

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

V zbirki je izvorna različica izdajatelja.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

University
of Ljubljana
Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is a publisher's version PDF file.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Božiček, D. 2016. Zasnova visoko učinkovitega fasadnega ovoja obstoječega poslovnega nebotičnika. Magistrsko delo. = High-performance façade design in the case of an existing business skyscraper. Master Thesis. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 104 str. (mentor: Košir, M.).

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/6168/>

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 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:

DAVID BOŽIČEK

**ZASNOVA VISOKO UČINKOVITEGA FASADNEGA
OVOJA OBSTOJEČEGA POSLOVNEGA
NEBOTIČNIKA**

Magistrsko delo št.: 11/II.ST

**HIGH-PERFORMANCE FAÇADE DESIGN IN THE
CASE OF AN EXISTING BUSINESS SKYSCRAPER**

Graduation – Master Thesis No.: 11/II.ST

Mentor:

doc. dr. Mitja Košir

Ljubljana, 16. 12. 2016

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Spodaj podpisani študent David Božiček, vpisna številka 26420023, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Zasnova visoko učinkovitega fasadnega ovoja obstoječega poslovnega nebotičnika

IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*

- a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
- b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V: Ljubljani

Datum: 5. 12. 2016

Podpis študenta:

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM

UDK:	699.86:692.23(043.3)
Avtor:	David Božiček
Mentor:	doc. dr. Mitja Košir
Naslov:	Zasnova visoko učinkovitega fasadnega ovoja obstoječega poslovnega nebotičnika
Tip dokumenta:	Magistrsko delo
Obseg in oprema:	104 str., 31 pregl., 34 graf., 45 sl., 10 en., 3 pril.
Ključne besede:	poslovne stolpnice, fasadni ovoj, dinamična metoda izračuna, EnergyPlus, OpenStudio,

Izvleček

Poslovne stavbe spadajo v skupino nestanovanjskih stavb, kamor med drugim uvrščamo tudi bolnice, izobraževalne ustanove in nakupovalna središča. Dandanes so v urbanih področjih zelo pogoste visoke, večnadstropne stavbe, ki se jih najpogosteje označi kot stolpnice oz. nebotičnike. Kombinacija poslovne in visoke stavbe predstavlja zanimivo zmes, ki je posebna z vidika energijskih tokov v stavbi, kvalitete notranjega bivalnega okolja in simbolnega statusa stavbe, ki se pogosto izraža v estetskemu učinku njenega fasadnega ovoja. Stavbni ovoj – povezava med zunanjim in notranjim okoljem – ima pomemben vpliv na količino energije, potrebne za zagotavljanje ustreznega bivalnega okolja v stavbi. V magistrski nalogi s simulacijskim programom EnergyPlus analiziram, kako različni načrtovalski ukrepi na nivoju fasadnega ovoja vplivajo na porabo energije za ogrevanje in hlajenje obstoječe poslovne stolpnice. Izkazalo se je, da lahko s primerno zasnovanim fasadnim ovojem na omenjeni poslovni stolpnici dosežemo veliko zmanjšanje energije, potrebne za ogrevanje stavbe, medtem ko lahko potrebno energijo za hlajenje zmanjšamo le v manjši meri. V kolikor fasadnega ovoja z vidika porabe energije ne zasnujemo celostno, lahko potrebo po hlajenju krepko povečamo. Na podlagi rezultatov analiz porabe energije sem določil računski model z najprimernejšo zasnovo fasadnega ovoja z vidika energetske učinkovitosti stavbe. Na tem modelu sem nato preveril še vpliv prezračevanja s sistemom za vračanje toplote odpadnega zraka ter rezultate primerjal z modelom dejanskega stanja stavbe in s kazalniki energetske učinkovitosti nestanovanjskih stavb, ki jih predpisuje Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah (PURES). V primerjavi z izhodiščnim modelom se pri končnem modelu poraba energije, potrebne za hlajenje stavbe, zmanjša le za 1 %. Poraba letne potrebne toplotne energije se zmanjša za slabih 65 %, kar ne zadosti kriterijem PURES-a o maksimalni dovoljeni potrebni energije za ogrevanje stavbe. V primerjavi z mejno vrednostjo iz omenjenega pravilnika, stavba, kljub vsem ukrepom za zmanjšanje porabe energije, porabi za 49 % preveč toplotne energije!

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	699.86:692.23(043.3)
Author:	David Božiček
Supervisor:	Assist. Prof. Mitja Košir, Ph. D.
Title:	High-performance façade design in the case of an existing business skyscraper
Document type:	Master Thesis
Scope and tools:	104 p., 31 tab., 34 graph., 45 fig., 10 eq., 3 ann.
Keywords:	High-rise office, high-performance façade, dynamical method, EnergyPlus, OpenStudio

Abstract

Office buildings are a major part of the non-residential buildings stock. In the modern society, high multi-storey buildings – skyscrapers – are a common sight in urban areas. The combination of the skyscraper's building shape and the office building type gives us an interesting case, which is special from the perspective of the building's energy efficiency, quality of the indoor environment and the status symbol – often manifested in the façade's visual appearance – which the building represents. In the thesis I analyse the heating and cooling demand of an existing business skyscraper, based on different energy-efficient design measures on the building's façade. For the calculation of the building's energy performance I used the simulation program EnergyPlus. As it turned out, there is a huge potential in reducing the building's heating demand with the energy efficient design of the façade. The reduction of the building's cooling demand is on the other hand not so drastical. As shown in the results of the analysis, there is a great risk of increasing the building's cooling demand with the inappropriate façade design strategy. Based on the analysis results of different energy-efficient design measures on the building's façade, I chose the most optimal combination of measures from the perspective of the building's energy performance. On this model I added a heat recovery ventilation system (which decreased the heating demand even more) and compared the results with the model based on the existing building and the Slovenian energy performance codes (PURES). Compared to the model based on the existing building, the final model decreased the annual cooling demand for 1 %, and the annual heating demand for 65 %. Despite the huge decrease in the building's heating demand, the final model, with all the energy-efficiency measures, still consumes 49 % too much heating energy, according to the PUREs building performance codes!

ZAHVALA

Za vse napotke, strokovnost in odzivnost se zahvaljujem mentorju doc. dr. Mitji Koširju.

Zahvaljujem se tudi kontaktni osebi lastnika obravnavane stavbe, gospodu Patricju Božiču, za sodelovanje, prijaznost in posredovane informacije, brez katerih izdelava magistrske naloge ne bi bila možna.

Hvala gospodični Tini Keber, ker je mojo nalogo spravila v berljivo obliko.

Najbolj pa se zahvaljujem staršem, Ireni in Zorku, ki sta mi skozi vsa leta nudila vso potrebno varnost in podporo ter mi s tem omogočila brezskrben študij. Hvala!

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE	I
IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
1 UVOD	1
1.1 Cilji in hipoteze	1
1.2 Zasnova naloge.....	2
2 POSLOVNE STOLPNICE	4
2.1 Kaj so poslovne stolpnice?	4
2.2 Zgodovina razvoja (poslovnih) stolpnice – kratek pregled s poudarkom na porabi energije	4
2.2.1 Prva energetska generacija: 1885–1916.....	5
2.2.2 Druga energetska generacija: 1916–1951	5
2.2.3 Tretja energetska generacija: 1951–1973.....	6
2.2.4 Četrta energetska generacija: 1973–danes	7
2.2.5 Peta energetska generacija: 1997–danes	8
2.3 Stavbni fond poslovnih stavb v Evropi in Sloveniji	9
2.4 Poraba energije v poslovnih stavbah	10
2.5 Visoko učinkoviti fasadni ovoj na poslovnih stolpnica	12
2.5.1 Kaj sploh je »visoko učinkovit fasadni ovoj«?	12
2.5.2 Dvojne steklene fasade.....	13
2.5.2.1 Splošno	13
2.5.2.2 Kompleksnost termodinamičnih procesov v dvojnih steklenih fasadah – simulacijske omejitve	15
2.5.3 Primeri dobre in slabe prakse visoko učinkovitih fasadnih ovojev	16
2.5.3.1 New York Time's Building, New York, ZDA, 2007	16
2.5.3.2 Post Tower, Bonn, Nemčija, 2002	18
2.5.3.3 Occidental Chemical Center (Hooker Building), Niagara Falls, NY, ZDA, 1980.....	20
3 ZAKONODAJA – Poraba energije v stavbah	22
3.1 Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah	22
3.2 Tehnična smernica za graditev TSG-1-004 Učinkovita raba energije.....	23
3.3 Standard SIST EN ISO 13790:2008 Energijske lastnosti stavb - Račun rabe energije za ogrevanje in hlajenje prostorov	24
3.3.1 Splošno.....	24
3.3.2 Vpliv uporabe različnih računskih metod po standardu SIST EN ISO 13790:2008	24
4 PREDSTAVITEV UPORABLJENIH PROGRAMSKIH ORODIJ	26
4.1 EnergyPlus 8.5.0	27
4.2 OpenStudio 1.9.0.....	29
4.3 SketchUp Make	30
4.4 Window 7.4	30
4.5 Climate Consultant 6.0	30

4.6. U-Wert	31
5 PREDSTAVITEV OBRAVNAVANE STAVBE	32
5.1 Predstavitev obravnavane stavbe	32
5.1.1 Splošni podatki o lokaciji, nosilni konstrukciji in geometriji stavbe	32
5.2 Klimatološke lastnosti lokacije stavbe	37
5.2.1 Podnebje	37
5.2.2 Mikrolokacija stavbe.....	38
5.3 Merjena poraba energije.....	38
5.3.1 Toplotna energija	38
5.3.2 Električna energija	40
5.3.3 Primerjava med porabo toplotne in električne energije	41
5.4 Mejne vrednosti po PURES-u za obravnavano stavbo.....	42
6 METODA DELA.....	43
6.1 3-D model stavbe	43
6.1.1 Pritličje in kleti	43
6.1.2 Vmesne etaže	45
6.1.3 Zgornje etaže	46
6.2 Programske nastavitve – vhodni podatki	46
6.2.1 Lokacija	47
6.2.2 Urniki.....	47
6.2.3 Konstrukcijski sklopi, elementi in materiali	49
6.2.4 Notranji viri toplote (ljudje, razsvetljava in oprema).....	50
6.2.5 Prezračevanje in infiltracija zunanjega zraka.....	50
6.2.6 Toplotne cone	51
6.2.7 Senčenje objekta	51
6.2.8 Simulacijske nastavitve.....	52
6.2.8.1 Časovni korak.....	52
6.2.8.2 Solarna distribucija.....	53
6.2.8.3 Algoritem konvekcijskega prenosa toplote	53
6.2.8.4 Algoritem kondukcijskega prenosa toplote	53
6.2.9 Programske omejitve in poenostavitve pri zasnovi modela	54
6.2.9.1 Toplotni mostovi	54
6.2.9.2 Senčila	54
6.2.9.3 Robne razmere površin.....	54
6.2.9.4 Prezračevanje z rekuperacijo toplote odpadnega zraka	55
7 ANALIZA VPLIVA RAZLIČNIH ZASNOV FASADNEGA OVOJA STAVBE NA PORABO ENERGIJE V STOLPNICI.....	56
7.1 Varianta 0 : Dejansko stanje	57
7.1.1 Splošen opis računskega modela	57
7.1.1.1 Zasnova netransparentnega in transparentnega fasadnega ovoja – Varianta 0	58
7.1.1.2 Senčenje transparentnega dela ovoja – Varianta 0	59
7.1.1.3 Infiltracija zunanjega zraka – Varianta 0.....	60
7.1.1.4 Notranji viri ljudi, razsvetljave in elektronske opreme.....	60
7.1.2 Rezultati simulacije – Varianta 0.....	61
7.2 Varianta 1: Zmanjšanje toplotne prehodnosti ovoja stavbe	62
7.2.1 Splošen opis računskega modela – Varianta 1	62
7.2.1.1 Zasnova netransparentnega in transparentnega fasadnega ovoja – Varianta 1	62
7.2.1.1.1 Izbira najprimernejših oken z vidika porabe energije etaž nad pritličjem.....	64
7.2.1.2 Infiltracija zunanjega zraka – Varianta 1.....	66
7.2.2 Rezultati simulacije – Varianta 1	66
7.3 Varianta 2: TI ovoja stavbe + nočno hlajenje.....	67
7.3.1 Splošen opis računskega modela – Varianta 2.....	67

7.3.2 Rezultati simulacije – Varianta 2	68
7.4 Varianta 3: TI ovoja stavbe + nočno hlajenje + optimalna kontrola zunanjih žaluzij	69
7.4.1 Splošen opis računskega modela – Varianta 3	69
7.4.2 Rezultati simulacije – Varianta 3	70
7.5 Varianta 4: ZUNANJA FIKSNA SENČILA.....	71
7.5.1 Primerjava rezultatov simulacij za različna fiksna senčila na modelu 7. etaže	73
7.5.2. Splošen opis računskega modela stavbe in rezultati analiz – Varianta 4	75
8 PRIMERJAVA REZULTATOV RAZLIČNIH ZASNOV FASADNEGA OVOJA.....	77
8.1 Koeficient specifičnih transmisijskih toplotnih izgub	77
8.2 Potrebna energija za ogrevanje stavbe.....	77
8.3 Potrebna energija za hlajenje stavbe.....	79
8.4 Skupna potrebna energija za obratovanje stavbe.....	79
8.5 Primerjava simulirane in merjene vrednosti porabe energije za obravnavano stavbo	81
9 PREDLOG KONČNE VARIANTE.....	84
9.1 Mehansko prezračevanje z rekuperacijo toplote odpadnega zraka	84
9.1.1 Rekuperacija zraka s 65% učinkovitostjo	85
9.1.2 Rekuperacija zraka s 100% učinkovitostjo	87
9.1.3 Komentar rezultatov modelov z rekuperacijo zraka – ali je PURES primeren za visoke poslovne stavbe?	89
9.2 Končna varianta.....	91
9.2.1 Splošen opis računskega modela.....	91
10 PRIMERJAVA REZULTATOV IZHODIŠČNE IN KONČNE VARIANTE.....	92
10.1 Potreba po ogrevanju računskih modelov stavbe	92
10.2 Potreba po hlajenju računskih modelov stavbe	93
10.3 Potreba po celotni energiji, potrebni za obratovanje računskih modelov stavbe	94
10.4 Primerjava toplotnih dobitkov in izgub računskih modelov stavbe.....	96
11 ZAKLJUČKI	98
VIRI.....	100

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Delitev poslovnih in nestanovanjskih stavb glede na velikost uporabne tlorisne površine v nekaterih državah EU. Podatki so podani glede na delež tlorisne površine in delež števila stavb v odstotkih [%], ki pripada posamezni velikostni skupini [prirejeno po: 22].	10
Preglednica 2: Podatki o obravnavani stavbi.	32
Preglednica 3: Vremenski podatki za Ljubljano [71].	37
Preglednica 4: Strošek in preračunana poraba toplotne energije po mesecih v letu 2014.	39
Preglednica 5: Mesečna in letna poraba električne energije v letih 2014 in 2015.	40
Preglednica 6: Porabe energije glede na energent in skupna poraba energije v stavbi.	41
Preglednica 7: Vhodni podatki ter mejni vrednosti H'_{Tmax} in Q_{NH} .	42
Preglednica 8: Primerjava priporočenih vrednosti svežega zraka za pisarne med slovenskim pravilnikom in standardom ASHRAE 189.1-2009.	50
Preglednica 9: Pregled pomembnejših lastnosti računskega modela dejanskega stanja.	57
Preglednica 10: Varianta 0: Dejansko stanje – toplotna prehodnost in površina konstrukcijskih sklopov nad kletnimi prostori.	58
Preglednica 11: Osnovne karakteristike oken – Dejansko stanje.	58
Preglednica 12: Vrednosti moči notranjih virov ljudi, luči in elektronske opreme za nekatere prostore v stavbi.	60
Preglednica 13: Rezultati simulacije – Varianta 0.	61
Preglednica 14: Varianta 1: Pregled pomembnejših lastnosti računskega modela.	62
Preglednica 15: Lastnosti analiziranih oken na podlagi rezultatov v programu Window 7.4.	64
Preglednica 16: Primerjava razlike v % pri porabi koristne energije računskega modela 7. nadstropja glede na model dejanskega stanja in model dejanskega stanja s toplotno izoliranim ovojem.	65
Preglednica 17: Varianta 1 – toplotna prehodnost in površina konstrukcijskih sklopov nad kletnimi prostori.	66
Preglednica 18: Rezultati simulacije – Varianta 1.	67
Preglednica 19: Varianta 2: Pregled pomembnejših lastnosti računskega modela.	68
Preglednica 20: Rezultati simulacije – Varianta 2.	68
Preglednica 21: Varianta 3: Pregled pomembnejših lastnosti računskega modela.	69
Preglednica 22: Rezultati simulacije – Varianta 3.	70

Preglednica 23: Rezultati simulacij modela 7. nadstropja stavbe z različnimi fiksnimi senčili in kontrolo notranjega roloja.....	74
Preglednica 24: : Nekatere lastnosti računskega modela – fiksna senčila.....	75
Preglednica 25: Rezultati simulacije – Varianta 5.....	75
Preglednica 26: Primerjava med merjeno in simulirano porabo energije.....	81
Preglednica 27: Rezultati simulacije – Varianta 4 + rekuperacija 65%.	85
Preglednica 28: Rezultati simulacije – Varianta 4 + rekuperacija 100%.	87
Preglednica 29: Primerjava rezultatov za varianto 4+65% rekuperacija z mejnimi vrednostmi po avstrijski in slovenski smernici.....	90
Preglednica 30: Končna varianta – Nekatere lastnosti računskega modela.....	91
Preglednica 31: Mesečna in letna poraba energije za posamezne procese ter skupna energija za obratovanje stavbe.....	92

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Naraščanje porabe elektrike in toplote za obratovanje stolpnic med leti 1950 in 1969. Študija 86 stolpnic, zgrajenih na Manhattnu (prirejeno po:[15]).	6
Grafikon 2: Odstotkovni deleži porabe energije v poslovni stavbi v toplemu podnebju (prilagojeno po:[25]).	11
Grafikon 3: Odstotkovni deleži porabe energije v poslovni stavbi v hladnem podnebju (prilagojeno po:[24]).	11
Grafikon 4: Stolpčni prikaz merjene porabe toplotne energije po mesecih v letu 2014.	39
Grafikon 5: Primerjava merjene mesečne porabe elektrike stavbe za leti 2014 in 2015.	40
Grafikon 6: Delež letne porabe energije v stavbi glede na energent.	41
Grafikon 7: Primerjava porabe merjene toplotne in električne energije stavbe po mesecih.	42
Grafikon 8: Primerjava povprečnih mesečnih temperatur med vremensko datoteko .epw in podatki, pridobljenimi iz ARSO.	47
Grafikon 9: Odstotkovni deleži porabljene koristne energije za računski model dejanskega stanja. ...	61
Grafikon 10: Odstotkovni deleži porabljene koristne energije za računski model Varianta 1.	67
Grafikon 11: Odstotkovni deleži porabljene koristne energije za računski model Varianta 2.	68
Grafikon 12: Odstotkovni deleži porabljene koristne energije za računski model Varianta 3.	70
Grafikon 13: Odstotkovni deleži porabljene koristne energije za računski model Varianta 4.	75
Grafikon 14: Primerjava koeficientov specifičnih transmisijskih izgub.	77
Grafikon 15: Primerjava potrebne koristne energije za ogrevanje stavbe.	78
Grafikon 16: Primerjava potrebne koristne energije za ogrevanje glede na kondicionirano prostornino stavbe.	78
Grafikon 17: Primerjava potrebne koristne energije za hlajenje stavbe.	79
Grafikon 18: Primerjava skupne potrebne energije za obratovanje stavbe.	80
Grafikon 19: Primerjava skupne potrebne energije za obratovanje stavbe – razčlenitev na področja.	80
Grafikon 20: Primerjava odstotkovnih deležev skupne potrebne energije različnih računskih modelov.	81
Grafikon 21: Primerjava izmerjene in simulirane mesečne porabe toplotne energije.	82
Grafikon 22: Primerjava izmerjene in simulirane mesečne porabe električne energije.	82
Grafikon 23: Odstotkovni deleži porabljene koristne energije za računski model variante 4 s 65% učinkovitostjo rekuperacije zraka.	85
Grafikon 24: Primerjava potrebne toplote glede na kondicionirano prostornino stavbe.	85

Grafikon 25: Primerjava skupne potrebne energije Variante 4 brez in z rekuperacijo (65% učinkovitost.)	86
Grafikon 26: Odstotkovni deleži porabljene koristne energije za računski model variante 4 s 100% učinkovitostjo rekuperacije zraka.	87
Grafikon 27: Primerjava potrebne toplote glede na kondicionirano prostornino stavbe.	88
Grafikon 28: Primerjava skupne potrebne energije variante 4 brez in z rekuperacijo (65% in 100% učinkovitost).	88
Grafikon 29: Primerjava mesečnih vrednosti potrebne energije za ogrevanje in pripadajočih mesečnih prihrankov med izhodiščno in končno varianto.....	93
Grafikon 30: Primerjava mesečnih vrednosti potrebne energije za ogrevanje med izhodiščno in končno varianto.	93
Grafikon 31: Primerjava mesečnih vrednosti potrebne energije za obratovanje stavbe in pripadajočih mesečnih prihrankov med izhodiščno in končno varianto.	94
Grafikon 32: Razmerja mesečne porabe energije računskega modela dejanskega stanja glede na različne procesne v stavbi.	95
Grafikon 33: Razmerja mesečne porabe energije računskega modela končnega stanja glede na različne procesne v stavbi.	95
Grafikon 34: Bilanca senzibilne energije v stavbi pri računskemu modelu dejanskega in končnega modela. Za pomen oznak glej opombo pod črto*	96

KAZALO SLIK

Slika 1: Vpliv novega urbanističnega zakona (New York Zoning Law) iz leta 1916 na obliko stolpnic [13].	5
Slika 2: Tour Fiat in Tour Elf, Pariz. Levo: slika začetnega predloga zasnove stolpnic [16]. Desno: končno izvedeno stanje s spremenjeno zasnovo stolpnice Tour Elf [17].	7
Slika 3: Prikaz števila zgrajenih t. i. »temnih« stolpnic v Severni Ameriki v obdobju od 1950 do 2005 [13].	7
Slika 4: Barhain World Trade Center, Manama [21].	8
Slika 5: Commerzbank Tower, Frankfurt, 1997. Na levi sliki je načrt prereza stavbe, ki prikazuje centralni atrij, na desni pa pogled na izvedeno stavbo [20].	8
Slika 6: Stavbni fond EU27, Švice in Norveške [22].	9
Slika 7: Deleži uporabne površine nestanovanjskih stab (po CC-SI klasifikaciji) v Sloveniji [23].	9
Slika 8: Poraba električne in druge energije v nestanovanjskih stavbah v obdobju od 1990 do 2009 v EU27, Švici in Norveški [22].	10
Slika 9: Deleži porabe energije glede na vrsto nestanovanjske stavbe [22].	11
Slika 10: Delitev dvojnih fasad po Wernerju Langu in Thomasu Herzogu [31].	14
Slika 11: Stolpnica New York Time's Building [36].	16
Slika 12: Senčila iz horizontalnih keramičnih cevi na stavbi NY Time's [35].	16
Slika 13: : Pozicije notranjih rolojev glede na različne orientacije fasad, na eksperimentalnemu modelu [34].	17
Slika 14: Stolpčni prikaz primerjave porabe energije glede na različne procese v stavbi na modelu konvencionalne izvedbe stavbe NY Time's in kalibriranemu modelu realne izvedbe [34].	17
Slika 15: Stolpnica Post Tower, Bonn, Nemčija [38].	18
Slika 16: Južna fasada in odprtina med slojema steklene fasade [38].	19
Slika 17: Levo: prerez skozi južno dvojno fasado s prikazom zajema zraka. Sredina: tipičen tloris stolpnice, na vzhodni in zahodni strani sta atrija. Desno: eden izmed atrijev, t. i. sky-garden oz. nebeški vrt [38].	19
Slika 18: Severna fasada in odprtina med slojema steklene fasade [38].	19
Slika 19: Pogled na stavbo Occidental Chemical Center [39].	20
Slika 20: Levo: prerez skozi dvojno stekleno fasado. Desno: pokrite zračne rege na dnu stavbe nakazujejo, da avtomatske odpiranje in zapiranje zračnih reg ne deluje [39].	20
Slika 21: Organigram uporabljenih programov in interakcij med njimi.	26

Slika 22: Posplošena shema delovanja oz. interakcije med različnimi moduli [59].	27
Slika 23: Prikaz OS aplikacije in njenih orodnih vrstic [62].	29
Slika 24: Pogled na južno fasado obravnavane poslovne stavbe [67].	32
Slika 25: Lokacija stavbe s širšim področjem Ljubljane in približana lokacija stavbe s prikazano orientacijo stavbe.	33
Slika 26: Prečni prerez stolpnice. Vsi kletni prostori ne spadajo v sklop obravnavane stolpnice, ampak so last drugih subjektov [66].	34
Slika 27: Tloris tipične etaže med 1. in 13. nadstropjem. Vzhodni in zahodni del etaže sta povezana s centralnim stopniščem [66].	35
Slika 28: Tloris tipične etaže med 14. in 16. nadstropjem [66].	36
Slika 29: Karta Evrope glede na Köpenn- Geigerjevo podnebno klasifikacijo z označeno pozicijo Ljubljane [69].	37
Slika 30: Odklon mesečne povprečne temperature zraka za leto 2014 (levo) in leto 2015 (desno) [72].	41
Slika 31: Računski model pritličja in kleti. Kletni prostori, ki spadajo pod obravnavano stavbo, ležijo neposredno pod tlorisom pritličja. Zgoraj: računalniška upodobitev modela glede na vrsto konstrukcijskega sklopa (svetlo rjava barva predstavlja stene, temno rjava barva predstavlja tla in strop, prosojno modra barva okna, vijolična barva pa površine, ki senčijo stavbo). Spodaj: računalniška upodobitev modela glede na robne razmere konstrukcijskih sklopov (modra barva pomeni zunanje razmere, svetlo modra barva pomeni zunanje razmere brez vpliva vetra in sonca, svetlo rjava barva predstavlja stik z zemljo, svetlo vijolična barva pa adiabatne robne razmere).	44
Slika 32: Slika računskega modela 2. (zgoraj) in 13. nadstropja (spodaj) z računalniško upodobitvijo za robne razmere. Na sliki vidimo, da sem upošteval zmanjšanje tlorisne površine 14. nadstropja, tako da je le del stropa 13. nadstropja adiabatno, medtem ko je pri modelu 2. nadstropja adiabatno celoten strop.	45
Slika 33: Etaže od 14. do 17. nadstropja. Objekti z vijolično barvo ponazarjajo sosednje objekte in predstavljajo površine, ki senčijo model. Vpliv sosednjih objektov na osončenost zgornjih etaž je zanemarljiv.	46
Slika 34: Prikaz urnika delovne zasedenosti v pisarnah. Urnik je prilagojen po standardu EN 15232 [75].	48
Slika 35: Prikaz urnika notranje temperature v času delovnih dni za obdobje ogrevanja.	48
Slika 36: Primer sestave konstrukcijskega sklopa zunanje stene v OS.	49
Slika 37: Materialne lastnosti armiranobetonske stene v OS.	49
Slika 38: Računalniška upodobitev toplotnih con na modelu zgornjih etaž.	51
Slika 39: Pogled na model 2. Nadstropja s severozahodne strani s prikazanimi objekti, ki senčijo stavbo. Objekti predstavljajo sosednje stavbe in drevesa.	52
Slika 40: Koncept zunanjih žaluzij [79].	59

Slika 41: Sestava konstrukcijskega sklopa zunanje stene na vzhodni in zahodni strani stavbe (program U-Wert).	63
Slika 42: Shema senčenja z enostavnim nadstreškom, ki blokira sončne žarke pod naklonom, večjim od 50°.	71
Slika 43: Shema delovanja horizontalnih lamel na obravnavani stavbi.	72
Slika 44: Shema delovanja lamelnega nastreška s horizontalnimi lamelami v dveh delih.	73
Slika 45: Shema delovanja senčila s horizontalnimi cevmi.	73

1 UVOD

Energetska učinkovitost stavb je postala pomemben del širšega konteksta energetske učinkovitosti, s katerim želi Evropska unija (EU) zmanjšati svojo odvisnost od uvoza energije oz. energentov, omejiti klimatske spremembe in prebroditi ekonomsko krizo [1]. Stavbe v EU porabijo 40 % vse primarne energije v EU in povzročijo 36 % vseh emisij CO₂ [2]. Niso pa vse enake, nekatere so energetske bolj potratne kot druge. Ene izmed najbolj energetsko potratnih vrst so poslovne stavbe.

Poslovne stavbe spadajo v skupino nestanovanjskih stavb, kamor med drugim uvrščamo tudi bolnice, izobraževalne ustanove in nakupovalna središča. Dandanes so v urbanih področjih zelo pogoste visoke, večnadstropne stavbe, ki se jih najpogosteje označi kot stolpnice oz. nebotičnike. Kombinacija poslovne in visoke stavbe predstavlja zanimivo zmes, ki je posebna z vidika energijskih tokov v stavbi, kvalitete notranjega bivalnega okolja in simbolnega statusa stavbe, ki se pogosto izraža v estetskemu učinku njenega fasadnega ovoja. Stavbni ovoj – povezava med zunanjim in notranjim okoljem – ima pomemben vpliv na količino energije, potrebne za zagotavljanje ustreznega bivalnega okolja v stavbi. Zaradi tega je njegova energetska učinkovita zasnova eden izmed najboljših načinov za zmanjševanje porabe energije pri novih in obstoječih stavbah [3].

Pri visokih stavbah ima fasadni ovoj prevladujoči delež pri skupni površini zunanjega ovoja stavbe. Zato je njegova zasnova pomembna tako z energetskega, kot tudi z vidika kakovostnega bivalnega okolja. V poslovnih nebotičnikih se največ energije porabi za ogrevanje, hlajenje, prezračevanje in razsvetljavo [3]. Fasadni ovoj ima direkten vpliv na porabo energije v vseh omenjenih procesih. V magistrski nalogi se ukvarjam z energetska učinkovito zasnovo fasadnega ovoja obstoječega poslovnega nebotičnika.

Za proučevanje vpliva različnih ukrepov na porabo energije v stavbi sem potreboval zanesljivo računalniško orodje. Konvencionalna orodja, ki se v Sloveniji uporabljajo za računanje potreb po toploti in hlajenju praviloma računajo po metodi, ki jo standard SIST EN ISO 13790: 2008 Energijske lastnosti stavb – Račun rabe energije za ogrevanje in hlajenje prostorov [4], definira kot kvazistacionarno mesečno metodo. Šestan [5] je po primerjavi štirih različnih računalniških programov (od teh se trije uporabljajo v praksi), ki računajo porabo energije po mesečni metodi, ugotovil precejšnja odstopanja in v nekaterih primerih nezanesljivo obnašanje le teh. Zaradi tega sem uporabil validiran računalniški program, ki računa porabo energija po dinamični metodi, to je EnergyPlus [6]. Izračun porabljene energije stavbe z omenjenim računalniškim programom predstavlja ključno dodano vrednost magistrske naloge.

1.1 Cilji in hipoteze

Z magistrsko nalogo sem želel podrobneje proučiti obnašanje poslovnih stolpnic v energetskega smislu ter odkriti potencial, ki ga te izkazujejo glede morebitnih prihrankov pri porabi energije. Pri tem sem se osredotočil na ukrepe na nivoju fasadnega ovoja stavbe. Zastavljeni cilji naloge so:

- oblikovati računalniški model obravnavane poslovne stolpnice v dinamičnem programu EnergyPlus,
- preveriti, kako različni ukrepi na nivoju fasadnega ovoja stolpnice vplivajo na porabo energije v stavbi,
- primerjati porabo energije pri različnih zasnovah fasadnega ovoja in z zakonsko predpisanimi vrednostmi porabe energije za nestanovanjske stavbe,
- izbrati najprimernejšo zasnovo zunanjega ovoja obravnavane stolpnice z energetskega vidika,
- primerjati izhodiščni in končni model stavbe med seboj ter z zakonsko predpisanimi vrednostmi o porabi energije v nestanovanjskih stavbah.

Na osnovi zastavljenih ciljev lahko izpostavim nekaj hipotez, ki jih bom v nalogi preverjal:

1. Zaradi klimatskih danosti lokacije stolpnice (Ljubljana) bo najbolj učinkovit ukrep na nivoju fasadnega ovoja tisti, ki bo minimaliziral njegove transmisijske izgube in s tem zmanjšal potrebo po energiji za ogrevanje.
2. Čeprav bo prevladovala potreba po ogrevanju, bo zaradi velikih notranjih dobitkov, ki so značilni za poslovne stavbe, in toplih poletij – z dnevnimi maksimumi med 25 in 30°C – energija za hlajenje predstavljala pomemben delež skupne porabe energije na letnem nivoju.
3. Vrsta senčil in njihova kontrola bosta pomembno vplivali na potrebo po ogrevanju in hlajenju stavbe.

1.2 Zasnova naloge

Za lažjo predstavitev vsebine bom prikazal naslove glavnih poglavij in jih na kratko opisal.

— 2 POSLOVNE STOLPNICE

To poglavje poda odgovore na vprašanja, kaj so poslovne stolpnice oz. nebotičniki, kako so se poslovne stolpnice v energetskega smislu razvijale skozi zgodovino, kaj pomeni visoko učinkovit fasadni ovoj, kaj so dvojne steklene fasade idr. Predstavljeni so tudi primeri dobre in slabe prakse pri zasnovah visoko učinkovitega fasadnega ovoja na poslovnih stolpnicah.

— 3 ZAKONODAJA – Poraba energije v stavbah

V tem poglavju so naštetih dokumenti (predpisi, pravilniki, tehnične smernice, standardi in zakoni), na katere sem se opiral, ter opisani trije izmed njih, ki so se pri izdelavi naloge izkazali za najbolj ključne: Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah, Tehnična smernica TSG-1-004 in standard SIST EN ISO 13790:2008. Pri zadnjemu je zapisan še kratek komentar o predpisanih računskih metodah za računanje porabe energije v stavbah, ki jih ta predpisuje.

— 4 PREDSTAVITEV UPORABLJENIH PROGRAMSKIH ORODIJ

Naštetih in opisanih so vsi računalniški programi, ki sem jih uporabljal za simuliranje porabe energije v obstoječi poslovni stolpnici, ter povezave med njimi.

— 5 PREDSTAVITEV OBRAVNAVANE STAVBE

Predstavitev glavnih konstrukcijskih in geometrijskih lastnosti obravnavane poslovne stolpnice, klimatoloških lastnosti lokacije, merjene porabe energije ter mejne vrednosti kazalnikov energetske učinkovitosti za analizirano stavbo.

— 6 METODA DELA

V tem poglavju predstavim oblikovanje računskega modela stolpnice v programskem paketu OpenStudio [7]. Ob ključnih informacijah o modelu stavbe so zapisani tudi vhodni podatki, ki jih program EnergyPlus potrebuje za simulacijo porabe energije v stavbi. Predstavljene so tudi nekatere omejitve, s katerimi se soočamo, ko uporabljamo omenjena računalniška programa.

— 7 ANALIZA VPLIVA RAZLIČNIH ZASNOV FASADNEGA OVOJA STAVBE NA PORABO ENERGIJE V STOLPNICI

Predstavljeni so splošni opisi računskih modelov stavbe z različnimi ukrepi na nivoju fasadnega ovoja in rezultati simulacij porabe energije le teh.

— 8 PRIMERJAVA REZULTATOV RAZLIČNIH ZASNOV FASADNEGA OVOJA

Primerjani so rezultati različnih variant zasnov fasadnega ovoja med seboj in z zakonsko predpisanimi vrednostmi.

— 9 PREDLOG KONČNE VARIANTE

Na podlagi primerjave rezultatov porabljenih energij je bila izbrana najprimernejša zasnova fasadnega ovoja. Na tej izbrani varianti je implementiran sistem z rekuperacijo toplote prezračevanega zraka in nato primerja rezultate o porabljeni energiji v stavbi z zakonsko predpisanimi dovoljenimi vrednostmi.

— 10 PRIMERJAVA REZULTATOV IZHODIŠČNE IN KONČNE VARIANTE

To poglavje vsebuje podrobnejšo primerjavo med rezultati računskega modela izhodiščne in končne variante.

— 11 ZAKLJUČKI

Kratek povzetek namena naloge, rezultatov in ugotovitev. Potrdim ali ovržem hipoteze naloge in na podlagi naučenega podam splošno razmišljanje o problematiki energetske učinkovitosti poslovnih nebotičnikov.

2 POSLOVNE STOLPNICE

2.1 Kaj so poslovne stolpnice?

V Slovarju slovenskega knjižnega jezika je stolpnica opisana kot zelo visoka večnadstropna stavba s sorazmerno majhno tlorisno površino [8] (identična definicija je podana tudi za besedo nebotičnik). Po drugi razlagi, je nebotičnik visoka stavba, ki je primerna za bivanje (ali aktivnosti) ljudi po celotni višini in ima vsaj 40–50 nadstropij [9] (to bi pomenilo, da v Sloveniji stolpnic nimamo). Natančne, standardizirane in globalno sprejete definicije za stolpnico ni. V uporabi je več različnih definicij, ki so prilagojene posamezni stroki. Tako je recimo v stroki, ki se ukvarja s požarno varnostjo stolpnica »v splošnem stavba, ki je višja od maksimalnega dosega opreme za gašenje požara. V številkah to pomeni višino v razponu od 23 do 30 metrov« [10].

V gradbeništvu se stavbe deli po CC klasifikaciji (Classification of types of Constructions) [11], po kateri spadajo poslovne stavbe v skupino nestanovanjskih stavb z oznako 122: Poslovne in upravne stavbe. V to skupino spadajo stavbe javne uprave (12201), bank, pošt, zavarovalnic (12202) in stavbe, namenjene lastnemu poslovanju podjetij (12203). Vse to so stavbe, v katerih so pisarne in prostori, namenjeni poslovanju. Dodatne klasifikacije poslovnih stavb, ki bi te delila na stolpnice in ostale, pa ni. Zaradi tega so statistični podatki praviloma osredotočeni na celoten sklop nestanovanjskih ali pa poslovnih stavb.

2.2 Zgodovina razvoja (poslovnih) stolpnic – kratek pregled s poudarkom na porabi energije

Prve stolpnice so začeli graditi v Združenih Državah Amerike (ZDA) pred dobrimi 150 leti. Med ekonomskim in kulturnim razcvetom se je vedno več ljudi v želji po zaslužku in prednostih mestnega življenja začelo seliti v mesta, zaradi tega so cene zemljišč naraščale in visoke stavbe so bile rešitev, pri kateri so se lahko dejavnosti in ljudje zgostili na manjši površini. Velika finančna in industrijska podjetja so potrebovala nove sedeže v mestnih središčih, zato je bila narava prvih visokih stavb poslovna [12]. S potrebnimi tehnološkimi preboji se je dirka proti nebu lahko začela in traja še danes.

Ker se v tej nalogi ukvarjam s porabo energije v poslovni stolpnici, me zanima predvsem energetski aspekt stolpnic. To poglavje bo povzetek članka z naslovom *Five Energy Generations of Tall Buildings: A historical Analysis of Energy Consumption in High Rise Buildings* [13]. Avtorji v tem članku razdelijo stolpnice v 5 energetskih generacij. Potrebno je opozoriti, da so stolpnice v posamezne generacije razdeljene na podlagi tipičnih stavb ter da so se pri podatkih večinoma opirali na severnoameriške stolpnice v pretežno hladnih klimah. Teh podatkov se ne sme jemati kot univerzalno merilo, saj so v vseh obdobjih po svetu gradili tudi stolpnice, ki ne spadajo med tipične predstavnike tega obdobja. Dejstvo pa je, in to precej zanimivo, da so se visoke stolpnice po drugi svetovni vojni širile iz ZDA na ostale kontinente po principu »copy-paste«, kjer sta imeli estetika in simbolika ekonomske moči, ki so ju mesta in podjetja želela izkazovati, primarno vlogo, ne glede na klimatske lastnosti lokacij in posledično energetsko (ne)učinkovitost stolpnic.

Kot so prikazali avtorji omenjenega članka, so razvoj visokih stavb usmerjali tehnološki preboji, urbanistični zakoni, predpisi, arhitekturni trendi in energetski krizi v sedemdesetih letih 20. stoletja.

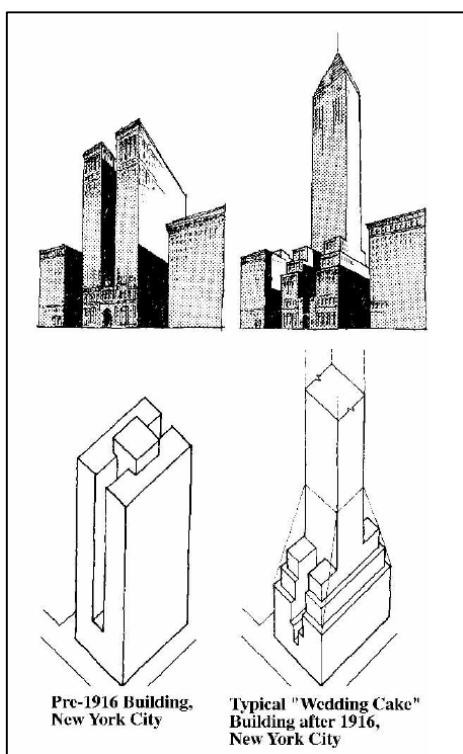
2.2.1 Prva energetska generacija: 1885–1916

Z razvojem jeklenih okvirnih nosilnih konstrukcij stavb (jeklo zamenja lito železo in les [10]) ter izumom dvigala leta 1854 so bile glavne ovire z vidika nosilnosti in funkcionalnosti visokih stavb odpravljene. Za prvo stolpnico na svetu velja stavba The Home Insurance Building iz leta 1885 v Chicagu. Stavbe v prvi generaciji so za obratovanje potrebovale sorazmerno malo energije. Energija v stavbah se je v glavnem porabljala za delovanje dvigal in ogrevanje prostorov. Prezračevanje se je izvajalo naravno z odpiranjem oken, ravni osvetljenosti pa so bile nizke zaradi neučinkovitosti umetnih virov svetlobe tistega obdobja.

Zunanje stene stavb so bile debele, tipično opečnate. Okenske odprtine so bile majhne, njihov delež glede na celotno fasado je znašal 20–30 %. Stavbe so bile kompaktne oblike z velikim volumnom glede na površino zunanjega ovoja (nizek oblikovni faktor* f_o [m^{-1}]). Z namenom zagotavljanja naravne svetlobe in ventilacije so bile značilne tlorisne oblike v črki H, I, E in L [12].

Zaradi svoje velike toplotne kapacitete (masivne debele zunanje stene) in majhnega deleža zunanjih površin glede na volumen ter majhnih oken, so se stavbe v smislu toplotnega udobja dobro obnašale. Tako poleti ni prihajalo do pregrevanja, pozimi pa je kombinacija kompaktne oblike in velike termične mase preprečevala preveč velike toplotne izgube.

2.2.2 Druga energetska generacija: 1916–1951



Slika 1: Vpliv novega urbanističnega zakona (New York Zoning Law) iz leta 1916 na obliko stolpnice [13].

Prvo večjo spremembo v energetskih karakteristikah visokih stavb je prinesel urbanistični zakon leta 1916 v New Yorku, New York City Zoning Law. Zaradi svojih tlorisnih oblik so bile stavbe do leta 1916 zelo masivne ter so senčile sosednje stavbe in ulice mest. Zaradi tega so oblasti sprejele zakon, po katerem je bilo potrebno zmanjšati tloris po določeni etaži. Tako so stolpnice postale vitkejših oblik oz. stopničene t. i. wedding cake buildings (Slika 1).

To je imelo pomemben vpliv na oblikovni faktor stavb, ki se je zaradi tega povečal. Glede na študijo Depecker et al. [14] je dokazano, da ima oblikovni faktor stavb pomemben vpliv na toplotne izgube v hladnih klimah. Tako potreba po ogrevanju proporcionalno narašča z večanjem oblikovnega faktorja – zaradi večje površine zunanjega ovoja glede na kondicionirano prostornino, stavba izgublja več toplote. Posledično so imele stavbe druge generacije večje toplotne izgube skozi ovoj stavbe.

Pozitiven vpliv vitkejših oblik pa je bila boljša globinska osvetljenost prostorov z naravno svetlobo. Tako bi sklepali, da se bodo potrebe po elektriki za razsvetljavo zmanjšale, vendar so se v tem času spremenili tudi predpisi o potrebni osvetljenosti. Predpisi so narekovali povečanje ravni osvetljenosti za približno 150 %.

* Definicija oblikovnega faktorja f_o je podana v poglavju 3.1 Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah – PURES -2 2010.

2.2.3 Tretja energetska generacija: 1951–1973

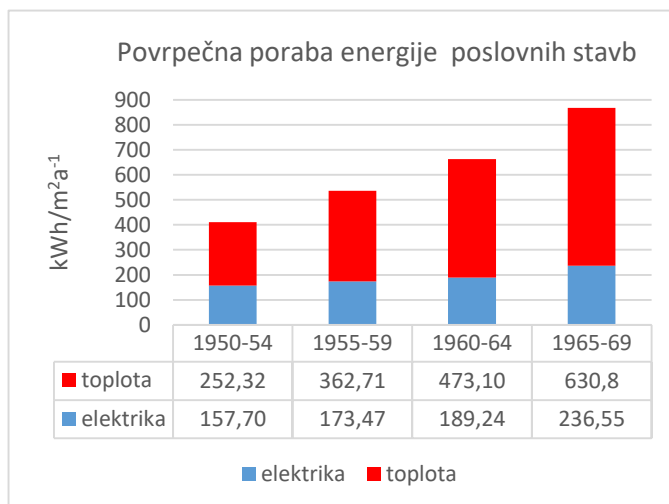
Po drugi svetovni vojni se je zgodil nov pomemben tehnološki preboj, saj se je razvil koncept obešenih steklenih fasad (ang. glazed curtain wall). Prvo stolpnico z obešeno stekleno fasado so zgradili leta 1951 v Chicagu. Te stolpnice so dosegale 50–75% delež zasteklitve glede na površino fasade. Zasteklitev v fasadi je bila enoslojna.

Toplotna prehodnost steklenih fasad je bila v primerjavi s toplotno prehodnostjo fasad prejšnjih generacij slabša, toplotna kapaciteta pa precej nižja. Zaradi tega se je povečala potreba po ogrevanju. Poleg tega so se v stavbah močno povečali solarni dobitki, kar je privedlo do pregrevanja stavb v poletnih mesecih. Stavbe se niso več zanašale na naravno prezračevanje, tako so postali sistemi za mehansko prezračevanje in klimatiziranje nujna oprema.

Tako zasnovane steklene stolpnice so se nato razširile po vseh kontinentih, neodvisno od klimatskih razmer. Za sedeže veliki korporacij so postale zelo popularne stolpnice s temnimi steklenimi fasadami, kar je zadevo v energetskem in svetlobnem smislu le še poslabšalo. Zaradi zatemnjenih stekel so imele fasade še večjo absorptivnost za sončno sevanje, kar je privedlo do še večjega pregrevanja. Poleg tega imajo zatemnjena stekla znatno slabšo prepustnost za vidno svetlobo, zaradi česar vanje prodre manj svetlobe.

