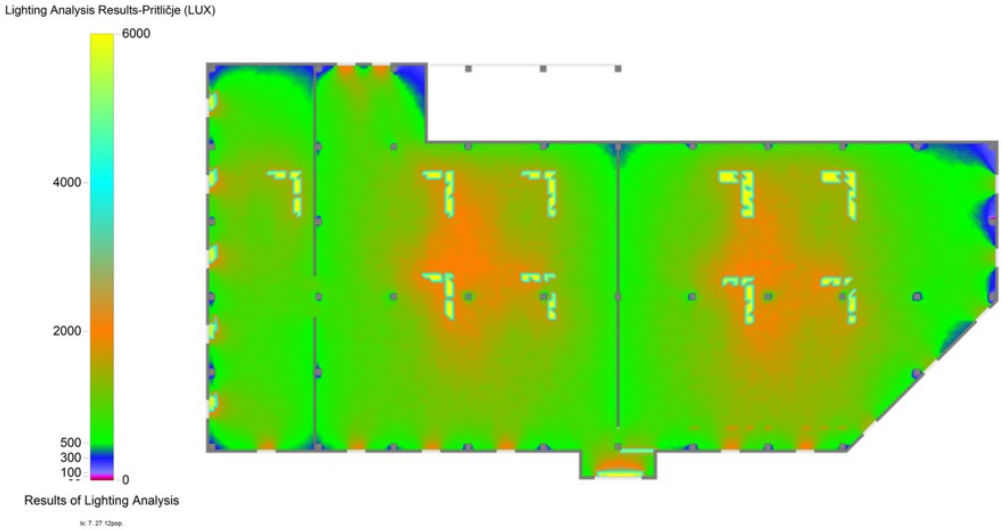
Slika A75: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 15.00 – model E3.



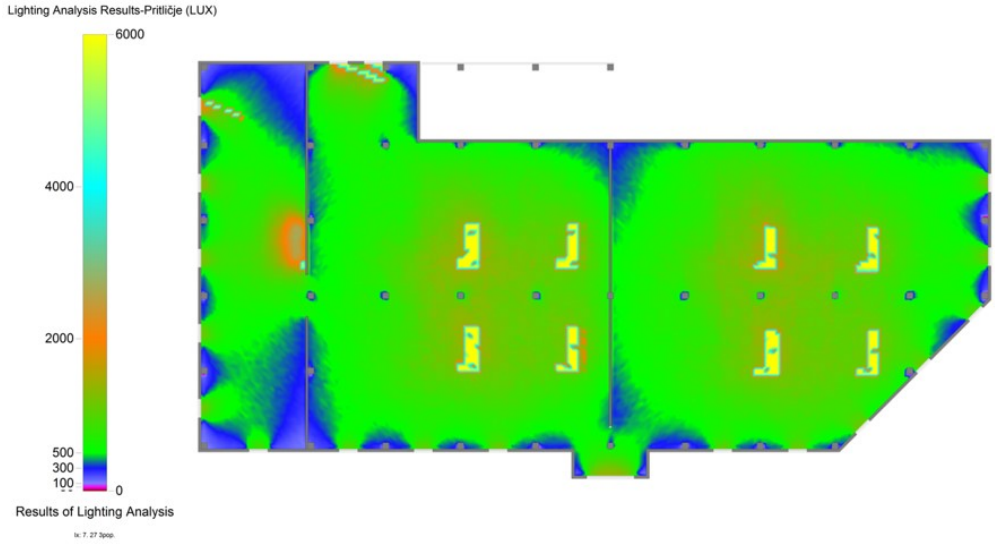
Slika A76: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 23.6. ob 18.00 – model E3.



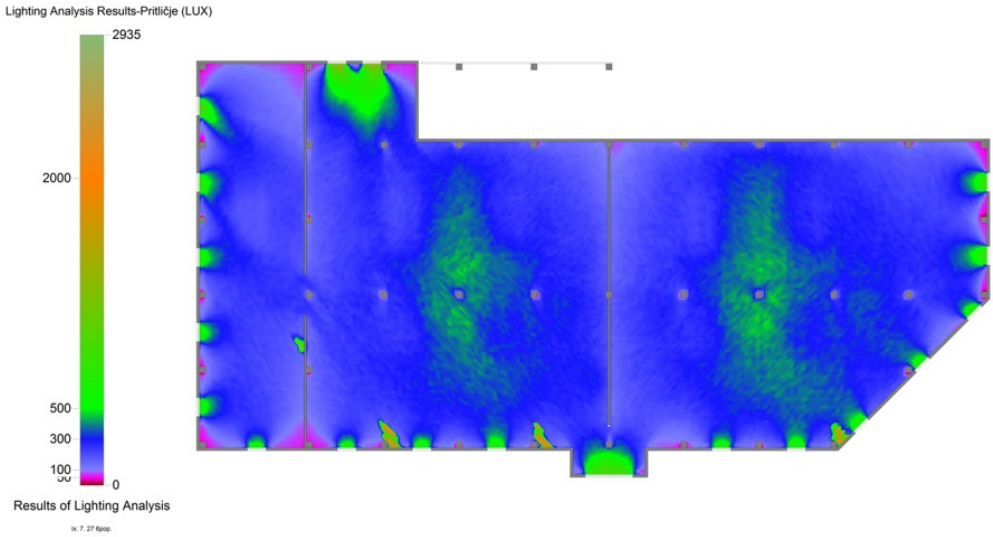
Slika A77: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 27.7. ob 09.00 – model E3.