V tem času so se zopet spremenile oblike tipičnih visokih stavb, te niso bile več vitke ampak so spet postale masivnejše z bolj globokimi tlorisi (visoke masivne štirikotne prizme). Tako so bili oblikovni faktorji ponovno nekoliko manjši, kar vpliva na manjše toplotne izgube pozimi, vendar si je zaradi večjih tlorisov in globljih pisarn v notranjost utrlo pot manj svetlobe, zaradi česar se je električna poraba za razsvetljavo zopet povečala. Poleg tega so novi predpisi zahtevali znatno višje ravni osvetljenosti na delovnih mestih, kar je posledično povečalo potrebo po električni energiji za razsvetljavo.

S hermetično zaprtim ovajem in masivnejšimi oblikami so bile stolpnice tega obdobja odvisne od fluorescenčnih sijalk in mehanskega kondicioniranja notranjega zraka. Lahka enoslojna steklena fasada je toploto izgubljala hitreje kot masivnejša opečnata, poleg tega je omogočala tudi večje solarne dobitke. Na grafikonu 1 vidimo rezultate študije, po kateri se je pri stolpnicah, zgrajenih proti koncu šestdesetih let, poraba energije več kot podvojila v primerjavi s stolpnicami, zgrajenimi v zgodnjih petdesetih letih.

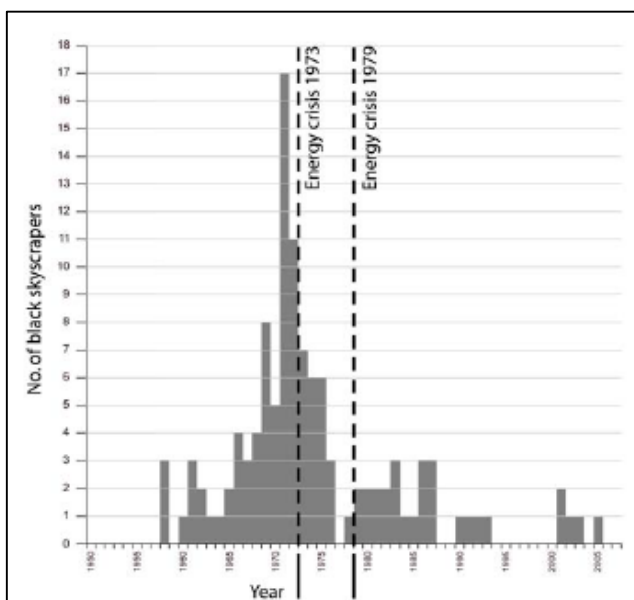


Grafikon 1: Naraščanje porabe elektrike in toplote za obratovanje stolpnic med leti 1950 in 1969. Študija 86 stolpnic, zgrajenih na Manhattnu (prirejeno po:[15]).

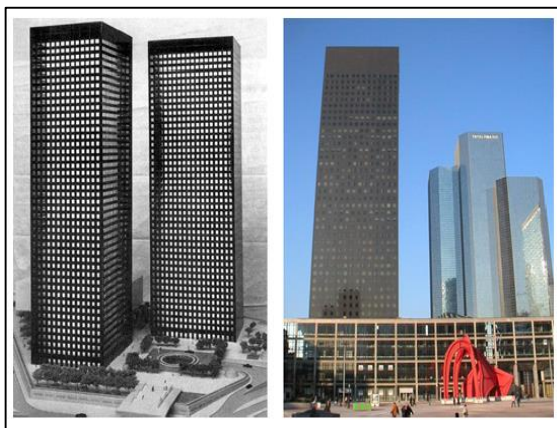
2.2.4 Četrta energetska generacija: 1973–danes

Spremembe v zasnovi steklenih obešenih fasad sta povzročili globalni energetska krizi v sedemdesetih letih 20. stoletja. Kot odgovor na energetska krizi so države začele spreminjati gradbene predpise in tako se je razširila uporaba dvoslojnih zasteklitev z nizkoemisijскими nanosi in polnjenjem z žlahtnim plinom (argon). Tako zasnovane zasteklitve so znatno izboljšale toplotno prehodnost steklenih fasad. Toplotna prehodnost fasad v tretji generaciji se je gibala v območju med 3 in 4 W/m²K, z novimi zasteklitvami pa so steklene fasade dosegale vrednosti okoli 1,5 W/m²K.

Zaradi energetske krize so se spremenili tudi predpisi o mejnih vrednostih osvetljenosti na delovnih mestih v pisarnah. Ti so narekovali zmanjšanje minimalne osvetljenosti za okvirno 25–50 %. S tem so zmanjševali porabo elektrike. Prav tako so predpisi narekovali takšne zasnove stolpnice, v katerih je zagotovljena visoka raven naravne osvetljenosti. Tako so se po energetska krizi začeli opuščati nebotičniki s temnimi steklenimi fasadami. Leta 1971 je bilo v Severni Ameriki zgrajenih 17 takšnih nebotičnikov, medtem ko je to število padlo na 3 leta 1975 in na 0 naslednje leto (Slika 3).



Slika 3: Prikaz števila zgrajenih t. i. »temnih« stolpnice v Severni Ameriki v obdobju od 1950 do 2005 [13].



Slika 2: Tour Fiat in Tour Elf, Pariz. Levo: slika začetnega predloga zasnove stolpnice [16]. Desno: končno izvedeno stanje s spremenjeno zasnovo stolpnice Tour Elf [17].

Razlika med zasnovami stavb 3. in 4. generacije je lepo vidna na primeru stavb Tour Fiat in Tour Elf v Parizu (Slika 2). Sprva sta bila mišljena kot dvojčka, vendar so po končani izgradnji prvega leta 1974 spremenili zasnovo drugega. Tako je prvi primer klasične masivne »škatile« z zatemnjenimi okni in globokimi tlorisi, drugi pa je zasnovan bolj razgibano in z zastekljeno fasado z novo generacijo toplotno-izolacijskih dvojnih stekel z boljšimi optičnimi lastnostmi. Stavbi imata enako bruto tlorisno površino etaž in višini, vendar se druga ponaša s polovico manjšimi stroški ogrevanja, razsvetljave in vzdrževanja [18].

Pomemben faktor, ki vpliva na porabo energije v poslovnih stavbah četrte generacije, pa je začetek razširjene uporabe računalniške in druge pisarniške opreme. Tako so dodatni notranji toplotni dobitki zaradi pisarniške opreme postali pomemben deležnik, ki vpliva na energetska bilanco stavbe.

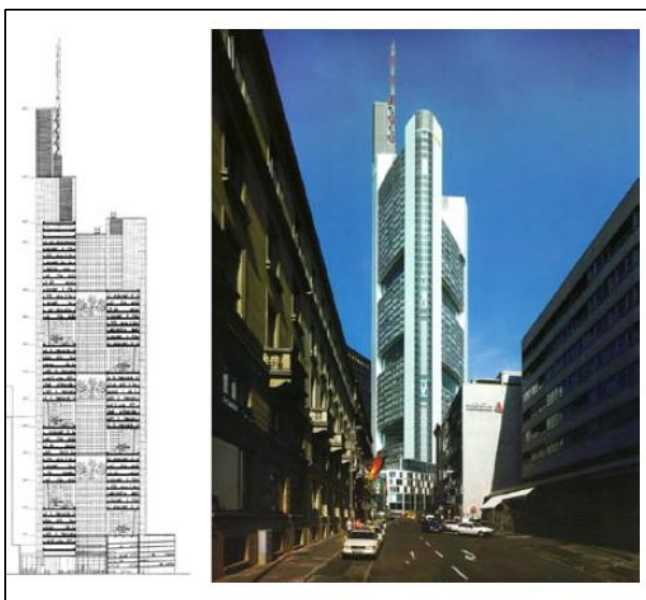
2.2.5 Peta energetska generacija: 1997–danes

Četrta generacija stavb se gradi še danes, saj izpolnjujejo minimalne energetske zahteve, vendar jih bistveno ne izboljšujejo. V peto generacijo stolpnic pa spadajo stavbe, ki te minimalne zahteve bistveno presegajo.

Tako stavbe niso več hermetično zaprte, ki v celoti slonijo na mehanskih sistemih kondicioniranja zraka, ampak uporabljajo pasivne ukrepe za zagotavljanje svežega kondicionirnega zraka (npr. stavbe z dvojnimi steklenimi fasadami, skozi katere se lahko dovaja svež zrak in odvaja izrabljen). Za zagotavljanje ustrezne osvetljenosti in svežega zraka v vseh prostorih se uporabljajo atriji. Zaradi tega so oblikovni faktorji nekaterih stavb nekoliko višji. Sistemi za ogrevanje in hlajenje delujejo po nizkotemperaturnih principih, npr. z aktivacijo termične mase masivnih sten in stropov (radiacijsko ogrevanje in/ali hlajenje). Uporabljajo se okna s trojnimi zasteklitvami z nizkoemisivnimi nanosi, s katerimi se toplotna prehodnost zasteklitev še dodatno zmanjša. S pametnimi sistemi upravljanja stavb, ki zajemajo področja ogrevanja, hlajenja, prezračevanja, razsvetljave in kontrole senčil, se poraba energije še dodatno zmanjšuje.

Tipični predstavnik stolpnice iz pete generacije je na primer stavba Commerzbank Tower v Frankfurtu (Slika 5), zgrajena leta 1997.

V zadnjih letih pa se razvija trend izrabljanja obnovljivih virov energije (sonce in veter) na mestu stavbe za proizvodnjo elektrike ali energije za pripravo tople vode. Eden izmed primerov takšne stolpnice je Bahrain World Trade Center, zgrajen leta 2008, v Manami (Slika 4). Ta 230 metrov visoka stavba je zasnovana kot dvojček, povezan s tremi prehodi. Na vsakemu prehodu je nameščena po ena vetrna elektrarna moči 225 kW, s premerom 29 metrov. Stavba je orientirana in zasnovana (oblika jader) tako, da v največji meri izkorišča potencial vetra, ki piha iz Perzijskega zaliva proti severu. Vetrne elektrarne tako proizvedejo od 11 do 15 % vse potrebne energije za obratovanje stavbe [19].



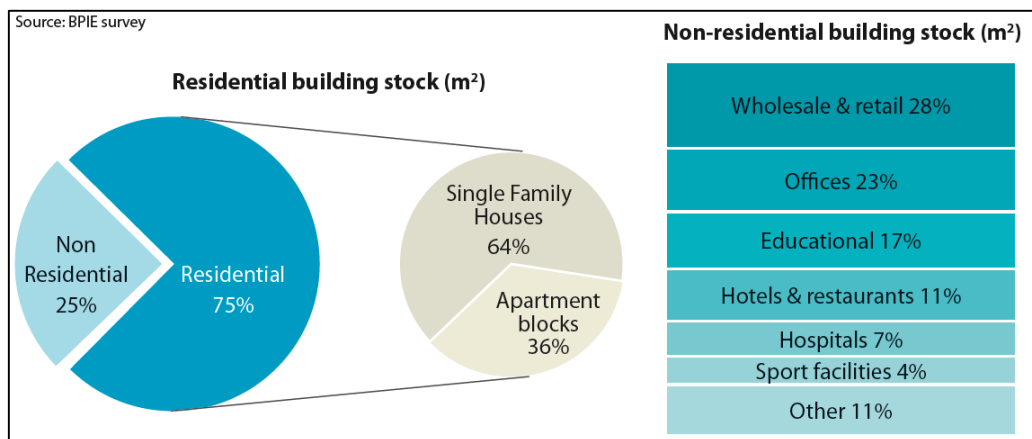
Slika 5: Commerzbank Tower, Frankfurt, 1997. Na levi sliki je načrt prereza stavbe, ki prikazuje centralni atrij, na desni pa pogled na izvedeno stavbo [20].



Slika 4: Bahrain World Trade Center, Manama [21].

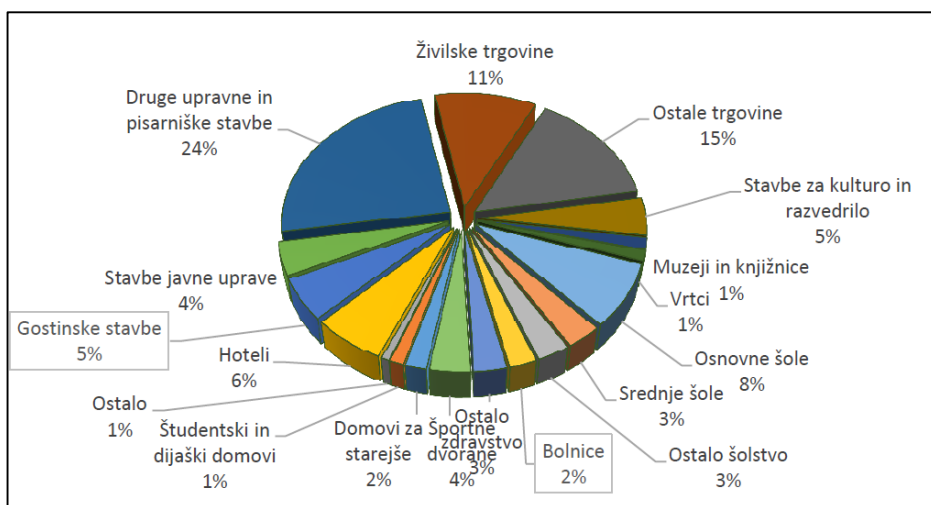
2.3 Stavbni fond poslovnih stavb v Evropi in Sloveniji

Stavbni fond vseh stavb na ozemlju 27 držav Evropske unije, Švice in Norveške znaša okoli 25000 km², kar je več kot površina Slovenije. Od tega fonda je 75 % stanovanjskih stavb in 25 % nestanovanjskih stavb. Poslovne stavbe predstavljajo 23 % vse neto tlorisne površine nestanovanjskega fonda, kar znaša 1437,5 km² (Slika 6) [22].



Slika 6: Stavbni fond EU27, Švice in Norveške [22].

V Sloveniji je situacija nekoliko drugačna, saj poslovne stavbe predstavljajo 28 % vseh nestanovanjskih stavb, medtem ko stavbe za trgovske in storitvene dejavnosti zavzemajo nekoliko manjši delež, in sicer 26 % (Slika 7).



Slika 7: Deleži uporabne površine nestanovanjskih stavb (po CC-SI klasifikaciji) v Sloveniji [23].

Podatka o deležu stolpnice med poslovnimi stavbami v EU ali Sloveniji v razpoložljivi literaturi nisem zasledil. Zanimivo bi bilo primerjati porabo energije med poslovnimi stolpnice in ostalimi poslovnimi stavbami ter opazovati, ali obstajajo kakšne razlike med porabljeno energijo enih in drugih.

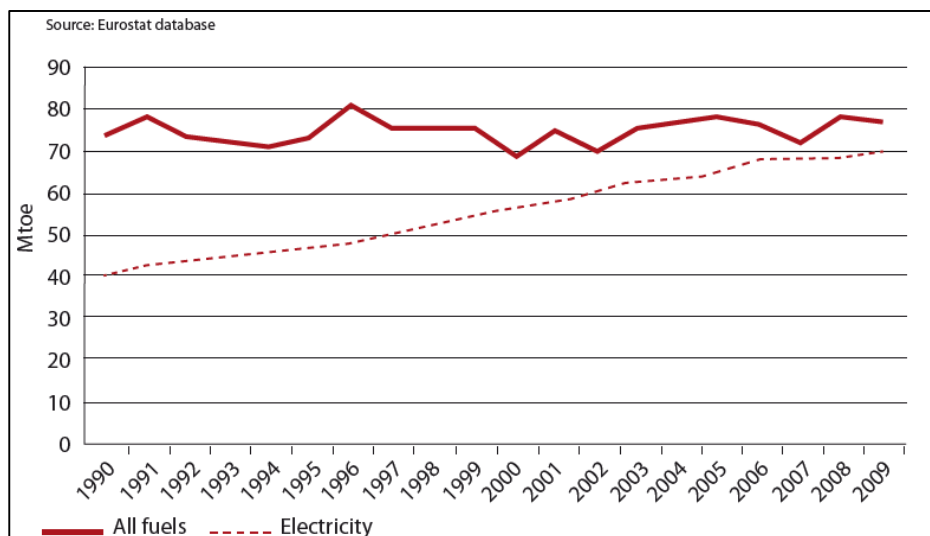
Struktura poslovnih stavb glede na velikosti uporabnih površin je po državah Evropske unije zelo različna (Preglednica 1). Tako predstavlja tlorisna površina poslovnih stavb z uporabno površino več kot 1000 m² na Slovaškem kar 88 % vse tlorisne površine, medtem ko ta delež v Bolgariji znaša le 10 %. Za Slovenijo tega podatka nisem našel, sem pa uspel poiskati ta podatek za vse nestanovanjske stavbe, po katerem lahko sklepam, da je delež poslovnih stavb z uporabno površino večjo od 1000 m² zelo majhen (1,4 % nestanovanjskih stavb ima uporabno tlorisno površino večjo od 1000 m²).

Preglednica 1: Delitev poslovnih in nestanovanjskih stavb glede na velikost uporabne tlorisne površine v nekaterih državah EU. Podatki so podani glede na delež tlorisne površine in delež števila stavb v odstotkih [%], ki pripada posamezni velikostni skupini [prirejeno po: 22].

Poslovne stavbe				Nestanovanjske stavbe			
Površina	< 200 m ²	200 < 1000 m ²	> 1000 m ²	Število	< 200 m ²	200 < 1000 m ²	> 1000 m ²
BG	60	30	10	EE	10	50	40
UK	21	27	47	SI	89,8	8,8	1,4
NL	12	24	64	LT	42	55	3
IT	5	24	64	CY	79		21
SK	1	12	88	AT	11,52	52	37
Število	< 200 m ²	200 < 1000 m ²	> 1000 m ²				
IE	95		5				
CZ	30	55	15				
IT	33	50	17				
LT	0	79	21				
SE	4,7	35,9	69,4				

2.4 Poraba energije v poslovnih stavbah

Poraba energije znotraj nestanovanjskega sektorja se lahko zelo razlikuje od vrste stavbe. Pri poslovnih stavbah zajema poraba energije ogrevanje, hlajenje, prezračevanje, razsvetljava, delovanje pisarniške in druge opreme (dvigala, računalniki, projektorji, kopirni stroji, printerji, avtomati za pijačo, hladilniki ...) ter pripravo tople sanitarne vode (glede na ostale majhen delež). Poslovne stavbe imajo tudi specifičen urnik obratovanja, saj med vikendi, prazniki ali kolektivnimi dopusti potrebujejo bistveno manj energije. Poleg tega lahko notranji toplotni dobitki zaradi ljudi, razsvetljave in opreme prispevajo pomemben delež k energetske bilanci stavbe.

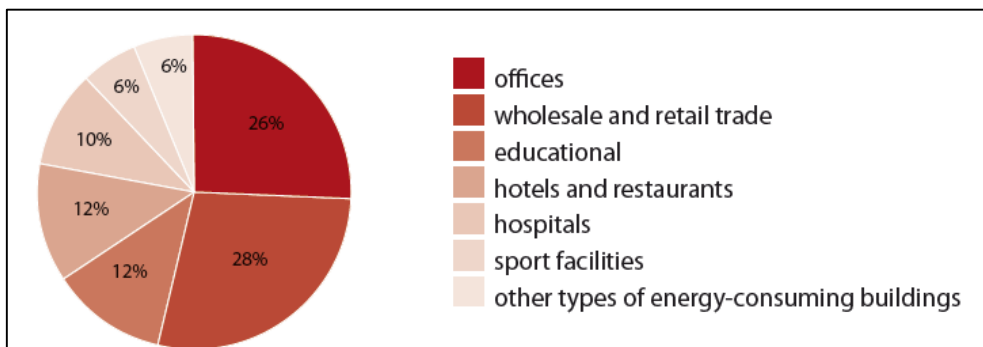


Slika 8: Poraba električne in druge energije v nestanovanjskih stavbah v obdobju od 1990 do 2009 v EU27, Švici in Norveški [22].

Za nestanovanjski sektor v EU je značilna konstantna rast porabe električne energije. Tako je v obdobju od 1990 do 2009 poraba elektrike narasla za 74 % (Slika 8)! K temu je bistveno prispeval razvoj IT

tehnologije in vedno več električnih naprav znotraj objektov. Glede na naravo poslovnih stavb lahko sklepamo, da je poraba električne energije tudi v njih skozi leta rasla.

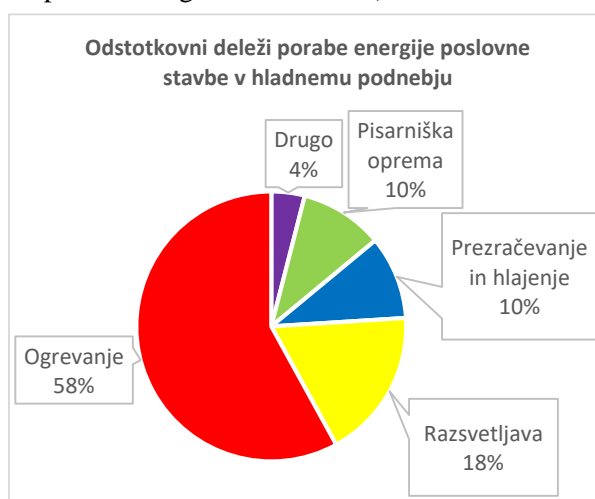
Podobno kot pri deležih uporabnih tlorisnih površin poslovne stavbe na nivoju EU pri porabi energije zaostajajo le za stavbami, ki po CC-SI klasifikaciji spadajo v skupino 123, to so Trgovske stavbe in stavbe za storitvene dejavnosti (Slika 9). Razlika v porabi znaša 2 odstotni točki, kar glede na razliko 5 odstotnih točk pri uporabni tlorisni površini pomeni, da so poslovne stavbe nekoliko bolj energijsko potratne.



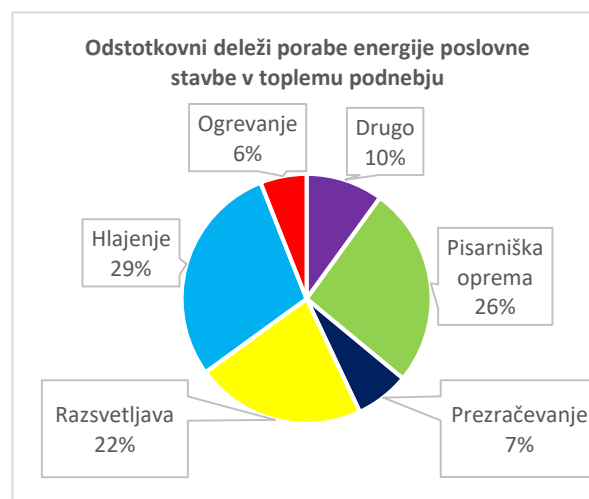
Slika 9: Deleži porabe energije glede na vrsto nestanovanjske stavbe [22].

Koliko energije porabi posamezen proces v poslovni stavbi zavisi predvsem od lokacije stavbe, saj so od te odvisne potrebe po ogrevanju in hlajenju. Za podnebje v Ljubljani, kjer sezona ogrevanja traja približno od oktobra do sredine maja, lahko pričakujemo, da bo prevladovala potreba po ogrevanju stavbe. Podobno lahko trdimo za večino slovenskih krajev z izjemo primorske regije, kjer sta temperaturni primanjkljaj ter kurilna sezona najkrajša. Poleg tega je veliko odvisno od same zasnove, saj je lahko na stavbi, ki je ustrezno toplotno izolirana in zaščitena proti pregrevanju, delež energije za ogrevanje in hlajenje manjši.

Neodvisno od klimatskih razmer pa lahko za poslovne stavbe trdimo, da pomemben delež porabljene energije predstavlja elektrika, potrebna za razsvetljavo in delovanje pisarniške opreme (28–48 % glede na podatke na grafikonih 2 in 3).



Grafikon 3: Odstotkovni deleži porabe energije v poslovni stavbi v hladnem podnebju (prilagojeno po: [24]).



Grafikon 2: Odstotkovni deleži porabe energije v poslovni stavbi v toplemu podnebju (prilagojeno po: [25]).

Z načrtovanjem stavbe ne moremo vplivati na porabo elektrike za opremo stavbe, lahko pa z ustrezno zasnovo bistveno zmanjšamo potrebo po elektriki za razsvetljavo.

2.5 Visoko učinkoviti fasadni ovoj na poslovnih stolpnicah

Pojem »visoko učinkovito« se lahko uporablja za več možnih funkcij oz. nalog, ki jih fasadni ovoj opravlja glede na namen stavbe in lokacijo, kjer stavba stoji. V toplih in suhih klimah je pomembna lastnost ovoja stavbe zbiranje deževnice. Visoko učinkovit ovoj je lahko tudi ovoj, ki ima dobre samočistilne sposobnosti in tako manjšo potrebo po vzdrževanju. V sklopu magistrske naloge pa me zanima vpliv zunanjega ovoja stolpnic na porabo energije v stavbi, torej visoko učinkoviti stavbni ovoj v energetskem smislu. Primerna zasnova stavbnega ovoja predstavlja enega izmed najbolj učinkovitih ukrepov za prihranke pri porabi energije na novih in obstoječih stavbah [3].

Pri visokih stavbah je zunanji ovoj stavbe večinoma sestavljen iz fasadnega ovoja. Pri nekaterih stolpnicah razlike v zasnovi med njeno fasado in streho sploh ni (npr. poslovna stopnica The Gherkin Tower v Londonu [26]). Zaradi tega je fasadni ovoj najpomembnejši del zunanjega ovoja stolpnic, saj ima največji vpliv na porabo energije in kakovost notranjega okolja.

2.5.1 Kaj sploh je »visoko učinkovit fasadni ovoj«?

Kot vmesnik med notranjostjo in zunanjostjo, stavbni ovoj opravlja funkcijo izmenjave informacij, energije in snovi. Izmenjuje se toplotna energija, svetloba, zrak in zvok. Posplošeno povedano je visoko učinkoviti fasadni ovoj takšen, da zagotavlja maksimalne energijske prihranke ob minimalnih negativnih vplivih na okolje in ljudi v stavbi. Po B. Raji et al. [3] na energetsko učinkovitost stavbnega ovoja vplivajo 3 glavni parametri:

1. zasnova fasadnega ovoja (vrsta uporabljenih stekel, površina oken in senčila),
2. lastnosti gradbenih materialov (specifična toplotna kapaciteta (termalna masa), toplotna izolativnost, zrakotesnost),
3. značilnosti lokacije stavbe (klimatske razmere in orientacija stavbe).

Ti parametri narekujejo jakost izmenjave z zunanjim okoljem. Pri celostni zasnovi stavb je potrebno na nivoju njenega ovoja kombinirati različne ukrepe, s katerimi zadostimo kriterijem porabe energije in primerne bivalnega okolja. Tako bi npr. lahko načrtovanje fasadnega ovoja izključno z namenom največje zaščite proti sončnemu pregrevanju poleti imelo za posledico manjše toplotne dobitke zaradi sončnega sevanja pozimi in večjo potrebo po umetni razsvetljavi. Zaradi tega je visoko učinkoviti fasadni ovoj treba načrtovati integralno, kjer hkrati obravnavamo več parametrov (toplota, svetloba ...).

V dokumentu *High-Performance Commercial Building Facades* [27] so visoko učinkovite fasadne ovoje razdelili v 4 različne skupine glede na tehnološke rešitve, ki jih uporabljajo. Te rešitve se dotikajo aplikacij na nivoju fasadnega ovoja, ki opravljajo določene primarne funkcije. Tako so fasadne ovoje razdelili v:

- fasadni ovoj za kontrolo sončnega sevanja (zajema aplikacije različnih variant senčil, uporabo spektralno selektivnega stekla, kotno selektivna kontrola sončnih žarkov ...),
- fasadni ovoj za kontrolo dnevne svetlobe (aplikacija različnih difuzorjev in reflektorjev za namen uravnavanje dnevne svetlobe),
- dvojne fasade in naravno prezračevanje (dvojne fasade so posebne rešitve, sestavljene iz dveh slojev, med katerimi je zračni prostor, ki se pogosto uporabljajo pri poslovnih stavbah ... Več o njih v poglavju 2.2.3),
- aktivni fasadni ovoj (v ta sklop spadajo dinamične »pametne« fasade, ki za zagotavljanje optimalnih bivalnih in energijskih razmer avtomatsko prilagajajo svoje komponente).

Tako zopet, kot za pojem stolpnice, natančne, standardizirane in globalno sprejete definicije o visoko učinkovitem fasadnem oboju ni. Glede na zapisano, bi visoko učinkovit fasadni ovoj lahko opisal na sledeči način. Poleg vseh osnovnih lastnosti, ki jih mora na nivoju posameznih gradbenih proizvodov

izpolnjevati fasadni ovoj (te definira Zakon o gradbenih proizvodih [28]), so naloge visoko učinkovitega fasadnega ovoja naslednje:

1. ustrezna toplotna zaščita:
 - toplotna prehodnost ovoja mora biti ustrezno nizka,
 - v toplih obdobjih leta omejiti vpad direktnega sončnega sevanja v stavbo,
 - minimalne ventilacijske toplotne izgube zaradi infiltracije zunanjega zraka,
 - orientacija in oblika stavbe morata biti prilagojeni lokaciji in klimi,
2. v obdobju ogrevanja omogoča solarne dobitke do te mere, da se lahko dejavnosti v stavbi odvijajo nemoteno,
3. skozi vse leto zagotavlja kvalitetno naravno osvetljenje,
4. zasnovan mora biti trajnostno, to pomeni, da bo funkcije, ki jih opravlja danes lahko enako dobro opravljal skozi celotno predvideno življenjsko dobo objekta,
5. vzdrževanje naprav in elementov, potrebnih da zunanji fasadni ovoj opravlja svoje funkcije, mora biti enostavno in stroškovno upravičeno glede na pričakovane prihranke zaradi uporabe le teh.
6. zagotavlja kvalitetno bivalno okolje za vse uporabnike v stavbi, v vseh letnih časih in skozi celotno predvideno življenjsko dobo stavbe.

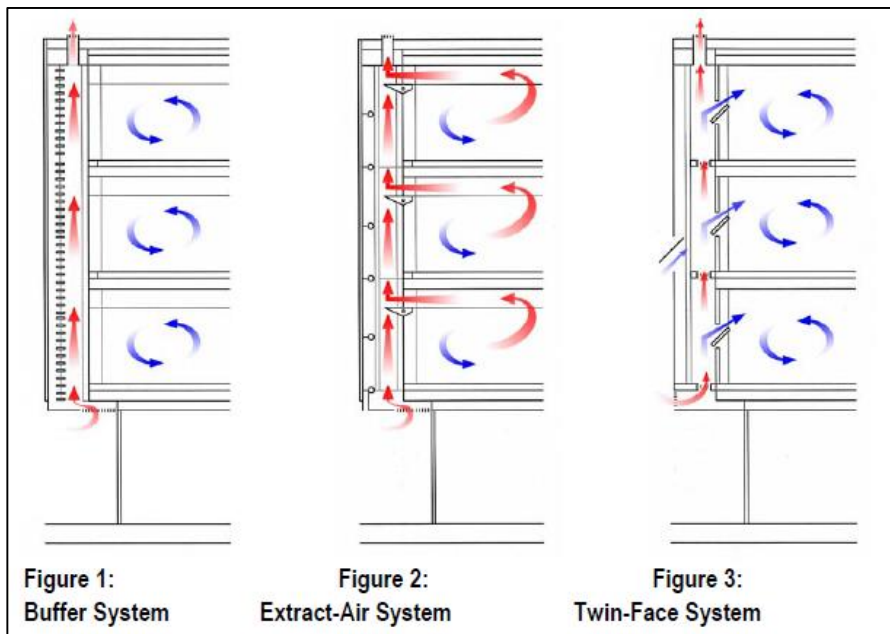
2.5.2 Dvojne steklene fasade

2.5.2.1 Splošno

Trend visokih energetsko potratnih steklenih poslovnih stavbe se je iz ZDA razširil v Evropo, v obratni smeri pa je potekal pojav visokih stavb z dvojno stekleno fasado. Kar pa je obema pojavoma skupno, je to, da so se načrtovalci stavb primarno ukvarjali z estetskimi učinki, zaradi česar dvojne steklene fasade pogosto niso izpolnjevale pričakovanj glede porabe energije in so se izkazale kot neupravičen investicijski strošek. Zaradi tega se je tako med arhitekti kot inženirji razvila delitev na podpornike in nasprotnike dvojnih steklenih fasad na stavbah [29].

Dvojne steklene fasade (v nadaljevanju DSF) so sestavljene iz dveh slojev, ločenih z različno širokim zračnim prostorom. En sloj je praviloma iz toplotno-izolacijske zasteklitve, drug sloj pa iz varnostnega stekla. V prostor med sloja priteka svež zunanji zrak, ki se nato uporablja za naravno ventilacijo stavbe. Glede na zunanje razmere in zasnovo DSF lahko hkrati s prezračevanjem prostora tudi ogrevamo ali hladimo. Vmesni prostor lahko služi tudi za namestitev senčil, s katerimi preprečujemo pregrevanje poleti in skrbimo za primerno osvetljenje z dnevno svetlobo. Različnih konceptov z zasnovo dvojnih steklenih fasad je mnogo. Pri tem so različni avtorji uporabljali različne klasifikacije glede na sposobnost prezračevanja, razdelitve vmesnega prostora na segmente in sposobnost akumulacije sončne energije. Za primer bom povzel klasifikacijo po Wernerju Langu in Thomasu Herzogu [30], ki dvojne steklene fasade delita na tri skupine, ki se razlikujejo glede na način ventilacije in zmanjševanje porabe energije (Slika 10).

Prva skupina (levo na sliki 10), t. i. tamponski sistem (ang. buffer system), primarno služi kot zaščita proti hrupu iz okolice in dodatna toplotna zaščita (pozimi so zračne rege na vrhu in dnu zaprte, s tem se zniža toplotna prehodnost ovoja). Druga skupina (sredina na sliki 10) se od prve razlikuje po tem, da v vmesni prostor odvaja odpadni zrak iz stavbe. Tretja skupina (desno na sliki 10) pa poleg toplotne zaščite in zaščite proti hrupu omogoča še naravno ventilacijo z odpiranjem oken v notranjem sloju ali pa skozi zračne rege [31]. Zaščita proti hrupu se šteje kot pomembna prednost dvojnih steklenih fasad v primerjavi z enoslojnimi.



Slika 10: Delitev dvojnih fasad po Wernerju Langu in Thomasu Herzogu [31].

Naravno prezračevanje je eno izmed področij, ki je pri visokih stavbah problematično. Odpiranje oken je lahko zaradi vremenskih razmer onemogočeno (dež, veter). Z višino narašča hitrost vetra, ki lahko povzroča zračni pritisk na fasadni ovoj. Ta obtežba lahko pri različno orientiranih fasadah povzroči tlačne razlike (na eni strani tlak, na drugi srk), ki lahko imajo za posledico močne zračne tokove skozi stavbo [29]. Mehansko prezračevanje predstavlja pomemben delež pri porabi električne energije v poslovnih stavbah. Poleg tega lahko slabo načrtovano in vzdrževano mehansko prezračevanje vodi do pojava sindroma bolnih stavb (ang. sick building syndrome – SBS).

Vmesni zračni prostor je lahko širok le 15 cm ali pa vse do velikosti prostorov zimskih vrtov [29]. Običajno pa je njegova širina med 0,5 in 1,5 metra.

Kot že omenjeno, obstaja znotraj sveta načrtovalcev stavb izrazita polarizacija na podpornike in nasprotnike DSF. V literaturi lahko za vsako pozitivno lastnost najdemo tudi negativno. Nekatere pomembnejše lastnosti stavb z DSF, pri katerih obstajajo nasprotna mnenja so [29]:

- HRUP: podporniki zagovarjajo DSF kot odlično zaščito proti zunanjemu hrupu, medtem ko nasprotniki menijo, da vmesni zračni prostor poleg svežega zraka prenaša tudi zunanji in notranji hrup iz drugih delov stavbe.
- POTREBA PO OGREVANJU: podporniki trdijo, da je pri stavbah z DSF ta manjša, saj se solarna energija v DSF shranjuje kot v sončnem kolektorju. Nasprotniki menijo, da so v poslovnih stavbah, kjer se običajno aplicirajo DSF, notranji dobitki veliki in zaradi tega potreba po ogrevanju ni problematična.
- POTREBA PO HLAJENJU: s prezračevanjem vmesnega prostora se lahko v stavbo dovede hladnejši zrak, zaradi tega je potreba po hlajenju manjša, toplejši zrak pa se odstrani skozi zračne lopute na vrhu DSF. Nasprotniki se ne strinjajo. Menijo, da pride poleti do pregrevanja vmesnega zračnega prostora, zaradi česar se lahko potreba po hlajenju še poveča.
- NARAVNO PREZRAČEVANJE: podporniki menijo, da se z naravnim prezračevanjem izboljša kakovost zraka in zmanjša poraba energije za mehansko prezračevanje, medtem ko nasprotniki trdijo, da je kljub temu potrebno namestiti mehansko prezračevanje, saj naravno prezračevanje ni mogoče v vseh obdobjih, poleg tega se lahko po vmesnem zračnem prostoru prenašajo neprijetne vonjave.

- CENA: podporniki menijo, da je zaradi energijskih prihrankov na dolgi rok višja začetna investicija v stavbo zaradi DSF upravičena, medtem ko nasprotniki menijo, da se prihranki pri porabi energije ne zmanjšajo, ampak celo povečajo, poleg tega je dražje tudi vzdrževanje.

Kot bo prikazano v primerih dobre in slabe prakse (poglavje 2.5.3), lahko stavbe z DSF delujejo zelo dobro ali pa slabo, na kar vpliva več dejavnikov (lokacija, oblika stavbe, orientacija, redno vzdrževanje ...).

Vsekakor pa so stavbe z DSF zanimive z vidika termodinamičnih procesov in možnosti simuliranja v računalniških orodjih.

2.5.2.2 Kompleksnost termodinamičnih procesov v dvojnih steklenih fasadah – simulacijske omejitve

Kot ukrep pasivno solarne arhitekture omogočajo dvojne steklene fasade akumulacijo sončne energije. Ustrezno ovrednotiti učinek DSF na energetska bilanca stavbe pa se izkaže kot kompleksna naloga. Lastnosti zasteklitev, vrsta in pozicija senčila znotraj zračnega prostora, zasnova in velikost vmesnega zračnega prostora ter velikost zračnih odprtin za dovod in odvod zraka so pomembni faktorji, ki vplivajo na termalno in energetska obnašanje stavb z DSF [3].

Zračni tokovi znotraj vmesnega prostora imajo pomemben vpliv na temperature zračnega sloja in na površine stekel. Simulacijska orodja, ki so sposobna ustrezno ovrednotiti vplive zračnih tokov, uporabljajo metodo za računanje dinamike tekočin – metodo CFD (computational fluid dynamics). CFD-metoda uporablja numerične analize in različne algoritme za računanje tokov znotraj tekočin [32].

Zelo zanimivo bi bilo zasnovati in simulirati računalniški model z dvojno stekleno fasado za obravnavano poslovno stolpnico. EnergyPlus, ki ga uporabljam za računanje porabe energije v stavbi, ni program, ki bi uporabljal metodo CFD za izračun zračnih tokov. V članku *Difficulties and limitations in performance simulation of a double skin facade with EnergyPlus* [33] avtorji izvedejo primerjavo med merjenimi rezultati temperature in hitrosti zračnih tokov znotraj dvojne steklene fasade na manjši bivalni celici ter simuliranimi rezultati programa EnergyPlus. Izkaže se, da pride do precejšnjih razhajanj med rezultati. Kot problem avtorji izpostavijo, da v programu EnergyPlus ni omogočeno dovolj natančno upoštevati kompleksnih procesov prenosa toplote zaradi zračnih tokov znotraj prezračevanega sloja fasade.

Ker je kontrola in verodostojnost izhodnih podatkov ključnega pomena pri računalniških simulacijah porabe energije, sem bil primoran opustiti idejo o izračunu porabe energije za primer dvojne steklene fasade s programom Energy Plus.

2.5.3 Primeri dobre in slabe prakse visoko učinkovitih fasadnih ovojev

V tem poglavju bom predstavil nekatere primere dobre in tudi slabe prakse zasnove fasadnih ovojev na poslovnih stolpnica.

2.5.3.1 New York Time's Building, New York, ZDA, 2007

Zgradba New York Time's Building je 348 metrov (52 etaž) visoka poslovna stolpnica z bruto tlorisno površino slabih 150000 m². Zgrajena je bila leta 2007 za 850 milijonov dolarjev [34]. Stavba je dobila ime po časopisu The New York Time's, ki za sedež družbe uporablja spodnjo polovico stavbe. Kombinacija tehnoloških rešitev stavbo uvršča v skupine aktivnih fasadnih ovojev, fasadnih ovojev za kontrolo sončnega sevanja in fasadnih ovojev za kontrolo dnevne svetlobe.

Investitorji so želeli transparentno stavbo s kvalitetnim delovnim okoljem, pri katerem igra dnevna osvetljenost pomembno vlogo [35]. Tako je fasada zasnovana kot steklena obešena fasada ($WWR = 0,76$)* z dvoslojno zasteklitvijo z nizkoemisijским nanosom z visoko vrednostjo transmisivnosti za dnevno svetlobo ($LT = 0,75$).

Kot zaščita proti sončnemu sevanju se uporabljajo zunanja fiksna senčila, sestavljena iz horizontalnih keramičnih cevi, za 45 centimetrov odmaknjenih od ravnine steklene fasade. Cevi so na tesno razporejene po celotni višini stolpnice, v vidnem polju vsake etaže pa so prekinjene, da omogočajo uporabnikom neoviran pogled v zunanost.



Slika 12: Senčila iz horizontalnih keramičnih cevi na stavbi NY Time's [35].



Slika 11: Stolpnica New York Time's Building [36].

Kvalitetna osvetljenost in prihranki pri porabi električne energije so bili prioriteta, zaradi tega so investitorji leta 2003 (pred pričetkom gradnje) pristopili k znanstvenoraziskovalni ustanovi Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). Skupaj so zasnovali koncept uravnavanja naravne osvetljenosti in optimalne umetne osvetljenosti. V ta namen so zgradili eksperimentalni model primera etaže v velikosti tlorisne površine 420 m² [35]. Tako so zasnovali koncept delovanja avtomatiziranih notranjih rolojev in sistema umetne osvetlitve, ki se avtomatsko prilagaja glede na ravni dnevne osvetljenosti v prostoru. Za grafično podporo in predstavitev rezultatov so izvedli tudi simulacije z računalniškim pripomočkom Radiance [37], ki je namenjen simuliranju osvetljenosti prostorov. Rezultati simulacij z omenjenim programom so prosto dostopni na povezavi https://windows.lbl.gov/comm_perf/NYTimes/radiance-animations/index.html.

* WWR je kratica za »Window to Wall Ratio« in je oznaka za razmerje med površino okenskih odprtín in površino fasadnega ovoja.

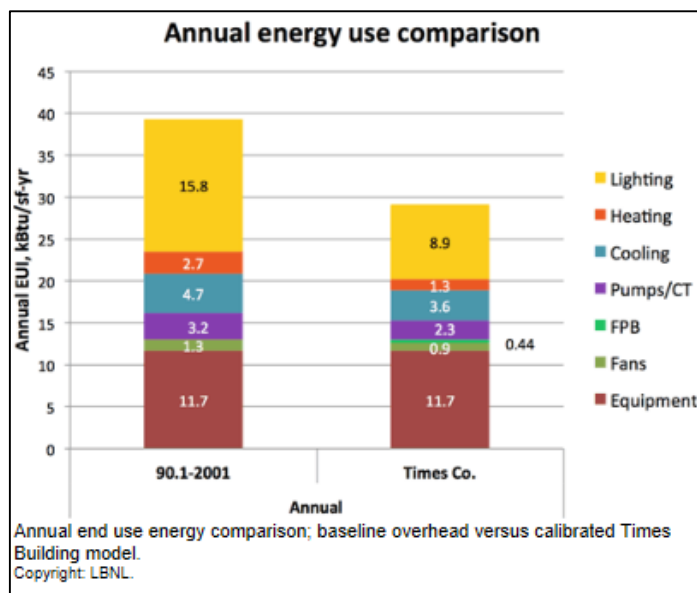


Slika 13: : Pozicije notranjih rolojev glede na različne orientacije fasad, na eksperimentalnemu modelu [34].

Poleg omenjenih sistemov na nivoju fasadnega ovoja je v stavbi ogrevanje, hlajenje in prezračevanje izvedeno s sistemom podtalnega razprševanja zraka.

Leta 2011 so izvedli anketo o zadovoljstvu uporabnikov z vidika bivalnega okolja. Poleg tega so z računalniškim programom EnergyPlus [6] izvedli primerjavo med porabo energije modela konvencionalno zasnovanega nebotičnika in realnega modela nebotičnika [35]. Rezultati so sledeči:

- na skali od 1 do 7 (4 pomeni nevtrarno) je 58 % vseh vprašanih dalo boljšo oceno od nevtralne za kontrolo avtomatskega sistema uravnavanja umetne svetlobe, 78 % vprašanih je bilo zelo zadovoljnih s kvaliteto osvetljenosti delovnih mest,
- 41 % uporabnikov se je na avtomatizirane notranje roloje odzvalo z več kot nevtralno oceno zadovoljstva (povprečna ocena delovanja avtomatiziranih rolojev je bila 4,12),
- kombinacija avtomatiziranih notranjih rolojev in sistema umetne osvetlitve je doprinesla k 54-odсотnemu zmanjšanju porabe električne energije v primerjavi s konvencionalnim modelom,
- skupna poraba elektrike zaradi uporabe senčil, sistemov za uravnavanje dnevne osvetljenosti in podnega razprševanja zraka se ocenjuje na 24 % manjšo kot pri konvencionalnem modelu, medtem ko je potreba po ogrevanju manjša za 51 %.



Slika 14: Stolpčni prikaz primerjave porabe energije glede na različne procese v stavbi na modelu konvencionalne izvedbe stavbe NY Time's in kalibriranemu modelu realne izvedbe [34].

Z dobljenimi rezultati so zadovoljni tako investitorji kot načrtovalci. V tem primeru se je višja začetna investicija v načrtovalski fazi izkazala za upravičeno, saj je obnašanje stavbe v energetskega smislu in kvaliteti notranjega okolja takšno, kot so predvideli načrtovalci stavbe.

2.5.3.2 Post Tower, Bonn, Nemčija, 2002

Stolpnico Post Tower za sedež družbe uporablja nemško pošto podjetje Deutsche Post DHL. Ta 163 metrov (42 etaž) visoka stolpnica z bruto tlorisno površino 107000 m² je bila zgrajena leta 2002 [38]. Namen arhitektov je bil zagotoviti vsem zaposlenim v stavbi stik z naravno svetlobo in svežim zunanjim zrakom, tako so zasnovali fasado stavbe kot dvoslojni ovoj in jo tipološko razdelili na način, ki spodbuja naravno ventilacijo.

Na poslovni stavbi Post Tower so načrtovalci želeli v čim večji meri izkoristiti potencial naravnega prezračevanja, sončnega sevanja in dnevne svetlobe. Potrebo energije ob naravnem prezračevanju zmanjšuje tudi decentralizirano ogrevalno/hladilni sistem.

Obliko stavbe določata dva eliptična segmenta, ločena s 7,2 metra širokim atrijem. Atrij poteka po celotni višini stavbe, in je razdeljen v 4 dele, t. i. »sky-gardens«. Prvi trije deli so visoki 9 etaž, vrhni pa 11 etaž.

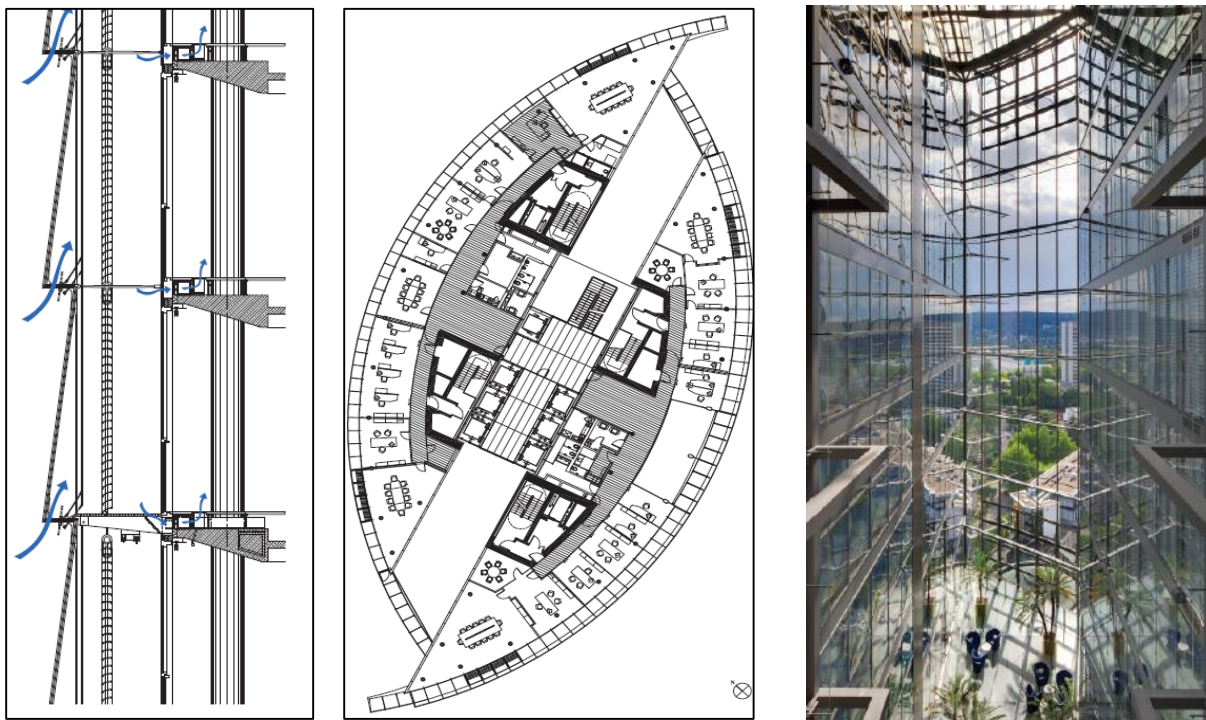
Glavni fasadi stolpnice sta orientirani na sever in jug. Z obliko in orientacijo so poskušali zmanjšati vetrne pritiske na fasado in tako preprečiti premočne zračne tokove v stavbi. Zunanji zrak vstopa skozi stekleno dvojno fasado, teče skozi obodno pozicionirane pisarne in sejne sobe ter nato vstopa v atrij. Na vrhu posameznega atrija so okna, skozi katera posledično izstopi segreti odpadni zrak.



Slika 15: Stolpnica Post Tower, Bonn, Nemčija [38].

Dvojna steklena fasada sestoji iz zunanje enoslojne zasteklitve, premičnih žaluzij v vmesnem prostoru in notranje toplotnoizolacijske zasteklitve od tal do stropa. Zunanja enoslojna steklena fasada je sestavljena iz segmentov, sestavljenih iz podkonstrukcije iz nerjavečega jekla, ki se razpredajo preko devetih etaž. Stekleni paneli zunanjega sloja so na južni fasadi pod rahlim naklonom in omogočajo vstop zraku pri dnu posameznega panela (Slika 17). Na severno orientirani fasadi pa so paneli vertikalni, tako da ima ta gladek videz, zrak pa vstopa skozi ventilacijske rege (Slika 18).

Od pomladi do jeseni se okna mehansko (motorizirano) odpirajo z namenom naravne ventilacije pisarn in s tem v precejšni meri zmanjšajo odvisnost stavbe od mehanskega prezračevanja. Ponoči se preko odprtih oken izvaja nočno hlajenje stolpnice.



Slika 17: Levo: prerez skozi južno dvojno fasado s prikazom zajema zraka. Sredina: tipičen tloris stolpnice, na vzhodni in zahodni strani sta atrija. Desno: eden izmed atrijev, t. i. sky-garden oz. nebeški vrt [38].



Slika 16: Južna fasada in odprtina med slojema steklene fasade [38].

Stolpnica je skozi leto 2003 za obratovanje porabila 75 kWh/m^2 energije (merjeno), kar predstavlja 79 % manjšo porabo kot pri tipični mehansko prezračevani poslovni stavbi. Za hlajenje potrebuje le 3 kWh/m^2 [38]. Gledano na dolgi rok, tako dobro obnašanje stavbe v energetskega smislu upravičuje stroške zaradi višje začetne investicije v zasnovo fasadnega ovoja.



Slika 18: Severna fasada in odprtina med slojema steklene fasade [38].

Zaposleni lahko preko zaslonov, občutljivih na dotik, prilagajajo pozicijo žaluzij in oken ter notranjo temperaturo. S tem je omogočena visoka stopnja prilagodljivosti notranjih razmer uporabnikom.

2.5.3.3 Occidental Chemical Center (Hooker Building), Niagara Falls, NY, ZDA, 1980

Čprav so v Severni Ameriki prednjačili pri grajenju visokih stolpnic, so svojo prvo visoko stavbo z dvojno stekleno fasado zgradili šele 1980 [39]. Ta stavba je bila Occidental Chemical Center (Slika 19). Načrtovalci stavbe so želeli zgraditi stavbo, ki je hkrati visoko učinkovita in transparentna za dnevno svetlobo. Tako so se odločili za izvedbo prezračevane dvojne steklene fasade (širina prezračevane rege je 1,2 m).

Za potrebe eksperimentalne študije obnašanja dvoslojne fasade so celo zgradili eksperimentalni model manjšega dela stavbe. Tako so zasnovali dvoslojno stekleno fasado, ki ima v medstekelnem prostoru za namene sončne zaščite nameščene horizontalne lamele, ki se avtomatsko uravnajo. Lamele imajo na njihovi površini nameščene solarne celice, ki delujejo kot senzorji, na podlagi katerih te lamele nato spremenijo pozicijo. Lamele so avtomatsko vodene tako, da svetlobo blokirajo in preusmerjajo v strop sosednjih prostorov. Prezračevana fasada v poletnih mesecih odvaja absorbirano toploto skozi zračne rege (mehansko odpiranje) na vrhu stavbe, v ogrevalni sezoni pa bi bile te rege zaprte. S tem je medstekelni prostor deloval kot pasivni solarni kolektor in tamponska cona med notranjim in zunanjim okoljem. Zrak se zajema pri dnu stavbe, prav tako skozi rege, ki se glede na razmere mehansko odpirajo in zapirajo

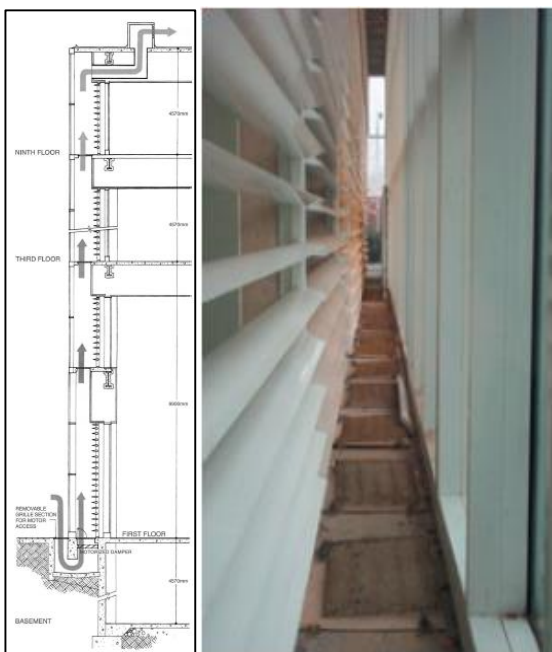
Leta 2001 je stavbo obiskala skupina raziskovalcev, ki so si želeli ogledati obnašanje dvoslojne fasade stavbe [39]. Njihove ugotovitve so naslednje:

- v uporabi je le 30 % stavbe,
- medstekelni prostor je bil v zelo slabem stanju, kar nakazuje, da že nekaj časa ni bil vzdrževan,
- lamele so morali prebarvati, ker so zaradi visoko reflektivne površine v sončnih dneh bleščale voznike avtomobilov ob prečkanju bližnjega mostu,
- avtomatizirane horizontalne lamele niso več avtomatizirane, ampak so v fiksni poziciji,
- zračne rege ob dnu DSF so bile prekrte s ploščami iz iverke, kar nakazuje, da mehansko odpiranje in zapiranje ne deluje več (slika 20 b),
- uporabniki stavbe so nezadovoljni z notranjim toplotnim udobjem, pravijo da je stavba prevroča ali prehladna.

Tako omenjena fasada služi kot primer slabe prakse. Razlogov za slabo obnašanje je več. Stavba je bila v osnovi dobro zasnovana, vendar načrtovalci niso predvideli, da bi katerikoli izmed sistemov v DSF odpovedal. Tehnični sistemi za ogrevanje in hlajenje so bili zasnovani na podlagi polno funkcionalne DSF, ker ta ne deluje kot je bilo predvideno, ti ne zmorejo pokrivati potreb po hlajenju ali ogrevanju



Slika 19: Pogled na stavbo Occidental Chemical Center [39].



Slika 20: Levo: prerez skozi dvojno stekleno fasado. Desno: pokrite zračne rege na dnu stavbe nakazujejo, da avtomatske odpiranje in zapiranje zračnih reg ne deluje [39].

stavbe v vseh obdobjih. Ker uporabniki stavbe niso investirali v vzdrževanje sistemov za avtomatsko odpiranje in zapiranje zračnih reg ter avtomatskega uravnavanja senčil, sta se sistema sčasoma pokvarila. Pri avtomatsko delujočih mehanskih sistemih je redno vzdrževanje nujno potrebno in ga je potrebno predvideti že v fazi načrtovanja stavbe.

3 ZAKONODAJA – Poraba energije v stavbah

Podlago za urejanje področja energetske učinkovitosti stavb predstavlja prenovljena direktiva o energetske učinkovitosti stavb EPBD-r 2010/31/EU (Energy Performance of Buildings Directive-recast) Evropskega parlamenta in Sveta z dne 19. maja 2010 [40]. Na osnovi te direktive so se v Evropski uniji sprejemali standardi, ki npr. določajo metodologije izračunov porabe energije v stavbah, na nivoju držav članic pa akcijski načrti, tehnične smernice, predpisi in zakoni, s katerimi se skrbi za implementacijo omenjene direktive na državnemu nivoju.

V tem poglavju bom na kratko opisal tri pomembnejše dokumente, ki se navezujejo na energetske učinkovitost stavb in so povezani s temo magistrske naloge. Ti dokumenti so:

- Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah [41],
- Tehnična smernica TSG-1-004 Učinkovita raba energije (TSG4)[42],
- Standard SIST EN ISO 13790 [43].

Poleg zgoraj navedenih dokumentov sem za obravnavano nalogo uporabljal še druge. Z njimi sem si pomagal pri nekaterih načrtovalskih ukrepih (npr. požarne lastnosti uporabljenih materialov) in za določitev programskih vhodnih podatkov. Ti dokumenti so:

- Akcijski načrt za skoraj nič-energijske stavbe za obdobje do leta 2020 (ANsNES)[23],
- tehnična smernica TSG-1-001-2010 Požarna varnost v stavbah [44],
- Muster-Hochhaus-Richtlinie (MHHR), 2008 [45],
- pravilnik o zahtevah za zagotavljanje varnosti in zdravja delavcev na delovnih mestih [46],
- pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb [47],
- ASHRAE standard 189.1-2009 [48],
- OIB-Richtlinie 6, Energieeinsparung und Wärmeschutz, 2011 [49].

3.1 Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah

Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah (PURES) [41] določa tehnične zahteve, ki morajo biti izpolnjene za učinkovito rabo energije v stavbah na področju toplotne zaščite, ogrevanja, hlajenja, prezračevanja ali njihove kombinacije, priprave tople vode in razsvetljave v stavbah ter metodologijo za izračun energijskih lastnosti v skladu z Direktivo EPBD-r 2010/31/EU (Pravilnik o učinkoviti rabi energije, 1. člen).

Pravilnik predpisuje obvezno uporabo tehnične smernice za graditev TSG4, ki določa gradbene ukrepe in rešitve za doseganje zahtev iz tega pravilnika ter določa metodologijo izračuna energijskih lastnosti stavbe.

Najpomembnejši del PURES-a, ki je ključen v kontekstu naloge, se nanaša na mejne vrednosti učinkovite rabe energije v stavbah. V členu 7 določa mejne vrednosti naslednjih količin, ki ne smejo biti presežene:

- koeficient specifičnih transmisijskih toplotnih izgub skozi površino toplotnega ovoja stavbe H'_T [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$], določen z izrazom:

$$H'_T \leq 0,28 + \frac{T_L}{300} + \frac{0,04}{f_0} + \frac{z}{4} \quad (1)$$

f_0 ... faktor oblike [m^{-1}] je razmerje med površino toplotnega ovoja stavbe in neto ogrevano površino stavbe

T_L ... povprečna letna temperatura zunanjega zraka [$^{\circ}\text{C}$]

z ... razmerje med površino transparentnega in netransparentnega dela stavbnega ovoja

- dovoljena letna potrebna toplota za ogrevanje Q_{NH} (kWh) stavbe, preračunana na enoto kondicionirane površine A_u oziroma prostornine V_e stavbe:

– za stanovanjske stavbe:

$$\frac{Q_{NH}}{A_u} \leq 45 + 60f_0 - 4,4T_L \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right] \quad (2)$$

– za nestanovanjske stavbe:

$$\frac{Q_{NH}}{V_e} \leq 0,32(45 + 60f_0 - 4,4T_L) \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right] \quad (3)$$

– za javne stavbe:

$$\frac{Q_{NH}}{V_e} \leq 0,29(45 + 60f_0 - 4,4T_L) \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right] \quad (4)$$

- dovoljen letni potreben hlad za hlajenje Q_{NC} (kWh) stavbe, preračunan na enoto hlajene površine stavbe A_u :

– za stanovanjske stavbe:

$$\frac{Q_{NC}}{A_u} \leq 50 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right] \quad (5)$$

- letna primarna energija za delovanje sistemov v stavbi Q_P (kWh), preračunana na enoto ogrevane površine stavbe A_u :

– za stanovanjske stavbe:

$$\frac{Q_P}{A_u} \leq 200 + 1,1(60f_0 - 4,4T_L) \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right] \quad (6)$$

- toplotna prehodnost elementov zunanje površine stavbe in ločilnih elementov delov stavbe z različnimi režimi notranjega toplotnega udobja (mejne vrednosti so podane v tabeli 1 tehnične smernice TSG4).

Poleg zgoraj navedenih zahtev PURES navaja še druge zahteve za energetska učinkovitost stavb, ki se nanašajo na delež energije, zagotovljen iz obnovljivih virov oz. drugih načinov pridobivanja energije za ogrevanje in hlajenje, ter energetska učinkovitost procesov v stavbi (ogrevanje, hlajenje, prezračevanje, priprava tople vode, razsvetljava). Te zahteve povzema in konkretizira tehnična smernica.

Pravilnik velja za vse novogradnje in rekonstrukcije, pri katerih se poseže v več kot 25 % površine toplotnega ovoja stavbe.

3.2 Tehnična smernica za graditev TSG-1-004 Učinkovita raba energije

Tehnična smernica [42] konkretizira zahteve o energetska učinkovitosti stavb, podane v PURES-u. Tako med drugim določa metodologijo za izračun energijskih lastnosti stavbe in različne potrebne izračune za določitev letne dovedene energije za delovanje stavbe. Podaja tudi razne zahteve in omejitve, ki jih morajo dosegati stavbe, gradbeni elementi in tehnični sistemi. Nekatere zahteve in omejitve se nanašajo na:

- elemente arhitekturne zasnove, ki vplivajo na učinkovito rabo energije
- dopustno toplotno prehodnost posameznih gradbenih elementov in sklopov,
- načine pasivnega zmanjševanja pregrevanja zaradi sončnega obsevanja,
- sestavo takšnih gradbenih konstrukcij, da ne bo prišlo do poškodb ali drugih škodljivih vplivov zaradi difuzijskega prehoda vodne pare,
- ravni potrebne vračanja toplote ali hladu odtočnega zraka

Pri podajanju konkretnih zahtev, metodologij in izračunov se opira na veljavne slovenske standarde, ki so nastali s privzemom in prilagoditvijo mednarodnih evropskih ali tujih nacionalnih standardov.

Za potrebe naloge je zanimiva metodologija za izračun energijskih lastnosti stavbe, ki podaja način za izračuna letne potrebne toplote za ogrevanje stavbe in letnega potrebnega hladu za hlajenje stavbe ter izračun dovedene energije za delovanje stavbe za različne tehnične sisteme v stavbi. Tehnična smernica se osredotoča predvsem na drugi del, to je izračun dovedene energije stavbe, mene pa zanima prvi del. Način za izračun potrebne energije za ogrevanje in hlajenje stavbe temelji na standardu SIST EN ISO 13790, ki ga bom opisal v nadaljevanju.

3.3 Standard SIST EN ISO 13790:2008 Energijske lastnosti stavb - Račun rabe energije za ogrevanje in hlajenje prostorov

3.3.1 Splošno

Standard SIST EN ISO 13790 [43] spada v sklop standardov, ki podpira Direktivo o energetski učinkovitosti stavb (predhodnica EPBD-r). Njegov namen je podajanje računskih metod za izračun potrebne energije za ogrevanje in hlajenje stanovanjskih in nestanovanjskih stavb na nivoju evropske skupnosti. Pri tem konkretizira in definira pojme v povezavi z računanjem porabe energije, kot npr. kondicionirana površina, koeficient transmisijskih izgub ...

Računske metode opisujejo:

- transmisijski in ventilacijski prenos toplote toplotnih con stavbe, ki so ogrevanje ali hlajenje na konstantno notranjo temperaturo,
- prispevek notranjih in solarnih dobitkov k toplotni bilanci stavbe,
- letne potrebne energije ogrevanja in hlajenja za vzdrževanje notranje temperature v stavbi – latentna energija ni vključena,
- letne dovedene energije za ogrevanje in hlajenje z uporabo vhodnih podatkov iz relevantnih standardov za tehnične sisteme.

Standard loči tri različne računске metode, in sicer mesečno, preprosto urno in dinamično (ang. dynamical ali detailed) metodo. Njegov namen je podajati procedure in pogoje, ki se nanašajo na vhodne podatke, s katerimi se zagotovi skladnost med različnimi računskimi metodami. Tako npr. podaja skupna pravila za definiranje robnih pogojev in fizičnih vhodnih podatkov neodvisno od uporabljene metode. Katero računsko metodo uporabiti, se določi na nacionalni ravni. Izbira pa je odvisna od tipa stavbe (stanovanjska, poslovna), kompleksnosti stavbe in tehničnih sistemov.

Dinamična metoda upošteva transmisijski in ventilacijski prenos toplote, absorpcijo toplote v konstrukcijskih sklopih stavbe ter notranje in solarne dobitke v stavbi, neposredno preko kratkih časovnih obdobij (časovni koraki), npr. na eno uro. Zaradi upoštevanja toplotne kapacitivnosti stavbe se dinamična metoda realno odziva na spremembe, tako npr. ob izklopu sistema za ogrevanje zaradi vpliva termalne mase stavbe padec notranje temperature ni nenaden.

Prvi dve metodi, mesečna in preprosta urna, pa spadata pod kvazistacionarne metode, pri katerih se dinamični učinki stavb zajamejo z vpeljavo korelacijskih faktorjev. Ti faktorji poskušajo zajeti vplive notranjih in solarnih dobitkov ter efekt, ki ga ima termalna masa stavbe na porabo energije.

3.3.2 Vpliv uporabe različnih računskih metod po standardu SIST EN ISO 13790:2008

Že leta 2004 je bilo v diplomski nalogi Sabine Jereb z naslovom *Toplotni odziv stavb po evropskem predstandardu prEN ISO 13790* [50] opozorjeno na občutljivost računskih metod, podanih v standardu. Takrat je kandidatka ugotovila, da imajo na končni rezultat velik vpliv korelacijski faktorji za upoštevanje dinamičnega vpliva stavb. Tako je ugotovila, da imajo veliki toplotni dobitki v primerjavi

z izgubami pomemben vpliv na končni rezultat izračunane porabe toplote. Ugotovljena so bila velika odstopanja med izračuni po takrat predlagani sezonski in mesečni metodi.

Od takrat se je omenjen standard spremenil, tako sezonske metode ni več, poleg mesečne pa sta dodani še preprosta urna in dinamična. Narejenih je bilo kar nekaj študij, ki se ukvarjajo s primerjavo rezultatov, dobljenih po dinamičnimi in ostalih metodah (npr. [51], [52]). Dinamični parametri so bili pogosto identificirani kot vzrok za razlike v rezultatih.

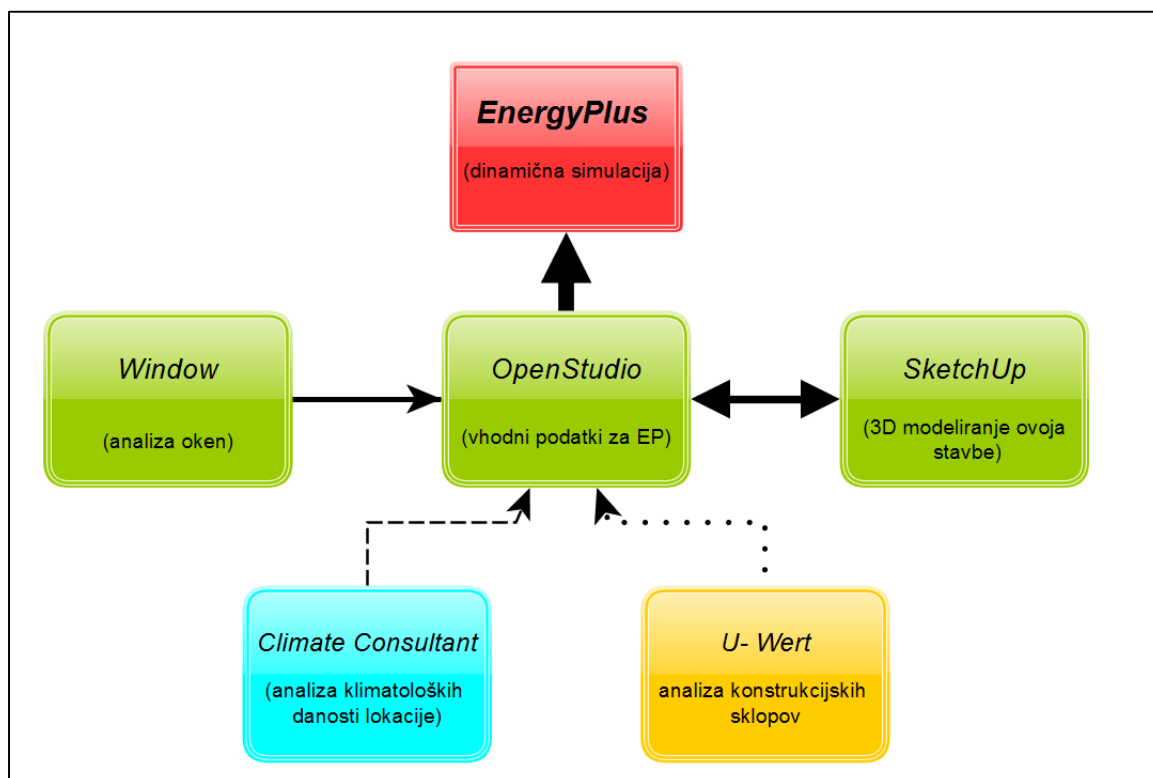
Leta 2007 so v članku *Impact of using different models in practice – A case study with the simplified methods of ISO 13790 standard and detailed modelling programs* [53] avtorji izvedli parametrično študijo na stavbi z 9 prostori in skupno površino 336 m². Njihov namen je bil primerjati, kako se rezultati (koristna energija za ogrevanje in hlajenje) ob spremembi določenih vhodnih podatkov spreminjajo za modele z različnimi računskimi metodami. Njihov namen ni bil ugotoviti, kako natančni so programi, ampak v katerih primerih so rezultati med različnimi metodami primerljivi in v katerih ne. Tako so med sabo primerjali 5 simulacijskih modelov: mesečna metoda, preprosta urna metoda, dinamični metoda s programom EnergyPlus in ESP-r ([54]) v skladu z omejitvami za skladnost računskih metod po ISO 13790 [43] in dinamična metoda brez omejitev za skladnost med računskimi metodami s programom ESP-r. Vhodni podatki, ki so jih spreminjali, so se nanašali na: lokacije (3 različne, južna (Atene), centralno evropska (Amsterdam) in severna (Aberdeen)), notranje dobitke (5 različnih variant, razlikujejo se glede na urnike in moč), delež zastekljenih površin (3 variante – osnovni, osnovni x2 in osnovni x0,5), tip nosilne konstrukcije (zelo lahka, lahka, masivna, masivna s slabo izoliranimi stenami), prezračevanje stavbe (5 variant, razlikujejo se glede na urnike in jakosti), orientacije (osnovna, osnovna zasukana za 90° in 180°) in notranje temperature (6 različnih variant). Zanimivo je bilo brati postopke, kako so avtorji skrbeli za skladnost med modeli preprostih računskih metod (mesečna in urna) ter dinamičnih metod. Iz prebranega sem lahko ugotovil, da imajo omejitve za skladnost računskih metod, ki jih predlaga standard SIST EN ISO 13790, pogosto za učinek zatiranje kalkulacijskih sposobnosti dinamičnih programov (npr. pri koeficientih za računanje konvektivne toplotne prestopnosti, kjer dinamična programa omogočata prilagajanje koeficientov glede na zunanje in notranje pogoje (hitrost vetra in temperatura zraka), se predpostavi konstantna vrednost tekom celotnega poteka simulacije).

Avtorji članka so zopet ugotovili, da je korelacijski faktor za dinamične učinke pri mesečni metodi glavni vzrok za večino razlik v rezultatih. Rezultati med preprostimi in dinamičnimi metodami so bili v nekaterih primerih dokaj skladni, v drugih primerih pa zelo različni. V skoraj vseh primerih so bili rezultati simulacijskih programov EnergyPlus in ESP-r podobni. Preprosta urna metoda je izkazovala bolj primerljive rezultate z rezultati dinamičnih programov kot pa mesečna. Avtorji so sklenili, da so rezultati mesečne in preproste urne metode bolj v skladu z rezultati dinamičnih metod za izračunane potrebe po ogrevanju masivnih stavb z majhnimi notranjimi dobitki in intenzivnim prezračevanjem (več urnih izmenjav zraka). Pri rezultatih potrebne energije za hlajenje so bile praviloma razlike med računskimi metodami izrazitejše. Pri rezultatih za dinamično metodo s programom ESP-r, ki računa brez omejitev po SIST EN ISO 13790, smo lahko v večini primerov ugotovili skladnost, v nekaterih primerih pa dokaj velika odstopanja v primerjavi z modelom ESP-r, ki upošteva omejitve. Tabela z rezultati članka bo prikazana v prilogi A.

Tako lahko sklenem, da obstajajo razlike med rezultati za različne računske metode. Pri interpretaciji rezultatov moramo biti previdni. Potrebno je dobro poznati vhodne podatke, kot je prikazano v omenjeni raziskavi. V nekaterih primerih so lahko rezultati med programi, ki uporabljajo različne računske metode primerljivi, spet v drugih primerih pa zelo različni.

4 PREDSTAVITEV UPORABLJENIH PROGRAMSKIH ORODIJ

Uporabil sem 6 različnih programov, ki so, čeprav vsak opravlja svojo ločeno funkcijo, neposredno ali posredno povezljivi en z drugim. To so Climate Consultant [55], U-Wert [56], Window [57], SketchUp Make [58], OpenStudio (OS) [7] in še najpomembnejši – EnergyPlus (EP) [6]. Prvih pet programov sem potreboval za določitev ustreznih vhodnih podatkov, ki jih zadnji potrebuje za izvedbo dinamične simulacije porabe energije v stavbi (Slika 21). Najmočnejša interakcija oz. odvisnost je med programoma EP in OS, saj je namen drugega uporabniku prijaznejša obdelava vhodnih podatkov, potrebnih za delovanje prvega (grafični vmesnik za EP). EP je sam po sebi uporabniku zelo neprijazen (program nima grafičnega vmesnika), a predstavlja trenutno enega najnaprednejših simulacijskih orodij za dinamično analizo porabe energije v stavbah. Direktno sta povezana tudi SketchUp in OS, saj se slednji uporablja kot vtičnik prvega in OS ter Window, iz katerega lahko podatke direktno uvozimo v OS. Ostala programa, Climate Consultant in U-Wert, pa nista direktno povezana z OS oz. EP, a sem ju posredno potreboval za določitev ustreznih vhodnih podatkov. Podrobnejša predstavitev programov in interakcije med njimi sledi v podpoglavjih. Posebno pozornost bom namenil programu EP, za katerega je literature oz. primerov uporabe v slovenskem jeziku zelo malo, predstavlja pa velik potencial za širšo uporabo v svetu energetskega modeliranja stavb.



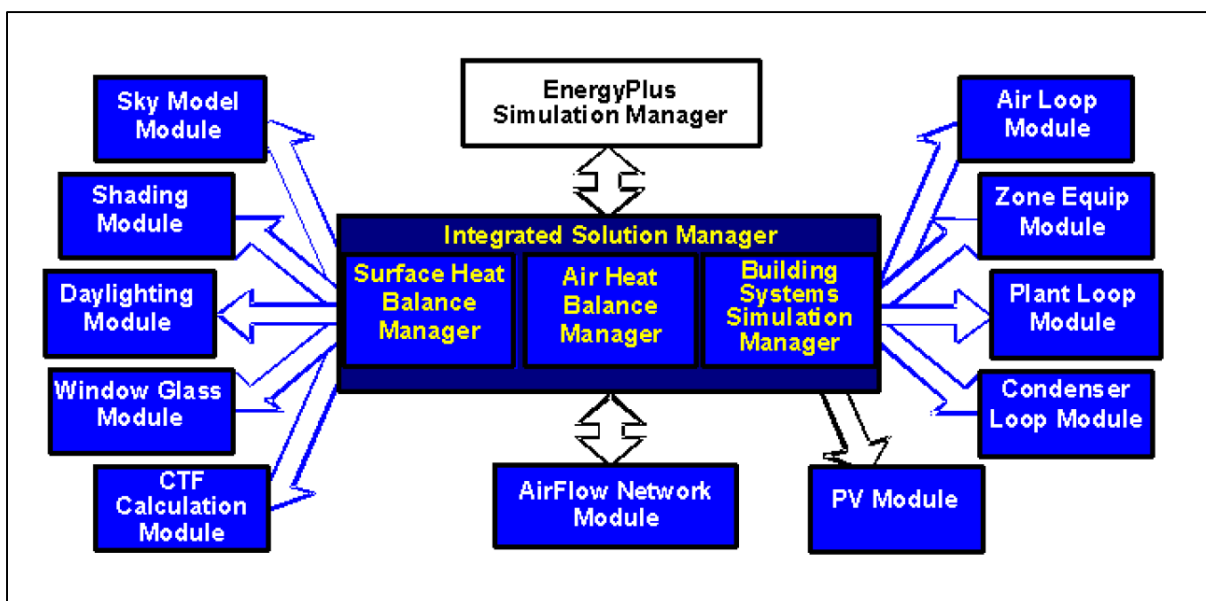
Slika 21: Organigram uporabljenih programov in interakcij med njimi.

4.1 EnergyPlus 8.5.0

EnergyPlus je simulacijski program za dinamično analizo porabe energije v stavbah. Računa potrebno energijo za ogrevanje, hlajenje, prezračevanje, porabo tople vode, razsvetlavo in delovanje električnih naprav ob upoštevanju notranjih dobitkov ljudi, opreme in raznih procesov v stavbi. Zelo pomembno je tudi to, da je EP brezplačen odprtokodni program, katerega razvoj financira javna ustanova iz ZDA, in sicer U.S. Department of Energy (DOE) Building Technologies Office (BTO). Njegov razvoj koordinira National Renewable Energy Laboratory (NREL), sodeluje pa za različnimi državnimi DOE laboratoriji, akademskimi institucijami in privatnimi podjetji. Program vsebuje podporna orodja *IDF-Editor* za kreiranje vhodnih podatkov v preprosti tabelarni obliki, *EP-Launch* za organiziranje datotek vhodnih in izhodnih podatkov ter za zagon simulacij ter *EP-Compare* za primerjavo rezultatov različnih simulacij. Potrebno se je zavedati, da EP nima grafičnega vmesnika (vnašanje vhodnih podatkov preko *IDF-Editor*-ja je zelo togo in praktično onemogoča geometrijsko zahtevnejše modele). Je konzolni program, ki bere vhodne podatke in izpisuje izhodne podatke. Obstaja vrsta programov, ki opravljajo funkcijo grafičnega vmesnika za EP (eden izmed njih je prej omenjeni OS) [6].

Korenine programa segajo v pozna 70-ta in zgodnja 80-ta leta prejšnjega stoletja, ko sta se na neposredni odgovor energetske krize začela razvijati njegova predhodnika BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) in DOE-2. Kot pri njegovih predhodnikih, je namen EP na podlagi fizičnih geometrijsko-konstruktivsko-materialnih karakteristik stavbe, njene lokacije, orientacije in vrste (poslovna, šola, bolnica ...) ter uporabljenih strojno-elektrotehničnih sistemov simulirati dejansko obnašanje stavbe v energetskega smislu [59].

Program je sestavljen iz več programskih modulov, ki delujejo skupaj z namenom, da izračunajo potrebe stavbe za ogrevanje in hlajenje, upoštevajoč različne tehnične sisteme in vire energije. Program deluje po osnovnih principih toplotnega ravnotežja [60]. Kaj to pomeni? To lahko najlažje opišem s pomočjo slike 22. Naloga nekaterih modulov nižjega ranga je pridobitev ustreznih vhodnih podatkov za izračun toplotnega ravnotežja stavbe kot celote. Toplotno ravnotežje se računa na nivoju ovoja stavbe (surface heat balance manager), na nivoju toplotnih con z manipuliranjem toplotnega ravnotežja zračne mase v coni (air heat balance manager) in na nivoju tehničnih sistemov, ki omogočajo ustrezno delovanje stavbe (building system simulation manager). Hkrati pa je potrebna sočasna interakcija med naštetimi nivoji, saj vplivajo eden na drugega.



Slika 22: Posplošena shema delovanja oz. interakcije med različnimi moduli [59].

Avtorji programa trdijo, da so modeli programa relativno preprosti, problem pa predstavlja potrebna organizacija različnih podatkov, ki omogočajo simulacijo mnogih različnih situacij, ki so odvisni od tipa stavbe in sistemov v stavbi. Program se razvija že slabih 40 let, v njegovi programski kodi se skriva za vsaj toliko let raziskav na gradbeno-fizikalnem področju. Omogočena je vrsta različnih možnosti vhodnih in izhodnih podatkov, zato program od uporabnika zahteva poglobljeno študijo njegovega delovanja in poznavanje teoretičnih osnov, ki se skrivajo v izračunih. Dokument, ki opisuje vhodne in izhodne podatke ima preko 1800 strani, dokument, ki pojasnjuje teoretično ozadje izračunov pa preko 1300 strani. To sta le dva od trinajstih dokumentov. Vsa dokumentacija v povezavi z delovanjem programa (npr. teoretična podlaga za izračune, možnosti in omejitve programa, slovar za programsko kodo ...) je možno pridobiti na spletni strani programa [6].

Eden izmed glavni vhodnih podatkov programa je datoteka s klimatskimi podatki lokacije stavbe (.epw – energy plus weather), ki vsebuje urne vremenske podatke. Omenjene datoteke so prosto dostopne na spletni strani <https://energyplus.net/weather> [61] za več tisoč lokacij po svetu.

Kako poteka simulacija in zakaj je dinamična? Simulacije stavbe se izvaja glede na določen časovni okvir, lahko je en dan, mesec ali celotno leto. Eden izmed pomembnih vhodnih podatkov, ki direktno vpliva na končni rezultat, je časovni korak (ang. timestep) izračunov. To je časovni interval, glede na katerega se posodobijo vhodni podatki (npr. zunanja temperatura) in ponovi izračun toplotnega ravnotežja. Osnovna vrednost časovnega koraka v programu je 15 minut, ki pa se lahko spreminja, glede na potrebe uporabnika. Uporabljene enačbe za izračun toplotnega ravnotežja so same po sebi stacionarne (časovno nespremenljive), simulacija pa je dinamična ravno zaradi kratkih časovnih korakov in urnih vremenskih podatkov, zaradi katerih se lahko program sproti odziva na spremembe zunanje okolja. Tako se je potrebno zavedati, da simulacija ni dinamična v absolutnem smislu (uporabljene enačbe za izračun toplotnega toka so stacionarne, fizikalne lastnosti materialov so konstantne).

Nekatere funkcije, ki jih program omogoča:

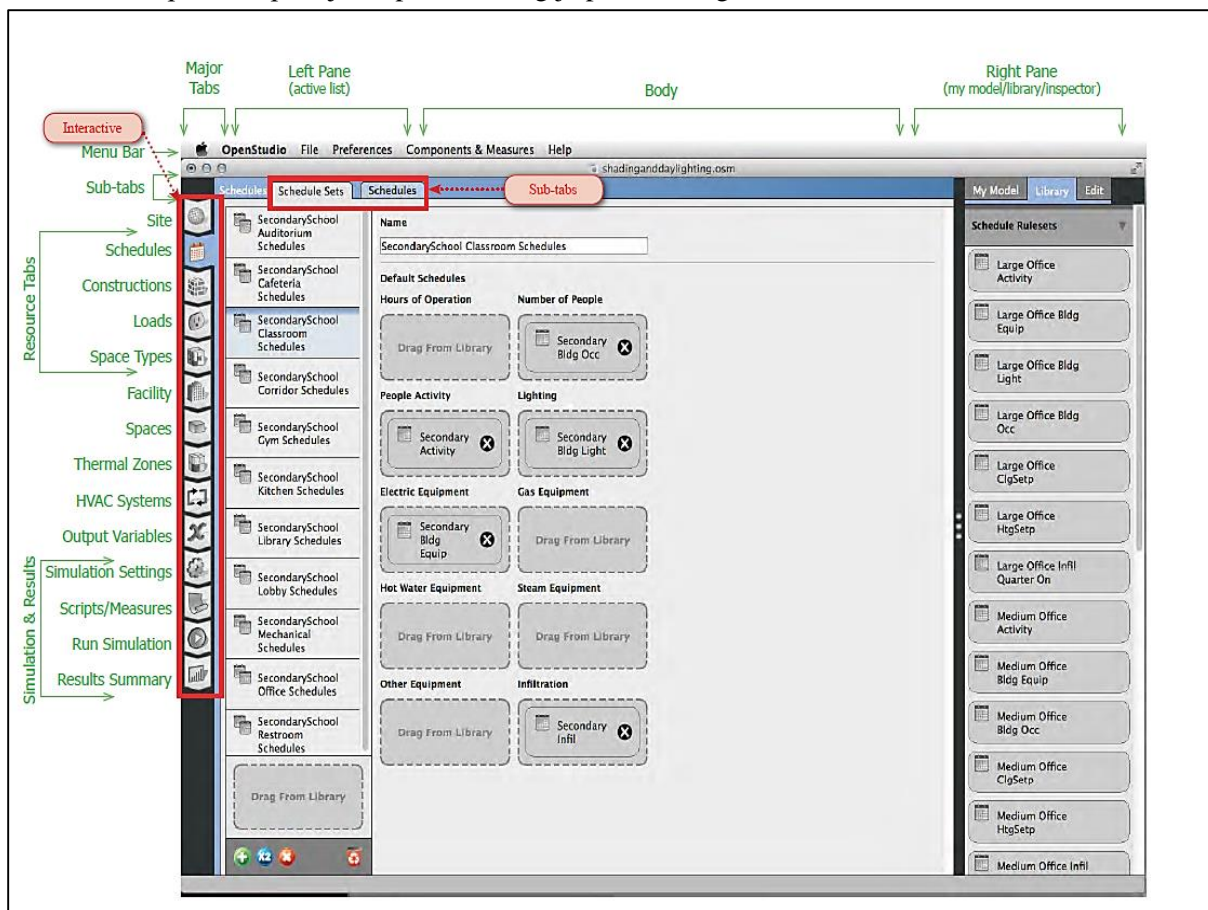
- Zunanja temperatura suhega termometra in hitrost vetra sta funkcija višine in sta odvisni od višine posamezne zunanje površine stavbe, kar ima vpliv na energijske tokove visokih stavb. Pri izračunu hitrosti vetra se upošteva tudi karakteristike terena (odprt teren, gozd, mesto ...).
- Glede na vrsto oz. karakteristike posameznega prostora omogoča določanje moči notranjih dobitkov (ljudi, oprema, luči) in definiranje različnih urnikov (temperaturni režim ogrevanja in hlajenja, zasedenost prostorov, delovanje naprav, infiltracije zunanega zraka, delovanje razsvetljave ...).
- Senčenje objekta: program lahko upošteva vpliv samo-senčenja objekta in senčenja zaradi drugih okoliških objektov, na podlagi dejanskih pozicij sonca na nebu in ob upoštevanju izmerjenih vrednosti direktnega in difuznega sončnega sevanja (program vsebuje podatke o poziciji stavbe, tj. zemljepisna lega in širina, na podlagi tega definira model zunanega neba z dejanskimi sončnimi potmi).
- Program lahko upošteva vpliv sončnega sevanja zaradi odboja direktnega in difuznega sončnega sevanja od okoliških objektov in tal.
- Upošteva toplotno kapaciteto konstrukcijskih sklopov.
- Kontrola senčil: obstajajo različne možnosti kontroliranja delovanja senčil.
- Modeliranje strojno-tehničnih sistemov v stavbi (za ogrevanje, hlajenje, prežračevanje, pripravo tople vode ...) in tako direktno upoštevanje razlike med neto potrebno in dovedeno energijo.
- Program omogoča analizo stroškov tekom življenjske dobe objekta.

Izbira posameznih funkcij vpliva na natančnost izračuna in trajanje simulacije. Od uporabnika je torej odvisno, kakšne funkcije želi upoštevati. Pri interpretaciji rezultatov simulacij je potrebno imeti v mislih programske nastavitve (več v poglavje 6.2. Programske nastavitve – vhodni podatki), saj lahko le tako razumemo rezultate in kontroliramo delovanje računalniškega modela.

4.2 OpenStudio 1.9.0

OpenStudio [7] je skupek programskih orodij, ki podpirajo energetska analiziranje stavb s programom EnergyPlus in napredno analiziranje dnevne osvetljenosti s programom Radiance [37]. Je brezplačen odprtokodni program, ki se konstantno posodablja in izboljšuje. Dostopen je preko spletne strani <https://www.openstudio.net/>, kjer je tudi vsa literatura in uporabne povezave. Podobno kot EP, ga razvija vrsta ustanov iz ZDA, pomembna razlika pa je ta, da pri njegovem posodabljanju in odpravljanju napak sodeluje tudi vrsta posameznikov s celega sveta, ki so aktivni na področju energetike stavb in programiranja.

Paket programskih orodij, ki spadajo pod OS, predstavljajo *OpenStudio SketchUp Plug-in*, *OpenStudio Application* (Slika 23), *ResultsViewer* in *Parametric Analysis Tool*. *OpenStudio SketchUp Plug-in* je dodatek k popularnemu programu za 3-D modeliranje Google SketchUp in omogoča hitro kreiranje geometrije stavbe, potrebne za EP. *OpenStudio Application* je grafični vmesnik, ki omogoča dostop do raznih modulov v EP, kot npr. ovoj stavbe, notranji dobitki, urniki in HVAC (kratica iz ang. heating, ventilation and air conditioning). *ResultsViewer* omogoča ogled in primerjavo različnih časovno odvisnih izhodnih podatkov iz EP. In zadnji, *Parametric Analysis Tool*, omogoča sočasno analizo različnih ukrepov, ki vplivajo na porabo energije posameznega modela stavbe.



Slika 23: Prikaz OS aplikacije in njenih orodnih vrstic [62].

Program se stalno posodablja in popravlja (nova verzija programa izide vsakih nekaj mesecev). Uporabniki s celega sveta pri tem sodelujejo s poročanjem o problemih, odpravljajo programske »hrošče« in tako prispevajo svoj delež k izboljšanju programa (poleg uradnih institucij, ki skrbijo za njegov razvoj). Kljub temu so v programu pogoste nepopolnosti oz. napake. Tako je treba biti previden pri interpretaciji rezultatov, saj se pogosto zgodi, da se vhodni podatki ne prenesejo oz. »popačijo« ob prenosu v EP. Poleg tega sam OS ne omogoča takšne raznolikosti pri vnašanju vhodnih podatkov kot EP, tako je pogosto treba dodatno manipulirati s podatki v EP preko IDF-Editorja. Vhodni podatki se lahko prenašajo le iz OS v EP, obratno to ne deluje!

4.3 SketchUp Make

Google SketchUp je praktičen risarski program za inženirje, arhitekta in razne oblikovalce. Na enostaven in hiter način omogoča kreiranje različnih tridimenzionalnih objektov (3-D objektov), od preprostih do kompleksnejših. Pred nekaj leti je bil še popolnoma brezplačen, a z naraščajočo popularnostjo v svetu 3-D modeliranja, z vedno širšim spektrom uporabe in vedno boljšo podporo se je razdelil v osnovno brezplačno verzijo SketchUp Make in plačljivo nadgrajeno verzijo SketchUp Pro. Za namene te naloge je popolnoma zadostovala brezplačna verzija, saj na njej deluje OS vtičnik in vsebuje vse potrebne risarske pripomočke za preprosti izris geometrije stavbe. Program je dostopen preko spletne strani <http://www.sketchup.com/> [58].

4.4 Window 7.4

Program Window 7.4 je brezplačen program za računanje gradbeno-fizikalnih karakteristik oken, ki ga je razvila ustanova Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) s sedežem v ZDA. Vsebuje obsežno bazo stekel (okoli 30000) in omogoča računanje toplotne prehodnosti okna kot celote (zasteklitev + okvir + distančniki) ter različnih optičnih karakteristik zasteklitev (prepustnost sončne energije, prepustnost vidnega dela sončnega sevanja, barvnih lastnosti zasteklitev ...). Dostopen je preko spletne strani <https://windows.lbl.gov/software/window/window.html> [57].

Program je povezljiv z vtičnikom OS in tako omogoča izvoz ustvarjenih in analiziranih oken v program EP.