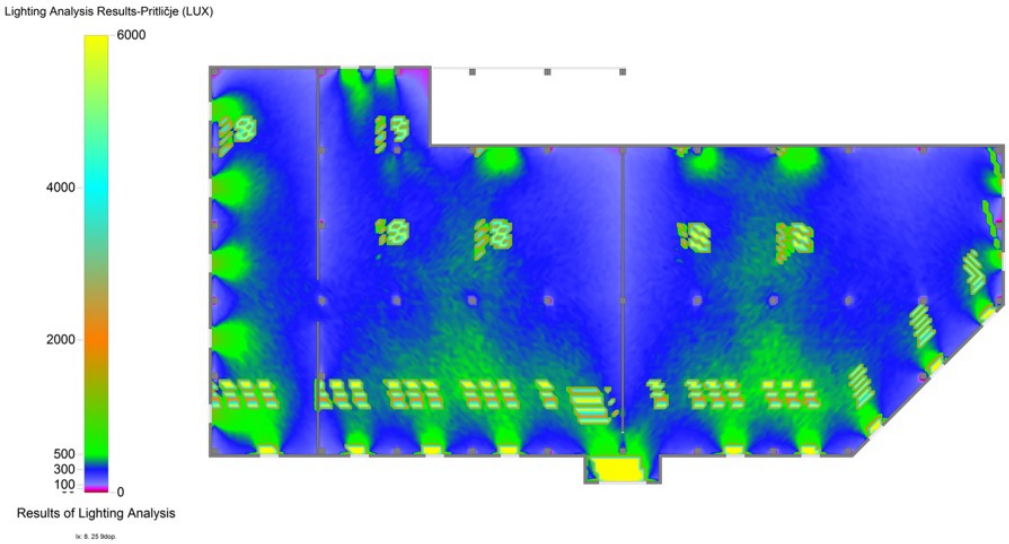
Slika A78: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 27.7. ob 12.00 – model E3.



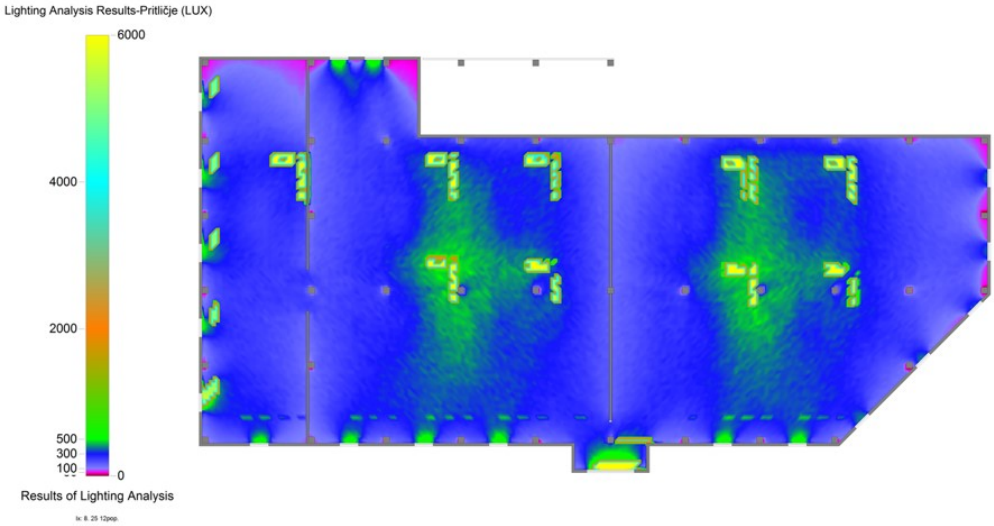
Slika A79: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 27.7. ob 15.00 – model E3.



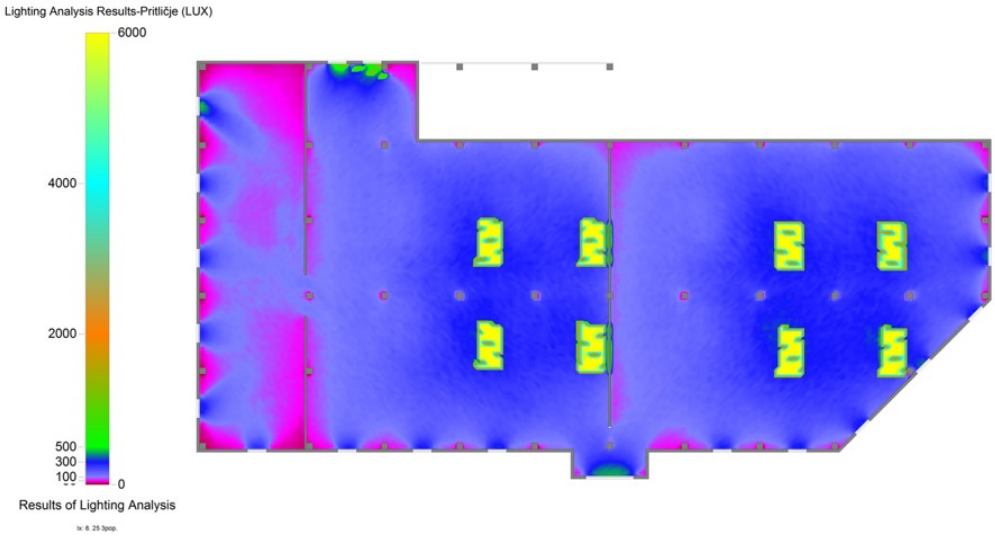
Slika A80: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 27.7. ob 18.00 – model E3.



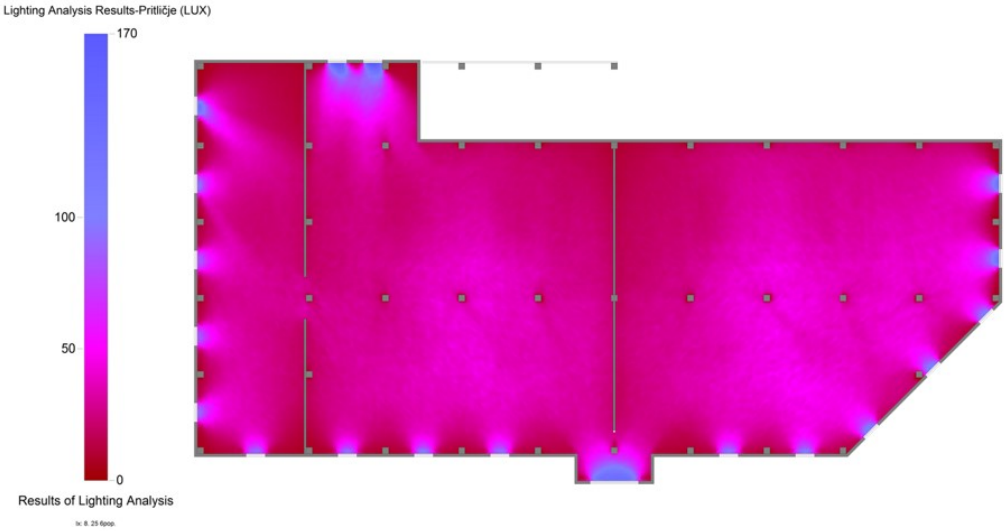
Slika A81: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 25.8. ob 09.00 – model E3.



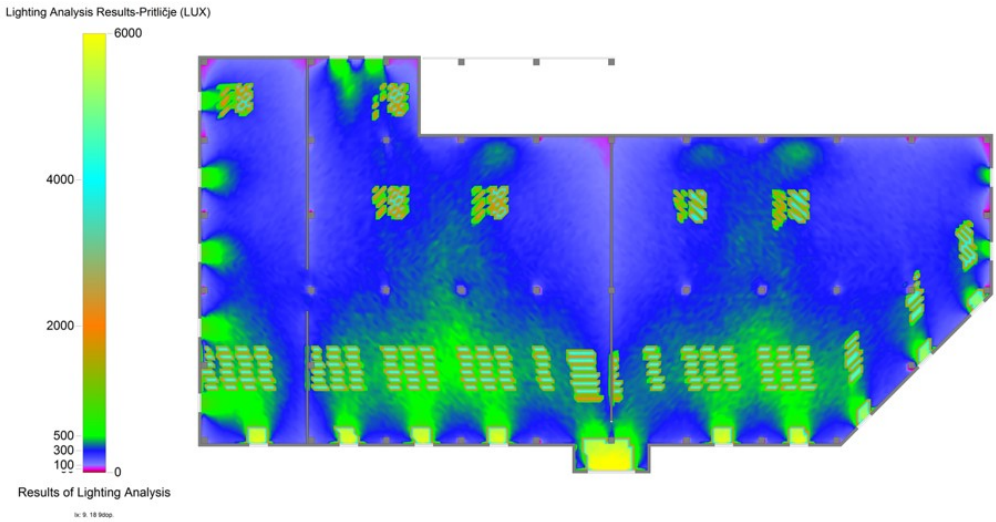
Slika A82: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 25.8. ob 12.00 – model E3.