4.5 Climate Consultant 6.0

Climate Consultant 6.0 je brezplačen in prosto dostopen računalniški program, razvit v različnih znanstvenih in izobraževalnih institucijah v ZDA. Dostopen je na spletni strani <http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/> [55], kjer je podan tudi splošen opis in navodila za uporabo.

Osnovni namen programa je grafična predstavitev različnih urnih klimatskih podatkov več tisoč lokacij po vsem svetu z namenom boljšega poznavanja osnovnih klimatoloških danosti posameznih lokacij, saj je poznavanje le teh osnova bioklimatskega načrtovanja stavb, torej načrtovanja stavb z namenom čim boljšega izkoriščanja lokalnih klimatskih danosti ob upoštevanju udobja uporabnika. Urni vremenski podatki, ki jih program na različne načine grafično predstavlja, so: temperatura zraka (suhega in vlažnega termometra), vlažnost (relativna in absolutna), sončno sevanje, osvetljenost, oblačnost, vetni vplivi (smer, jakost, vlažnost) in temperatura tal. Program poskuša na posplošen način povezati zunanje razmere z udobjem v notranjosti stavbe. Tako ob upoštevanju štirih različnih standardov za določitev toplotnega udobja izrisuje psihrometrične karte in podaja osnovne načrtovalske ukrepe za zagotavljanje notranjega toplotnega udobja.

Čeprav bi za določitev osnovnih klimatoloških danosti lokacije obravnavane stavbe lahko uporabil tudi druge vire (npr. Atlas okolja), je predstavitev podatkov s tem programom priročna zaradi uporabljene datoteke z vremenskimi podatki, ki je identična datoteki, uporabljeni v programu EP. To mi je pomagalo pri interpretaciji rezultatov simulacije in določitvi nekaterih vhodnih podatkov, ki jih potrebuje EP (npr. vhodni podatki za kontrolo zunanjih senčil). Vremenski podatki so v obliki .epw (energy plus weather) datoteke, dostopni brezplačno na spletni strani <https://energyplus.net/weather> [61].

4.6. U-Wert

Programski pripomoček U-Wert oz. u-wert.net [56] je spletni program za računanje gradbeno-fizikalnih karakteristik konstrukcijskih sklopov, kot so stacionarna toplotna prehodnost, fazni zamik in temperaturno dušenje ter difuzije vodne pare skozi konstrukcijski sklop (količina kondenzirane vodne pare, čas sušenja, difuzijska upornost vodni pari ...). Pri tem se opira na nemške standarde DIN [63]. Poleg tega služi kot odličen vir splošnih informacij o gradbeno-fizikalni problematiki stavb in fizikalnih lastnostih gradbenih materialov (gostota, toplotna prevodnost, difuzijska upornost, specifična toplotna kapaciteta). Obstajata brezplačna in plačljiva verzija programa, sam sem uporabljal brezplačno verzijo. Program je dostopen na spletni strani <https://www.u-wert.net/?lv=1>.

S pomočjo programa sem ustrezno sestavil konstrukcijske sklope netransparentnega dela stavbnega ovoja obravnavane stavbe, tako da ustrezajo zahtevam PURES-a (glede stacionarne toplotne prehodnosti in difuzije vodne pare). Tako sem dobil vhodne podatke za sestavo konstrukcijskih sklopov v OS.

5 PREDSTAVITEV OBRAVNAVANE STAVBE

5.1 Predstavitev obravnavane stavbe

5.1.1 Splošni podatki o lokaciji, nosilni konstrukciji in geometriji stavbe

Stavba se nahaja v Ljubljani na naslovu Dunajska cesta 50, 1527 Ljubljana. Spada pod katastrsko občino Bežigrad, njena parcelna številka pa je 1929 [64]. Po CC-SI klasifikaciji stavb spada pod nestanovanjske upravne in pisarniške stavbe s klasifikacijo 12203 (druge upravne in pisarniške stavbe). Stavba je last podjetja Petrol, Slovenska energetska družba d. d., ki stavbo uporablja kot glavni sedež družbe. Poslovna stolpnica je bila zgrajena leta 1972 [65].



Slika 24: Pogled na južno fasado obravnavane poslovne stavbe [67].

Nosilna konstrukcija stavbe je sestavljena iz armiranobetonskih stebrov in sten. Medetažno nosilno konstrukcijo predstavlja rebričasta armiranobetonska plošča.

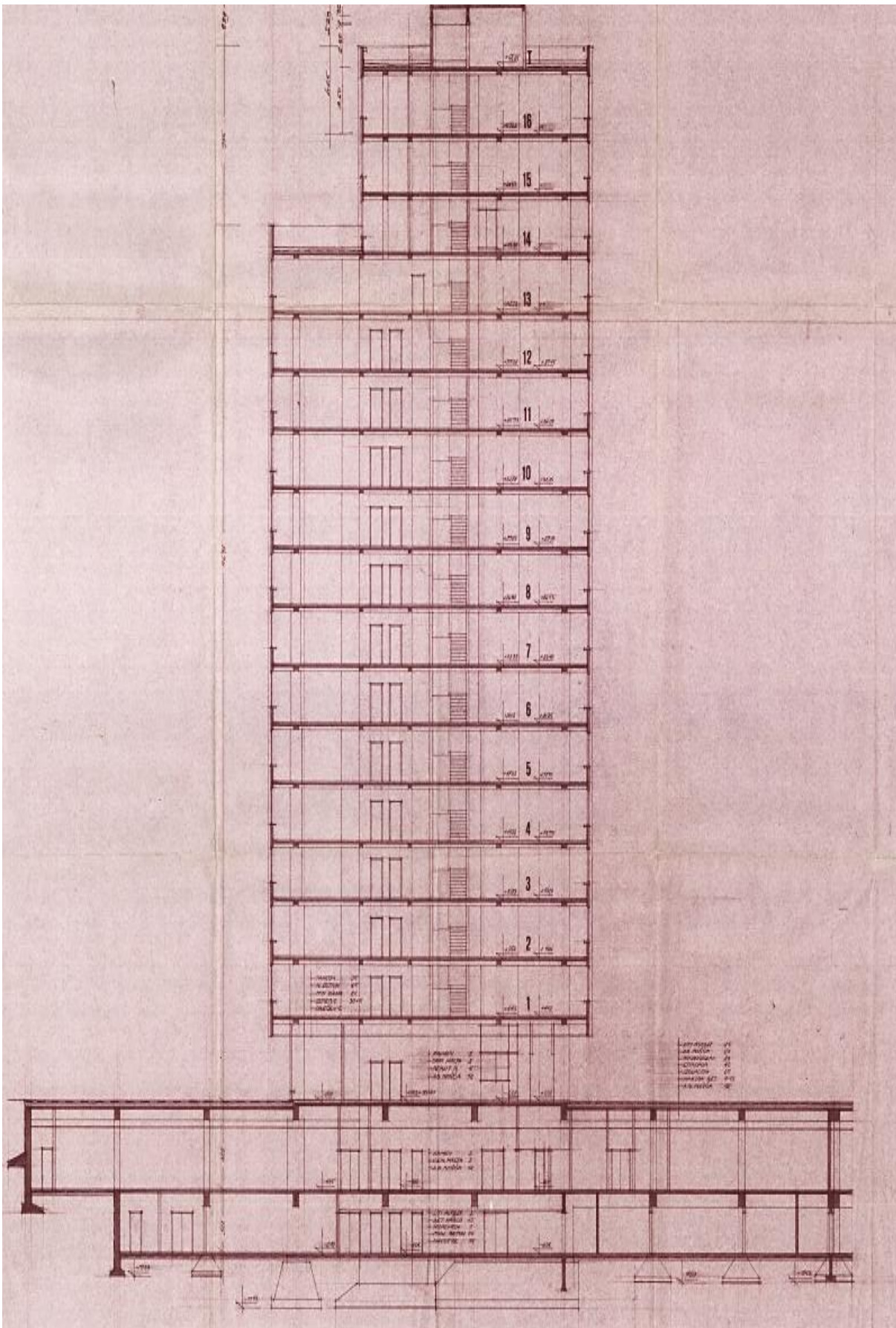
Glavni podatki o stavbi so strnjeni v preglednici 2. Podatke o geometriji stavbe sem pridobil iz načrtov, ki mi jih je posredoval predstavnik lastnika stavbe [66].

Stavba vsebuje vsega skupaj 19 etaž, od katerih sta dve kletni. V kletnih prostorih se nahajajo razni servisni prostori, računalniški center in skladišča. Zgornja kletna etaža je tesno povezana s tržnico, javnim podhodom ter z različnimi trgovskimi in gostinskimi lokali. Kletni prostori stolpnice se nadaljujejo v druge prostore, ki ne spadajo v sklop obravnavane stavbe. V pritličju stavbe se nahaja sprejemna recepcija in avla, iz katere se lahko dostopa do glavnih vertikalnih komunikacij. Po obodu tlorisa pritličja pa so razporejene manjše sejne sobe in pisarne.

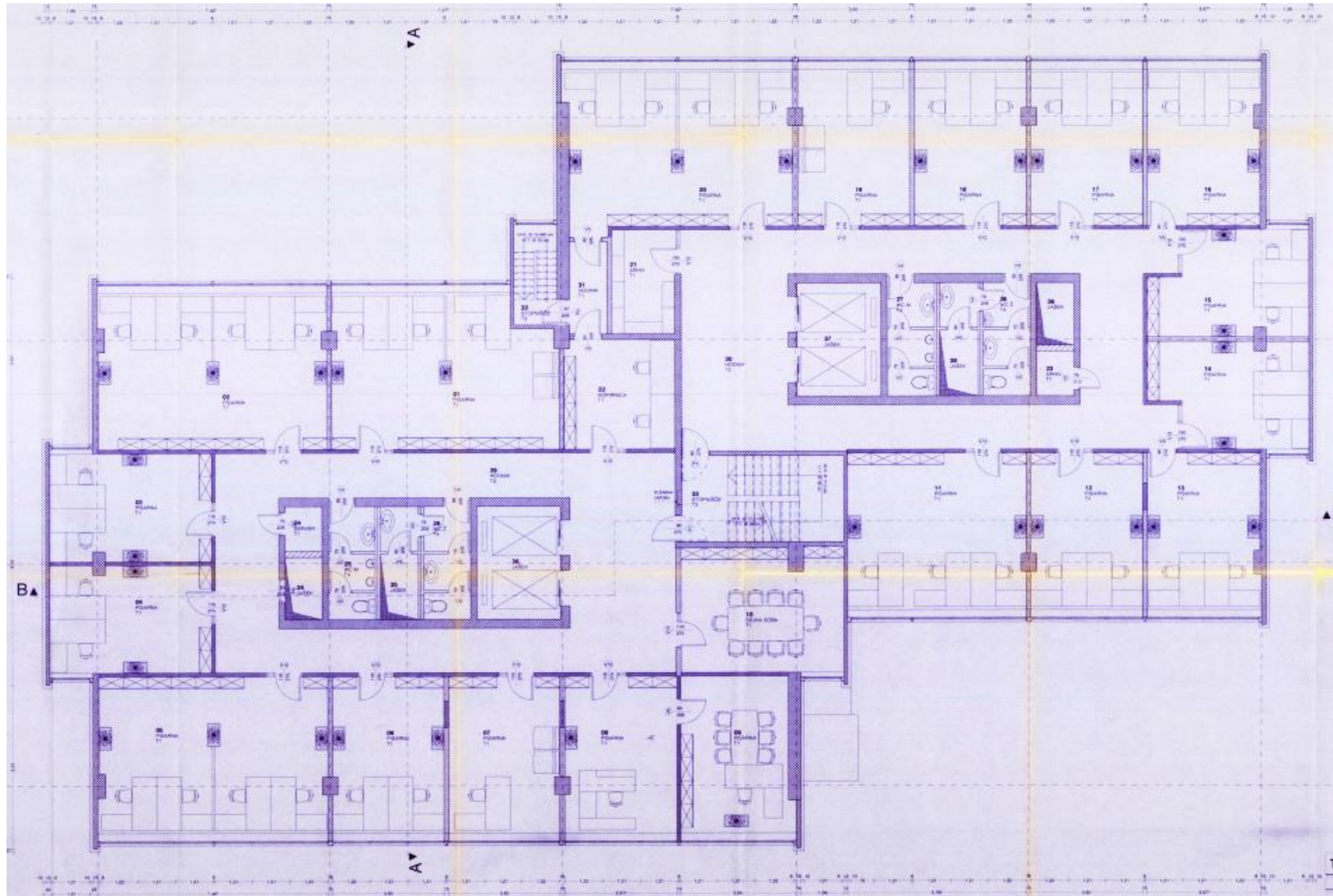
Preglednica 2: Podatki o obravnavani stavbi.

Koordinate stavbe	GKY: 462424, GKX: 102389
Katastrska občina	Bežigrad
Parcelna številka	1929
CC-SI klasifikacija	12203
Etažnost stavbe	19 etaž (od tega dve kletni)
Kota najvišjega dela stavbe	58,6 m
Neto tlorisna površina	13989,5 m ²
Površina fasade stavbe	7193,4 m ²
Površina oken	2503,1 m ²

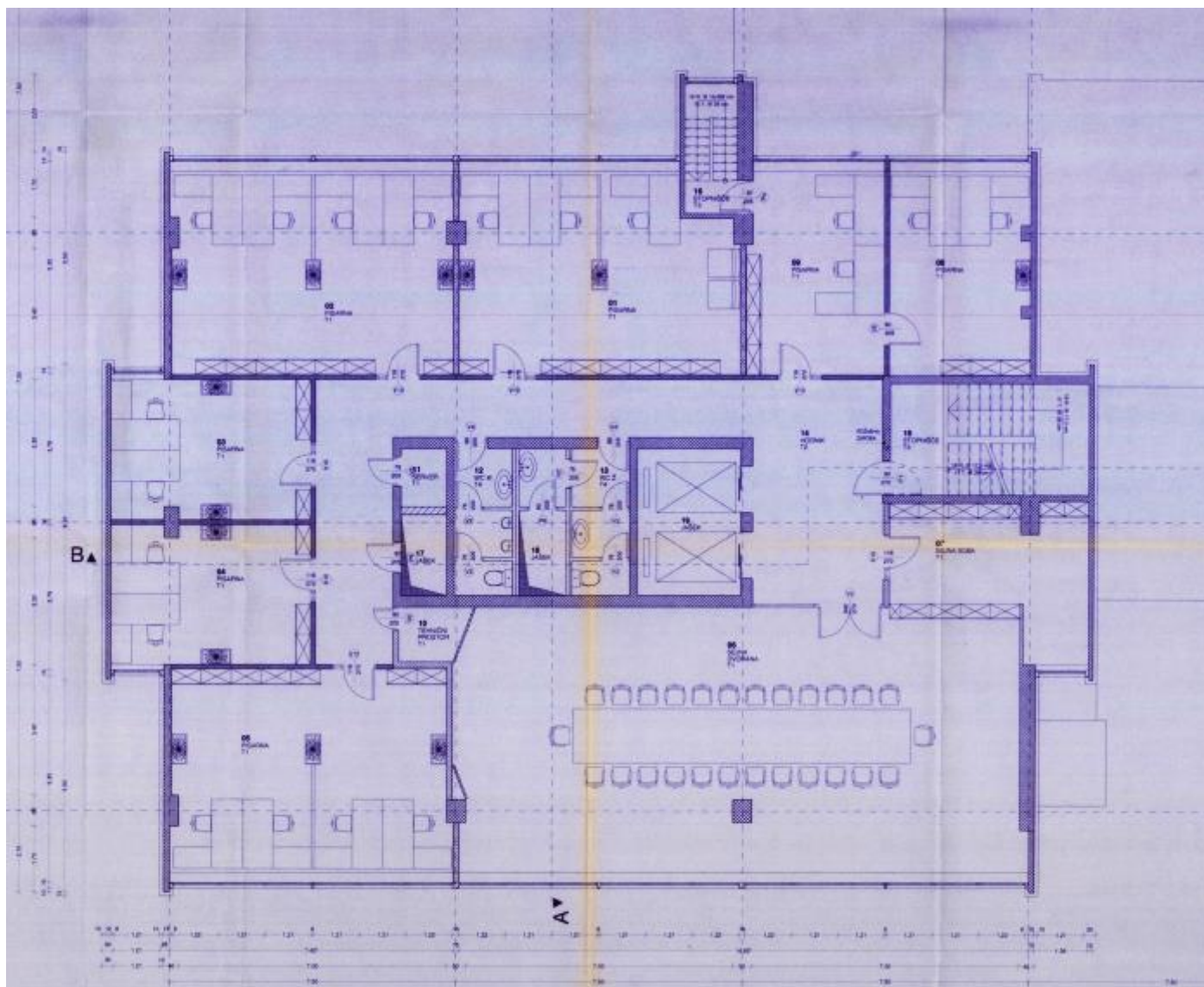
Od nadstropja 1 do 13 se geometrija tlorisa ne spreminja. Tloris lahko razdelimo na vzhodni in zahodni del, ki se povežeta preko centralnega stopnišča. Po obodu tlorisa so razporejene pisarne in sejne sobe, v jedru tlorisa pa so sanitarni in servisni prostori ter jaški, namenjeni strojnim instalacijam in dvigalom. Prostor v jedru so obdani s hodnikom (Slika 27). Razporeditev prostorov je v teh etažah zelo podobna,



Slika 26: Prečni prerez stolpnice. Vsi kletni prostori ne spadajo v sklop obravnavane stolpnice, ampak so last drugih subjektov [66].



Slika 27: Tloris tipične etaže med 1. in 13. nadstropjem. Vzhodni in zahodni del etaže sta povezana s centralnim stopniščem [66].

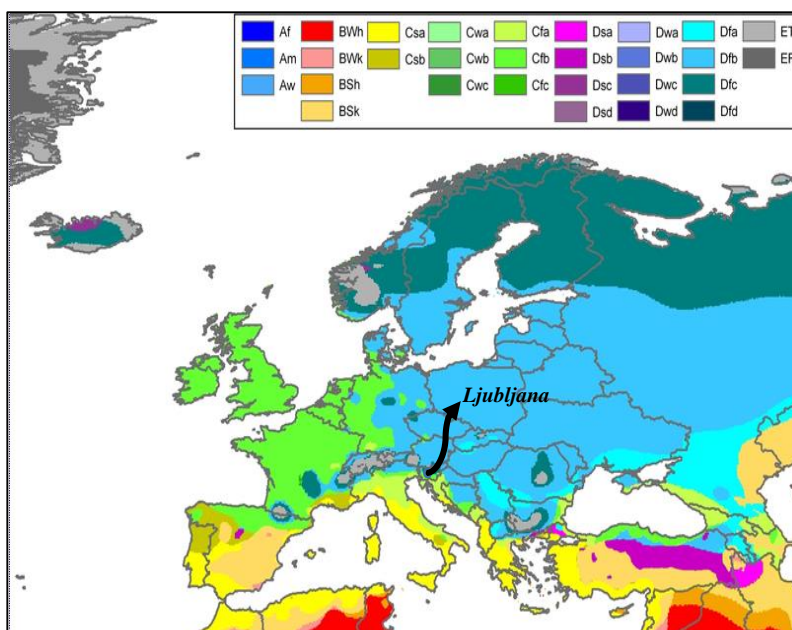


Slika 28: Tloris tipične etaže med 14. in 16. nadstropjem [66].

5.2 Klimatološke lastnosti lokacije stavbe

5.2.1 Podnebje

Po Köpenn-Geigerjevi klasifikaciji, ki razporeja tipe podnebja na podlagi temperature in količine padavin, je podnebje v Ljubljani zmerno toplo vlažno podnebje s toplim poletjem (oznaka Cfb), za katerega je značilno, da povprečna mesečna temperatura najhladnejšega meseca ne pade pod $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ in ima vsaj en mesec povprečno temperaturo čez $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ [68].



Slika 29: Karta Evrope glede na Köpenn- Geigerjevo podnebno klasifikacijo z označeno pozicijo Ljubljane [69].

Najtoplejša meseca z dnevnimi maksimumi običajno med 25 in $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ sta julij in avgust, januar pa je najhladnejši mesec s temperaturami, ki se gibljejo večinoma okoli $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. V povprečju se 90 dni na leto temperature spustijo tudi pod ledišče, 60 dni na leto pa ima temperaturo nad $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Padavine so razmeroma enakomerno porazdeljene med letnimi časi, čeprav sta zima in pomlad ponavadi nekoliko bolj suha kot poletje in jesen. Letna količina padavin je okoli 1400 mm. Nevihte so zelo pogoste v obdobju od maja do septembra. Sneženje je značilno za obdobje med decembrom in februarjem, v povprečju pa je mesto s snežno odejo pokrito 65 dni. Poleti je vreme v mestu bolj pod vplivom sredozemskih zračnih tokov, zato so poletja sončna in razmeroma topla [70].

Preglednica 3: Vremenski podatki za Ljubljano [71].

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec	leto
povp. temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	-1.1	1.4	5.4	9.9	14.6	17.8	19.9	19.1	15.5	10.4	4.6	0	9.8
povp. najvišja dnevna temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	2	5.5	10.4	15.4	20.4	23.6	26.1	25.4	21.6	15.8	8.2	2.6	14.8
povp. najnižja dnevna temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	-3.8	-2	0.9	4.7	9	12.4	14.1	13.8	10.9	6.5	1.7	-2.3	5.5
absolutna najvišja temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	14.8	18.9	24.6	29.3	31.1	34.7	37.1	36.5	31.5	26.9	21.9	16.7	37.1
absolutna najnižja temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	-20.3	-18	-18.2	-3.6	-1.2	2.7	5.8	4.5	-0.6	-5.4	-14.5	-16.7	-20.3

se nadaljuje...

... nadaljevanje preglednice 3

št. dni z najnižjo temp. ≤ 0.0 °C	23.7	18.2	11.5	2.1	0.1	0	0	0	0	2	10.5	21.3	89.6
št. dni z najvišjo temp. ≥ 25 °C	0	0	0	0.6	4.7	12.2	19.6	16.9	6.3	0.3	0	0	60.6
povp. relativna vlaga ob 14. uri [%]	78.1	66.9	57.9	52.9	51.9	54.5	51.6	53.9	59	64.3	75.2	81.2	62.4
povp. trajanje sonč. obsevanja (ure)	47	85	128	162	210	221	260	230	164	116	56	37	1712
št. jasnih dni (oblačnost $< 2/10$)	1.8	2.8	3.4	3.1	2.8	2.9	5.1	4.5	1.7	2	1.3	1	32.5
št. oblačnih dni (oblačnost $> 8/10$)	18.1	13.7	13.2	11.2	9.1	8.5	5.8	5.9	7.9	11.6	17.4	19.9	142.2
višina padavin [mm]	82	80	98	109	122	155	122	144	130	115	135	101	1393
št. dni s snežno odejo ob 7. uri	21	15.2	7.5	1.3	0.1	0	0	0	0	0	5.3	14.4	64.9
št. dni s padavinami $\Rightarrow 1.0$ mm	9	8.3	9.1	10.8	11.6	12.2	9.8	9.5	8.2	8.4	9.4	8.6	114.8
št. dni z meglo	15.3	10.2	6.8	4.2	4.9	5.1	6.1	9.8	15.2	15.4	12.8	15.2	120.8

5.2.2 Mikrolokacija stavbe

Stavba se nahaja na križišču Dunajske in Kržičeve ulice (Slika 25). Predvsem prva je zelo prometno obremenjena (hrup). V neposredni bližini stolpnice je nekaj zgradb, ki jo senčijo v nižjih nadstropjih (do 5. nadstropja). Zaradi orientacije stavbe (in lege na severni polobli Zemlje) je severna fasada praktično neizpostavljena soncu (razen zgodnjih jutranjih ur poleti), nasprotno pa velja za ostale fasade. Tako so na južni fasadi potrebna senčila, da se prepreči pregrevanje poleti in neenakomerna osvetljenost prostorov.

5.3 Merjena poraba energije

Podatke o stroških porabe toplotne energije za leto 2014 in porabi električne energije za leti 2014 in 2015 sem pridobil od lastnika stavbe – Petrola d. d.

5.3.1 Toplotna energija

Toplotna energija se uporablja za ogrevanje stavbe (voda se ogreva ločeno z električnimi bojlerji [65]). Potrebno toploto za obratovanje upravljalca stavbe pridobiva iz sistema za daljinsko ogrevanje, ki je v lasti podjetja Energetika Ljubljana d.o.o. Strošek toplote je podan za leto 2014, poraba energije pa je preračunana glede na veljavni cenik z dne 25. 8. 2016 omenjenega podjetja za dobavo toplotne energije. V znesku računa je zajeta tako omrežnina kot tudi stroški za druge subjekte v sklopu stavbe, ki se napajajo preko iste toplotne podpostaje. Zato bo izračunana poraba energije obravnavane stavbe iz zneska računa okvirna, saj bi za natančen poračun potreboval še dodatne podatke (kvadratura, ki odpade na vse subjekte, vrsto ogrevala). Na podlagi mesečnih stroškov bom preračunal porabljeno energijo glede na ceno MWh ter nato še odštel strošek za omrežnino (modificirana porabljena energija). Mesečne vrednosti modificirane porabljene toplotne energije tako predstavlja dejansko porabo toplote za ogrevanje stavbe (Preglednica 4), ki jo bom prikazal v grafikonu 4.

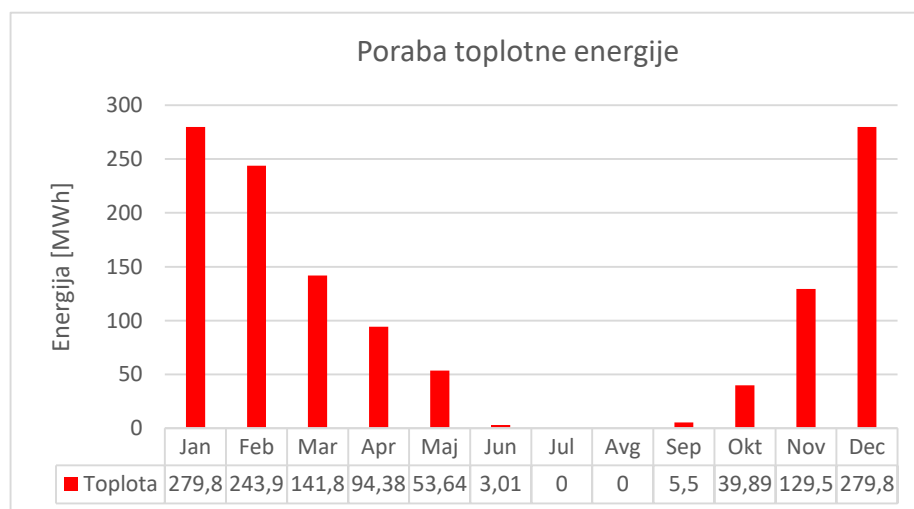
Cena omrežnine je enaka znesku računa za julij in avgust (v teh mesecih porabe toplotne energije ni), in sicer 1618,51 EUR, kar preračunano v energijo pomeni 29,06 MWh. Modificirana porabljena energija je tako razlika med preračunano mesečno energijo in preračunano energijo glede na ceno omrežnine.

Ob pogledu na preglednico 4 najbolj bode v oči majhna poraba meseca januarja glede na sosednji december in februar. Po vsej verjetnosti je razlog v tem, da znesek računa za mesec januar ne odraža dejanske cene energije toplote. Predstavniki podjetja, ki ima v lasti stavbo, vidi razlog v poročilu stroškov toplotne energije za leto 2013, katerih presežek se je odštel od stroškov za mesec januar v letu 2014. Zaradi tega bom za mesec januar upošteval kar enako vrednost kot za mesec december (označeno z rdečo barvo v preglednici 4).

Preglednica 4: Strošek in preračunana poraba toplotne energije po mesecih v letu 2014.

Cena toplote (z DDV): 55,692 EUR/MWh (cena na dan 1.7.2016)			
MESEC	Znesek računa [EUR]	Preračunana porabljena energija [MWh]	Modificirana porabljena energija [MWh]
Jan	12.205,27	219,16	190,10 (279,78)
Feb	15.200,33	272,94	243,88
Mar	9.514,76	170,85	141,79
Apr	6.874,46	123,44	94,38
Maj	4.773,38	85,71	53,64
Jun	1.785,88	32,07	3,01
Jul	1.618,51	29,06	0,00
Avg	1.618,51	29,06	0,00
Sep	1.924,93	34,56	5,5
Okt	3.840,07	68,95	39,89
Nov	8.827,54	158,51	129,45
Dec	17.200,17	308,84	279,78
Leto 2014	85.383,81	1.533,14	1274,1

Skupna poraba toplotne energije na letni ravni za leto 2014 tako znaša 1274,1 MWh.



Grafikon 4: Stolpni prikaz merjene porabe toplotne energije po mesecih v letu 2014.

Ob pogledu na grafikon 4 opazimo, da potreba po ogrevanju po mesecih hitro narašča in tudi pade. Tako npr. pade poraba z vrednosti 243,9 MWh meseca februarja na vrednost 141,8 MWh meseca marca.

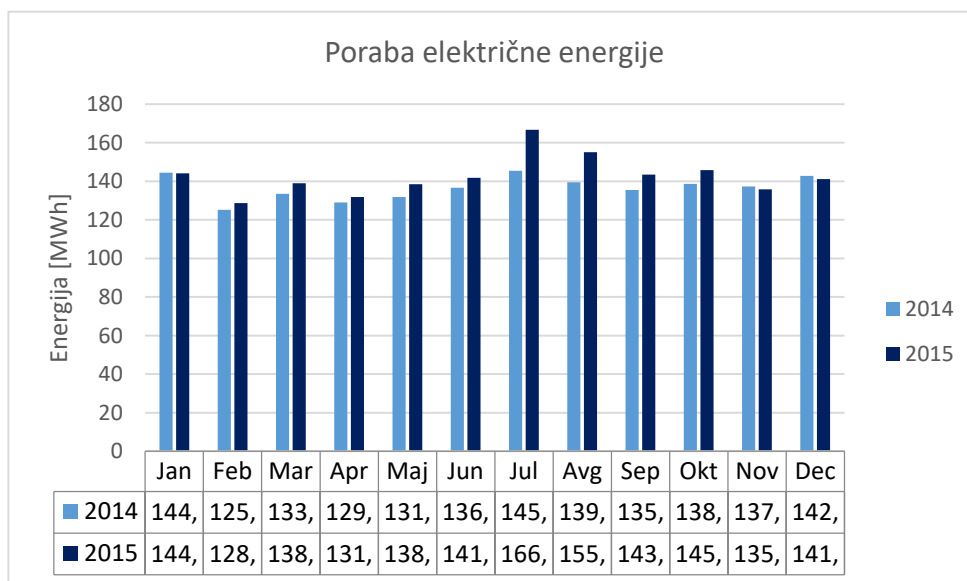
5.3.2 Električna energija

Porabo električne energije sem pridobil za leti 2014 in 2015 (preglednica 5). Poraba električne energije v stavbi je posledica hlajenja, prezračevanja, priprave tople vode, razsvetljave in delovanja elektronske opreme v stavbi (pisarniška oprema, kuhinja, samopostrežni avtomati ...).

Preglednica 5: Mesečna in letna poraba električne energije v letih 2014 in 2015.

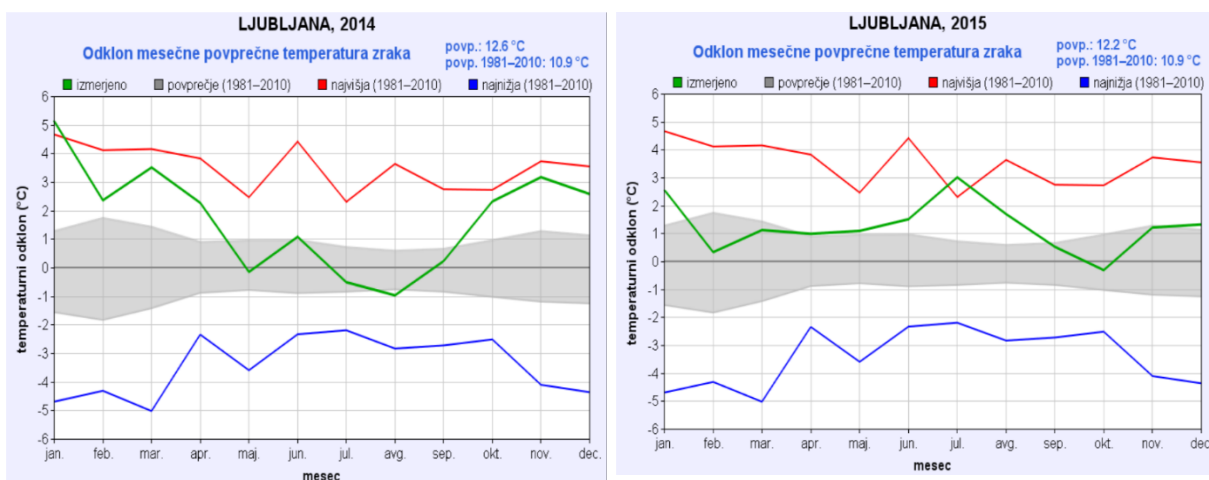
Mesec	2014			2015		
	VT [MWh]	MT [MWh]	Skupaj 2014 [MWh]	VT [MWh]	MT [MWh]	Skupaj 2015 [MWh]
Jan	85,92	58,59	144,52	81,86	62,21	144,07
Feb	73,20	52,00	125,20	74,90	53,74	128,64
Mar	73,03	60,45	133,48	79,39	59,59	138,99
Apr	71,32	57,76	129,08	70,09	61,82	131,91
Maj	68,19	63,65	131,84	72,13	66,32	138,45
Jun	72,21	64,40	136,61	77,80	64,09	141,89
Jul	83,75	61,78	145,53	96,28	70,46	166,74
Avg	70,97	68,60	139,57	82,82	72,34	155,16
Sep	79,33	56,16	135,49	83,45	60,04	143,49
Okt	79,24	59,44	138,69	85,56	60,28	145,83
Nov	77,71	59,69	137,40	79,40	56,43	135,83
Dec	80,79	61,98	142,78	82,55	58,61	141,16
Leto	915,66	724,52	1640,18	966,24	745,93	1712,17

Iz primerjave podatkov letne porabe elektrike med letom 2014 in 2015 opazimo, da je poraba leta 2015 za 4,4 % večja kot prejšnje leto.



Grafikon 5: Primerjava merjene mesečne porabe elektrike stavbe za leti 2014 in 2015.

Nazornejši je stolpčni prikaz mesečne porabe elektrike (Grafikon 5). Opazimo, da je največja razlika v porabi električne energije med letoma 2014 in 2015 v najtoplejših mesecih leta, juliju in avgustu. To lahko pripišemo manjši potrebi po hlajenju poletja 2014, saj je bilo poletje leta 2014 hladnejše (Slika 30).



Slika 30: Odklon mesečne povprečne temperature zraka za leto 2014 (levo) in leto 2015 (desno) [72].

Pričakoval bi, da bo poraba elektrike med poletjem zaradi hlajenja stavbe izrazitejša v primerjavi z ostalimi meseci. Presenetilo me je tudi, da je poraba elektrike meseca januarja in decembra tako velika. V letu 2014 je bila od meseca januarja poraba večja le meseca julija (najtoplejši mesec v letu), v letu 2015 pa le julija in avgusta. Razlog gre iskati v večji porabi električne energije za razsvetljavo, saj je dan krajši, ter dodatni porabi elektrike za delovanje sistema za ogrevanje (električne črpalke in ventili).

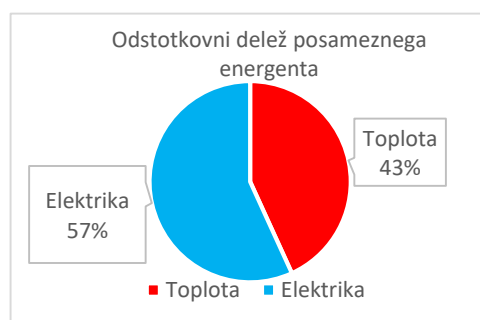
5.3.3 Primerjava med porabo toplotne in električne energije

Sledi primerjava porabe energije glede na energent. Za električno energijo sem upošteval povprečje med mesečnimi vrednostmi porabe za leto 2014 in 2015. Kot je razvidno iz preglednice 6, je skupna poraba energije slabe 3 GWh/a. To znaša približno toliko energije kot je zloglasni Blok 6 Termoelektrarne Šoštanj z močjo 600 MW proizvede v petih urah obratovanja.

Preglednica 6: Porabe energije glede na energent in skupna poraba energije v stavbi.

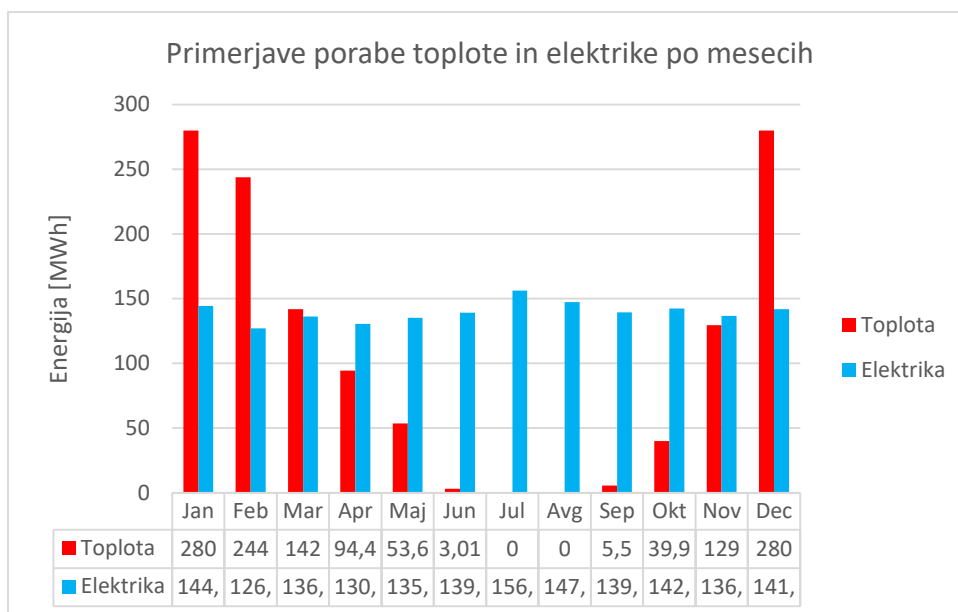
Poraba energije	Toplota	Elektrika	Skupaj
[MWh/a]	1274,1	1676,17	2950,27

Delež toplotne energije znaša 43 %, delež električne energije pa 57 % vse porabljene energije v stavbi (Grafikon 6).



Grafikon 6: Delež letne porabe energije v stavbi glede na energent.

Na grafikonu 7 opazimo, da je poraba električne energije v primerjavi s toplotno sorazmerno enakomerna skozi vse leto. Meseca marca in novembra je poraba med energentoma približno enakovredna. Pozimi je poraba toplotne energije za faktor 2 večja od porabe električne energije.



Grafikon 7: Primerjava porabe merjene toplotne in električne energije stavbe po mesecih.

5.4 Mejne vrednosti po PURES-u za obravnavano stavbo

Za nestanovanjske stavbe sta po PURES-u edini mejni vrednosti, s katerimi vrednotimo energetska učinkovitost, koeficient specifičnih transmisij toplote H'_T in letna potrebna toplota za ogrevanje stavbe Q_{NH} , preračunana na kondicionirano prostornino stavbe V_e . Določita se na podlagi enačb 1 in 2 (poglavje 3.1 Pravilnik o učinkoviti rabi energije), pri katerih so glavni vhodni podatki faktor oblike f_0 , delež z in povprečna letna temperatura T_L (ta za Ljubljano znaša $9,8\text{ }^\circ\text{C}$).

Preglednica 7: Vhodni podatki ter mejni vrednosti H'_{Tmax} in Q_{NH} .

Vhodni podatki:			
	T_L	9,8	$^\circ\text{C}$
	z	0,35	
	f_0	0,254	m^{-1}
Mejni vrednosti:			
	H'_{Tmax}	0,557	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}^{-1}$
	$max(Q_{NH}/V_e)$	6,046	$\text{kWh}/\text{m}^3\text{a}$

Predvidevam, da bo mejna vrednost koeficienta specifičnih transmisij izgub z izboljšanjem toplotne izolativnosti ovoja stavbe dosegljiva. Za doseganje mejne vrednosti potrebne toplote za ogrevanje, pa bo skoraj gotovo poleg ukrepov na nivoju ovoja stavbe potrebno predvideti sistem z rekuperacijo odpadne toplote prezračevanega zraka.

6 METODA DELA

V tem poglavju bom opisal način modeliranja računskega modela stavbe. Za to sem se odločil, ker so odločitve glede izbire programskih nastavitev in poenostavitve pri vhodnih podatkih (geometrijske, robne razmere površin, urniki) bistvene za rezultate simulacij. Poleg tega bo to poglavje lahko služilo kot pomoč drugim, ki se bodo želeli naučiti uporabljati OS in EP pri analiziranju porabe energije v stavbah.

6.1 3-D model stavbe

Model stavbe se izriše kot generični ovoj, sestavljen iz ploskev brez debeline. Vsaka izrisana ploskev pripada svojemu prostoru, ima svoje ime, določene robne razmere (ali meji na zunanji zrak, tla, drug prostor) in določen konstrukcijski sklop. Rišejo se transparentni deli ovoja in zasteklitve (brez okvirja). Prve poenostavitve se začnejo že pri sami geometriji stavbe. Ker se izriše le generična ploskev brez debeline, praktično ni mogoče, da bi se tlorisna površina, površina ovoja ali volumen stavbe popolnoma ujemali z dejanskim stanjem, lahko dobimo le približek. Sam sem upošteval navodila EP dokumentacije (glej [73]) in sem za zunanje stene uporabil zunanje mere, notranje stene pa sem risal po geometrijski sredini. Podatke o površinah in volumnih toplotnih con bi lahko kasneje sicer modificiral ročno z *IDF-Editor*-jem, vendar tega zaradi ohranjanja preprostosti simulacijskega postopka nisem storil.

Želja je bila izrisati 3-D model stavbe in ga analizirati kot celoto, a to zaradi zmogljivosti uporabljenega računalnika ni bilo mogoče. Vnašanje vhodnih podatkov preko OS aplikacije je bilo namreč prepočasno (aplikacije je ob skoraj vsakemu kliku »zmrznila« za nekaj minut), zato sem ubral drugačen način in stavbo razdelil v 3 sklope:

1. Pritličje in kleti (slika 31).
2. Vmesne etaže – zajema etaže od 1. do 13. nadstropja (slika 32).
3. Zgornje etaže – zajema etaže od 14. do 17. nadstropja (slika 33).

Sklop 2, vmesne etaže, sem še dodatno razdelil na 5 delov, ki predstavljajo 1., 2., 7., 12. in 13. nadstropje. Tako stavbo kot celoto predstavlja 7 računskih modelov z adiabatnimi (toplota ne uhaja izven prostora, program pa vseeno upošteva toplotno kapaciteto konstrukcije) robnimi razmerami na mestih medetažnih stropov in podov.

Rezultate o porabi energije za celotni model stavbe sem dobil s seštevanjem rezultatov posameznih modelov. Za vmesne etaže, ki jih posebej nisem modeliral (3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11 nadstropje) sem predpostavil, da je poraba energija enaka:

- nadstropja 3–6: poraba enaka aritmetični sredini rezultatov 2. in 7. nadstropja
- nadstropja 8–11: poraba enaka aritmetični sredini rezultatov 7. in 12. etaže.

Na takšen način sem izračunal porabo energije potrebne za obratovanje celotne stavbe.

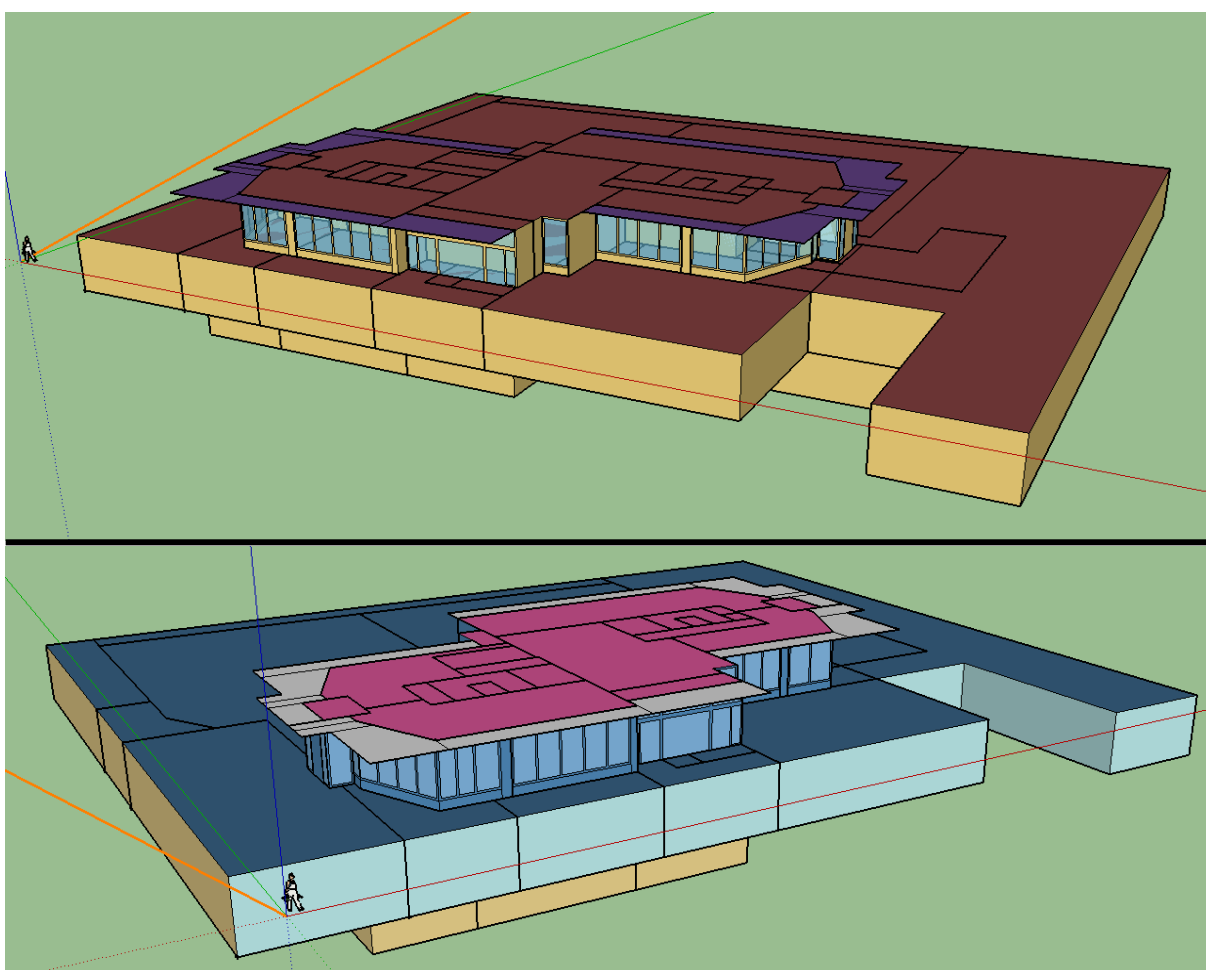
6.1.1 Pritličje in kleti

Pri modeliranju računskega modela pritličja in kleti sem imel največ težav. Problem se pojavi zaradi kletnih prostorov. Načrti kletnih prostorov so iz leta 1999, namembnost nekaterih prostorov se je v tem času že spremenila. Poleg tega se pod stolpnico nahaja cela veriga različnih prostorov, ki se navezujejo na prostore analizirane stavbe (podhod, restavracija, različna skladišča, zaklonišče, tržnica ...), tako da je sten v stiku s terenom zelo malo. Za analiziranje potreb po ogrevanju in hlajenju, je definiranje robnih razmer ključnega pomena (temperatura tal, temperatura zraka v sosednjih prostorih in zunanosti, vpliv

sonca in vetra). Zaradi tega sem v pri oblikovanju računskega modela pritličja in kleti naredil nekaj grobih poenostavitev:

- zaradi omejitev OS aplikacije in ohranjanja preprostosti samega simulacijskega postopka so nekatere robne razmere površin neustrezne (programske omejitve v povezavi z robnimi razmerami površin so opisane v poglavju 6.2.9.3 Robne razmere površin),
- sestava določenih konstrukcijskih sklopov zaradi kasnejše adaptacije nekaterih prostorov ne ustreza realni situaciji (neskladja načrtov z realno situacijo),
- predpostavljeni notranji dobitki zaradi ljudi, razsvetljave in opreme ter temperaturni režim posameznih kletnih prostorov so lahko neustrezni.

Zaradi naštetih poenostavitev se na model pritličja in kleti pri interpretaciji rezultatov nisem osredotočil. Tudi poznejši načrtovalski ukrepi za izboljšanje toplotne izolativnosti stavbe se končajo v pritličju, saj imam o kletnih prostorih enostavno premalo natančne podatke, s čimer bi lahko nekateri načrtovalski ukrepi bili nerealni oz. neuporabni.



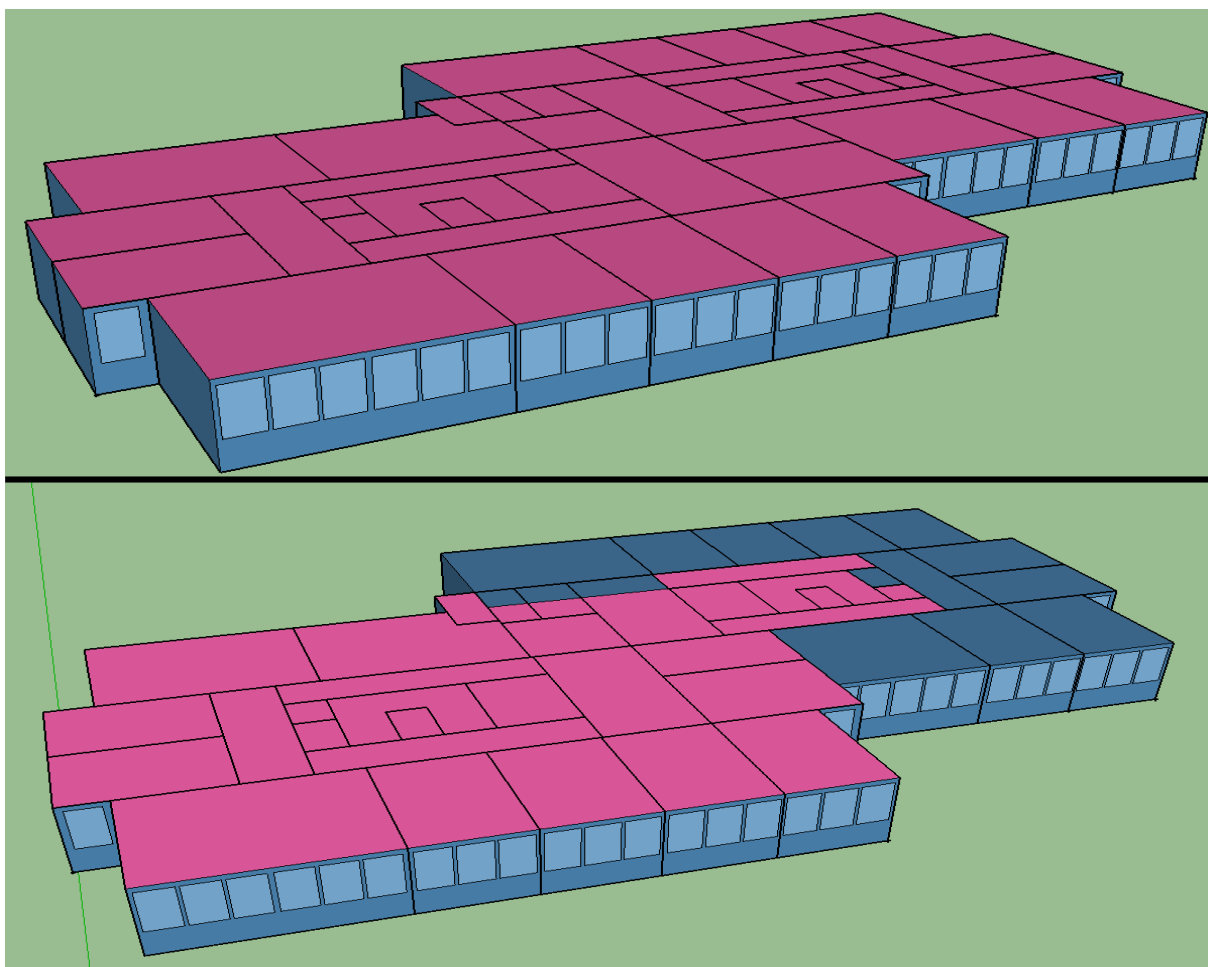
Slika 31: Računski model pritličja in kleti. Kletni prostori, ki spadajo pod obravnavano stavbo, ležijo neposredno pod tlorisom pritličja. Zgoraj: računalniška upodobitev modela glede na vrsto konstrukcijskega sklopa (svetlo rjava barva predstavlja stene, temno rjava barva predstavlja tla in strop, prosojno modra barva okna, vijolična barva pa površine, ki senčijo stavbo). Spodaj: računalniška upodobitev modela glede na robne razmere konstrukcijskih sklopov (modra barva pomeni zunanje razmere, svetlo modra barva pomeni zunanje razmere brez vpliva vetra in sonca, svetlo rjava barva predstavlja stik z zemljinjo, svetlo vijolična barva pa adiabatne robne razmere).

Velik del pritličja predstavlja avla, kjer je dostop do vertikalnih komunikacij. Na zahodnem delu so sejne sobe, na vzhodnem pa v glavnem pisarne. V kletnih prostorih je poleg hodnikov, stopnišč in servisnih

prostorov še računalniški center stavbe in razni skladiščni prostori. Vrste ostalih prostorov, ki mejijo na prostore obravnavane stolpnice pa so: lokali, pasaža, tržnica, razna skladišča, zaklonišče idr.

6.1.2 Vmesne etaže

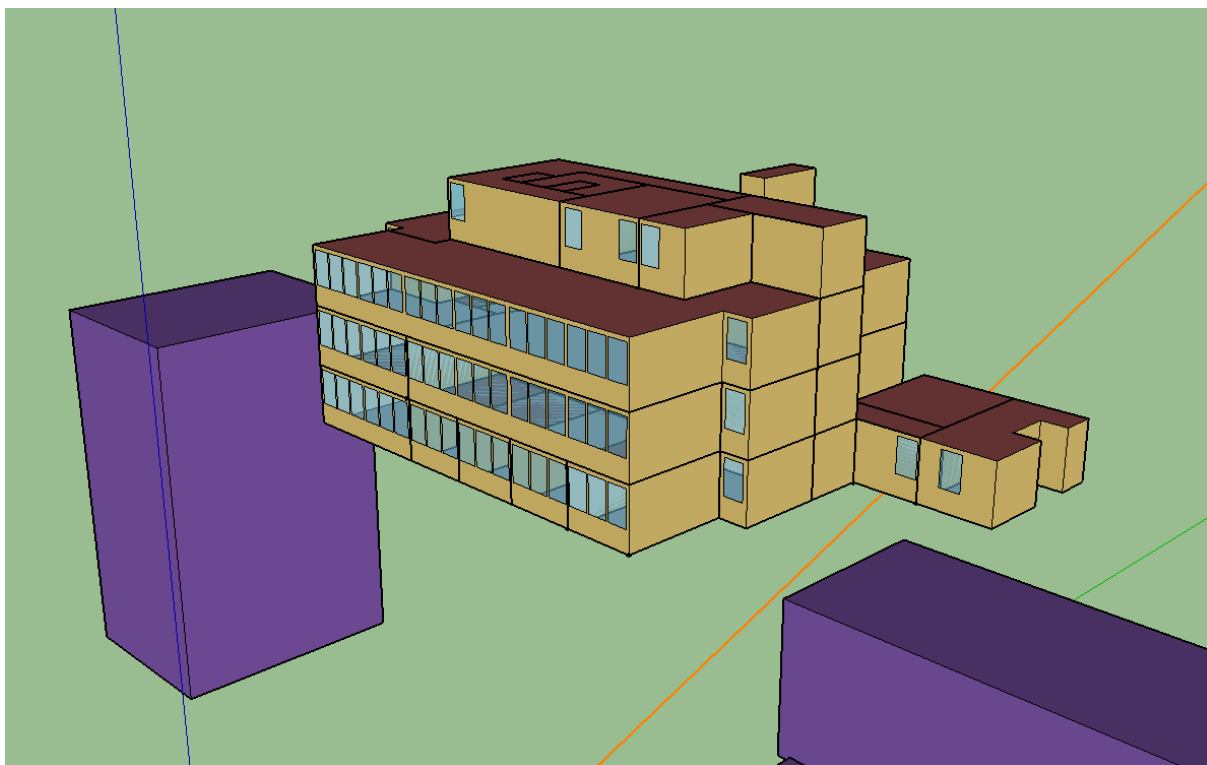
Bruto tlorisna površina etaž od 1. do vključno 13. nadstropja je identična, spreminja se le razporeditev in velikost prostorov v njih. Število prostorov v posamezni etaži variira od največ 47 do najmanj 33, povprečno število prostorov na etažo je 40,5. Zaradi ohranjanja preprostosti modeliranja, sem poenostavil, da je računski model v geometrijskem smislu identičen za vse etaže. Tako sem za podlogo vmesnih etaže uporabil tloris 12 etaže, ki je najbolj preprost, vsebuje pa 39 prostorov. Edina razlika med računskimi modeli vmesnih etaž je njihova vertikalna pozicija oz. višina nad tlemi. Razlog, da sem modeliral 5 modelov in ne samo enega je v različni poziciji etaž, kar močno vpliva na osončenost posameznega modela, ter drugačnih robnih razmerah površin modelov. Model 1. in 13. nadstropja imata drugačne robne razmere površin kot ostali modeli. Tlorisna površina pritličja je manjša od 1. nadstropja, zaradi česar je robni del tal v stiku z zunanjim zrakom (to je na sliki 31 prikazano kot površina, ki senči pritličje). V 14. nadstropju pa se tlorisna površina zmanjša, zaradi tega je del stropa 13. nadstropja v stiku z zunanjim zrakom, medtem ko je pri nižjih etažah celoten strop predpostavljen kot strop z adiabatnimi robnimi razmerami. Poleg tega višina v manjši meri vpliva tudi na projektno zunanjo temperaturo in projektno hitrost vetra, ki sta funkciji višine. Prostore računskega modela sestavljajo hodniki, stopnišče, sanitarije, jaški, sejna soba in pisarne. Pisarne so razporejene po obodu stavbe in predstavljajo več kot 60 % celotne tlorisne površine.



Slika 32: Slika računskega modela 2. (zgoraj) in 13. nadstropja (spodaj) z računalniško upodobitvijo za robne razmere. Na sliki vidimo, da sem upošteval zmanjšanje tlorisne površine 14. nadstropja, tako da je le del stropa 13. nadstropja adiabatno, medtem ko je pri modelu 2. nadstropja adiabatno celoten strop.

6.1.3 Zgornje etaže

V 14. nadstropju se tloris etaž spremeni, tako da stolpnica v višino raste samo po zahodnem delu tlorisa (Slika 33). Poenostavljene pa so velikosti nekaterih oken servisnih prostorov v 14. in 17. nadstropju, saj njenih dejanskih izmer iz načrtov niso mogli vedno razbrati. V 14. nadstropju je na južni strani večja sejna soba, poleg pisarn, sanitarij, stopnišča in jaškov pa so prisotni še prostori strojnice dvigala in drugi servisni prostori. Vrsta prostorov v 15. nadstropju se nekoliko spremeni, saj je to namenjeno jedilnici za zaposlene in kuhinji. V 16. nadstropju so večinoma pisarne, 17. pa je namenjeno servisnim prostorom (strojnica dvigala idr.).



Slika 33: Etaže od 14. do 17. nadstropja. Objekti z vijolično barvo ponazarjajo sosednje objekte in predstavljajo površine, ki senčijo model. Vpliv sosednjih objektov na osončenost zgornjih etaž je zanemarljiv.

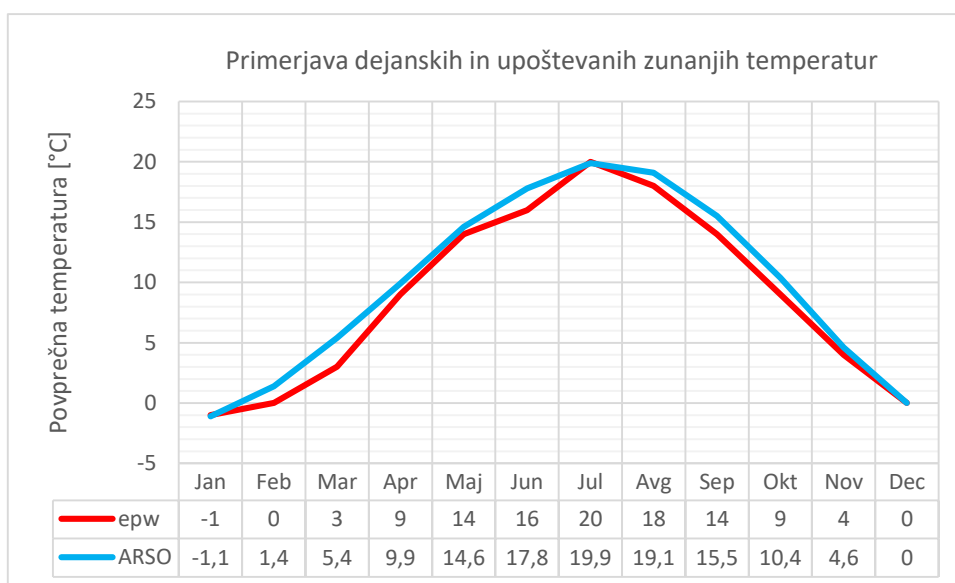
6.2 Programske nastavitve – vhodni podatki

Z rezultati simulacije se lahko dejanskemu stanju porabe energije v stavbi približamo le s kvalitetnimi vhodnimi podatki. Večinoma pa brez poenostavitev ne gre, zato je potrebno približke ali poenostavitve vhodnih podatkov razumeti, da lahko korektno interpretiramo rezultate. Nekatere vhodne podatke v povezavi s tipi prostorov, toplotnimi conami, senčili in površinami lahko vnašamo kar preko vtičnika v SketchUp-u (preko OS Inspector-ja). Za ostale vhodne podatke (npr. podatki o lokaciji, orientacija stavbe, raven ventilacije in infiltracije, urniki, simulacijske nastavitve ...) je potrebno uporabiti OS aplikacijo, v katero lahko vstopamo neposredno ali pa prek SketchUp vtičnika. V naslednjih podpoglavjih bom na kratko opisal nekatere ključne vhodne podatke.

6.2.1 Lokacija

Lokacijo stavbe določa vremenska .epw datoteka (opisana v poglavju 4.5 Climate Consultant 6.0). To je lokacija meteorološke postaje, kjer se zbirajo podatki. Razen v primeru, da se podatki beležijo na parceli, kjer stoji stavba, ti dve lokaciji nikoli ne sovpadata. Upošteval sem priporočila spletne strani <https://energyplus.net/weather/simulation> [74], kjer priporočajo, da .epw datoteka ustreza lokaciji obravnavane stavbe v primeru, da ta od dejanske lokacije ni oddaljena več kot 30 (do 50) kilometrov, višinska razlika pa ni večja od 100 metrov. V mojem primeru se upoštevana meteorološka postaja nahaja na območju letališča Brnik in je oddaljena dobrih 17 kilometrov, višinska razlika pa je slabih 85 metrov.

V grafikonu 8 je prikazana primerjavo povprečne mesečne temperature med podatki .epw datoteke in podatki Agencije republike Slovenije za okolje (ARSO) za Ljubljano. Meteorološka postaja, kjer podatke beleži ARSO, se nahaja v Bežigradu, kar je v neposredni bližini lokacije stavbe.



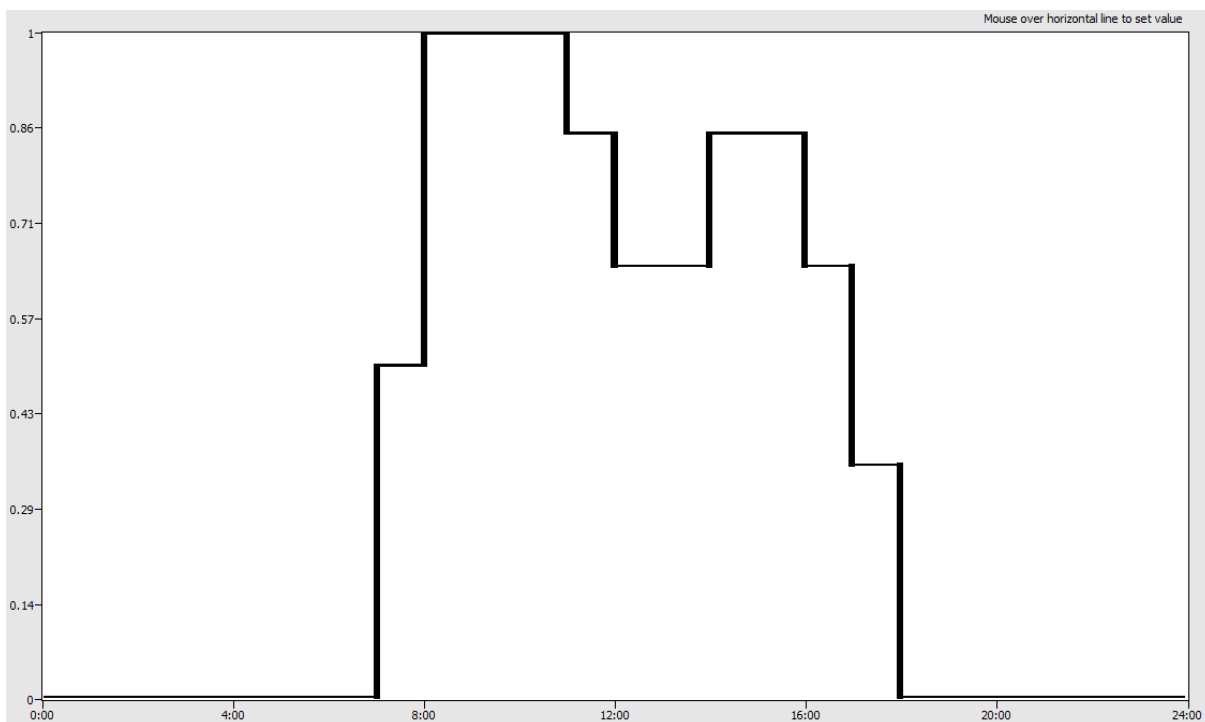
Grafikon 8: Primerjava povprečnih mesečnih temperatur med vremensko datoteko .epw in podatki, pridobljenimi iz ARSO.

Na podlagi rezultatov lahko opazimo, da večjih odstopanj pri povprečnih zunanjih mesečnih temperaturah ni, kar kaže na primernost uporabe .epw datoteke (vsaj glede mesečnih temperatur).

6.2.2 Urniki

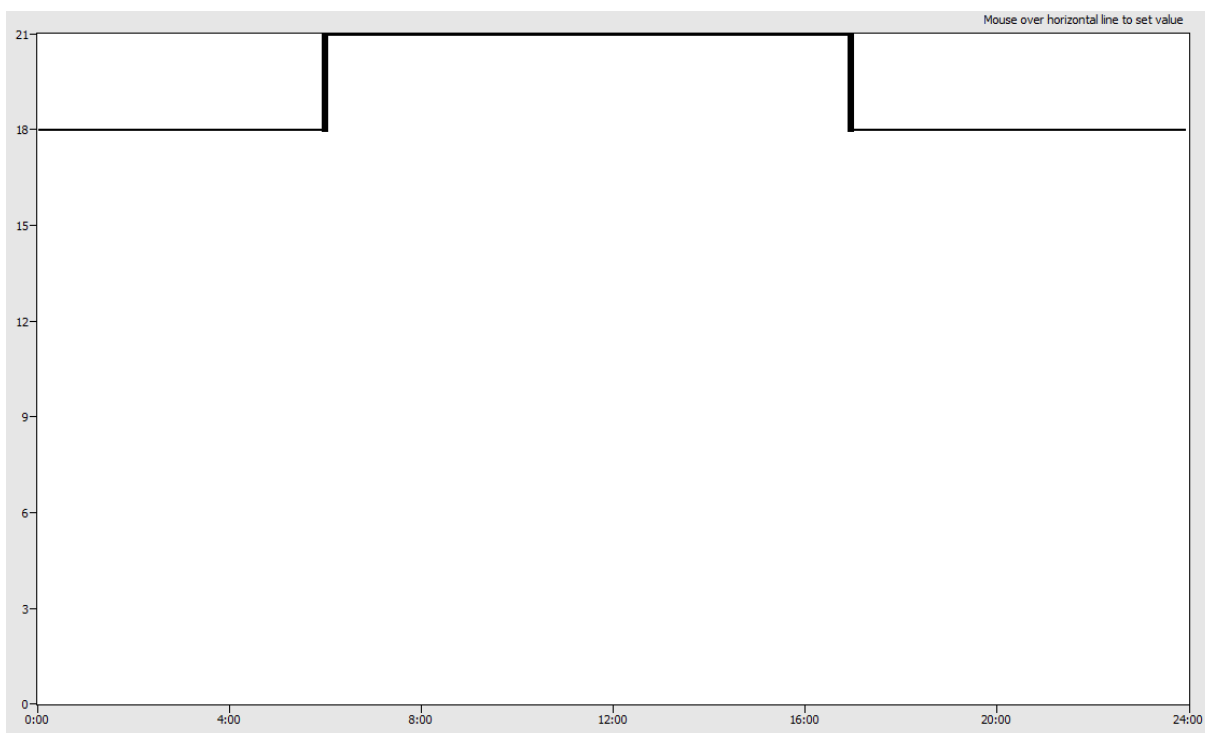
EP uporablja urnike za primerno upoštevanje različnih parametrov, ki vplivajo na energetsko bilanco stavbe. Tako je npr. za pisarniški tip prostora potrebno definirati drugačne urnike kot za kuhinjo. Urnike sem prilagodil dejanskemu obratovalnemu režimu stavbe, ki mi jih je prek osebne komunikacije sporočil predstavnik lastnika stavbe. Med delovniki (od ponedeljka do petka) je stavba zasedena od 7. do 18. ure z vmesnimi nihanji (Slika 34). V sobotah sem upošteval manjšo stopnjo zasedenosti in krajši delovni čas (od 8 do 13), v nedeljah pa, da stavba ni zasedena. Upoštevani urniki so naslednji: urnik temperaturnega režima hlajenja in ogrevanja, urnik zasedenosti prostora, urnik aktivnosti uporabnikov stavbe (stopnja metabolizma), urnik obratovanja luči in druge elektronske opreme, urnik upoštevanja infiltracije zunanjega zraka in urnik aktivnosti ljudi. Urniki so ključni za upoštevanje primernih notranjih dobitkov v stavbi.

Urnik zasedenosti je pomemben, saj preko njega program računa skupno moč notranjih dobitkov zaradi ljudi. Tako so ti v času dela večji kot v obdobjih nezasedenosti stavbe.



Slika 34: Prikaz urnika delovne zasedenosti v pisarnah. Urnik je prilagojen po standardu EN 15232 [75].

Za simulacijo porabe energije za ogrevanje in hlajenje v stavbi so bistveni urniki za ogrevanje in hlajenje. V delovnem času morajo biti temperaturne razmere primerne za kvalitetne delovne razmere, medtem ko lahko izven delovnega časa temperatura v stavbi naraste ali pade izven optimalnega temperaturnega območja. Za obdobje ogrevanja sem upošteval, da temperatura ponoči in izven delovnega časa ne pade pod 18°C , v delovnem času pa je 21°C (Slika 35). Takšen režim sem določil na podlagi komunikacije s predstavnikom stavbe. V poletnem času sem upošteval, da izven delovnega časa temperatura ne naraste nad 28°C , v delovnem času pa je 23°C .



Slika 35: Prikaz urnika notranje temperature v času delovnih dni za obdobje ogrevanja.

Predpostavljena razporeditev prostorov po tlorisu etaž je takšna, da le majhen delež dnevne svetlobe prodre do prostorov v jedru stavbe (nekateri dele etaž so lastniki stavbe že začeli prilagajati v tlorisno bolj odprte tipe pisarn, preko katerih prodre več dnevne svetlobe v notranjost stavbe – zaradi ohranjanja preprostosti računskih modelov in ker menim, da to bistveno ne vpliva na energijske tokove stavbe, tega nisem upošteval). Zaradi tega sem za namen bolj natančnega upoštevanje porabe elektrike za razsvetljavo upošteval dva različna urnika, enega za prostore v jedru tlorisa (kjer dnevne svetlobe ni ali pa je minimalna) in enega za prostore ob robu tlorisa (večinoma pisarne). Pri prvemu urniku je tako poraba elektrike za razsvetljavo večja kot pri drugem. Zaradi lažje preglednosti naloge bom te in ostale uporabljene urnike prikazal v prilogi B.

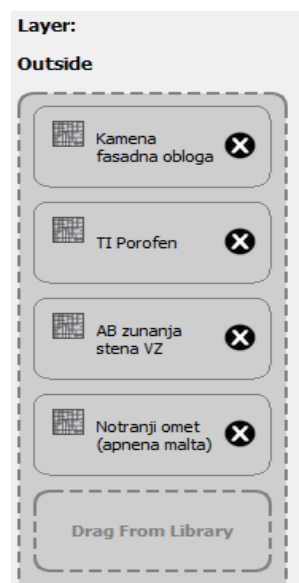
6.2.3 Konstrukcijski sklopi, elementi in materiali

Potrebno je definirati vse materiale z ustreznimi fizikalnimi in optičnimi lastnostmi. Potrebno je definirati vsak sloj materiala v konstrukcijskem sklopu, ki ima svojo debelino. Materialne lastnosti, ki jih program potrebuje, so (Slika 36): hrapavost površine (za račun konvektivne toplotne prestopnosti, kar je pomembno le za mejne plasti), debelina sloja d [m], toplotna prevodnost λ [W/mK^{-1}], gostota ρ [kg/m^3], specifična toplota materiala c [J/kgK^{-1}], faktor absorptivnosti dolgovalovnega toplotnega sevanja α_{IR} [/], faktor absorptivnosti sončnega sevanja α_S [/] in faktor absorptivnosti vidnega dela sončnega sevanja α_{LT} [/].

Ko so vsi materiali definirani, lahko sestavimo konstrukcijski sklop. Potrebno je pozicionirati posamezen material na svojo pozicijo v konstrukcijskem sklopu (Slika 37).

Roughness:	Thickness:
MediumRough	0.100000 m
Conductivity:	Density:
2.330000 $\text{W/m}\cdot\text{K}$	2500.000000 kg/m^3
Specific Heat:	Thermal Absorptance:
960.000000 $\text{J/kg}\cdot\text{K}$	0.880000
Solar Absorptance:	Visible Absorptance:
0.660000	0.660000

Slika 37: Materialne lastnosti armiranobetonske stene v OS.



Slika 36: Primer sestave konstrukcijskega sklopa zunanje stene v OS.

Pri oknih se definira samo zasteklitev, okenski okvir se definira ločeno. Podatki, ki jih program upošteva pri računanju toplotnih in svetlobnih tokov skozi stekla, so debelina, prepustnost za sončno sevanje in vidni del sončnega sevanja, reflektivnost in emisivnost na sprednji in zadnji strani stekel za vidni spekter in celotno sončno sevanje, toplotna prevodnost in faktor umazanosti oken.

Pri senčilih je za delo z OS potrebno ločiti fiksna senčila, kot npr. nadstreški in fiksni brisoleji, ter senčila, ki so premična. Fiksna senčila je potrebno izrisati preko OS vtičnika v Google SketchUp-u, premična senčila pa se določijo preko OS aplikacije. Omogočeno je upoštevanje treh različnih tipov premikajočih se senčil, in sicer žaluzij, rolojev in zaslonov oz. mrež (ang. screen). Podatki, ki jih program potrebuje za upoštevanje toplotnih tokov, so podobni kot za stekla, poleg tega pa potrebuje še razdaljo od zasteklitve okna, velikost odprtih na vrhu, dnu in straneh senčila ter pozicijo senčila (znotraj, zunaj ali med zasteklitvijo).

6.2.4 Notranji viri toplote (ljudje, razsvetljava in oprema)

Notranji viri energije se definirajo za vsak upoštevan tip prostora posebej. Upoštevajo se preko urnikov obratovanja stavbe. Definirani viri v stavbi so ljudje, luči in elektronska oprema.

Notranje dobitke ljudi se definira gleda na število ljudi v prostoru, število ljudi na m^2 tlorisne površine ali m^2 tlorisne površine na osebo. Program zahteva podatek o načinu upoštevanja toplote zaradi notranjih virov v energetske bilanci stavbe. Tako je pri notranjih dobitkih ljudi potrebno definirati delež energije, ki se prenaša s sevanjem in s konvekcijo (toplota, prenesena s sevanjem, se odda v površine prostora ter se nato v odvisnosti od absorptivnosti površin odda nazaj v prostor, toploto, preneseno s konvekcijo, pa program doda direktno v zračno maso prostora). Poleg tega je potrebno definirati delež latentne in senzibilne energije, saj latentna energija vpliva na relativno vlažnost prostora. Delež lahko definiramo ročno ali pa ga definira program sam z enačbo, po kateri je senzibilna energija funkcija notranje temperature zraka in predpisane stopnje metabolizma osebe (podrobneje razloženo v [60]). Potrebno je navesti tudi delež sproščenega CO_2 , saj lahko program spremlja tudi količino CO_2 v prostoru. Sam tega sicer nisem spremljal.

Definiranje moči razsvetljave in elektronske opreme je poleg upoštevanja notranjih dobitkov pomembno tudi za končen rezultat potrebne električne energije za obratovanje stavbe. Vnesen podatek je lahko direktna moč vira v W, moč vira glede na površino (W/m^2) ali pa površino, ki odpade ne enoto moči vira (m^2/W). Le del predpisane moči program upošteva kot notranji dobitok toplote (odvisno, kako v programu definiraš oddajanje toplote luči in opreme v prostor), celoten del predpisane moči pa se beleži kot porabljena električna energija.

Vrednosti za moč posameznega energetskega vira sem večinoma povzel po vrednostih ameriških standardov ASHRAE 189.1-2009 (polno ime ASHRAE 189.1-2009-Standard for the Design of High-Performance Green Buildings Exept Low-Rise Residential Buildings [48]), ki jih izdaja ustanova ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [76]). Temu je botrovalo to, da lahko program po omenjenem standardu avtomatsko pripiše upoštevano moč notranjih dobitkov za različne vire toplote (ljudje, razsvetljava, elektronska oprema) glede na različne tipe prostora. V nekaterih primerih pa te vrednosti notranjih dobitkov po omenjenih standardih niso bile primerne oz. niso ustrezale dejanskemu stanju, zato sem jih ročno prilagodil (npr. število ljudi v jedilnici in kuhinji 15. nadstropja).

6.2.5 Prezračevanje in infiltracija zunanjega zraka

Parametra, ki poleg notranjih dobitkov pomembno vplivata na rezultate simulacije in sta neposredno odvisna od tipa prostora, sta vrednost ventilacije in infiltracije. Ob primerjavi vrednosti, ki jih za ventilacijo pisarniških prostorov priporočata slovenski pravilnik o prezračevanju (Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb [47]) in standard ASHRAE 189.1-2009 [48], sem ugotovil, da se vrednosti dobro ujemajo. Vrednosti sem primerjal za pisarne, ki predstavljajo več kot 60 % neto kondicionirane tlorisne površine v stavbi (preglednica 8).

Preglednica 8. Primerjava priporočenih vrednosti svežega zraka za pisarne med slovenskim pravilnikom in standardom ASHRAE 189.1-2009.

	Pravilnik	ASHRAE
$m^3/s*oseba$	/	0,009439
$m^3/h*oseba$	35	33,98

Zaradi tega sem za ventilacijo upošteval vrednosti po standardu ASHRAE, ki jih program samodejno upošteva glede na definicijo tipa prostora.

Pri infiltraciji pa je bila situacija nekoliko bolj kompleksna, saj sem težko našel oprijemljive podatke o primernih vrednostih infiltracije. Na koncu sem upošteval vrednosti infiltracije, kakor so navedene v knjigi Gradbena fizika prof. dr. Saša Medveda [77].

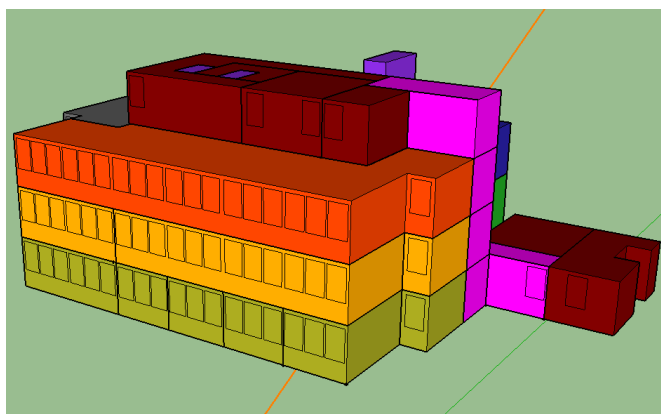
Podrobne vrednosti za prezračevanje in infiltracijo bodo predstavljene pri opisu posameznega računskega modela.

6.2.6 Toplotne cone

Stavbo je potrebno razdeliti v toplotne cone. To so območja v stavbi, kjer lahko predvidevamo enak temperaturni režim ogrevanja in hlajenja. Pomembna poenostavitev, ki sem jo upošteval, je, da se med toplotnimi conami ne izmenjuje zrak, to pomeni da toplotnih izgub ali dobitkov zaradi premikanja zračne mase ni.

Za način ogrevanja in hlajenja sem vklopil funkcijo »ideal air loads« oz. idealni zračni dobitki, ki upošteva HVAC sistem s 100-odstotno učinkovitostjo. To je funkcija, ki jo omogoča EP, če ne želimo načrtovati modelov za sistem ogrevanja, hlajenja in prezračevanja.

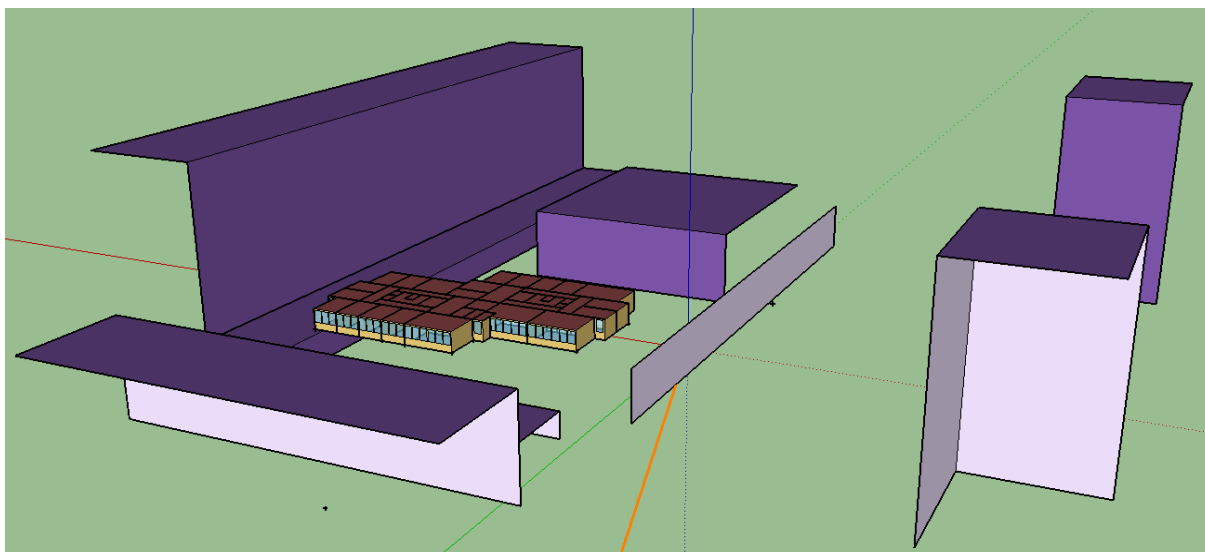
Načeloma bi v stavbi lahko izbral le dve različni toplotni coni (glede na navodila standarda SIST EN ISO 13790, ki med drugim določa, da spadata dva prostora v različno toplotno cono, če je temperaturna razlika v obdobju ogrevanja ali hlajenja več kot 4°C). V eno bi spadali kondicionirani prostori (pisarne, hodniki, sanitarije ...), v drugo pa nekondicionirani prostori (jaški za instalacije, servisni prostori ...). Ker pa program EP, podaja rezultate simulacij ločeno za vsako posamezno toplotno cono, sem te določal po drugačnem principu. Toplotni coni sem definiral ločeno za severno in južno orientirane obodne prostore pisarn in sejnih sob, za prostore v jedru (hodniki, stopnišče in sanitarije) in za ostale nekondicionirane prostore. Tako sem lahko bolj natančno interpretiral rezultate simulacij in lažje opazil napake. Za računski model pritličja in kleti sem definiral 7 toplotnih con, za posamezen model vmesne etaže sem definiral 4 toplotne cone, za model zgornjih etaž pa 10 toplotnih con (Slika 38).



Slika 38: Računalniška upodobitev toplotnih con na modelu zgornjih etaž.

6.2.7 Senčenje objekta

Senčenje objekta ima precejšen vpliv na toplotno izmenjavo stavbe z okolico. Prek OS vtičnika lahko na enostaven način izrišemo objekte, ki senčijo stavbo. Vsega skupaj sem izrisal 7 objektov (Slika 39).



Slika 39: Pogled na model 2. Nadstropja s severozahodne strani s prikazanimi objekti, ki senčijo stavbo. Objekti predstavljajo sosednje stavbe in drevesa.

Severno od objekta se nahaja pritlični trgovski objekt in 4-nadstropni stanovanjski blok. Na južni strani je stavba ministrstva za finance višine 12 metrov. Na vzhodni strani, v neposredni bližini objekta, je visok stanovanjski blok (30 metrov). Na zahodni strani pa so neposredno ob stavbi drevesa v ravni liniji, na drugi strani ceste pa sta dva višja poslovna objekta (35 metrov).

Zelo uporabna možnost, ki jo EP omogoča, je spreminjanje transparentnosti objektov za senčenje. Tako sem lahko poenostavljeno upošteval vpliv dreves na zahodni strani stolpnice, z urnikom transparentnosti dreves (gre za linijo dreves listavcev, tako sem upošteval dva profila senčenja – poletnega in zimskega, prvi zaustavi 90 %, drugi pa 30 % sončnega sevanja, ki pade na drevesa). Treba pa je biti pozoren na primerne programske nastavitve. Če želimo, da program upošteva urnike senčenja, je potrebno imeti vključeno nastavitvev za podroben algoritem modeliranja difuznega tipa neba (Detailed Sky Diffuse Modeling).

6.2.8 Simulacijske nastavitve

Pod pojmom simulacijske nastavitve so mišljeni vhodni podatki, ki direktno vplivajo na raven natančnosti simulacije, čas trajanja simulacije in uporabljene računske metode za računanje izhodnih parametrov. Opisal bom tiste nastavitve, ki najbolj bistveno vplivajo na končne rezultate. Opis posameznih nastavitvev temelji na dokumentih Engineering Reference [60] in Input Output Reference [77], ki spadata v sklop dokumentov, ki služijo kot pomoč pri učenju in razumevanju EP.

6.2.8.1 Časovni korak

Izbran časovni korak vpliva na natančnost in čas trajanja simulacije. Krajši kot je časovni korak izračuna, bolj podoben je odziv računskega modela stavbe na vremenske spremembe (temperatura, sončno sevanje, veter ...) realnemu odzivu stavbe. Zaradi tega se računska metoda, ki računa porabo energije stavbe na podlagi časovnih korakov, imenuje tudi natančna ali dinamična računska metoda. Najmanjši časovni korak, ki ga program še omogoča, je 1 minuta. Sam sem za časovni korak izbral 15 minut. Odločujoč kriterij za takšen časovni korak je bil uporabljen algoritem za izračun kondukcijskega prenosa toplote skozi ovoj stavbe, algoritem Conduction Transfer Function, kar je opisano v poglavju 6.2.8.4 Algoritem kondukcijskega prenosa toplote.

6.2.8.2 Solarna distribucija

Pod pojmom solarna distribucija je mišljeno upoštevanje vpliva sončnega sevanja, tako direktnega kot razpršenega oz. difuznega. Uporabil sem funkcijo FullExteriorWithReflections. Ta funkcija upošteva vpliv senčenja stavbe zaradi sosednjih objektov (ki jih je potrebno definirati), kot tudi samosenčenje stavbe. Poleg tega upošteva refleksijo sončnega sevanja (tako direktnega kot difuznega) od tal, objektov v okolici in od samega objekta. Predpostavlja se, da sončno sevanje, ki skozi transparentni del ovoja prodre v notranjost, enakomerno razporedi na površini tal v toplotni coni.

6.2.8.3 Algoritem konvekcijskega prenosa toplote

Eden izmed parametrov, ki pomembno vpliva na prehod toplote skozi ovoj stavbe, so konvekcijski prestopni koeficienti. Definirajo konvekcijski prenos toplote skozi mejne zračne plasti med površino konstrukcijskega sklopa in zrakom. Odvisni so od raznih parametrov (hrapavost površine, hitrost vetra, temperature zraka in površine, velikost površine ...). V teoriji obstaja mnogo računskih metod, katerih natančnost je odvisna od robnih pogojev, ki jih je potrebno upoštevati.

Za računanje konvekcijskih prestopnih koeficientov sem uporabil algoritma, ki jih program upošteva samodejno. Za notranje površine je to algoritem TARP, za zunanje površine pa algoritem DOE-2. Prvi algoritem temelji na korelacijah med naravno in prisilno konvekcijo na podlagi meritev v laboratoriju. Koeficiente toplotne prestopnosti prilagaja glede na temperaturno razliko med zrakom in površino ter orientacijo normale na površino (tako loči med koeficienti za stene, pode in strope). Drugi algoritem za računanje konvekcijskega prenosa toplote zunanjih površin, DOE-2, upošteva, ali je ta v privetni ali zavetrni poziciji. Oba algoritma pa upoštevata enake koeficiente za hrapavost površine. Omenjena algoritma (kot tudi drugi) sta podrobneje opisana v dokumentih Engineering Reference [60] in InputOutput Reference [77].

6.2.8.4 Algoritem kondukcijskega prenosa toplote

Kot omenjeno, sem za računanje kondukcije toplote skozi ovoj stavbe uporabil algoritem Conduction Transfer Function (CTF). Ta algoritem je postal popularen zaradi praktičnosti pri uporabi v računalniških programih, ki računajo porabo energije stavb na podlagi časovnih korakov. Omogoča hitro računanje toplotnih tokov na obeh straneh konstrukcijskega sklopa, ki sta edina izhodna podatka. Glavna predpostavka je, da je toplotni tok linearna funkcija zunanje in notranje temperature. Tako sta ti temperaturi edina vhodna podatka, ki se spreminjata pri vsakem naslednjem časovnem koraku. S tem se pomembno skrajša čas, potreben za izvedbo simulacij.

Natančno poznavanje te računske metode zahteva naprednejše poznavanje matričnega računanja. Za splošno razumevanje te metode pa moramo poznati omejitve in slabosti, ki jih takšna metoda izračuna toplotnih tokov vsebuje. Ta računska metoda neposredno določa dolžino časovnih korakov. Ugotovljeno je, da se ta metoda obnaša slabše pri masivnejših konstrukcijskih sklopih (materiali z veliko gostoto in specifično toploto, npr. armiranobetonske plošče v stiku s terenom) s kratkimi časovnimi koraki (krajši od 15 minut). Ker je nosilna konstrukcija stavbe sestavljena iz masivnih armiranobetonskih sten in plošč, sem tako določil dolžino časovnega koraka izračunov na 15 minut. V kolikor pa bi bila konstrukcija lahka, bi bili časovni koraki tudi krajši (npr. 3 minute). Druga slabost, ki pa nima vpliva na končne rezultate, je, da ni omogočen vpogled v spreminjanje temperature znotraj konstrukcijskega sklopa, saj program ne shranjuje podatkov o temperaturah znotraj konstrukcijskih sklopov. Tako s to metodo ni mogoče dobiti podatkov o temperaturnem poteku znotraj gradbenega elementa.

6.2.9 Programske omejitve in poenostavitve pri zasnovi modela

Poleg tega, da se zavedamo, kaj vse uporabljeno programsko orodje zmore, se je potrebno zavedati tudi, česa vsega ne zmore. Predstavljene bodo nekatere omejitve oz. ovire, na katere sem naletel pri oblikovanju računskih modelov.

6.2.9.1 Toplotni mostovi

Račun po mesečni in preprosti urni metodi glede na standard SIST EN ISO 13790 omogoča sorazmerno enostavno upoštevanje linijskih toplotnih mostov. Ker je koeficient transmisijских izgub eden glavnih vhodnih podatkov za računanje potrebe po ogrevanju in hlajenju, lahko toplotne mostove upoštevamo tako, da le tega ustrezno povečamo, za kar je potreben poračun transmisijских izgub skozi ovoj zaradi točkovnih in linijskih toplotnih mostov. Tehnična smernica TSG4 predpisuje tudi poenostavljeno upoštevanje linijskih toplotnih mostov, kadar je njihov vpliv ustrezno majhen (vsi linijski toplotni mostovi v stavbi imajo linijsko toplotno prehodnost manjšo od $0,2 \text{ W/mK}^{-1}$). Takrat lahko koeficient specifičnih transmisijских izgub stavbe povečamo za pavšalno vrednost $0,06 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$.

Pri dinamični metodi izračuna s programom EP pa ta koeficienta specifičnih transmisijских izgub ne računa, saj računa energijsko ravnotežje za vsako površino stavbe in prostor v stavbi posebej. Tako lahko linijske toplotne mostove upoštevamo na različne načine. Eden izmed načinov je, da predhodno ročno izračunamo vse toplotne mostove in nato posebej prilagodimo vrednosti toplotnih prehodnosti konstrukcijskih sklopov. Druga možnost je, da preko OS vtičnika izrišemo površine, na katerih poteka linijski ali točkovni toplotni most. Kakorkoli, tega problema se je potrebno zavedati vnaprej, saj ko imamo enkrat oblikovan računski model, ni enostavnega načina za upoštevanje linijskih toplotnih mostov. Ne aplikacija OS in ne IDF-Editor nimata možnosti za vnašanje potrebnih vhodnih podatkov za računanje vpliva toplotnih mostov.