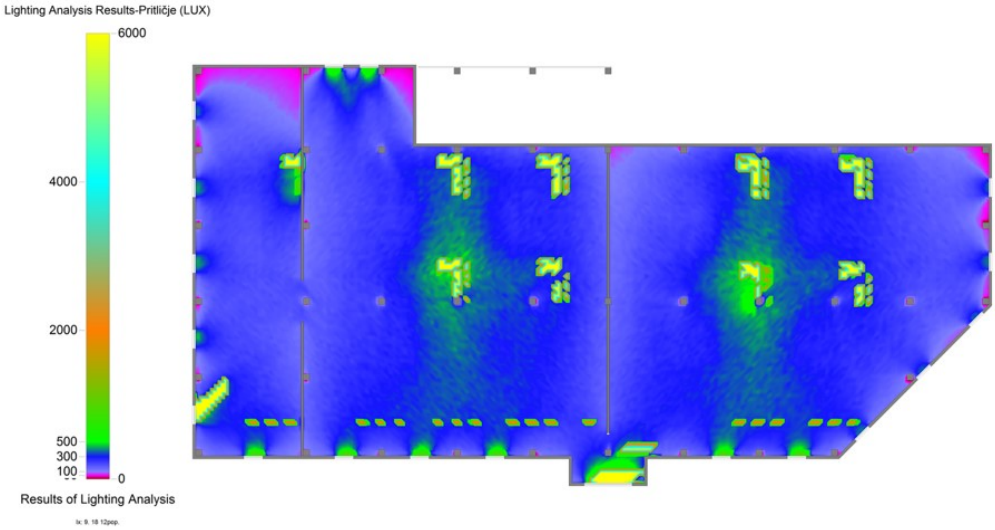
Slika A83: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 25.8. ob 15.00 – model E3.



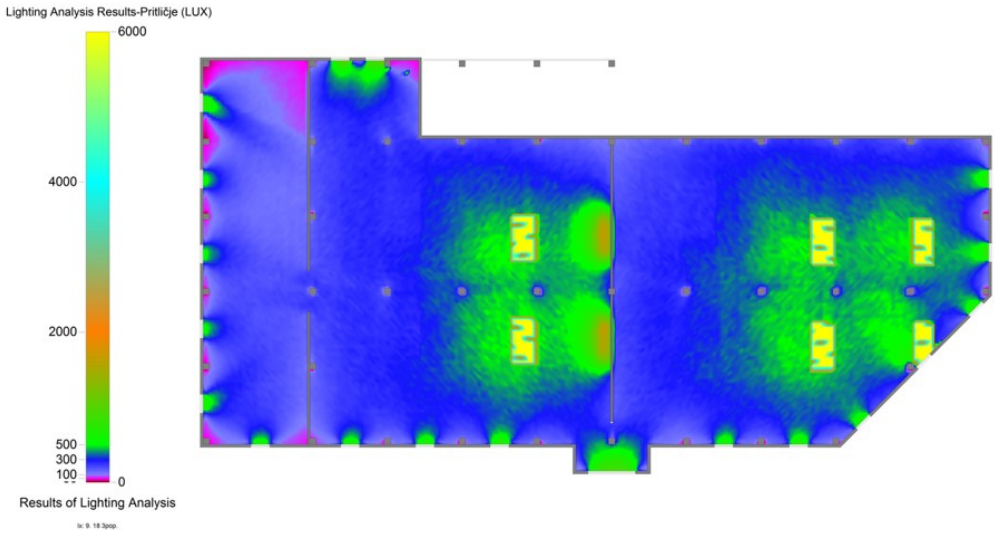
Slika A84: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 25.8. ob 18.00 – model E3.



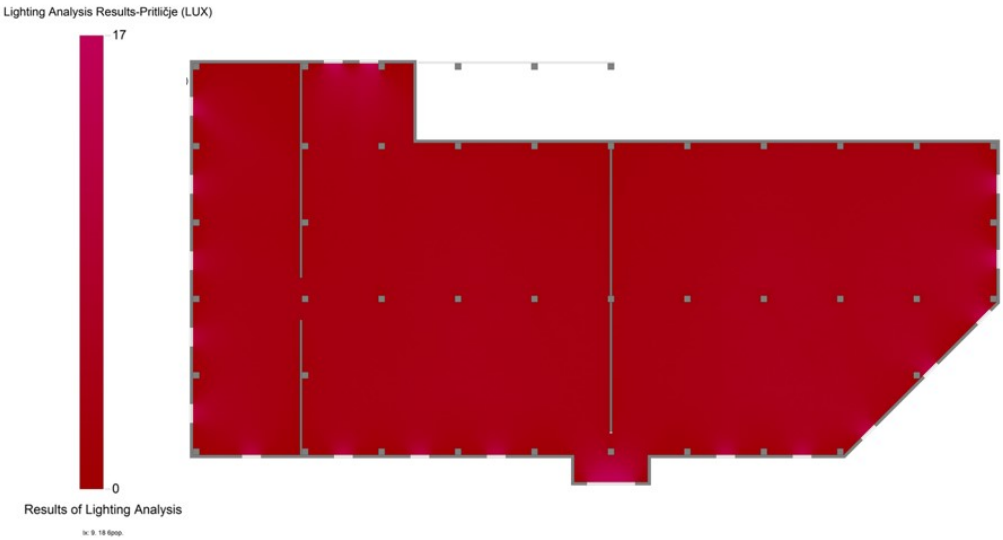
Slika A85: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 18.9. ob 09.00 – model E3.