6.2.9.2 Senčila

Kot je bilo opisano v poglavju 6.2.3 Konstrukcijski sklopi, elementi in materiali, program omogoča modeliranje premičnih senčil. Programske omejitve glede omenjenih senčil se nanašajo na predpostavljene pozicije in način kontrole le teh. Tako je predpostavljeno, da roloji, žaluzije in zaslони pokrivajo le zastekljeni del okna. V realnosti so senčila na takšen način nameščena le v redkih primerih, predvsem v notranjosti stavb ali pa kadar so nameščena v medstekelnemu prostoru, kar je še manj pogosto. Poleg tega so lahko takšna senčila le v dveh pozicijah, in sicer v poziciji, kjer prekrivajo celotno stekleno površino, in obratno – v poziciji, ko ne pokrivajo nič steklene površine.

6.2.9.3 Robne razmere površin

Preko aplikacije OS je omogočeno definirati naslednje robne razmere površin: zunanost, zunanost brez vpliva vetra, zunanost brez vpliva sonca, zunanost brez vpliva sonca in vetra, stik z zemljino, adiabatne razmere ter stik s površino sosednjega notranjega prostora. Robne razmere površin so pomembne, saj definirajo tiste vremenske razmere, ki so pomembne za računanje toplotnega toka skozi površine (kot je opisano v poglavju 6.1.1 Pritličje in kleti).

V primeru obravnavne stavbe se je pokazala potreba po definiranju bolj specifičnih robnih razmer v kletnih prostorih, kjer so prostori obravnavane stolpnice mejili na prostore izven sklopa stavbe. Program EP omogoča upoštevanje takšnih prostorov preko stika površin z ročnim definiranjem temperaturnih razmer v omenjenemu prostoru, vendar to ni omogočeno preko aplikacije OS (vsaj ne do verzije OS 1.11.0).

6.2.9.4 Prezračevanje z rekuperacijo toplote odpadnega zraka

Kot rečeno, program EP in OS omogočata modeliranje tehničnih sistemov, ki jih program nato avtomatsko upošteva za izračun potrebne dovedene energije stavbe. Na takšen način je mogoče modelirati tudi sistem za prezračevanje z rekuperacijo toplote odpadnega zraka. Če pa ne želiš modelirati tehničnih sistemov in te zanima le koristna energija, ki jo stavba potrebuje za obratovanje, enostavnega načina za upoštevanje sistema za vračanje toplote odpadnega zraka ni.

Programi, ki računajo po mesečni metodi glede na standard SIST EN ISO 13790, omogočajo enostavno upoštevanje rekuperacije odpadnega zraka z definiranjem učinkovitosti sistema, npr. s 85-odstotno učinkovitostjo. Nato računalniški program avtomatsko upošteva to vrednost z ustreznim zmanjšanjem ventilacijskih toplotnih izgub.

Žal ne aplikacija OS in ne IDF-Editor (vsaj en do verzije OS 1.11.0) ne omogočata upoštevanja učinkovitosti sistema za vračanje toplote odpadnega zraka na tako preprost način. V primeru, ko je pomemben le energetski vidik stavbe in so parametri kvalitete notranjega zraka manj pomembni, lahko prezračevanje z rekuperacijo odpadnega zraka upoštevamo s primernim zmanjševanjem intenzivnosti prezračevanja v obdobju ogrevanja. Tako so zmanjšane ventilacijske izgube v obdobju ogrevalne sezone, kar je glavni namen prezračevanja z rekuperacijo toplote odpadnega zraka.

7 ANALIZA VPLIVA RAZLIČNIH ZASNOV FASADNEGA OVOJA STAVBE NA PORABO ENERGIJE V STOLPNICI

V sledečem poglavju bom predstavil rezultate različnih računskih modelov, ki se razlikujejo glede na kombinacijo ukrepov na fasadnem ovoju. Kot prvo sem analiziral računski model dejanskega stanja. Nato sem začel dodajati posamezne ukrepe na nivoju fasadnega ovoja.

Pri izbiri ukrepov na nivoju fasadnega ovoja sem sledil določenim kriterijem. V prvi vrsti sem želel, da so predlagani ukrepi realni in stroškovno učinkoviti (zanimivi za lastnika). Tako nisem predvidel posegov v nosilno konstrukcijo stavbe. Tudi velikosti okenskih odprtin nisem spreminjal, saj je na podlagi rezultatov ankete med zaposlenimi [65] več kot 80 % vprašanih zadovoljnih z osvetljenostjo v delovnih prostorih.

Druge omejitve glede ukrepov se nanašajo na natančnost rezultatov simulacij računalniških modelov stavbe. Kot omenjeno, sem želel simulirati računalniški model obravnavane stavbe z DSF, vendar sem bil zaradi razlogov, opisanih v poglavju 2.5.2.2 Kompleksnost termodinamičnih procesov v dvojnih steklenih fasadah – simulacijske omejitve, bil primoran opustiti to idejo.

Tako so analizirani ukrepi na nivoju stavbnega ovoja sledeči:

- zmanjšanje transmisijskih izgub ovoja stavbe skozi transparentni in netransparentni del ovoja (povečava debeline in zamenjava toplotne izolacije, nova okna) – Varianta 1,
- nočno hlajenje stavbe – Varianta 2,
- optimalna kontrola zunanjih žaluzij – Varianta 3,
- zamenjava zunanjih žaluzij z različnimi zunanjimi fiksnimi senčili v kombinaciji z notranjimi roloji – Varianta 4.

Pri vsaki varianti sem predstavil podatke o potrebni energiji za ogrevanje, hlajenje, razsvetljavo, opremo in skupni potrebni energiji ter odstotkovne deleže ki jih predstavlja posamezen proces v primerjavi s skupno potrebno energijo računskega modela stavbe. Energije za pripravo tople sanitarne pitne vode v modelih nisem upošteval, saj ta predstavlja le manjši delež skupne energije v obravnavani stolpnici [65]. Zaradi ohranjanja preglednosti podrobnejših rezultatov, kot so na primer prikaz transmisijskih in ventilacijskih izgub, nisem prikazoval. Podrobnejša analiza rezultatov je bila opravljena ob primerjavi izhodiščnega računskega modela in končnega računskega modela v poglavju 10 Primerjava rezultatov izhodiščne in končne variante.

Primerjava rezultatov različnih variant med seboj in z zakonsko predpisanimi vrednostmi sledi v poglavju 8 Primerjava rezultatov različnih zasnov fasadnega ovoja. Na podlagi primerjave rezultatov med različnimi variantami sem nato izbral končno varianto, pri kateri sem simuliral še porabo energije ob dodanem sistemu za vračanje odpadne toplote prezračevanega zraka.

7.1 Varianta 0 : Dejansko stanje

7.1.1 Splošen opis računskega modela

Prva varianta predstavlja izhodiščno stanje, to je dejansko stanje stavbe. Iz pomanjkljivosti, identificiranih na podlagi analize dejanskega stanja stavbe, sledijo predlagani in preverjeni ukrepi na nivoju zunanega ovoja ter drugi ukrepi (nočno hlajenje, optimizacija kontrole senčil ...).

Nekateri pomembnejši vhodni parametri računskega modela so prikazani v preglednici 9. Ta služi tudi lažjemu identificiranju razlik v računskih modelih, tako bo podobna tabela prisotna v vsakem podpoglavju za različno varianto računskega modela.

Preglednica 9: Pregled pomembnejših lastnosti računskega modela dejanskega stanja.

Varianta 0: Dejansko stanje		
Zunanji ovoj		
Delež okenskih površin – z faktor	0,35	
Koeficient specifičnih transmisijskih izgub*	$H'_T = 1,308 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$	
Okna	Pritličje	1 – 17 nad.
	$U_w = 3,16 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$ $g\text{-faktor} = 0,65$ $A_w = 3,6 \text{ m}^2$ (skupaj $A = 279,5 \text{ m}^2$)	$U_w = 3,03 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$ $g\text{-faktor} = 0,68$ $A_w = 2,34 \text{ m}^2$ (skupaj $A = 2224 \text{ m}^2$)
Senčila		
Vrsta senčil	J fasada: zunanje žaluzije S fasada: /	
Kontrola senčil	Vedno popolnoma spuščena, lamele pravokotne na zasteklitev	
Prezračevanje	0,6 h ⁻¹	
Infiltracija zunanjega zraka	0,33 h ⁻¹	
Nočno hlajenje	NE	
Rekuperacija toplote prezračenega zraka	NE	

* v izračunu je upoštevan le nadzemni del zunanega ovoja stavbe brez upoštevanje toplotnih mostov. Po poenostavljeni metodi upoštevanja toplotnih mostov, predpisani v TSG4, se vrednost poveča za 0,06 na $1,368 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$

7.1.1.1 Zasnova netransparentnega in transparentnega fasadnega ovoja – Varianta 0

Sestavo konstrukcijskih sklopov (netransparentni del) sem dobil iz originalnih načrtov stolpnice (iz leta 1975). Posegov v zunanji ovoj stolpnice od takrat ni bilo, tako sem za dejansko stanje stolpnice uporabil omenjene konstrukcijske sklope. Sestava konstrukcijskih sklopov bo prikazana v prilogi C, na tem mestu bo prikazana le toplotna prehodnost konstrukcijskih sklopov in skupna površina posameznega konstrukcijskega sklopa.

Preglednica 10: Varianta 0: Dejansko stanje – toplotna prehodnost in površina konstrukcijskih sklopov nad kletnimi prostori.

Površine v stiku z zunanostjo oz. neogrevanimi prostori		
	U [W/m^2K^{-1}]	Površina [m^2]
Zunanje stene		
Zunanja stena SJ	0,670	3138,65
Zunanja stena VZ	0,666	2361,12
Pritličje – parapet	0,676	129,19
Streha		
Nepohodna	0,514	133,77
Pohodna	0,763	575,09
Okna		
N1-N17	3,031	2223,98
Pritličje	3,158	279,15
Tla k neogrevanim prostorom		
Tla – pritličje	0,810	612,30
Zunanji strop		
Strop pritličje – zunanji previs	1,125	134,10

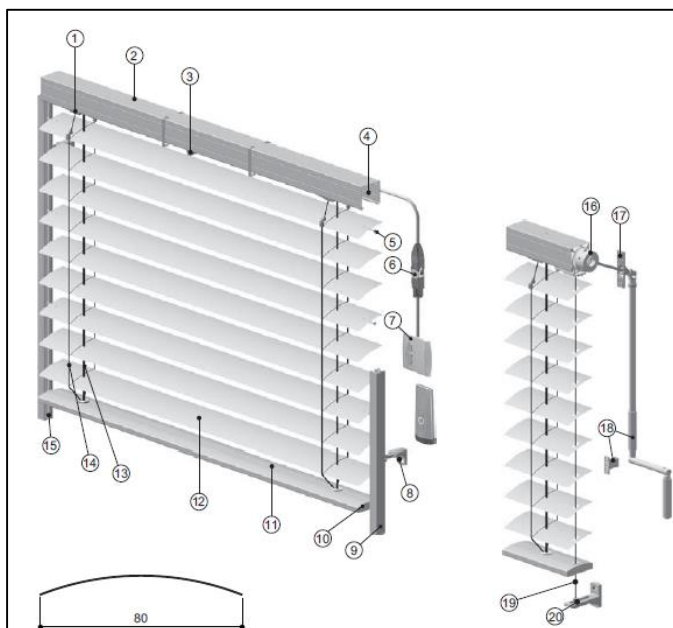
Okna v stavbi lahko v grobem razdelimo na 2 skupini, in sicer okna v pritličju in v ostalih etažah (od nadstropja 1 do nadstropja 17 – N1 – N17). Tako sem s programom Windows 7.4 sestavljal karakteristični okni, ki sem ju nato uvozil v OS. Gre za dvoslojna okna z znatno slabšimi toplotnimi karakteristikami kot jih zahtevajo današnji predpisi.

Preglednica 11: Osnovne karakteristike oken – Dejansko stanje.

Okna – Dejansko			
Pritličje:		N1-N17	
Okvir	Aluminij ($U_f = 3,97 W/m^2K^{-1}$)	Okvir	Aluminij ($U_f = 3,97 W/m^2K^{-1}$)
Površina:	3,596 m^2	Površina:	2,335 m^2
Zasteklitev:	Dvoslojna, brez nizko emisijskega nanosa; 5,7/12/5,7 mm	Zasteklitev:	Dvoslojna, brez nizko emisijskega nanosa; 5,7/12/5,7 mm
Plin v MSP*:	Zrak	Plin v MSP*:	Zrak
U_w	3,158 W/m^2K^{-1}	U_w	3,031 W/m^2K^{-1}
g -faktor	0,649	g -faktor	0,682
LT	0,581	LT	0,674
*MSP = medstekelni prostor			

7.1.1.2 Senčenje transparentnega dela ovoja – Varianta 0

Naslednja predpostavka, ki je potrebna, se nanaša na senčila. Odločil sem se, da bodo zunanje žaluzije na južni fasadi pri računskem modelu ves čas spuščene, lamele žaluzij pa bodo orientirane pravokotno na zasteklitev. Poleg tega so na južni fasadi prisotne še notranje zavese, ki sem jih v računskem modelu zanemaril, saj program ne omogoča simulacije z dvojnimi premičnimi senčili na eni zasteklitvi. To je groba poenostavitev realne situacije, za katero sem se odločil zaradi programskih omejitev, ohranjanja enostavnosti modela in realne situacije pozicije žaluzij.



Podatke o geometriji žaluzij sem povzel po podatkih proizvajalca [79], toplotne in optične lastnosti pa po prednastavljenih vrednostih v vmesniku OS.

Slika 40: Koncept zunanjih žaluzij [79].

Računski model na severni fasadi ne upošteva nobenih senčil. To ni v skladu z realno situacijo, kjer so prisotna notranja senčila (zavese). Ta poenostavitev je posledica tega, da lahko kot notranja senčila upoštevam le žaluzije ali roloje (programska omejitev). V realni situaciji pa so zavese lahko v različnih pozicijah glede na okno.

Zaradi omenjenih poenostavitev pričakujem na južni fasadi manjše, na severni fasadi pa večje solarne dobitke kot v realni situaciji.

7.1.1.3 Infiltracija zunanjega zraka – Varianta 0

Še ena pomembna lastnost modela dejanske stavbe se nanaša na stopnjo infiltracije zunanjega zraka. Predpostavil sem, da je ta večja, kot bo znašala pri kasnejših »saniranih« modelih stavbe. Za to sem se odločil, ker predstavljajo toplotne izgube zaradi infiltracije pri novejših stavbah manjši delež toplotnih izgub kot pri starejših in bi bilo upoštevanje enake stopnje infiltracije pri dejanskem in »saniranem« stanju nerealno (za pričakovati je, da se bo ob sanaciji zunanjega ovoja povečala tudi zrakotesnost).

Za stavbo sem predpostavil, da spada v območje med 2. in 3. razredom tesnosti. To so stavbe, pri katerih ob tlačni razliki 50 Pa (pascalov) med stavbo in okolico pričakujemo od 4 do 6 izmenjav zraka na uro [77]. To vrednost sem predpisal predvsem zaradi mehanskega prezračevanja v stavbi, saj se pri mehanskem prezračevanju ustvari nadtlak in zmanjša infiltracijo v stavbo. Dejanska pričakovana stopnja infiltracije je tako dobljena z enačbo $0,07 \cdot n_{50}^*$ [77]. Ustrezne vrednosti infiltracije zunanjega zraka sem za računski model določil iterativno. Tako je vrednost infiltracije preko letnega cikla obratovanja stavbe $0,33 \text{ h}^{-1}$.

7.1.1.4 Notranji viri ljudi, razsvetljave in elektronske opreme

Vrednosti notranjih virov, ki definirajo notranje dobitke in tudi električno porabo za razsvetljavo ter elektronsko opremo, se pri različnih variantah zasnove fasadnega ovoja ne spreminjajo. Zato so vhodni podatki za notranje vire pri ostalih variantah identični.

V realnosti bi pričakovali, da lahko različne zasnove fasadnega ovoja vplivajo na potrebe po umetni razsvetljavi v stavbi (debelina konstrukcijskih sklopov zunanjih sten, vrsta senčil, kontrola zunanjih senčil). Tako bi bilo potrebno spremljati, kako se spreminja vrednost naravne osvetljenosti v prostorih, da bi lahko pravilno ovrednotil potrebe po umetni svetlobi v prostorih. Spremljanje notranje osvetljenosti prostorov ni bil predmet mojih raziskav, zaradi tega sem predpostavil konstantne vrednosti električne moči razsvetljave, za vse analizirane variante stavbnega ovoja.

V preglednici 12 so prikazane vrednosti moči za notranje vire v pomembnejših prostorih obravnavane stolpnice. Vse vrednosti je program avtomatsko določil glede na posamezen tip prostora z upoštevanjem predpisanih vrednosti po standardih ASHRAE 189.1-2009.

Preglednica 12: Vrednosti moči notranjih virov ljudi, luči in elektronske opreme za nekatere prostore v stavbi.

	LJUDJE [oseba/m ²]	LUČI [W/m ²]	OPREMA [W/m ²]
Pisarna	0,051129	10,656	6,889
Sejna soba	0,538	12,594	3,983
Hodnik	0,0108	4,844	1,722
Sanitarije	0,108	8,72	0,753

Dejanske vrednosti notranjih virov, ki so upoštevani v energetske bilanci stavbe, dobimo prek urnikov uporabe, ki definirajo faktorje, s katerimi zmnožimo predpisane vrednosti notranjih virov.

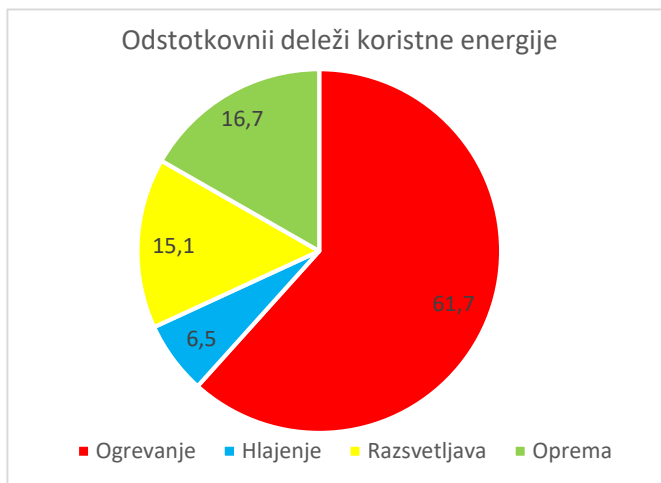
* n_{50} je oznaka za število izmenjav zraka na uro pri tlačni razliki 50 Pa [h^{-1}].

7.1.2 Rezultati simulacije – Varianta 0

Skupna simulirana poraba koristne energije stolpnice znaša 2360,8 MWh (Preglednica 13). Od tega se slabi dve tretjini energije (Grafikon 9) porabi za ogrevanje stavbe. Najmanj energije je potrebno za hlajenje, 6,5 % vse skupne energije oz. 152,4 MWh.

Preglednica 13: Rezultati simulacije – Varianta 0.

Varianta 0: Dejansko stanje			
Poraba energije:			
Koristna energija:			
	MWh	kWh/m ³	
Ogrevanje:	1456,8	33,38	
Hlajenje:	152,4	3,49	
Razsvetljava:	357,1	8,18	
Oprema:	394,6	9,04	
Skupaj:	2360,8	54,09	



Grafikon 9: Odstotkovni deleži porabljene koristne energije za računski model dejanskega stanja.

Za razsvetljava stavba porabi 357,1 MWh energije (15,1 % vse energije), za delovanje elektronske opreme pa 394,6 MWh oz. 16,7 % vse energije.

7.2 Varianta 1: Zmanjšanje toplotne prehodnosti ovoja stavbe

7.2.1 Splošen opis računskega modela – Varianta 1

Ta varianta predstavlja situacijo, v kateri bi zmanjšali toplotno prehodnost stavbnega ovoja, in sicer tako, da bi vsi konstrukcijski sklopi ustrezali PURES-u. Pri tem sem predpostavil, da se delež transparentnih površin ne spremeni, torej gre za zamenjavo in dodatek toplotne izolacije (v nadaljevanju TI) v posameznem konstrukcijskem sklopu ter zamenjavo oken. Torej, gre za klasično energetske sanacije stavbe, ki jo danes vidimo na večini objektov. Predpostavljam tudi, da se zmanjša infiltracija zunanjega zraka v stavbo. Ta predpostavka temelji na dejstvu, da so stavbe po zamenjavi stavbnega pohištva ter dodani TI in pripadajočih slojev (parne ovire, sekundarne HI ...) zrakotesnejše.

Preglednica 14: Varianta 1: Pregled pomembnejših lastnosti računskega modela.

Varianta 1: Zmanjšanje toplotne prehodnosti ovoja stavbe		
Zunanji ovoj		
Delež okenskih površin – z faktor	0,35	
Koeficient specifičnih transmisijskih izgub*	$H'_T = 0,402 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$	
Okna	Pritličje	1 – 17 nad.
	$U_w = 1,06 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$ g- faktor = 0,65 $A_w = 3,6 \text{ m}^2$ (skupaj $A = 279,5 \text{ m}^2$)	$U_w = 0,895 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$ g- faktor = 0,68 $A_w = 2,34 \text{ m}^2$ (skupaj $A = 2224 \text{ m}^2$)
	Senčila	
Vrsta senčil	J fasada: zunanje žaluzije S fasada: /	
Kontrola senčil	Vedno popolnoma spuščena, lamele pravokotne na zasteklitev	
Prezračevanje	$0,6 \text{ h}^{-1}$	
Infiltracija zunanjega zraka	$0,18 \text{ h}^{-1}$	
Nočno hlajenje	NE	
Rekuperacija toplote prezračevanega zraka	NE	

* v izračunu je upoštevan le nadzemni del zunanjega ovoja stavbe brez upoštevanje toplotnih mostov. Po poenostavljeni metodi upoštevanja toplotnih mostov, predpisani v TSG4, se vrednost poveča za 0,06 na $0,462 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$

Torej, model se od prejšnjega razlikuje glede manjše vrednosti toplotne prehodnosti ovoja in manjše stopnje infiltracije (2x manjša infiltracija).

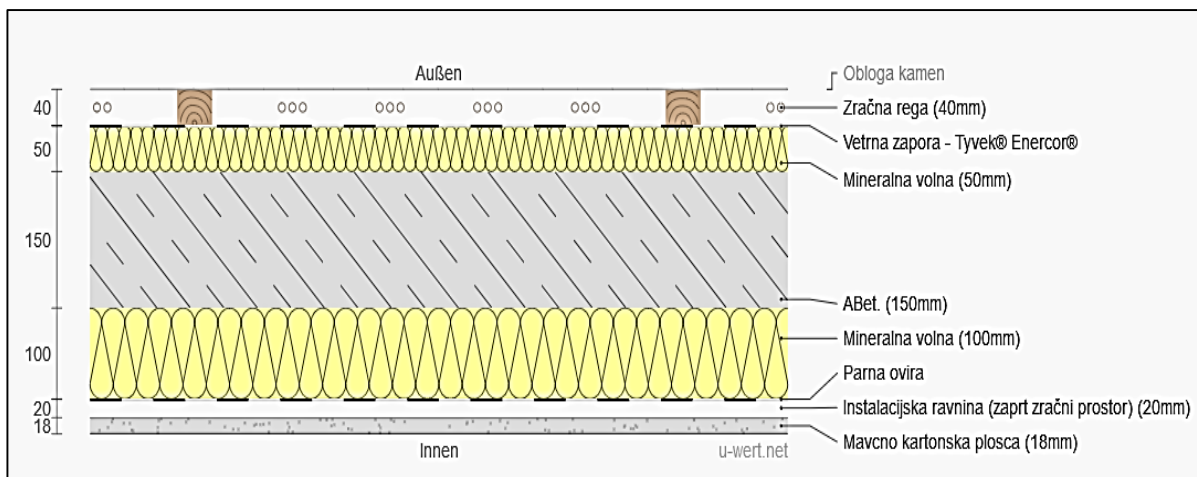
7 2.1.1 Zasnova netransparentnega in transparentnega fasadnega ovoja – Varianta 1

Pri načrtovanju ustreznih konstrukcijskih sklopov sem se držal določenih usmeritev. Želel sem preprosto in cenovno sprejemljivo rešitev. Tako sem upošteval, da bi bila namestitev dodatne TI izolacije na notranji strani zunanjih sten možna, saj prostorske stiske v stavbi ni (osebna komunikacija s predstavnikom lastnika stavbe).

Poleg tega je treba upoštevati predpise o požarni varnosti. V tehnični smernici o požarni varnosti v stavbah TSG-1-001:2010 ([44]) je navedeno, da se za stavbe, višje od 22 metrov, upoštevajo zahteve MHHR (nemške vzorčne smernice za visoke objekte, Muster-Hochhaus-Richtlinie [45]). Te zahteve določajo, da morajo biti nenosilne zunanje stene in nenosilni deli nosilnih zunanjih sten stavb, višjih od 22 metrov, iz popolnoma negorljivih izolacijskih materialov (razen okenskih okvirjev, TI v zaprtih negorljivih profilih, tesnila in nenosilni deli, ki nimajo doprinosa k širjenju požara). Tako sem se odločil za TI zunanjih sten iz mineralne volne, ki spada v najvišji razred požarne odpornosti A1.

Streha stavbe je ravna, tam sem predvidel eno izmed klasičnih rešitev, ki jo ponujajo razni ponudniki TI in hidroizolacij (npr. Fragmat [80]). Tla pritličja, ki meji na kletne prostore, sem obravnaval kot tla k neogrevanim prostorom. Tudi tam sem uporabil negorljive TI-plošče iz mineralne volne.

Konstruktivske sklope sem analiziral s programom U-Wert, tako da so zadostili vsem kriterijem glede toplotne zaščite in difuzije vodne pare, ki jih zahteva tehnična smernica TSG4. Sestave konstrukcijskih sklopov v tej fazi ne bom prikazoval, so pa prikazani v prilogi C. Na sliki 41 je prikaz sestave zunanje stene (na V in Z fasadi) iz programa U-Wert (zunanjí del prezračevane fasade je prikazan le shematično, podkonstrukcija ni lesena, obloga iz kamna pa je debelejša).



Slika 41: Sestava konstrukcijskega sklopa zunanje stene na vzhodni in zahodni strani stavbe (program U-Wert).

Odločitev o izbiri najprimernejših oken za stavbo ni trivialna. Okna z boljšimi toplotnimi lastnostmi imajo praviloma slabše optične lastnosti. Tako lahko pri oknih z nizkim U -faktorjem pričakujemo nižji g -faktor in LT . Pri energetski bilanci stavbe igra g -faktor pomembno vlogo, saj vpliva na solarne dobitke. Katera okna bodo na obravnavani stavbi prispevala k najnižji porabi koristne energije, je bilo treba preveriti računsko. Izbral sem okna, ki se razlikujejo v toplotnih in optičnih lastnosti zasteklitev, okvir in distančnik pa sta pri vseh enaka.

Pritličje je načeloma osenčeno z vseh strani (za lažjo predstavbo glej sliko 39), poleg tega predstavlja površina okenskih odprtí pritličja le 12,5 % površine okenskih odprtí v ostalih etažah. Zaradi tega za pritličje dodatne analize o primerni izbiri oken nisem izvajal. Na podlagi izkušenj lahko trdim, da bodo k manjši energetski bilanci najbolj prispevala najbolj toplotno izolativna okna. Vpliv oken, ki so predvidena za vse ostale etaže (N1-N17), bom dodatno preveril v programu EP, na računskem modelu izbrane etaže (7. nadstropje). Tako bom določil najprimernejša okna z vidika energetske učinkovitosti. Lastnosti oken so predstavljene v preglednici 15.

Preglednica 15: Lastnosti analiziranih oken na podlagi rezultatov v programu Window 7.4.

Okna – Dejansko					
Pritličje:					
Površina:	3,596 m ²				
Okvir	Aluminij ($U_f = 2,2 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$)				
Zasteklitev:	Troslojna, nizkoemisijiski nanos na notranji in srednji zasteklitvi				
Plin:	Argon				
U_w	1,064 W/m ² K				
g-faktor	0,447				
LT	0,550				
N1-N17					
Okvir	Aluminij ($U_f = 2,2 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$)				
Površina:	2,166 m ²				
OKNO1		OKNO2		OKNO3	
Zasteklitev:	Dvoslojna, nizko emisijiski nanos na notranji zasteklitvi; 3/16/3 mm	Zasteklitev:	Troslojna, nizko emisijiski nanos na notranji zasteklitvi; 3/16/3/16/3 mm	Zasteklitev:	Troslojna, nizko emisijiski nanos na notranji in srednji zasteklitvi; 3/16/3/16/3 mm
Plin:	Argon	Plin:	Argon	Plin:	Argon
U_w	1,388 W/m ² K	U_w	1,155 W/m ² K	U_w	0,885 W/m ² K
g-faktor	0,568	g-faktor	0,51	g-faktor	0,477
LT	0,717	LT	0,632	LT	0,634

OKNO 3 ima najnižji U_w in najmanjše vrednosti optičnih lastnosti. OKNO 2 je tako kot prejšnje okno troslojno, le da na srednji zasteklitvi nima nizko emisijiskega nanosa. Posledično je višji U_w in g- faktor, prepustnost za vidni del sončnega sevanja pa je celo malenkost nižja. OKNO 1 je dvoslojno z nizko emisijiskim nanosom, zaradi česar ima najvišje vrednosti toplotne prehodnosti in opazovanih optičnih lastnosti.

7.2.1.1.1 Izbira najprimernejših oken z vidika porabe energije etaž nad pritličjem

Poleg primerjave med različnimi kombinacijami oken me je zanimal tudi prispevek, ki ga ima na porabo energije zmanjšanje toplotne prehodnosti netransparentnega dela ovoja. Tako sem primerjal, kako se spreminjajo rezultati glede na model brez toplotne izolacije in model s toplotno izolacijo netransparentnega ovoja. Upoštevana pozicija senčil in njihova kontrola je enaka kot pri dejanskem stanju (glej prejšnje poglavje 7.1.1.2 Senčenje transparentnega dela ovoja).

Skupaj sem primerjal 5 računskih modelov. Trije so imeli enako vrsto oken na južni in severni fasadi, dva modela pa sta imela na severni fasadi okna z najnižjo toplotno prehodnostjo (OKNO 3), na južni fasadi pa okna z višjo prepustnostjo za sončno sevanje in višjo toplotno prehodnostjo (OKNO 1 in OKNO 2).

Preglednica 16: Primerjava razlike v % pri porabi koristne energije računskega modela 7. nadstropja glede na model dejanskega stanja in model dejanskega stanja s toplotno izoliranim ovojem.

[%]	Dejansko	TI netr. ovoja	TI netr. ovoja + SJ OKNO 1		TI netr. ovoja + SJ OKNO 2		TI netr. ovoja + SJ OKNO 3	
Ogrevanje:	Izhodišče (Varianta 0)	42,45	51,65	15,98	53,46	19,14	55,65	22,93
Hlajenje:		-21,42	-40,8	-15,96	-38,46	-14,04	-35,91	-11,93
Skupna:		25,41	29,93	6,05	31,23	7,8	32,79	9,88
			TI netr. ovoja + S OKNO3 J OKNO 1		TI netr. ovoja + S OKNO 3 J OKNO2			
Ogrevanje:			54,2	20,42	55,35	22,41		
Hlajenje:			-41,31	-16,38	-38,40	-13,99		
Skupna:			31,51	8,17	32,43	9,4		

Negativne vrednosti v preglednici 16 pomenijo, da se je situacija v primerjavi z izhodiščnim stanjem poslabšala. To se je zgodilo pri vseh računskih modelih pri potrebni energiji za hlajenje. Kot že opisano, se poraba elektrike za razsvetljavo in opremo ne spreminja, zaradi tega ju v preglednici 16 nisem prikazoval. V skupni energiji je upoštevan seštevek vseh procesov, tudi razsvetljave in delovanja opreme.

Opazimo, da se ob toplotni izolaciji netransparentnega dela ovoja brez zamenjave oken (3. stolpec v zgornjemu delu preglednice 16) poraba toplotne energije zmanjša za več kot 40 %, poraba energija za hlajenje pa naraste za več kot 20 % v primerjavi z izhodiščnim stanjem. Glavni vzrok za to so notranji dobitki, ki imajo ob boljši toplotni izolaciji večji vpliv na notranjo temperaturo. To je pozimi zaželeno, poleti pa lahko vodi do pregrevanja stavbe. Skupna potreba po energiji se zmanjša za 25,4 %. Potrebno je poudariti, da v analiziranih računskih modelih nisem upošteval zmanjšanja infiltracije zaradi boljše zrakotesnosti modelov z dodano TI in novimi okni.

Ob dodatni zamenjavi oken se energetska bilanca stavbe še izboljša. Če najprej primerjamo, kaj se zgodi, če tako na severni kot na južni fasadi uporabimo enak tip oken (zgornji del preglednice 16). Potrebe po ogrevanju se znatno zmanjšajo pri vseh modelih. Najbolje se odreže model z OKNI 3, kjer se potreba po ogrevanju zmanjša za slabih 23 %. Če primerjamo rezultate glede hlajenja, opazimo, da ima model z OKNI 3 precej manjšo porabo za hlajenje kot ostala dva modela. To nakazuje, da so poleg manjših transmisivnih izgub skozi steklo zaradi manjše toplotne prehodnosti solarni dobitki tega modela manjši, kar se pozitivno odraža pri potrebah po hlajenju. Prepustnost za sončno sevanje je pri OKNU 3 manjša za 16 % v primerjavi z OKNOM 1 in 6,5 % v primerjavi z OKNOM 2 (preglednica 16). Logičen je tudi največji prihranek pri skupni porabi energije, saj se potreba po elektriki za opremo in razsvetljavo med modeli ne spreminja.

Ob primerjavi modelov z različnimi tipi zasteklitev na severni in južni fasadi (spodnji del preglednice 14) opazimo boljše obnašanje modela, ki ima na južni fasadi OKNA 2 (nekoliko nižja toplotna prehodnost in prepustnost za sončno sevanje v primerjavi z OKNI 1). Potreba po ogrevanju se zmanjša za dobrih 22 %, potreba po hlajenju pa poveča za 14 %. Skupaj prihranimo 9,4 % energije.

Iz rezultatov v preglednici sledi, da se najbolje odreže model z najbolj toplotno izolativnimi okni, to so OKNA 3. Tako lahko sklenemo, da za obravnavano stavbo toplotna prehodnost oken igra pomembno vlogo v energijski bilanci stavbe. Potrebno pa se je zavedati, da je predpostavljena pozicija senčil glede na okna dokaj konzervativna, to pomeni, da bi v realni situaciji pričakovali nekoliko večje solarne dobitke in pa tudi večjo potrebo po hlajenju.

Ker je skupna poraba energije pri modelu z OKNI 3 na obeh fasadah in pri modelu z OKNI 2 na južni in OKNI 3 na severni fasadi primerljiva, sem se odločil simulirati še ostale modele in tako primerjati rezultate na nivoju celotne stavbe. Do presenečenja ni prišlo, model z OKNI 3 doseže za malenkost boljše rezultate, in sicer za 0,3 % manjšo porabo toplote za ogrevanje, 1,3 % manj potrebnega hlada in skupno 0,3 % manj energije za obratovanje stavbe. Tako bom v nadaljnjih analizah upošteval okna 3 na severni in južni fasadi. Ker pa so razlike majhne, ne izključujem možnosti, da bi se ob drugačni zasnovi senčil rezultati lahko obrnili v prid modelu z različnimi okni na severni in južni fasadi.

Po izbranih oknih za računski model lahko predstavim vrednosti toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov in oken (Preglednica 17). Vsi konstrukcijski sklopi zadostijo zahtevam po PURES-u.

Preglednica 17: Varianta 1 – toplotna prehodnost in površina konstrukcijskih sklopov nad kletnimi prostori.

Površine v stiku z zunanostjo oz. neogrevanimi prostori		
	U [W/m ² K]	Površina [m ²]
Zunanje stene		
Zunanja stena SJ	0,218	3138,65
Zunanja stena VZ	0,218	2361,12
Pritličje – parapet	0,242	129,19
Streha		
Nepohodna	0,195	133,77
Pohodna	0,191	575,09
Okna		
P1-P17	0,895	2223,98
Pritličje	1,064	279,15
Tla k neogrevanim prostorom		
Tla – pritličje	0,280	612,30
Zunanji strop		
Strop pritličje – zunaj	0,245	134,10

7.2.1.2 Infiltracija zunanjega zraka – Varianta 1

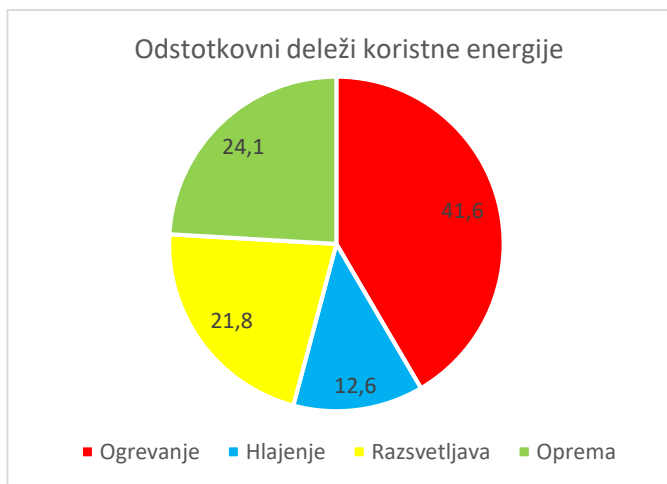
Zaradi boljše zrakotesnosti sem vrednost infiltracije zunanjega zraka še zmanjšal v primerjavi z izhodiščno situacijo. Predvidevam, da stavba spada v območje 1. in 2. razreda tesnosti, za katera je prevedena zrakotesnost med 1,5 in 3 izmenjave zraka pri tlačni razliki 50 Pa [77]. Tako pričakujem infiltracijo v območju med 0,1 in 0,2 izmenjav zraka na uro. Končna vrednost upoštewane infiltracije zraka je tako 0,18 h⁻¹(preglednica 14).

7.2.2 Rezultati simulacije – Varianta 1

Skupna poraba energije računskega modela znaša 1640,5 MWh (Preglednica 18), od tega največji delež predstavlja toplotna energija, in sicer 41,6 % (Grafikon 10). Za hlajenje se porabi 12,6 % vse energije (206,3MWh), elektrika za razsvetljavo in elektronsko opremo pa skupaj predstavlja 45 % (751,7 MWh) vse potrebne energije.

Preglednica 18: Rezultati simulacije – Varianta 1.

Varianta 1:			
Poraba energije:			
Koristna energija:			
	MWh	kWh/m ³	
Ogrevanje:	682,3	15,63	
Hlajenje:	206,3	4,73	
Razsvetljava:	357,1	8,19	
Oprema:	394,6	9,04	
Skupaj:	1640,5	37,59	



Grafikon 10: Odstotkovni deleži porabljene koristne energije za računski model Varianta 1.

7.3 Varianta 2: TI ovoja stavbe + nočno hlajenje

7.3.1 Splošen opis računskega modela – Varianta 2

Drugi ukrep, ki spada v območje ovoja stavbe, je nočno hlajenje. To bi se izvajalo s povečanjem dovajanja hladnejšega zunanega zraka v notranjost stavbe tekom noči ali v jutranjih urah, med obdobji hlajenja stavbe. Tehnična smernica TSG4 navaja, da je nočno prezračevanje oz. nočno hlajenje stavbe upoštevano v izračunu energetske bilance stavbe, če je upravljano avtomatsko.

Pogoj, da nočno hlajenje deluje, je nižja temperatura zunanjega zraka od maksimalne dovoljene temperature znotraj stavbe. Ljubljansko podnebje je primerno za nočno hlajenje stavb, saj temperature v toplejših mesecih leta ponoči padejo v ustrezno temperaturno območje. V splošnem je bolje, da se pasivno hlajenje stavbe izvaja v nočnem času, ko ta ni v obratovanju.

Glede na rezultate simulacije računskega modela Varianta 1, je stavbo potrebno hladiti od aprila do oktobra. Nočno hlajenje se bi izvajalo z avtomatskim odpiranjem oken na ventus, v nočnem času (med 23:00 in 5:00 na obodu stavbe). V poznih spomladanskih in poletnih mesecih je potrebno paziti, da se stavba ne podhladi, tako bi bilo potrebno sočasno spremljanje notranje temperature, saj povečanje potreb po ogrevanju ni namen nočnega hlajenja.

Avtomatsko vodenje nočnega hlajenja zahteva dodatne aktuatorje na ovoju (za odpiranje oken), senzorje (veter, padavine, zunanja in notranja temperatura ter relativna vlažnost), kontrolno logiko za nadzor nad delovanjem aktuatorjev in interpretacijo podatkov ter centralno nadzorni sistem za spremljanje in shranjevanje podatkov (računalnik). Za potrebe ustreznega delovanja računskega modela pa implementacija vseh teh ukrepov v model ni potrebna. Prilagoditi je bilo potrebno le vhodne podatke za infiltracijo (povečanje infiltracije v nočnem času med obdobji hlajenja) in spremeniti temperaturni režim za ogrevanje (spremeniti urnik tako, da ni prihajalo do ogrevanja stavbe).

Ta ukrep zniža potrebe po hlajenju, medtem pa ne sme povečati potrebe po ogrevanju. Z dobljenimi rezultati želim ugotoviti, za koliko se zmanjša potreba po hlajenju stavbe. Glede na Varianto 1 se tako spremeni le vrednost infiltracije zunanjega zraka, ki se na letni ravni poveča za 5 % (na 0,19 h⁻¹). Ob primerjavi vrednosti infiltracije zraka v nočnem času pa ugotovimo, da se ta poveča približno za faktor 2,3, in sicer z 1,1 h⁻¹ na 2,5 h⁻¹.

Preglednica 19: Varianta 2: Pregled pomembnejših lastnosti računskega modela.

Varianta 2: TI ovoja stavbe + nočno hlajenje		
Zunanji ovoj		
Delež okenskih površin – z faktor	0,35	
Koeficient specifičnih transmissijskih izgub*	$H'_T = 0,402 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$	
Okna	Pritličje	1 – 17 nad.
	$U_W = 1,06 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$ g- faktor = 0,65 $A_W = 3,6 \text{ m}^2$ (skupaj $A = 279,5 \text{ m}^2$)	$U_W = 0,895 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$ g- faktor = 0,68 $A_W = 2,34 \text{ m}^2$ (skupaj $A = 2224 \text{ m}^2$)
Senčila		
Vrsta senčil	J fasada: zunanje žaluzije S fasada: /	
Kontrola senčil	Vedno popolnoma spuščena, lamele pravokotne na zasteklitev	
Prezračevanje	0,6 h ⁻¹	
Infiltracija zunanjega zraka	0,19 h ⁻¹	
Nočno hlajenje	DA	
Rekuperacija toplote prezračevanega zraka	NE	

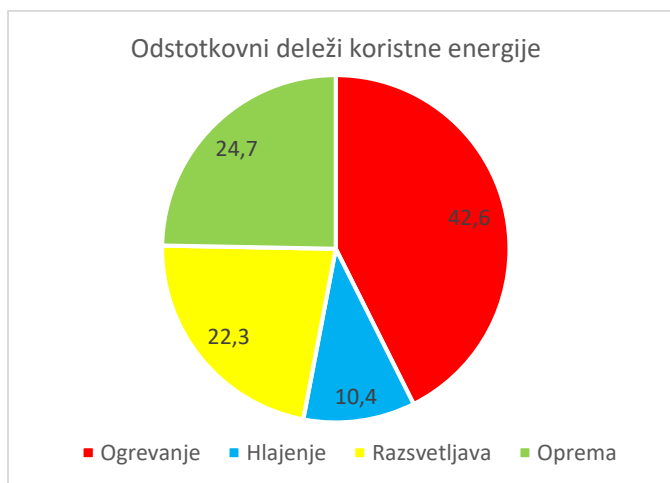
* v izračunu je upoštevan le nadzemni del zunanjega ovoja stavbe brez upoštevanja toplotnih mostov. Po poenostavljeni metodi upoštevanja toplotnih mostov, predpisani v TSG4, se vrednost poveča za 0,06 na 0,462 W/m²K⁻¹.

7.3.2 Rezultati simulacije – Varianta 2

Skupna poraba energije stavbe je 1599 MWh (Preglednica 20), največ energije pa porabi za ogrevanje, in sicer 683 MWh, kar predstavlja 42,6 % celotne energije (Grafikon 11). Razsvetljava predstavlja 22,3% delež, oprema pa 24,7% delež vse porabljene koristne energije v stavbi.

Preglednica 20: Rezultati simulacije – Varianta 2.

Varianta 2:			
Poraba energije:			
Koristna energija:			
	MWh	kWh/m ³	
Ogrevanje:	683,0	15,65	
Hlajenje:	164,1	3,76	
Razsvetljava:	357,3	8,19	
Oprema:	394,6	9,04	
Skupaj:	1599,0	36,64	



Grafikon 11: Odstotkovni deleži porabljene koristne energije za računski model Varianta 2.

Ob primerjavi z rezultati variante brez nočnega hlajenja opazimo prihranek koristne energije za hlajenje v velikosti 40 MWh oz. 20 % zmanjšanje potrebe po hlajenju.

Za delovanje avtomatskega odpiranja oken je potrebna dodatna električna energija. To porabljajo aktuatorji za odpiranje oken, senzorji ter računalnik. Uporaba avtomatskega odpiranja oken je upravičena tedaj, ko poraba električne energije za njegovo delovanje ni prevelika v primerjavi s prihranki električne energije za hlajenje. Poleg tega predstavlja dodaten strošek (poleg samega sistema) tudi vzdrževanje. Če na podlagi podatkov enega izmed proizvajalcev aktuatorjev upoštevamo, da je moč enega aktuatorja 30 W in da za odpiranje okna potrebuje 45 sekund [81]. Predpostavim, da je aktuatorjev na celotni stavbi 300 (okvirno eden za vsak prostor na obodu stavbe) ter da je na leto 120 dni, ko sistem nočnega hlajenja deluje. S takšnimi predpostavkami bi bila letna poraba elektrike za aktuatorje okoli 30 kWh. Glede na privarčevano energijo to znaša manj kot 0,1 % vse privarčevane energije. S tega vidika se uporaba nočnega hlajenja z avtomatskim odpiranjem in zapiranjem oken na obravnavani stavbi splača. Kljub temu pa ostajajo pomisleki, saj pri sistemih z električnim pogonom in premičnimi deli obstaja večja verjetnost okvar in posledično višjih stroškov vzdrževanja.

7.4 Varianta 3: TI ovoja stavbe + nočno hlajenje + optimalna kontrola zunanjih žaluzij

7.4.1 Splošen opis računskega modela – Varianta 3

Kontrola senčil igra pomembno vlogo pri porabi energije in dnevni osvetljenosti stavbe. Do tega trenutka je bila kontrola senčil zastavljena zelo konzervativno. Pri tem računskem modelu pa me zanima, kakšna bi bila poraba energije stavbe, če bi se zunanje žaluzije obnašale tem bolj optimalno z vidika porabe energije. Tako morajo senčila v obdobju ogrevanja omogočiti solarne pritoke, v obdobju hlajenja pa ustrezno zaščito proti vpadu direktnega sončnega sevanja.

Kontrolna logika zunanjih žaluzij je zastavljena tako, da se ta aktivirajo, če sta zagotovljena sledeča pogoja:

- če je zunanja temperatura zraka (T_e) $\geq 12^\circ\text{C}$ in
- če je moč vpadnega sončnega sevanja na okensko površino (G_{sol}) $> 60 \text{ W/m}^2$.

Takšne vrednosti sem določil na podlagi vremenskih podatkov za izbrano lokacijo in iterativnega postopka analiziranja porabe energije za različne vrednosti zunanje temperature in moči sončnega sevanja na zastekljeno površino. V času, ko sta pogoja izpolnjena, je naklon žaluzij takšen, da blokira direktno sončno sevanje.

Preglednica 21: Varianta 3: Pregled pomembnejših lastnosti računskega modela.

Varianta 3: TI ovoja stavbe + nočno hlajenje + optimalna kontrola žaluzij		
Zunanji ovoj		
Delež okenskih površin – z faktor	0,35	
Koeficient specifičnih transmisijskih izgub*	$H'_T = 0,402 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$	
Okna	Pritličje	1 – 17 nad.
	$U = 1,06 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$ $g = 0,65$ $A_w = 3,6 \text{ m}^2$ (skupaj $A = 279,5 \text{ m}^2$)	$U = 0,895 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$ $g = 0,68$ $A_w = 2,34 \text{ m}^2$ (skupaj $A = 2224 \text{ m}^2$)
Senčila		

Vrsta senčil	J fasada: zunanje žaluzije S fasada: /
Kontrola senčil	Vklopljena, če: $T_e \geq 12^\circ\text{C}$ in $G_{sol} > 60 \text{ W/m}^2$, naklon žaluzij se spreminja, tako da blokira direktno sončno sevanje.
Prezračevanje	0,6 h ⁻¹
Infiltracija zunanjega zraka	0,19 h ⁻¹
Nočno hlajenje	DA
Rekuperacija toplote prezračevanega zraka	NE

* v izračunu je upoštevan le nadzemni del zunanjega ovoja stavbe brez upoštevanje toplotnih mostov. Po poenostavljeni metodi upoštevanja toplotnih mostov, predpisani v TSG4, se vrednost poveča za 0,06 na 0,462 W/m²K⁻¹.

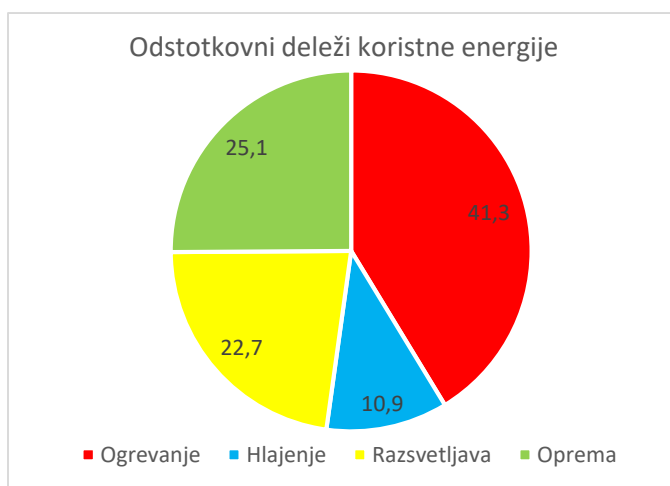
Kot že opisano, dnevna osvetljenost ni opazovani parameter, zanima me le energetske vidik oz. za koliko lahko vplivamo na potrebe po ogrevanju in hlajenju z optimalno kontrolo žaluzij. Tako bodo dobljeni rezultati predstavljaljo mejo, koliko energije lahko privarčujemo, če ne upoštevamo dnevne svetlobe. Za pričakovati je, da bi ob upoštevanju dnevne svetlobe rezultati z vidika potrebe po ogrevanju bili nekoliko slabši.

7.4.2 Rezultati simulacije – Varianta 3

Skupna poraba energije na letni ravni znaša 1572,5 MWh (preglednica 22). Največji del energije se porabi za ogrevanje, in sicer 41,3 % (grafikon 13). Potreba po hlajenju znaša 171,3 MWh (10,9 % celotne energije).

Preglednica 22: : Rezultati simulacije – Varianta 3.

Varianta 3:			
Poraba energije:			
Koristna energija:			
	MWh	kWh/m ³	
Ogrevanje:	649,4	14,88	
Hlajenje:	171,3	3,92	
Razsvetljava:	357,3	8,19	
Oprema:	394,6	9,04	
Skupaj:	1572,5	36,03	



Grafikon 12: Odstotkovni deleži porabljene koristne energije za računski model Varianta 3.

Razsvetljava in elektronska oprema skupaj porabita 47,8 % celotne koristne energije stavbe.

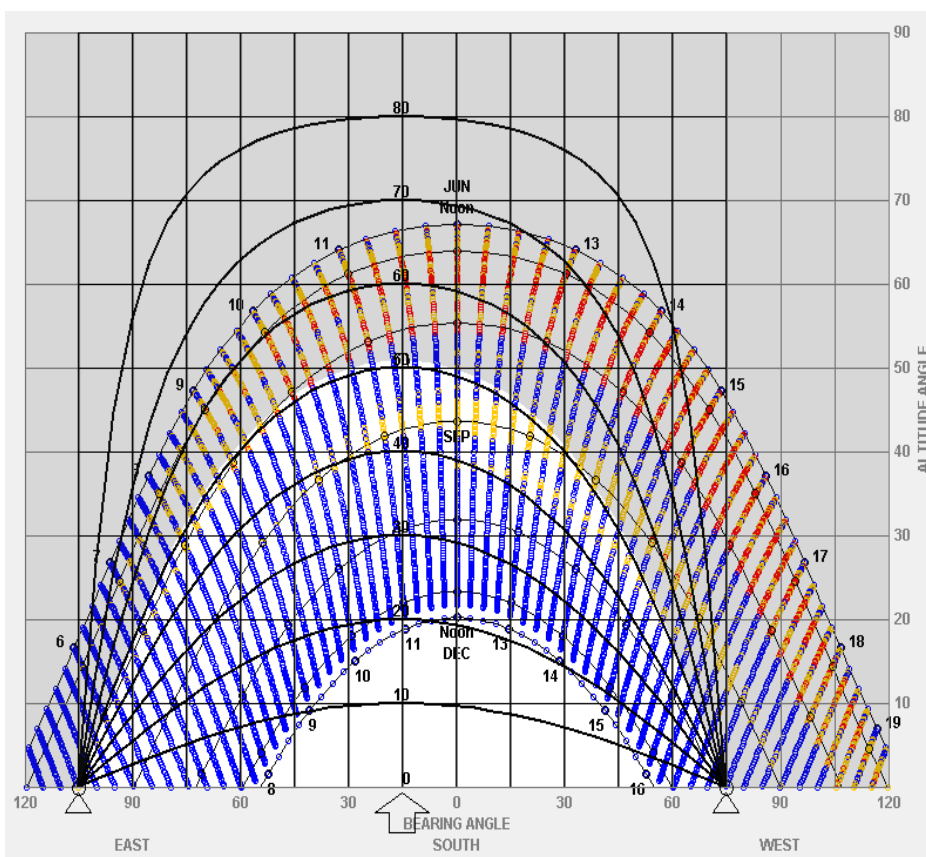
7.5 Varianta 4: ZUNANJA FIKSNA SENČILA

Čprav bi teoretično z avtomatskimi zunanji žaluzijami z ustrezno kontrolno logiko lahko dosegli visoko bivalno ugodje ter bolj optimizirali porabo energije, pa je ta varianta dražja (potrebni senzorji, aktuatorji, kontrolna logika) in zaradi premikajočih delov obstaja večja možnost okvare. Tako me je zanimala energetska bilanca stavbe v primeru, kjer bi bila na zunanji ovoj stavbe nameščena fiksna senčila.

Zunanja fiksna senčila spadajo med ukrepe pasivno solarne arhitekture. Če so ustrezno zasnovana, morajo omogočati solarne toplotne dobitke v obdobjih ogrevanja ter zaščito proti soncu v obdobjih hlajenja. Njihova pomanjkljivost je to, da je njihova pozicija fiksna in lahko zaradi tega onemogočajo nemoten pogled v zunanost. Poleg tega zaradi svoje stacionarnosti ne morejo zagotoviti popolne sončne zaščite v vseh obdobjih leta ter ob vseh urah dneva. Tako je poleg zunanjih senčil, ki v glavnem opravljajo funkcijo zaščite proti pregrevanju, praviloma potrebno še notranje senčilo, s katerim uravnavamo ustrezno dnevno osvetljenost ter omilimo solarne pritoke.

Obstajajo različne izvedbe zunanjih fiksnih senčil, od horizontalnih do vertikalnih lamel (brisojeji), različnih nadstreškov ter drugih variant. Primernost posameznih senčil pa je odvisna od vrste stavbe, orientacije fasade in lokacije stavbe [82].

Na računskem modelu 7. etaže sem primerjal tri različne vrste zunanjih fiksnih senčil, in sicer horizontalne lamele (Slika 43), kombinacijo lamelnega nadstreška in horizontalnih lamel (Slika 44) ter senčilo iz horizontalnih cevi (Slika 45). Njihova zasnova je takšna, da senčijo zasteklitve v toplih časih leta ter omogočajo vpad sončnih žarkov v hladnejših mesecih. Na podlagi podnebnih razmer v Ljubljani, njene zemljepisne širine ter želje po čim bolj neoviranemu pogledu skozi okna sem določil relativno pozicijo senčil glede na okna ter razmerje med pozicijami posameznih elementov izbranega senčila.



Slika 42: Shema senčenja z enostavnim nadstreškom, ki blokira sončne žarke pod naklonom, večjim od 50°.

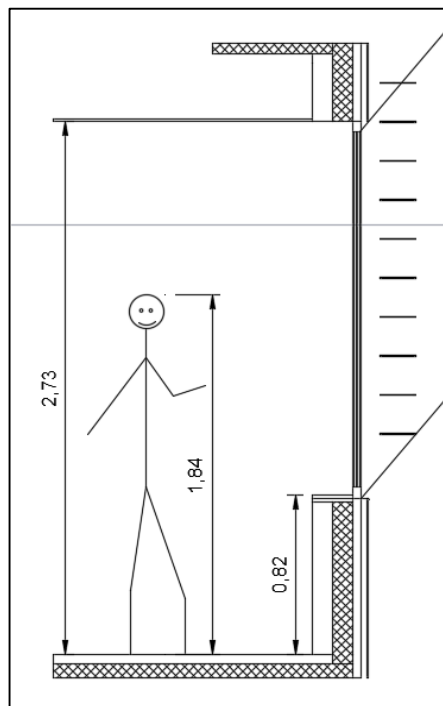
Na podlagi sheme sončne poti za izbrano lokacijo (Slika 42) ter dosedanjih rezultatov simulacij sem določil, da morajo senčila blokirati sončne žarke, ki na vertikalno površino padajo pod naklonom 50° ali več. Tako bi senčila blokirala direktno sončno sevanje v obdobju od sredine marca do sredine septembra, izven tega obdobja pa bi omogočale solarne dobitke (to se ujema z obdobji ogrevanja in hlajenja stavbe).

Implementacija zunanjih fiksnih senčil na stavbo je v realnosti v veliki meri odvisna od statične stabilnosti stavbe (dodatna obtežba na fasado ter potencialno povečanje vetrne obtežbe na fasado stavbe) in mehanske odpornosti elementov senčil na obtežbo vetra in snega. Glede na to, da obravnavam stolpnico, obstaja možnost, da bi obliko zunanjega fiksnega senčila diktirala sposobnost prenašanja vetrne obtežbe.

Horizontalne lamele:

Horizontalne lamele ali brisoleji predstavljajo zelo enostavno obliko fiksnih zunanjih senčil. Na obravnavani stavbi sem jih pozicioniral 10 cm od okna, med sabo pa so oddaljeni 20 centimetrov. Posamezna lamela je široka 18 centimetrov.

Zaradi sorazmerno velikega razmaka med posameznimi lamelami, prekinitev lamel v vidnem polju ni potrebna, saj njihova zasnova uporabniku stavbe omogoča zadovoljiv pogled v zunanost.



Slika 43: Shema delovanja horizontalnih lamel na obravnavani stavbi.

Lamelni nadstrešek + horizontalne lamele v dveh delih:

S to varianto sem želel omogočiti neoviran pogled v zunanost v območju vidnega polja povprečnega uporabnika.

Horizontalne lamele so od okna oddaljene 8 cm. Široke so 10 cm, prav toliko pa je tudi njihov medsebojni razmak. Lamelle v lamelnem nadstrešku so nameščene pod naklonom 45° glede na zastekljeno površino. Med seboj pa so oddaljene 10 cm. Skupaj jih je 6, tako da je previs nadstreška dolg 60 centimetrov (slika 46).

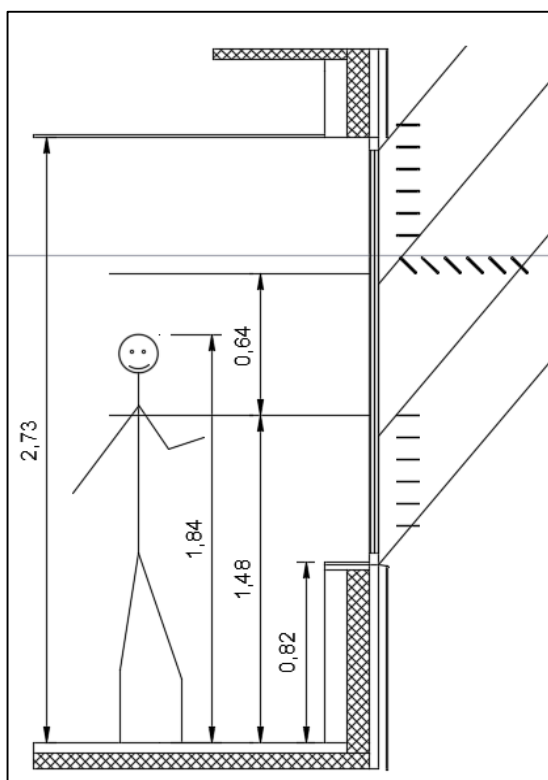
Takšna zasnova senčila je primerna za nižje stavbe, saj je nadstrešek lahko problematičen zaradi vetra. Zaradi tega nadstrešek ni iz enega kosa, ampak iz posameznih lamel.

Horizontalne cevi:

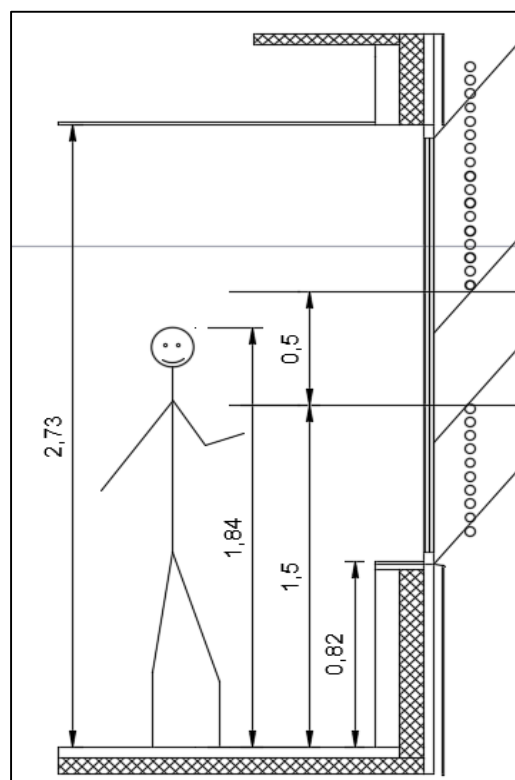
Ta varianta je imitacija fasade poslovne stavbe New York Times iz New Yorka, ZDA (glej poglavje 2.5.3.1. New York Time's Building, New York, ZDA, 2007). Na zunanji fasadi so nameščene keramične horizontalne cevi, ki so v območju vidnega polja prekinjene, s čimer omogočajo neoviran pogled v zunanjo svetlobo.

Na območjih, kjer so cevi prekinjene, je zasteklitev nezaščiten. Tako pri tej varianti pričakujemo nekaj več solarnih dobitkov in posledično več hlajenja.

Horizontalne cevi so od okenske zasteklitve oddaljene 15 cm. Njihov polmer je 2 cm, prav tako 2 cm znaša tudi razdalja med sosednjima cevema.



Slika 44: Shema delovanja lamelnega nastreška s horizontalnimi lamelami v dveh delih.



Slika 45: Shema delovanja senčila s horizontalnimi cevmi.

7.5.1 Primerjava rezultatov simulacij za različna fiksna senčila na modelu 7. etaže

Računski model predstavlja situacijo, kjer je ovoj stavbe toplotno izoliran in se izvaja nočno hlajenje (Varianta 3, vendar brez zunanjih žaluzij). Med seboj sem primerjal 6 različnih modelov, in sicer po dva za vsako vrsto senčil, enega brez notranjega senčila in enega z notranjim senčilom. Primerjava med varianto z in brez senčila je zanimiva zato, ker lahko primerjamo, kako notranji rolo vpliva na solarne dobitke. Notranje senčilo predstavlja rolo, ki je v programu krmiljen tako, da se vklopi, kadar je moč sončnega sevanja na površino okna večja od 100 W/m^2 . Tako poskušam zajeti vpliv notranjih senčil za uravnavanje dnevne osvetljenosti na solarne dobitke skozi okna. Za realno izvedbo bi bilo notranje senčilo potrebno, saj bi drugače lahko imeli probleme zaradi neugodne osvetlitve prostora (npr. bleščanje). Rezultati simulacij so prikazani v preglednici 23.

Preglednica 23: Rezultati simulacij modela 7. nadstropja stavbe z različnimi fiksnimi senčili in kontrolo notranjega roloja.

[kWh/a]	Horizontalne lamele		Lamelni nadstrešek + hor. lamele		Horizontalne cevi	
	brez roloja	z rolojem	brez roloja	z rolojem	brez roloja	z rolojem
Ogrevanje	38683,3	39083,3	38647,2	39122,2	37075,0	37980,6
Hlajenje	8744,4	8716,7	8719,4	8650,0	10344,4	9680,6
Skupaj	47427,8	47800,0	47366,7	47772,2	47419,4	47661,1
Senzibilni toplotni dobitki skozi zasteklitve						
Južna okna	3400,8	2916,9	3399,7	2770,8	7518,9	5709,2
Severna okna	2383,3	2383,3	2382,8	2383,1	2379,7	2380,8

Če primerjamo potrebno koristno energijo za ogrevanje 7. nadstropja opazimo, da je ta pri varianti z roloji nekoliko višja. To je logična posledica delovanja rolojev. Prav tako opazimo, da roloji zmanjšajo potrebno koristno energijo za hlajenje stavbe. Ker rezultati ustrezajo pričakovanjem, lahko sklepam, da program ustrezno upošteva roloje in so rezultati verodostojni. Rezultati horizontalnih lamel in variante z lamelnim nadstreškom so si zelo podobni. Lahko rečemo, da je delovanje praktično enakovredno. Pri horizontalnih cevah pa opazimo, da model v primerjavi z ostalima potrebuje manj energije za ogrevanje in več za hlajenje. To je logično, saj imajo solarni dobitki zaradi prekinitve cevi v vidnem polju zasteklitve večji vpliv. To potrjujejo tudi rezultati senzibilnih toplotnih dobitkov skozi zasteklitve. Ti so pri južni fasadi s horizontalnimi cevmi za več kot dvakrat večji tako pri varianti brez, kot tisti z rolojem. Skupna bilanca potrebne energije za ogrevanje in hlajenje pa nam poda zelo primerljive rezultate. Tako znaša razlika med varianto z rolojem, ki potrebuje največ (horizontalne lamele) in tisto, ki potrebuje najmanj energije (horizontalne cevi) samo 140 kWh (kar je manj kot 0,3 % skupne energije variante horizontalnih lamel z roloji). To je zelo zanimivo, saj sem pričakoval slabše obnašanje variante s horizontalnimi cevmi, saj je zasnova manj ugodna, ker v vidnem polju ne štiti zasteklitve tako učinkovito kot model z lamelnim nadstreškom.

Glede na skupno porabljeno energijo 7. nadstropja bi lahko sklenil, da se v energetskega smislu najbolj obnašajo horizontalne cevi. Ker pa je razlika zelo majhna, sem se odločil da bom za nadaljnje analize na ostalih modelih zbral varianto s horizontalnimi lamelami. Razloga sta dva, in sicer hitrejša in lažje risanje računalniških modelov, saj je elementov manj. Poleg tega v realnosti pričakujem manjše solarne dobitke kot jih izkazuje računski model za horizontalne cevi. Pričakujem, da bi zaradi razporeditve prostorov v obravnavani stavbi (pisarne po obodu tlorisa), roloji bili spuščeni bolj pogosto, saj so preveliki kontrasti med osvetljenimi površinami zaradi narave dela v pisarnah (delo z računalnikom), nezaželeni.

7.5.2. Splošen opis računskega modela stavbe in rezultati analiz – Varianta 4

Glavne značilnosti fiksnih senčil v obliki zunanjih horizontalnih brisolejev so bile že opisane, ostale lastnosti modela pa so prikazane v preglednici 24.

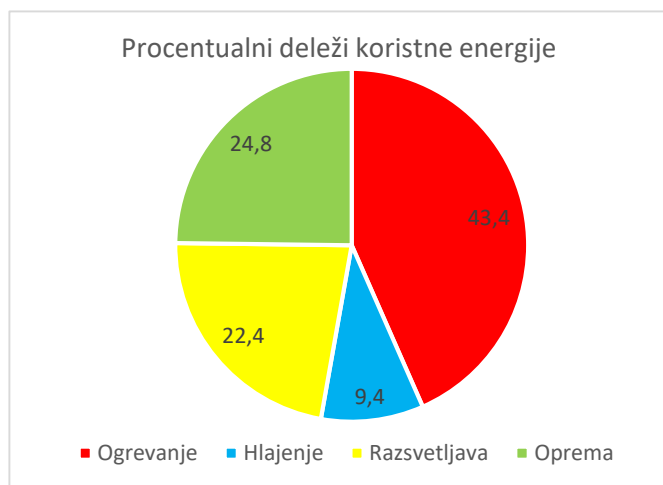
Preglednica 24: : Nekatere lastnosti računskega modela – fiksna senčila

Varianta 4: Zunanja fiksna senčila	
Zunanji ovoj	
Delež okenskih površin – z faktor	0,35
Koeficient specifičnih transmisijskih izgub*	$H'_T = 0,402 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$
Okna	Pritličje
	1 – 17 nad.
	$U = 1,06 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$
	$U = 0,895 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$
	$g = 0,65$
	$g = 0,68$
	$A = 3,6 \text{ m}^2$ (skupaj $A = 279,5 \text{ m}^2$)
	$A = 2,34 \text{ m}^2$ (skupaj $A = 2224 \text{ m}^2$)
Senčila	
Vrsta senčil	J fasada: zunanje horizontalne lamele (brisoleji) + notranji rolo S fasada: /
Kontrola senčil	Zunanji brisoleji so fiksni, notranji rolo: Vklapljen, če $G_{sol} > 60 \text{ W/m}^2$
Prezračevanje	$0,6 \text{ h}^{-1}$
Infiltracija zunanjega zraka	$0,19 \text{ h}^{-1}$
Nočno hlajenje	DA
Rekuperacija toplote prezračevanega zraka	NE

* v izračunu je upoštevan le nadzemni del zunanjega ovoja stavbe brez upoštevanja toplotnih mostov. Po poenostavljeni metodi upoštevanja toplotnih mostov, predpisani v TSG4, se vrednost poveča za 0,06 na $0,462 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$.

Preglednica 25: Rezultati simulacije – Varianta 5.

Varianta 4:			
Poraba energije:			
Koristna energija:			
		MWh	kWh/m ³
	Ogrevanje:	690,3	15,82
	Hlajenje:	149,9	3,43
	Razsvetljava:	357,3	8,19
	Oprema:	394,6	9,04
	Skupaj:	1592,5	36,48



Grafikon 13: Odstotkovni deleži porabljene koristne energije za računski model Varianta 4.

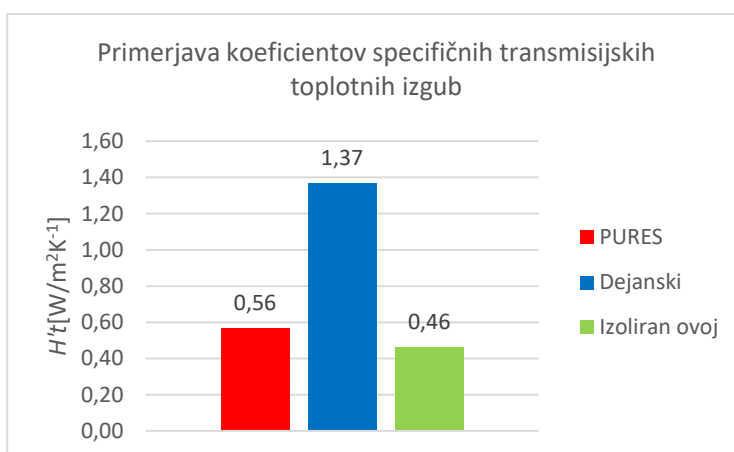
Skupna porabljena energija znaša 1592,5 MWh (Preglednica 25). Za ogrevanje se porabi 690,3 MWh toplotne energije, kar glede na vso energijo znaša 43,4 % (Grafikon 13). Za hlajenje računski model potrebuje 149 MWh hladu (9,4 % vse energije). Razsvetljava predstavlja 22,4 %, oprema pa 24,8 % vse energije.

8 PRIMERJAVA REZULTATOV RAZLIČNIH ZASNOV FASADNEGA OVOJA

V sledečem poglavju bom predstavil primerjavo relevantnih podatkov. Med seboj bom primerjal rezultate simulacij različnih variant računskih modelov. Poleg tega bom te vrednosti, kjer je to mogoče, primerjal z mejnimi vrednostmi PURES-a. Na koncu primerjam še simulirane rezultate dejanskega stanja stavbe z merjenimi rezultati porabe energije v stavbi.

8.1 Koeficient specifičnih transmisij toplinskih izgub

Po PURES-u predstavlja koeficient specifičnih transmisij toplinskih izgub enega izmed glavnih kriterijev energetske učinkovitosti stavb. Pri računskih modelih imamo dve različni vrednosti omenjenega koeficienta. Eno vrednost sem izračunal za dejansko stanje stavbe (Varianta 0), drugo pa za toplotno izoliran ovoj, ki ustreza zahtevam PURES-a (Varianta 1,2,3,4).

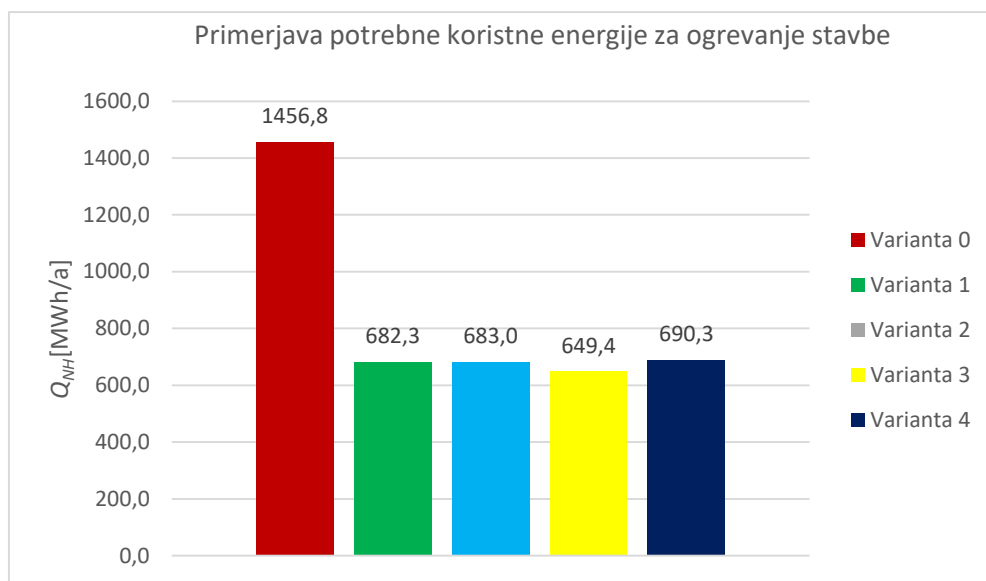


Grafikon 14: Primerjava koeficientov specifičnih transmisij toplinskih izgub.

Koeficient specifičnih transmisij toplinskih izgub, izračunan za dejansko stanje stavbe, je za faktor 2,5 večji od mejne vrednosti po PURES-u (grafikon 14), medtem ko je pri računskih modelih z zmanjšano toplotno prehodnostjo vrednost manjša za slabih 15 % (0,46 W/m²K⁻¹).

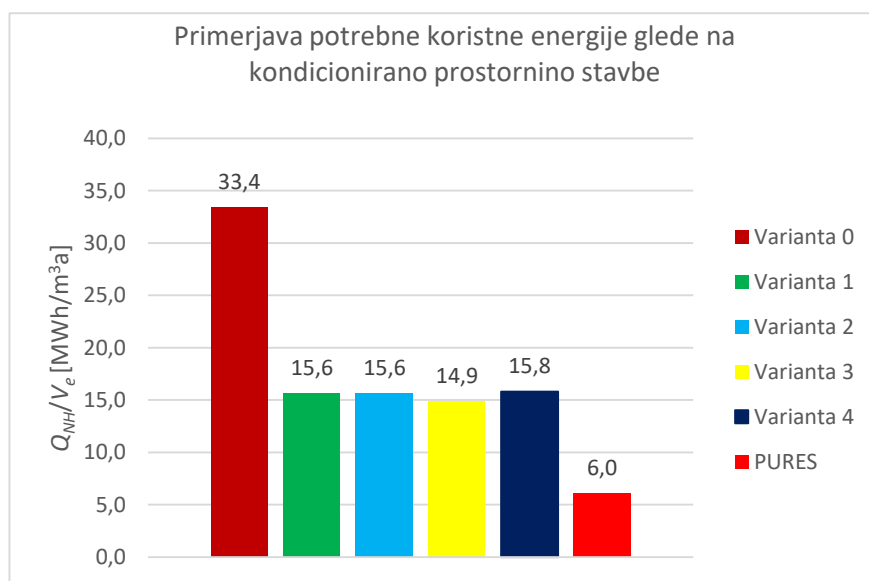
8.2 Potrebna energija za ogrevanje stavbe

Zaradi klimatoloških lastnosti lokacije stavbe predstavlja ogrevanje glavnino vseh energetskih potreb. PURES predpisuje za nestanovanjske stavbe mejno vrednost potrebne toplote za ogrevanje glede na kondicionirano prostornino stavbe. Na nivoju fasadnega ovoja zmanjšujemo potrebno toploto za ogrevanje v glavnem z zmanjšanjem toplotne prehodnosti ovoja stavbe (manjši H_T), kar ima za posledico manjše transmisijske izgube.



Grafikon 15: Primerjava potrebne koristne energije za ogrevanje stavbe.

Z zmanjšanjem toplotne prehodnosti zunanje ovojnice se je potreba po ogrevanju zmanjšala za 53 % (primerjava Variante 1 z Variantom 0), z 1456,8 MWh na 682,3 MWh (Grafikon 15). Tako vidimo, zakaj je koeficient specifičnih transmisivskih toplotnih izgub pomemben. Transmisivske izgube skozi toplotni ovoj stavbe predstavljajo glavno vseh toplotnih izgub. Variante od 1 do 4 imajo enako izolativno zunanjo ovoj, spreminjajo pa se druge lastnosti (nočno hlajenje, senčila). Najmanj energije za ogrevanje potrebuje Varianta 3, ki v primerjavi z Variantom 1 porabi 5 % manj toplotne energije. To izboljšavo lahko pripišemo optimizaciji delovanja senčil, saj imata računski modela enaka senčila, spreminja se le njihova kontrola. Ta je pri Varianti 3 optimalnejša z vidika porabe energije (naj opomnim, da je pozicija senčil pri Varianti 1 zelo konzervativna). Z nočnim hlajenjem (Varianta 2) na potrebo po ogrevanju ne vplivamo (razlika z varianto 1 minimalna). Nočno hlajenje, ki bi imelo za posledico povečanje potreb po ogrevanju, je zasnovano napačno. Varianta 4, ki predstavlja računski model s fiksnimi senčili in notranjim rolojem, med izboljšanimi variantami izkazuje največjo potrebo po energiji za ogrevanje. Razlika pa je majhna, saj ta v primerjavi z Variantom 1 znaša le 1 % (8 MWh). Potrebno pa je upoštevati, da je sama zasnova računskega modela Variante 4 s fiksnimi senčili boljša kot pri Varianti 1, ker je pozicija senčil na omenjenem modelu nerealna (konstantno spuščena, lamele pravokotno na okna).

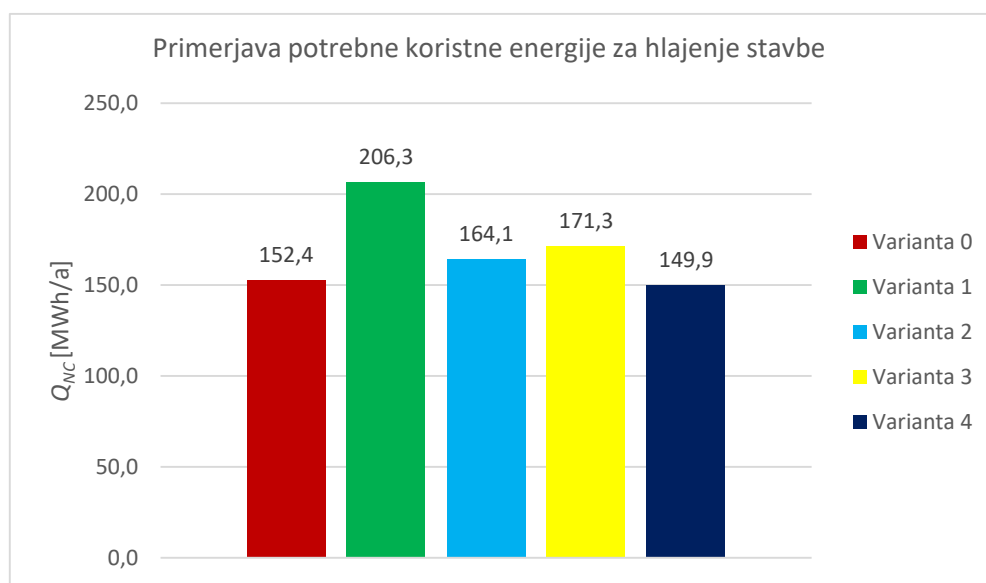


Grafikon 16: Primerjava potrebne koristne energije za ogrevanje glede na kondicionirano prostornino stavbe.

Ko primerjamo potrebno toploto za ogrevanje glede na kondicionirano prostornino stavbe (grafikon 16) opazimo, da je mejna vrednost določena glede na zahteve PURES-a krepko nižja od izračunanih vrednosti za računске modele. Poraba toplote je pri Varianti 3 previsoka za faktor 2,26.

8.3 Potrebna energija za hlajenje stavbe

Poslovne stavbe imajo zaradi velikih notranjih toplotnih dobitkov (ljudi, oprema, razsvetljava) ter velikega deleža zastekljenih površin v poletnih mesecih tendenco k pregrevanju. Na grafikonu 17 so lepo vidni vplivi posameznih ukrepov na nivoju fasadnega ovoja na porabo energije za hlajenje.

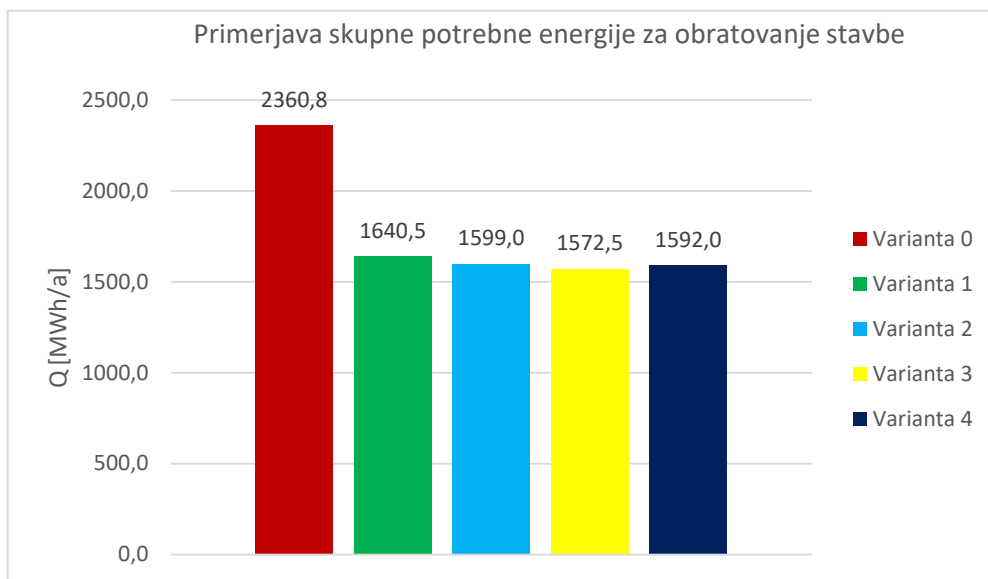


Grafikon 17: Primerjava potrebne koristne energije za hlajenje stavbe.

Opazimo, da zaradi zmanjšanja transmisijskih izgub skozi ovoj stavbe potreba po hlajenju naraste za več kot 50 MWh, kar predstavlja povečanje za dobrih 35 % (primerjava Variante 1 z Varianto 0). Razlog za takšno povečanje je ta, da imajo ob manjši izgubi toplote skozi stavbni ovoj notranji toplotni dobitki ter solarni dobitki večji vpliv na notranjo temperaturo, saj se stavba ponoči ne uspe toliko ohladiti, kot se je lahko pri slabše izoliranem toplotnem oboju. Poleg tega so manjše tudi toplotne izgube zaradi infiltracije, saj se zaradi večje zrakotesnosti te zmanjšajo. Pri Varianti 2 pride do izraza nočno hlajenje, saj z njim zmanjšamo potrebo pa hladu za dobrih 20 %, tj. na 164 MWh. Optimalna kontrola zunanjih žaluzij z vidika porabe energije ima za posledico malenkostno povečanje potrebnega hladu (za 4 %). Razlog je v konzervativni poziciji zunanjih žaluzij pri prejšnjih variantah, saj so žaluzije spuščene med celotno simulacijo in tako prepuščajo manj sončnega sevanja. Računski model s fiksnimi senčili in notranjim rolojem (tudi z nočnim hlajenjem!) pa se z vidika potrebne energije za hlajenje stavbe obnaša najbolje, potreba po hlajenju znaša 149,9 MWh. V primerjavi z Varianto 2 se zmanjša za dobrih 8 % (14 MWh), z Varianto 3 pa za 12,5 % (21 MWh), z izhodiščno varianto pa za 2 % (2,5 MWh).

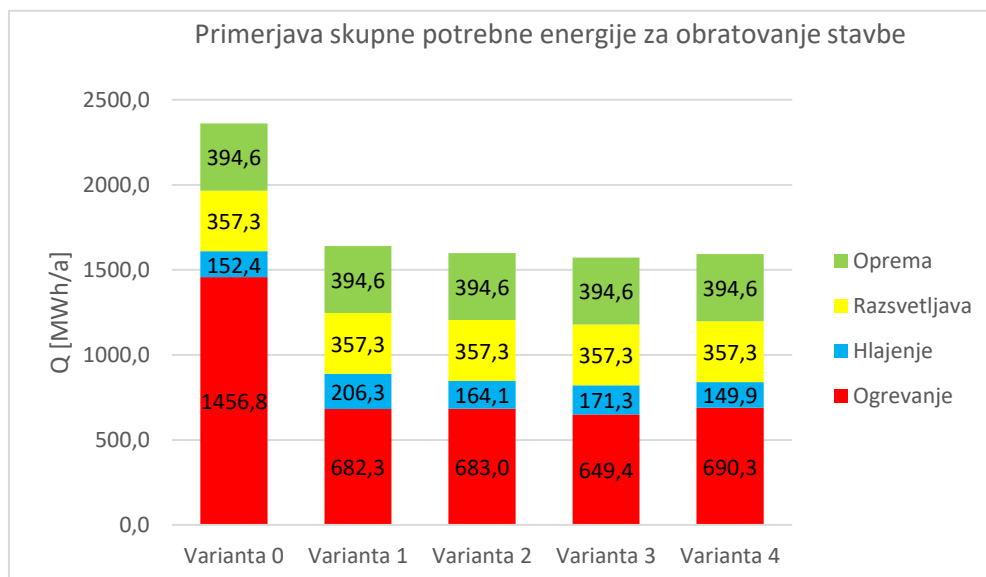
8.4 Skupna potrebna energija za obratovanje stavbe

Skupna potrebna energija za obratovanje stavbe zajema potrebno toploto za ogrevanje, hlad za hlajenje in električno energijo za razsvetljava in delovanje opreme. Toplota in hlad sta tekom simulacije izračunana v odvisnosti od stanja sistema in se spreminjata skozi vse leto, medtem ko sta razsvetljava in oprema vezani na urnike obratovanja stavbe ter vrsto, velikost in zasedenost prostora. Porabljena elektrika za razsvetljava in opremo je enaka pri vseh računskih modelih in znaša 751,9 MWh/a.

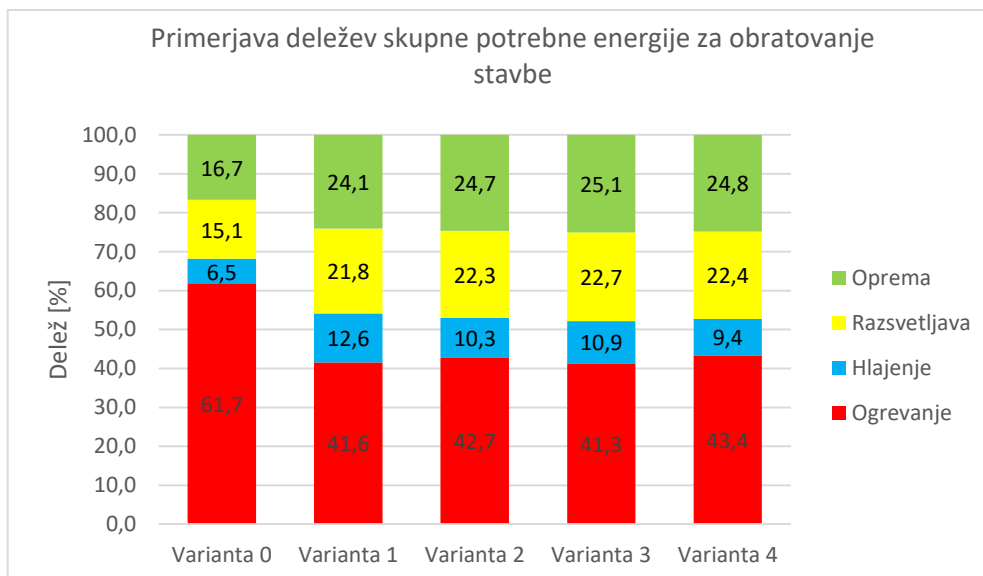


Grafikon 18: Primerjava skupne potrebne energije za obratovanje stavbe.

Ko k energetski bilanci stavbe prištejemo še potrebno energijo za razsvetljavo in opremo, relativne razlike med računskimi modeli z boljše zasnovanim fasadnim ovojem niso več tako velike. Tako je razlika med Varianto 1 in Varianto 3, ki predstavljata najslabšo in najboljšo situacijo, 68 MWh, kar predstavlja samo dobre 4 % skupne energije Variante 3 (Grafikon 18 in 19). Iz tega lahko sklepamo, da je najbolj učinkovit ukrep na nivoju stavbnega ovoja zmanjšanje transmisijskih izgub, torej zmanjšanje vrednosti toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov transparentnega, ter netransparentnega dela stavbnega ovoja. Če primerjamo Varianto 2 (ki je najbližje vrednosti aritmetične sredine variante 1 in 3) z Varianto 0, se skupna poraba energije zmanjša za 761,8 MWh, kar je za skoraj tretjino skupne energije računskega modela dejanskega stanja. To vsekakor predstavlja znatno zmanjšanje potrebne energije za obratovanje stavbe.



Grafikon 19: Primerjava skupne potrebne energije za obratovanje stavbe – razčlenitev na področja.



Grafikon 20: Primerjava odstotkovnih deležev skupne potrebne energije različnih računskih modelov.

Na grafikonu 22 se dobro vidi, kako se zmanjša delež potrebne energije za ogrevanje glede na skupno potrebno energijo. Pri Varianti 1 ta znaša preko 60 %, medtem ko se pri ostalih variantah ta delež zniža na dobrih 40 %. Poveča se tudi delež hladu, ki pri Varianti 0 znaša le 6 % celotne potrebne energije, pri ostalih pa med 9,4 in 12,6 %. Delež porabljene elektrike za razsvetljavo in elektronsko opremo se poveča z dobrih 30 % pri Varianti 0 na dobrih 45 % pri ostalih variantah.

8.5 Primerjava simulirane in merjene vrednosti porabe energije za obravnavano stavbo

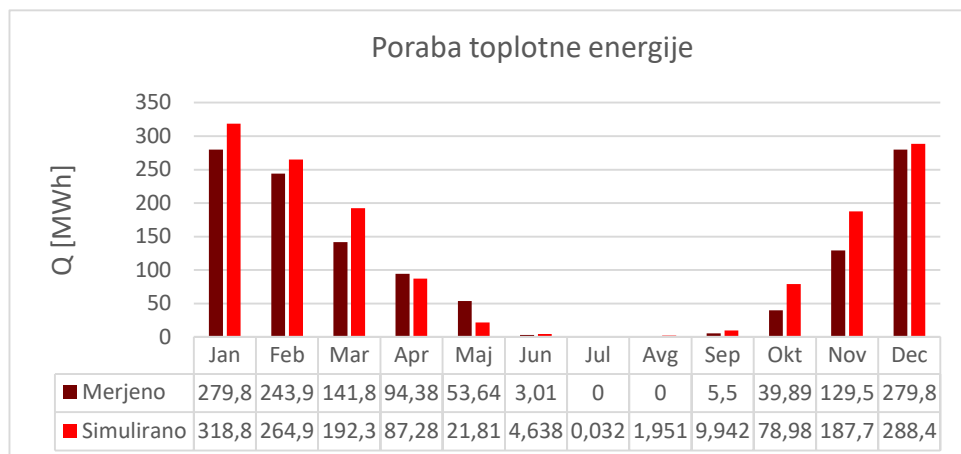
Opozoril bi na razliko med merjenimi in simuliranimi vrednostmi porabe energije dejanskega stanja stavbe. Prvi predstavljajo dovedeno energijo stavbe, ki je potrebna za obratovanje stavbe in upošteva energijo, potrebno za delovanje tehničnih sistemov v stavbi, drugi pa koristno energijo, ki jo tehnični sistemi morajo proizvesti. Skupna koristna energija stavbe je zaradi tega praviloma manjša od dovedene energije za obratovanje stavbe. Način za računanje dovedene energije podaja TSG4 in zahteva podrobno poznavanje tehničnih sistemov v stavbi.