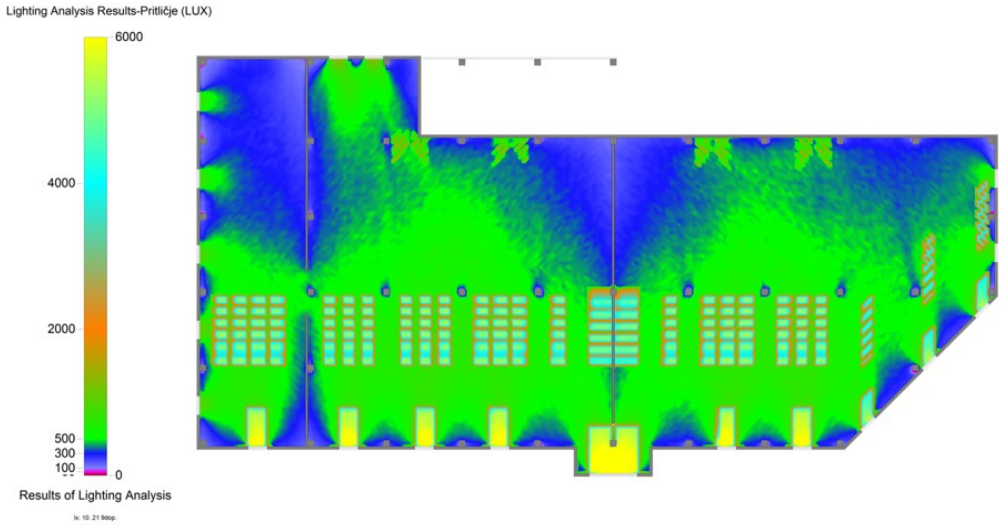
Slika A86: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 18.9. ob 12.00 – model E3.



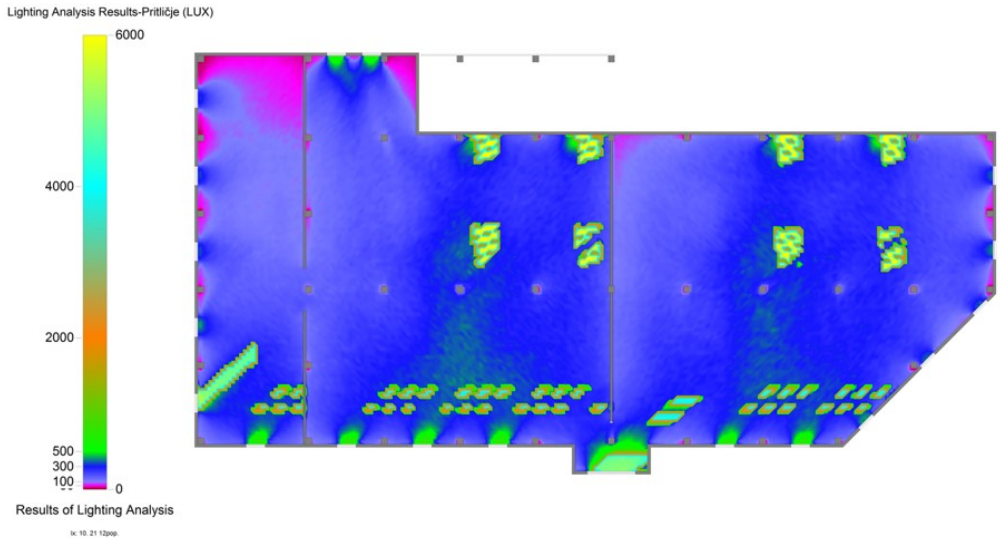
Slika A87: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 18.9. ob 15.00 – model E3.



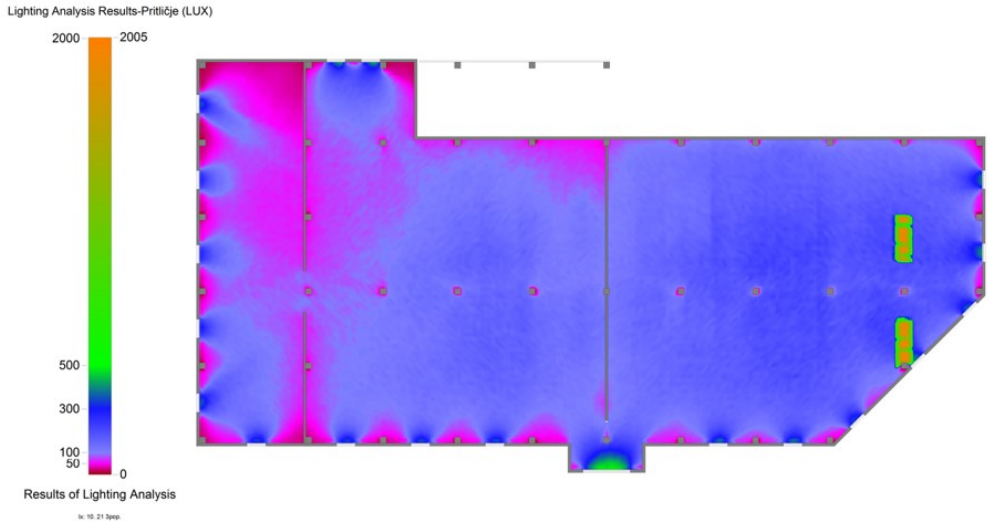
Slika A88: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 18.9. ob 18.00 – model E3.



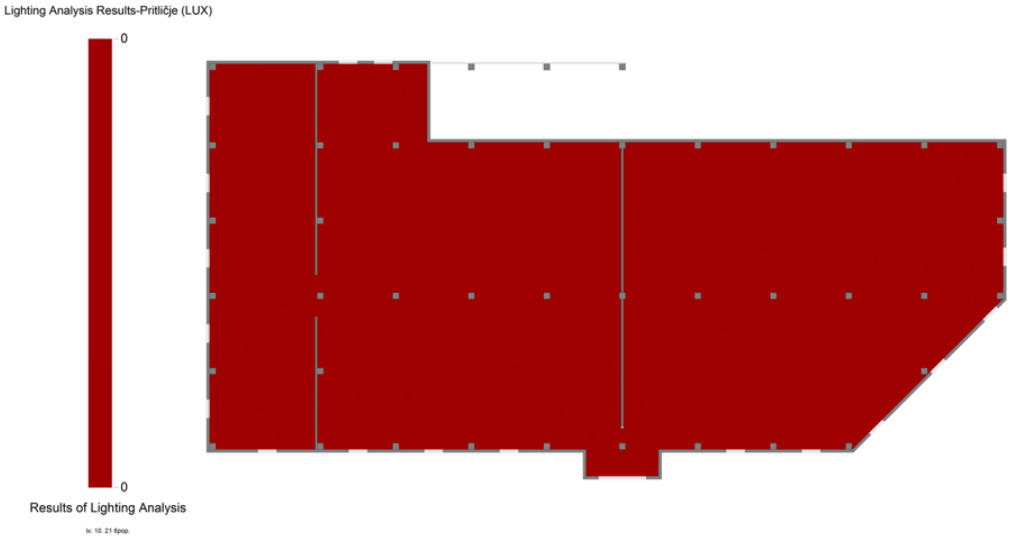
Slika A89: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.10. ob 09.00 – model E3.



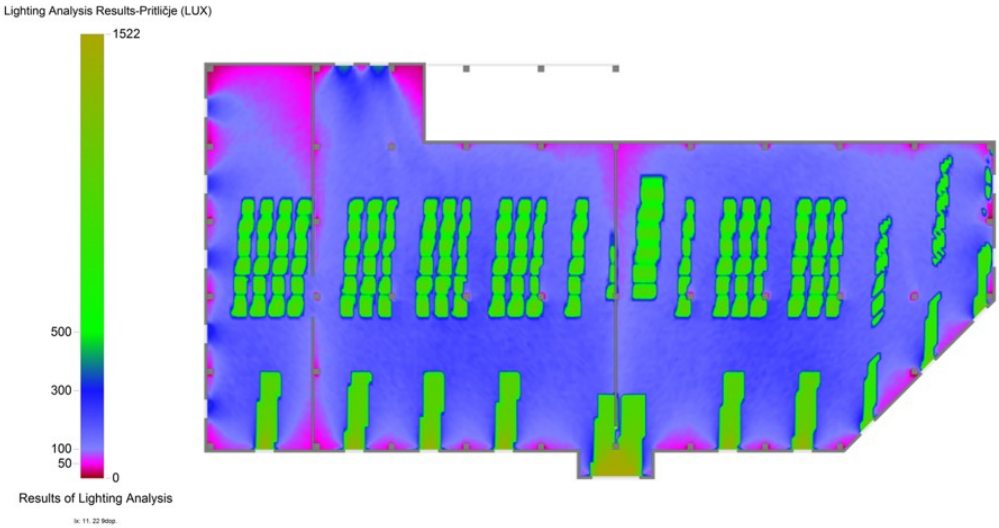
Slika A90: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.10. ob 12.00 – model E3.



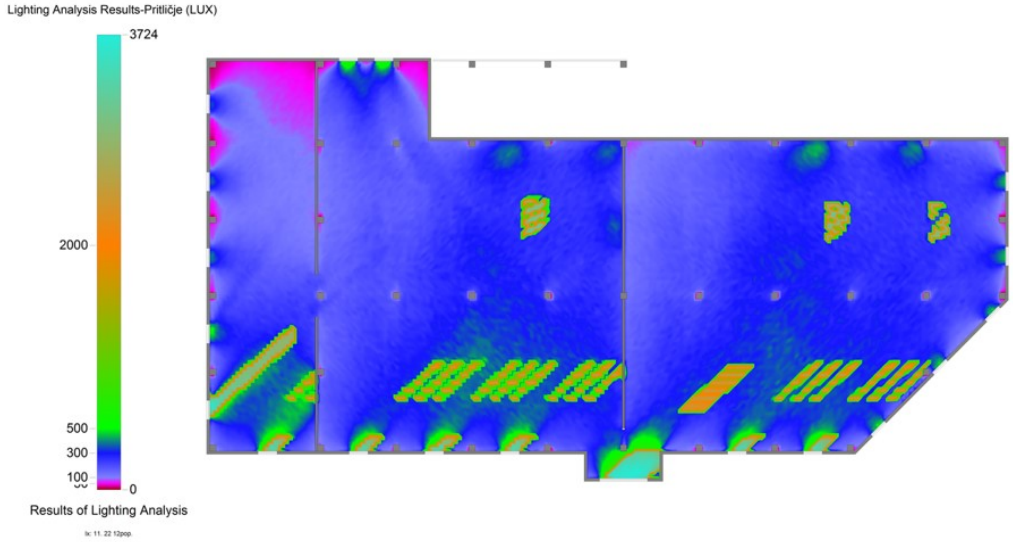
Slika A91: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.10. ob 15.00 – model E3.



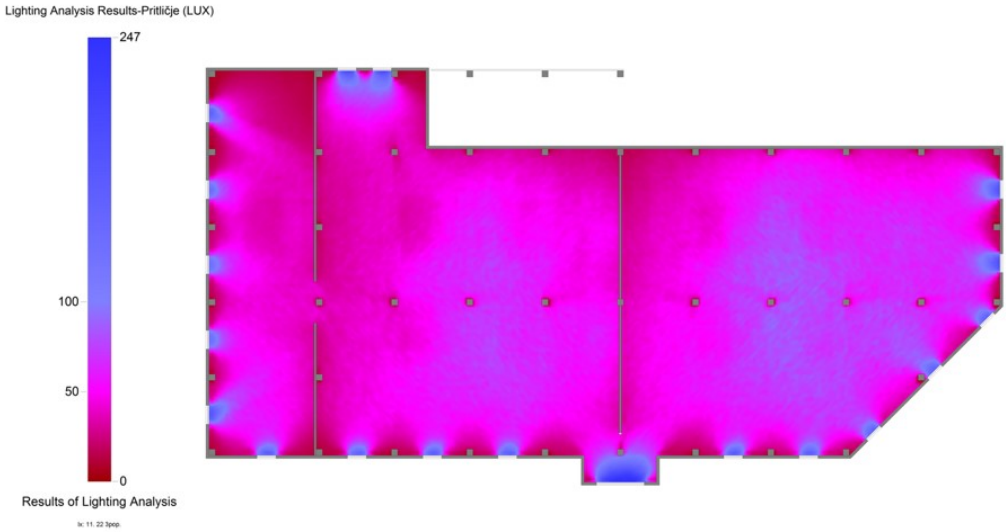
Slika A92: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.10. ob 18.00 – model E3.



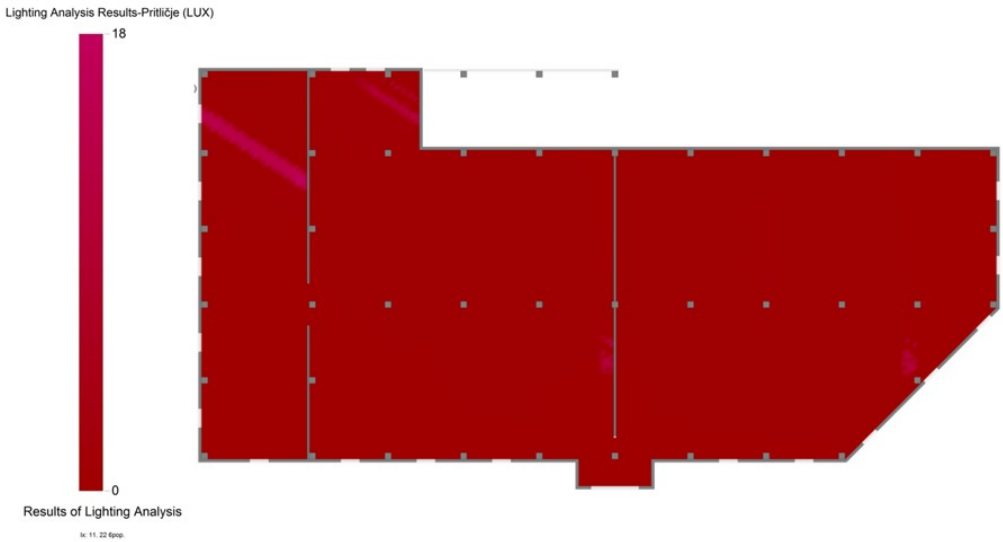
Slika A93: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.11. ob 09.00 – model E3.



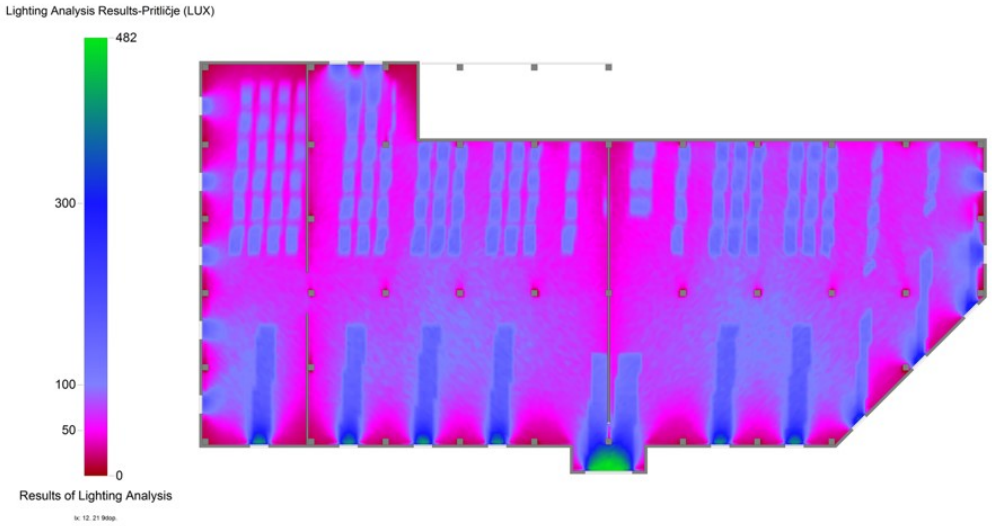
Slika A94: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.11. ob 12.00 – model E3.



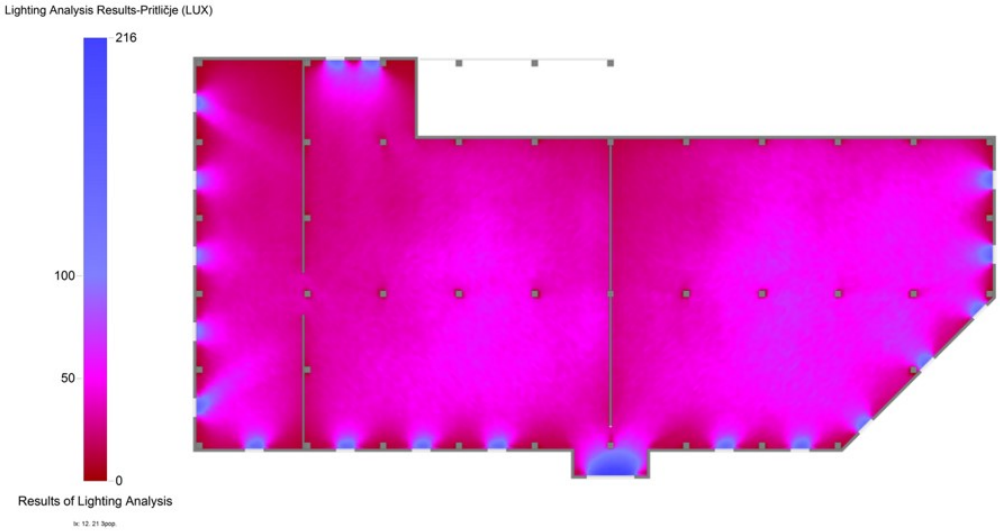
Slika A95: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.11. ob 15.00 – model E3.



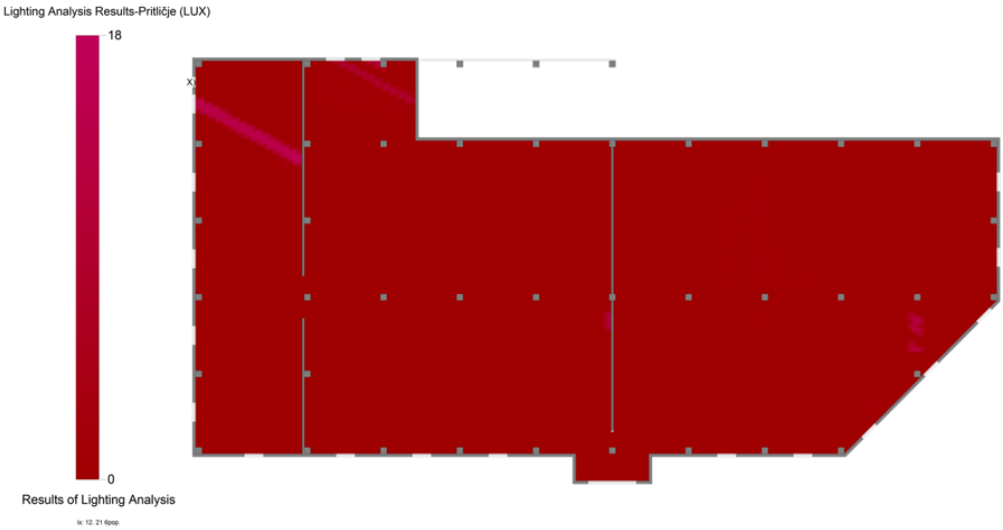
Slika A96: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 22.11. ob 18.00 – model E3.



Slika A97: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 09.00 – model E3.



Slika A98: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 15.00 – model E3.



Slika A99: Osvetljenost z dnevno svetlobo dne 21.12. ob 18.00 – model E3.