V preglednici 26 je prikazana letna poraba električne in toplotne energije za primer merjenega stanja in simuliran model. Kot vidimo, so med vrednostmi precejšnja razhajanja. Pri toplotni energiji je simulirana večja za 185,81 MWh oz. 13 % v primerjavi z merjeno. Pri porabi elektrike pa je situacija obratna, merjena poraba je večja za kar 771,92 MWh oz. je simulirana v primerjavi z merjeno manjša za kar 46 %.

Preglednica 26: Primerjava med merjeno in simulirano porabo energije.

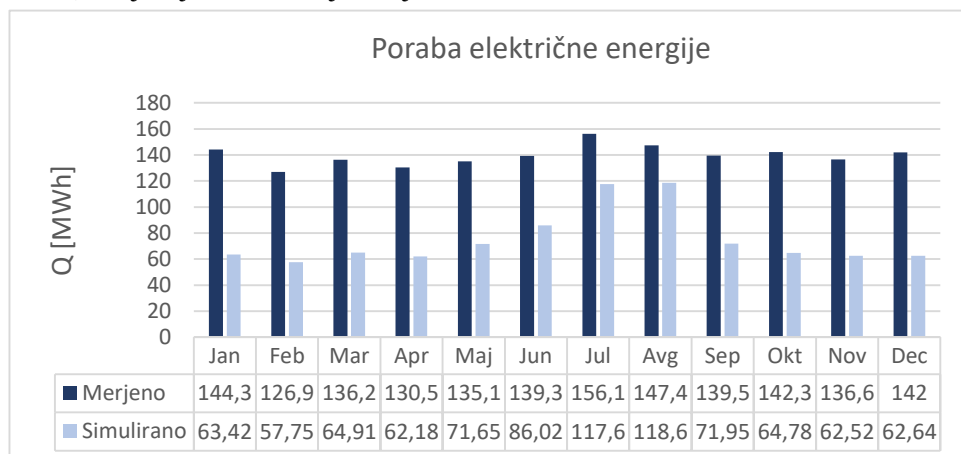
[MWh]	Toplota	Elektrika	Skupaj
Merjena	1271,10	1676,17	2946,27
Simulirana	1456,81	904,25	2361,06

Na grafikonih 21 in 22 je predstavljena mesečna poraba energije za računski model in realno stavbo.



Grafikon 21: Primerjava izmerjene in simulirane mesečne porabe toplotne energije.

V vseh mesecih, razen v maju in septembru, je simulirana poraba toplotne energije večja kot merjena (Grafikon 21). Največje razlike so januarja, marca, oktobra in novembra.



Grafikon 22: Primerjava izmerjene in simulirane mesečne porabe električne energije.

Najmanjša razlika v porabi električne energije je v mesecu avgustu in juliju, ko je poraba simuliranega modela manjša za 20 % in 25 % (Grafikon 22). V ostalih mesecih je poraba simuliranega modela precej manjša, največja razlika je meseca januarja, ko računalniški model izkazuje za 56 % manjšo porabo. Na simuliranih rezultatih je vpliv hlajenj v toplejših mesecih leta bolj izrazit kot pri merjenih rezultatih. Po vsej verjetnosti je razlog v tem, da je izkoristek klimatskih naprav za hlajenje takšen, da je razmerje med proizvedeno energijo za hlajenje in porabljeno električno energijo večji od 1 (glede na TSG4 mora biti gleda na vrsto generatorja hladu izkoristek minimalno 2,5). To pomeni, da je koristna energija večja od dovedene energije za hlajenje stavbe.

Kot že večkrat povedano v poglavju 6.0 Metoda dela, je bilo za oblikovanje računskega modela in definiranje vhodnih podatkov potrebnih kar nekaj poenostavitev in predpostavk, ki imajo za posledico razhajanje med računsko in realno situacijo. Zaradi tega ujemanja med merjenimi in simuliranimi vrednostmi niti nisem pričakoval. Vseeno pa je primerjava pokazala izrazita razhajanja. Model stavbe glede na realno situacijo izkazuje preveliko potrebo po ogrevanju in premajhno porabo električne energije. Glavni razlog za takšna razhajanja med rezultati je odločitev, da sem vhodne podatke za notranje vire ljudi, razsvetljave in elektronske opreme upošteval na podlagi standarda ASHRAE 189.1-2009. Tako sem očitno podcenil vrednost notranjih toplotnih dobitkov zaradi ljudi in porabo elektrike za razsvetljavo in elektronsko opremo v stavbi. Nezanemarljiv vpliv na razhajanja med rezultati ima po vsej verjetnosti tudi uporaba .epw klimatske datoteke, ki vsebuje podatke za lokacijo, oddaljeno 17 kilometrov. Manjši vpliv na razliko v porabi električne energije ima tudi neupoštevanje elektrike, potrebne za pripravo tople vode v računskih modelih. Če bi želel v največji meri zagotoviti skladnost med merjenimi in simuliranimi rezultati, bi bilo potrebno prilagoditi vhodne podatke v računskih

modelih (predvsem podatke v povezavi z notranjimi viri toplote). Računski model se ocenjuje za dovolj dobro kalibriran, če rezultati med merjeno in simulirano porabo energije odstopajo v rangi 10–20 % [3].

Ali to pomeni, da so rezultati analize različnih ukrepov na nivoju fasadnega ovoja in z njimi povezane ugotovitve napačni? Vsekakor ne. Ukrepi so še vedno relevantni. Pričakujem, da bi ob implementaciji enakih ukrepov na nivoju fasadnega ovoja na kalibriranem računskem modelu prišel do podobnih ugotovitev, saj obstoječi računalniški model vseeno dovolj dobro upošteva podnebne razmere lokacije in energijske tokove v stavbi ter med stavbo in okolico. Za pričakovati je, da bi bili prihranki pri porabi toplotne energije manjši v absolutnem smislu ter da bo zaradi večjih notranjih dobitkov narasla potreba po hlajenju. Vseeno bi ugotovil, da zamenjava stavbnega pohištva in namestitve dodatne toplotne izolacije zelo zmanjša potrebo po ogrevanju in hkrati poveča potrebo po hlajenju stavbe. Nočno hlajenje bi se prav tako izkazalo kot zelo pomemben ukrep, kontrola zunanjih žaluzij in zunanja fiksna žaluzija pa bi imeli enakovreden vpliv na potrebo po hlajenju in ogrevanju stavbe.

V kolikor pa bi želel kalibrirati računski model, bi najprej prilagodil vhodne podatke za porabo elektrike za razsvetljavo in opremo ter ustrezno ovrednotil notranje toplotne dobitke ljudi. Za to pa bi potreboval bolj natančne podatke o omenjenih simulacijskih parametrih. Za to bi bilo potrebno vložiti dodaten trud in čas tako z moje strani, kot s strani lastnikov stavbe. Ker je namen naloge na podlagi analiz ukrepov na nivoju fasadnega ovoja opazovati, kako se spreminja ravnovesje porabe energije pri različnih ukrepih, izbrati najprimernejše ukrepe z vidika energetske učinkovitosti stavbe ter s tem oceniti potencial za prihranke v obstoječi stolpnici, dodatna kalibracija računskih modelov ni potrebna. Kalibracija pa bi bila potrebna, v kolikor bi želeli z veliko mero natančnosti ovrednotiti morebitne prihranke v energijskem in stroškovnem smislu.

9 PREDLOG KONČNE VARIANTE

Na podlagi rezultatov simulacij lahko sedaj izberem najprimernejšo varianto. Poleg rezultatov simulacij je pomemben kriterij tudi funkcionalnost in ekonomičnost.

Glede na končne rezultate simulacij se tako odločam med Varianto 3 in 4. Prva izkazuje nekoliko večje energetske prihranke kot druga. Ker pa je pomemben kriterij visoko učinkovitega fasadnega ovoja tudi trajnostna zasnova, pa odločitev ni trivialna. Za ustrezno delovanje avtomatiziranih zunanjih senčil je potrebna večja investicija (aktuatorji, senzorji, kontrolna logika, centralno nadzorni sistem). Poleg tega imajo premikajoči se deli zunanjih senčil večjo nagnjenost k okvaram (spomnimo se primera slabe prakse iz poglavja 2.5.3), zaradi česar bi bilo na dolgi rok vzdrževanje zunanjih žaluzij precej dražje. Še ena slaba lastnost sistema, ki je vezan na delovanje senzorjev, pa je, da potrebuje dlje časa, da se le ta optimizira. Tako bi lahko trajalo nekaj let, preden bi upravljalci optimizirali kontrolno logiko do te mere, da bi ustrezala tako z energetskega vidika, kot tudi z vidika zadovoljstva uporabnikov (dnevna osvetljenost, moteče prepogosto vklapljanje zunanjih žaluzij) [84]. Zaradi tega bo končen računski model predstavljala varianta 4 s fiksnimi zunanjimi horizontalnimi brisoleji.

Za zagotovitev minimalnih zahtev PURES-a bo potrebno še zmanjšanje ventilacijskih izgub stavbe. Ta ukrep ne spada v področje fasadnega ovoja, ampak v področje učinkovitih tehničnih sistemov za prezračevanje stavbe. Tako je sedaj potrebno preveriti še vpliv rekuperacije zraka na energetske bilanco stavbe.

9.1 Mehansko prezračevanje z rekuperacijo toplote odpadnega zraka

Glede na tehnično smernico TSG4 morajo imeti vse prezračevalne in klimatizacijske naprave, namenjene za normalno obratovanje stavbe, vgrajene prenosnike toplote za vračanje toplote zavrženega ali odtočnega zraka s temperaturnim izkoristkom nad 65 %. Pri nizkoenergijskih stavbah pa mora ta izkoristek znašati najmanj 75 % [42].

Z računskim modelom stavbe predvidevam, da bo prezračevanje preko rekuperatorjev toplote odpadnega zraka potekalo od 1. nadstropja naprej. To je zaradi poenostavitve računskega modela stavbe in ker je večina prostorov v kleti nebivalnih, tam pa je dovoljena nižja temperatura notranjega zraka.

Upoštevanje rekuperacije zraka s programom EP ni trivialna. Kot opisano v poglavju 6.2.9.4 Prezračevanje z rekuperacijo toplote odpadnega zraka, je za enostavno upoštevanje sistema rekuperacije zraka potrebno zmanjšati pretok prezračevanega zraka v obdobju ogrevanja

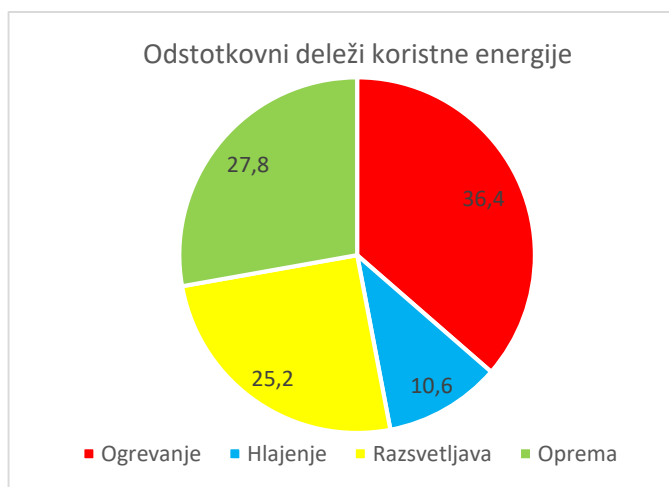
9.1.1 Rekuperacija zraka s 65% učinkovitostjo

Kot izhodišče me je zanimalo, kakšen je doprinos rekuperacije z minimalnim predpisanim izkoristkom vračanja toplote po PURES-u. Ta znaša 65 %, to pomeni, da se izgubi le 35 % toplote zaradi ventilacije zraka.

Kot obdobje, kjer se je zmanjšanje ventilacijskih izgub za 65 % izkazalo kot najbolj učinkovito, kar pomeni, da se potreba po hlajenju ni povečala, je obdobje od 15.10. do 15. 3., kar je okvirna kurilna sezona v Ljubljani.

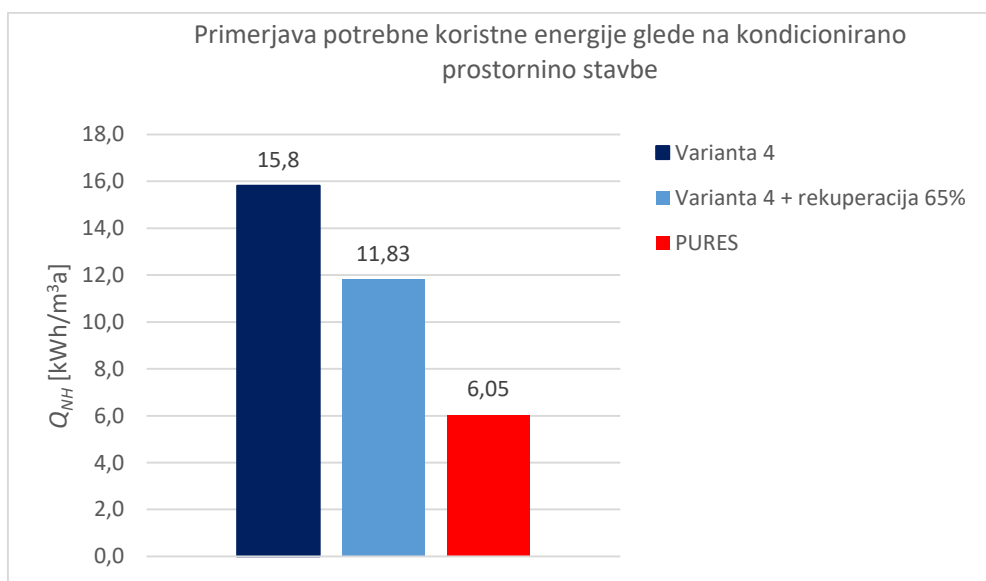
Preglednica 27: Rezultati simulacije – Varianta 4 + rekuperacija 65%.

Varianta 4 + rekuperacija 65%:			
Poraba energije:			
Koristna energija:			
		MWh	kWh/m ³
	Ogrevanje:	516,5	11,83
	Hlajenje:	150,9	3,46
	Razsvetljava:	357,3	8,19
	Oprema:	394,6	9,04
	Skupaj:	1419,3	32,52



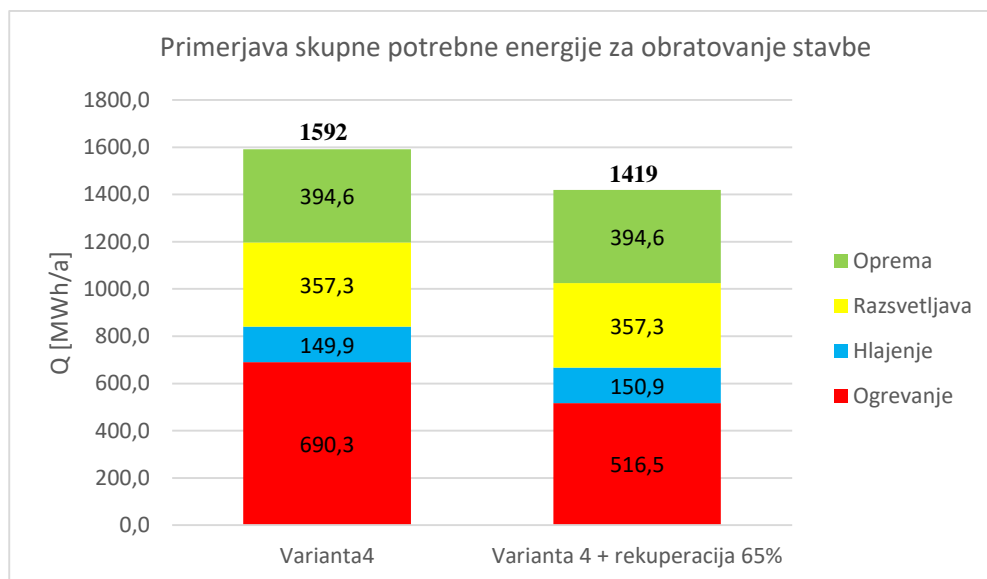
Grafikon 23: Odstotkovni deleži porabljene koristne energije za računski model variante 4 s 65% učinkovitostjo rekuperacije zraka.

Skupna poraba energija je 1419 MWh (Preglednica 27). Največ energije se porabi za ogrevanje, in sicer 36,4 % (516,5 MWh), najmanj pa za hlajenje, tj. 10,6 % (150,9 MWh) vse potrebne energije. Delež za razsvetljava znaša 25,2 %, za opremo pa 27,8 % vse energije (Grafikon 23).



Grafikon 24: Primerjava potrebne toplote glede na kondicionirano prostornino stavbe.

Kot opazimo na grafikonu 24, rekuperacija zraka povzroči 25% zmanjšanje potrebe po ogrevanju. To še vseeno ni dovolj za zadostitev zahtev za energetske učinkovite stavbe po PURES-u. Potreba stavbe po toploti še vedno za 49 % presega maksimalno dovoljeno po PURES-u.



Grafikon 25: Primerjava skupne potrebne energije Variante 4 brez in z rekuperacijo (65% učinkovitost.)

Skupna potrebna toplota se z rekuperacijo zmanjša za 173 MWh, medtem ko potreba po hlajenju za malenkost naraste (1 MWh). Tako znaša skupen prihranek energije slabih 11 %.

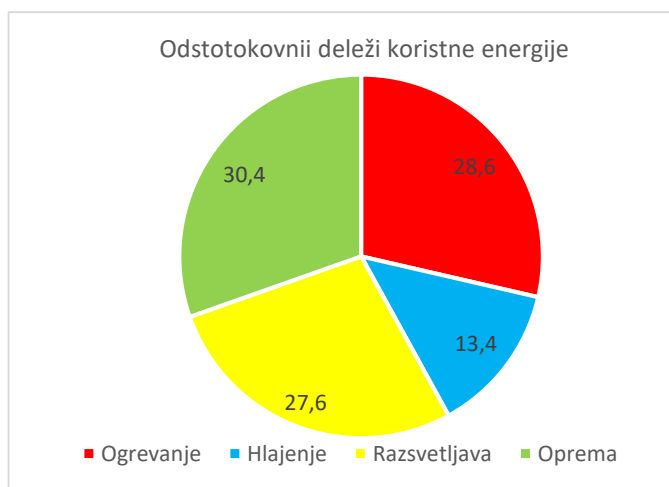
9.1.2 Rekuperacija zraka s 100% učinkovitostjo

Ker je potreba po toploti še vedno skoraj dvakrat prevelika glede na PURES, sem se odločil povečati učinkovitost rekuperacijskega sistema. Upošteval sem sistem s 100% učinkovitostjo izmenjave toplote med izstopnim in vstopnim zrakom. To je le teoretično stanje, saj so običajne vrednosti rekuperacijskih sistemov izmenjave toplote prezračevanega zraka okrog 90 %.

Računsko obdobje, pri katerem upoštevam rekuperacijo zraka, je enako kot pri situaciji z varianto s 65% učinkovitim sistemom. Tako pričakujem, da se bo potreba po hlajenju še nekoliko povečala, vendar temu ne prepisujem preveč pozornosti, saj me zanima predvsem potrebna toplota za ogrevanje stavbe.

Preglednica 28: Rezultati simulacije – Varianta 4 + rekuperacija 100%.

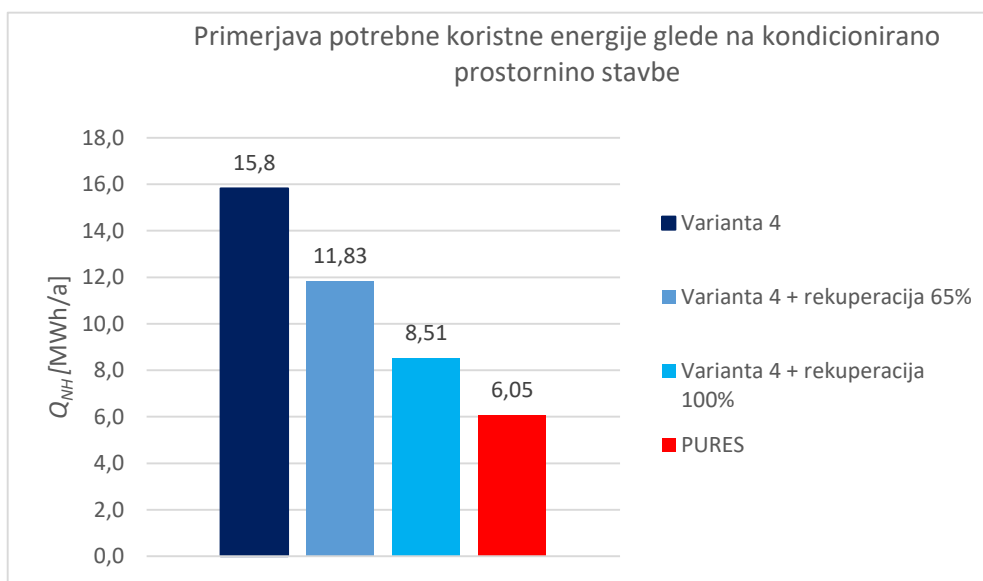
Varianta 4 + rekuperacija 100%:			
Poraba energije:			
Koristna energija:			
		MWh	kWh/m ³
	Ogrevanje:	371,2	8,51
	Hlajenje:	173,4	3,97
	Razsvetljava:	357,3	8,19
	Oprema:	394,6	9,04
Skupaj:		1296,5	29,71



Grafikon 26: Odstotkovni deleži porabljene koristne energije za računski model variante 4 s 100% učinkovitostjo rekuperacije zraka.

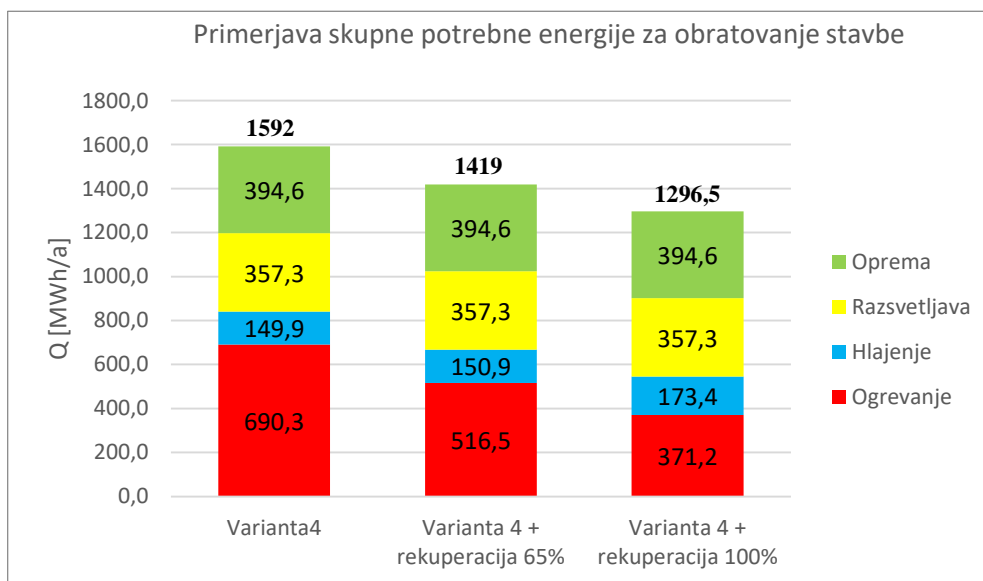
Odstotkovni deleži koristne energije za obratovanje stavbe s takšnim modelom dosežejo točko, kjer energija za ogrevanje stavbe ne predstavlja več največjega deleža potrebne energije. Večji delež predstavlja potreba elektrike za delovanje opreme (30,4 % vse energije), medtem ko predstavlja energija za delovanje razsvetljave za eno odstotkovno točko manjši delež kot za ogrevanje (Grafikon 26).

Trenutno nas najbolj zanima primerjava potrebne toplote s prejšnjo varianto in maksimalno dovoljeno vrednostjo po PURES-u. Kot opazimo (Grafikon 27), se s povečanjem učinkovitosti rekuperacije na 100 % doseže znatna izboljšava v primerjavi z modelom s 65% učinkovitostjo vračanja toplote. Potrebna toplota za delovanje stavbe se zmanjša za 28 %. V primerjavi z izhodiščno Varianto 4, ki je brez rekuperacije zraka, pa se potreba po toploti zmanjša za 46 %. Lahko pa ugotovimo, da čeprav upoštevamo 100% učinkovitost rekuperacijskega sistema, ne dosežemo vrednosti, predpisane po PURES-u. Stavba tako še vedno porabi za slabih 29 % preveč toplotne energije!



Grafikon 27: Primerjava potrebne toplote glede na kondicionirano prostornino stavbe.

Na grafikonu 28 opazimo, da Varianta 4 s 100% učinkovito rabo energije v primerjavi z varianto 4 porabi 18,5 % (295,5 MWh/a) manj skupne energije, v primerjavi z varianto 4 z manj učinkovito rekuperacijo zraka pa 8,6 % (122,5 MWh/a). Potreba po hlajenju se pri 100% učinkoviti rekuperaciji zraka v primerjavi z ostalima poveča za približno 15 %, ker sem pričakoval.



Grafikon 28: Primerjava skupne potrebne energije variante 4 brez in z rekuperacijo (65% in 100% učinkovitost).

9.1.3 Komentar rezultatov modelov z rekuperacijo zraka – ali je PURES primeren za visoke poslovne stavbe?

Kot smo ugotovili, obravnavana stavba ne izpolnjuje pogoja o maksimalni dovoljeni vrednosti glede potrebne energije za ogrevanje, ki jo predpisuje PURES, tudi če upoštevamo 100% učinkovito rekuperacijo. Pravno gledano lahko tako sklenemo, da je stavba glede na slovenske predpise o energetski učinkovitosti stavb energetsko neučinkovita.

V tej fazi lahko opozorim na pomanjkljivost PURES-a, saj ta očitno ni namenjen za podajanje mejnih zahtev za poslovne stolpnice. Poslovne stolpnice imajo praviloma precej manjše oblikovne faktorje kot običajno oblikovane družinske hiše. Ker je enačba za izračun maksimalno dovoljene potrebe za ogrevanje odvisna od oblikovnega faktorja, ta igra pomembno vlogo. Oblikovni faktor klasičnih družinskih hiš običajno zavzema vrednost v območju med 1 in $1,6 \text{ m}^{-1}$. Pri večstanovanjskih stavbah bo ta vrednost že manjša [77]. Večje stavbe, kot so stolpnice z večjim številom etaž, pa praviloma dosegajo vrednosti pod $0,3 \text{ m}^{-1}$. Glede na naravo enačbe (enačba 2) to pomeni strožjo omejitev glede maksimalne dovoljene porabe toplotne energije.

Še ena slabost PURES-a je v omejitvi potrebnega hlada. Ta je pri stanovanjskih stavbah zastavljen kot fiksna vrednost $50 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, pri nestanovanjskih stavbah pa omejitve sploh ni. Če bi tako hotel zadostiti le kriterijem PURES-a, ukrepov za zmanjševanje potrebnega hlada na stavbo niti ni potrebno implementirati. Poslovne stavbe zaradi velikih notranjih toplotnih dobitkov in nagnjenosti k zasnovi z velikimi steklenimi površinam praviloma namenijo precejšen delež skupne porabe energije hlajenju tudi na lokacijah, kjer prevladuje potreba po ogrevanju. Brez ukrepov za zmanjšanje potrebnega hlada (nočno hlajenje in senčila) bi bila poraba energije za hlajenje v obravnavani poslovni stolpnici večja za več kot 50 MWh (glej grafikon 17)!

PURES velja za vse nove stavbe in rekonstrukcije, pri katerih se posega v več kot 25 % površine toplotnega ovoja. Ker oblika stavbe pomembno vpliva na energijske karakteristike, pri rekonstrukcijah stavb pa praviloma v samo obliko ne posegamo, bi bilo smiselno za obnove stavb podati manj stroge zahteve.

Če se ozremo čez mejo v Avstrijo in si ogledamo, kakšne zahteve ima njihov »PURES« oz. tehnična smernica [85] glede potrebne energije za ogrevanje in hlajenje v stavbah lahko ugotovimo naslednje:

- enačbe za določitev maksimalne potrebne toplote in hlada se razlikujejo glede na stanovanjske in nestanovanjske stavbe (enako kot pri PURES-u),
- zahteve za novogradnje so bolj stroge kot za rekonstrukcije,
- pri nestanovanjskih stavbah je podana omejitev tudi glede potrebnega hlada.

Če si ogledamo enačbe za nestanovanjske stavbe*:

— novogradnje – potrebna toplota za ogrevanje:

$$\frac{Q_{NH}}{V_e} \leq 5,5 \left(1 + \frac{3,0}{l_c} \right) \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right] \text{ oz. največ } \frac{Q_{NH}}{V_e} \leq 18,7 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right] \quad (7)$$

— novogradnje – potreba po hladu:

$$\frac{Q_{NC}}{V_e} \leq 1,0 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right] \quad (8)$$

— rekonstrukcije – potrebna toplota za ogrevanje:

$$\frac{Q_{NH}}{V_e} \leq 8,5 \left(1 + \frac{2,5}{l_c} \right) \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right] \text{ oz. največ } \frac{Q_{NH}}{V_e} \leq 30,00 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right] \quad (9)$$

* podrobnejše zahteve za maksimalno dovoljene vrednosti in opis enačb so predstavljene v [80], tukaj povzemam samo enačbe.

— rekonstrukcije – potreba po hladu:

$$\frac{Q_{NC}}{V_e} \leq 2,0 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right] \quad (10)$$

Pri tem l_c predstavlja karakteristično dolžino, ki je enaka recipročni vrednosti faktorja oblike. Poudaril bi, da so mejne vrednosti porabe energije določene na ravni vsake članice EU posebej, z upoštevanjem klimatskih razmer in drugih dejavnikov, ki vplivajo na porabo energije. Kot smo opazili, to lahko privede do različnih enačb in zahtev že pri sosednjih državah.

Preglednica 29: Primerjava rezultatov za varianto 4+65% rekuperacija z mejnimi vrednostmi po avstrijski in slovenski smernici.

[kWh/m ³]	Varianta 4 + 65% rekuperacija	OIB – novogradnje	OIB – rekonstrukcije	PURES
Q_{NH}/V_e	11,83	9,69	13,89	6,05
Q_{NC}/V_e	3,46	1	2	/

Kot opazimo, so mejne vrednosti porabe toplote v stavbah po avstrijski smernici višje od slovenskih zahtev za nestanovanjske stavbe (6,05 kWh/m³) tako pri rekonstrukcijah kot pri novogradnjah. Tukaj pride do izraza ločena zahteva za novogradnje in rekonstrukcije. Glede na prvo obravnavano stolpnico presega maksimalno vrednost potrebne toplote, po drugi (rekonstrukcije) pa je ne presega in je tako ustrezna. Potreben hlad za obravnavano stolpnico pa presega mejni vrednosti po avstrijski smernici. Tukaj moram poudariti, da primerjanje stavbe v Sloveniji z mejnimi vrednostmi v Avstriji ni povsem korektno, saj vsaka država določi enačbe za mejne vrednosti glede na njene klimatske zahteve in druge značilnosti, kot so npr. tipološke značilnosti stavbnega fonda. Tako je to primerjavo potrebno jemati z določeno rezervo.

9.2 Končna varianta

Kot končno varianto bom izbral računski model variante 4 z rekuperacijskim sistemom prezračevanja s 65% učinkovitostjo. V kolikor bi se v stavbi namestil sistem za vračanje toplote odpadnega prezračevanega zraka, bi ta bil bolj učinkovit oz. bi to vsaj obljubljal njegov proizvajalec. Ker spadajo rekuperatorji med tehnične sisteme, ki niso bili tematika predstavljene naloge, se bom držal enakega načela kot do zdaj in bom v računskem modelu uporabil varianto, ki ima najmanjši potencial toplotnih prihrankov. Tako lahko predpostavim, da bodo učinki sistema boljši, v kolikor se ta na stavbi dejansko uporabi.

9.2.1 Splošen opis računskega modela

Vse značilnosti računskega modela so bile že opisane (poglavje 9.1.1), zato bodo na tem mestu – v preglednici 30 – strnjene njegove glavne značilnosti, podobno kot pri ostalih variantah. Ker so bili rezultati tudi že prikazani in opisani, tukaj ne bodo predstavljeni še enkrat.

Preglednica 30: Končna varianta – Nekatere lastnosti računskega modela.

Končna varianta	
Zunanji ovoj	
Delež okenskih površin – z faktor	0,35
Koeficient specifičnih transmisijskih izgub*	$H'_T = 0,402 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$
Okna	Pritličje
	1 – 17 nad.
	$U_w = 1,06 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$
	$U_w = 0,895 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$
	g- faktor = 0,65
	g- faktor = 0,68
	$A_w = 3,6 \text{ m}^2$ (skupaj $A = 279,5 \text{ m}^2$)
	$A_w = 2,34 \text{ m}^2$ (skupaj $A = 2224 \text{ m}^2$)
Senčila	
Vrsta senčil	J fasada: zunanje horizontalne lamele (brisoletji) + notranji rolo S fasada: /
Kontrola senčil	Zunanji brisoletji so fiksni, notranji rolo: Vklapljen, če $G_{sol} > 60 \text{ W/m}^2$
Prezračevanje	$0,51 \text{ h}^{-1}$
Infiltracija zunanjega zraka	$0,19 \text{ h}^{-1}$
Nočno hlajenje	DA
Rekuperacija zraka	DA – 65% učinkovitost

* v izračunu je upoštevan le nadzemni del zunanjega ovoja stavbe brez upoštevanje toplotnih mostov. Po poenostavljeni metodi upoštevanja toplotnih mostov, predpisani v TSG4, se vrednost poveča za 0,06 na $0,462 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$.

10 PRIMERJAVA REZULTATOV IZHODIŠČNE IN KONČNE VARIANTE

V sledečem poglavju bom podrobneje primerjal rezultate računskega modela izhodiščne (varianta 0) in končne variante (varianta 4 + rekuperacija 65%).

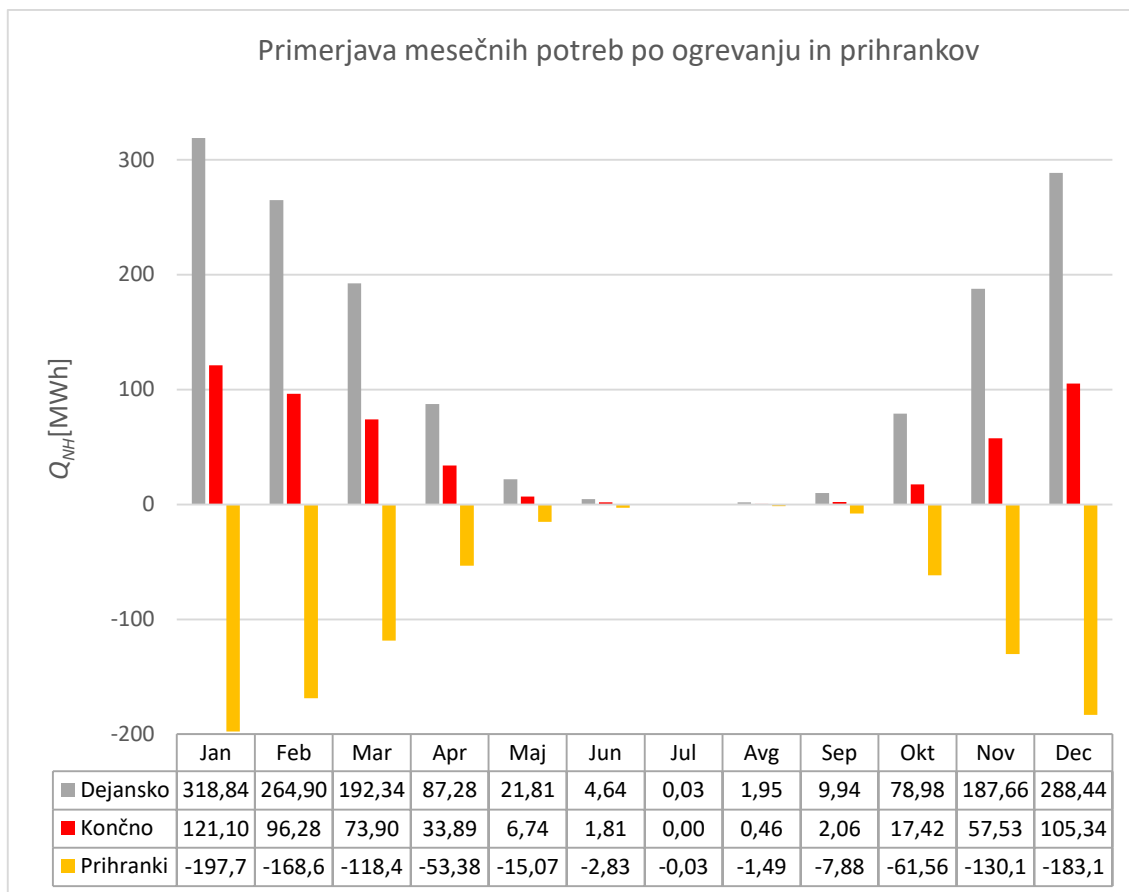
V preglednici 31 so predstavljeni podatki tako o mesečni porabi energije v stavbi za posamezne procese, kot tudi za skupno energijo, potrebno za obratovanje stavbe. Na letni ravni se skupna poraba energije zmanjša za 40 %, kar znaša 941,54 MWh koristne energije.

Preglednica 31: Mesečna in letna poraba energije za posamezne procese ter skupna energija za obratovanje stavbe.

STAVBA	Mesečna in letna poraba energije [MWh]									
	Razsvetljava		Oprema		Ogrevanje		Hlajenje		Celotna energija	
	Dej.	Kon.	Dej.	Kon.	Dej.	Kon.	Dej.	Kon.	Dej.	Kon.
Jan	30,11	30,11	33,32	33,32	318,84	121,10	0,00	0,02	382,25	184,55
Feb	27,47	27,47	30,30	30,30	264,90	96,28	0,00	0,03	322,65	154,08
Mar	31,19	31,19	33,73	33,73	192,34	73,90	0,00	0,03	257,25	138,86
Apr	28,14	28,14	32,14	32,14	87,28	33,89	1,92	3,11	149,45	97,28
Maj	31,19	31,19	33,73	33,73	21,81	6,74	6,74	7,04	93,46	78,71
Jun	29,95	29,95	32,59	32,59	4,64	1,81	23,50	23,09	90,66	87,44
Jul	29,38	29,38	33,29	33,29	0,03	0,00	54,98	49,97	117,66	112,64
Avg	31,19	31,19	33,73	33,73	1,95	0,46	53,67	46,74	120,54	112,13
Sep	29,22	29,22	32,55	32,55	9,94	2,06	10,19	15,28	81,89	79,12
Okt	30,11	30,11	33,32	33,32	78,98	17,42	1,36	5,18	143,76	86,04
Nov	29,95	29,95	32,59	32,59	187,66	57,53	0,00	0,33	250,19	120,4
Dec	29,38	29,38	33,29	33,29	288,44	105,34	0,00	0,04	351,09	168,04
Leto	357,30	357,30	394,59	394,59	1456,81	516,53	152,36	150,87	2360,83	1419,29

10.1 Potreba po ogrevanju računskih modelov stavbe

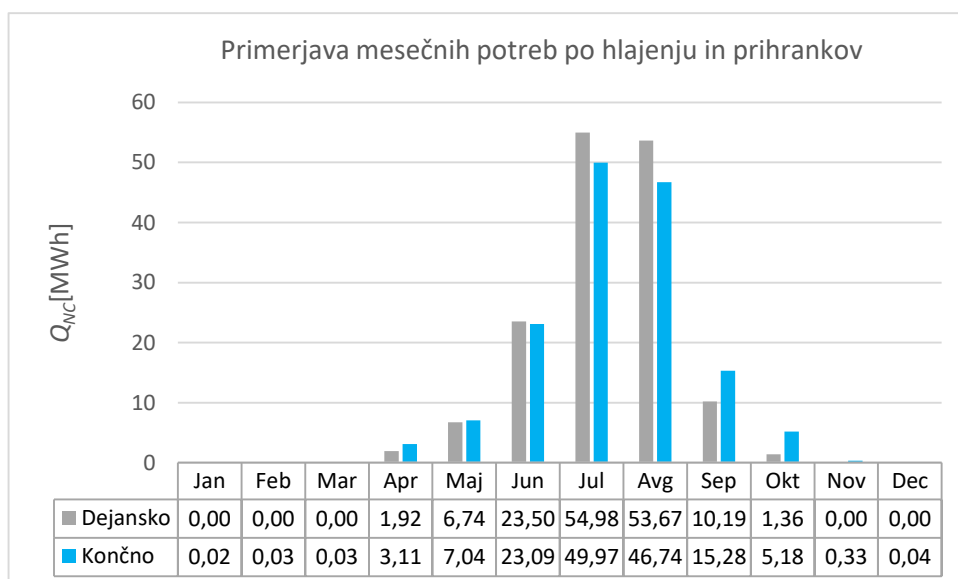
Če se najprej osredotočimo na ogrevanje, opazimo, da se je potreba po ogrevanju na letni ravni zmanjšala za slabih 65 %. Kot rečeno, je klima v Ljubljani takšna, da predstavlja energija, potrebna za ogrevanje, največji delež vseh procesov v stavbi, zaradi tega so prihranki pri ogrevanju lahko največji. Največ toplote stavba potrebuje v januarju, kjer je pri končni varianti potrebnih 121,1 MWh toplote, kar je za skoraj 200 MWh manj kot pri izhodiščni varianti (Grafikon 29). Tudi v poletnih mesecih (junij, julij, avgust) računski model izkazuje nekaj potrebe po ogrevanju, pri izhodiščni situaciji 6,62 MWh, pri končni pa 2,27 MWh. Ta potreba je posledica nastavitve urnikov za ogrevanje, ki tudi tekom poletnih dni zagotavljajo minimalno temperaturo v notranjih prostorih (pri izhodiščni situaciji je ta 18°C, pri končni pa 15°C). Zaradi infiltracije zunanjega zraka in zagotavljanja ustreznih ravni prezračevanja, pa lahko tudi poleti v notranjosti temperatura pade pod minimalno dovoljeno vrednost in takrat programsko orodje prikaže potrebo po ogrevanju. Kljub temu verjetno stavbe takrat dejansko ne bi ogrevali in lahko to potrebo iz končne bilance tudi odštejemo, saj je le teoretična.



Grafikon 29: Primerjava mesečnih vrednosti potrebne energije za ogrevanje in pripadajočih mesečnih prihrankov med izhodiščno in končno varianto.

10.2 Potreba po hlajenju računskih modelov stavbe

Potreba po hlajenju se na letni ravni ne spremeni veliko, razlika med končno in izhodiščno varianto je tako le 1.49 MWh, kar je manj kot 1 % v primerjavi z izhodiščno varianto (Grafikon 30).



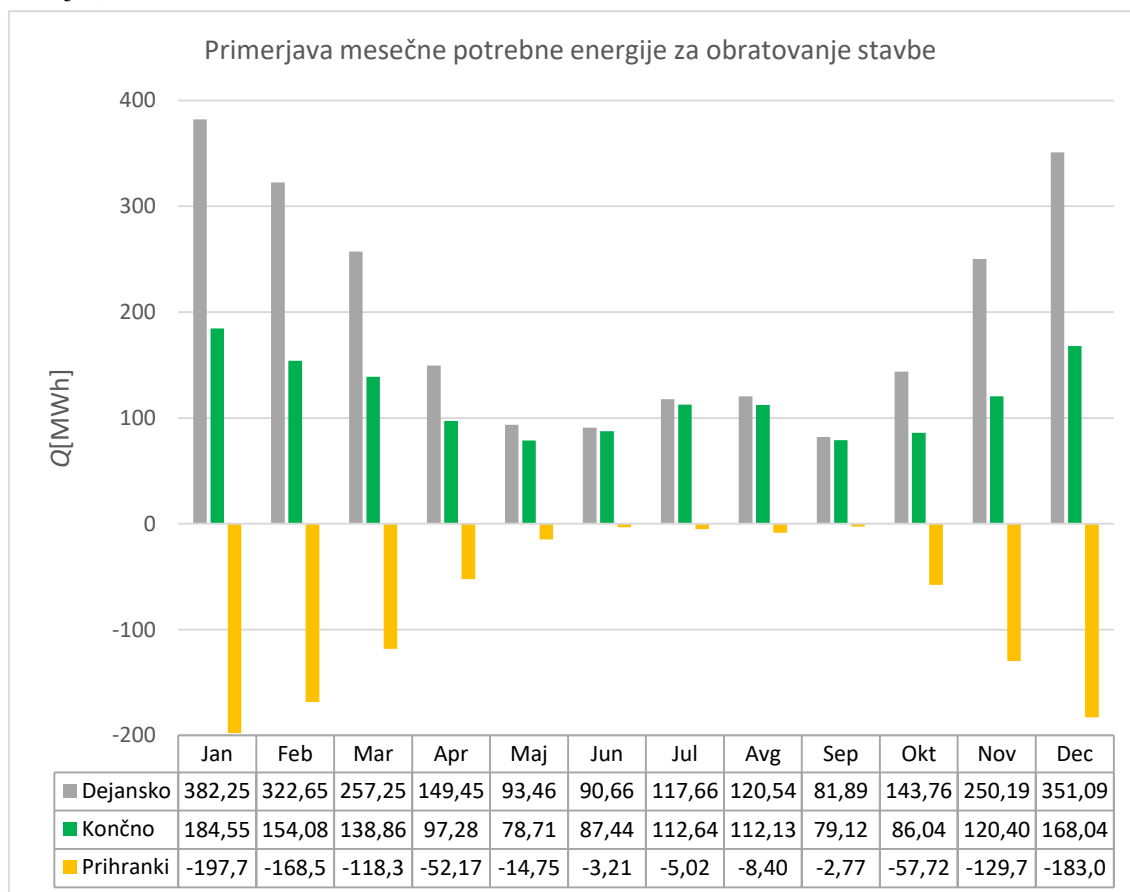
Grafikon 30: Primerjava mesečnih vrednosti potrebne energije za ogrevanje med izhodiščno in končno varianto.

To se na prvi pogled zdi presenetljivo, vendar kot omenjeno v poglavju 8.3 Potrebna energija za hlajenje, kjer primerjam rezultate različnih računskih modelov, tudi razumljivo.

Za razliko od mesečnih vrednosti potrebne toplote, kjer so vrednosti pri končnem modelu skozi vse leto manjše, pa pri vrednostih potrebnega hlada opazimo, da so pri prehodnih obdobjih potrebe po hlajenju pri končni varianti večje, v poletnih mesecih pa manjše kot pri izhodiščni varianti. Pri rezultatih modela končnega stanja opazimo pojav potrebe po hlajenju v mesecih, kjer tega ne pričakujemo, to je pozimi, zgodaj pomladi ter pozno jeseni (januar, februar, marec, november in december). Razlog je enak kot pri ogrevanju, in sicer v nastavitvah urnikov hlajenja. Opazimo pa, da pri izhodiščni varianti teh potreb ne zaznamo. Zrakotesnost kot tudi transmisijske izgube skozi ovoj so se zmanjšale. Kombinacija obojega verjetno vpliva na pojav potrebe po hlajenju v zimskem času. Vrednost je spet minimalna (skupaj 0,45 MWh) in na končne rezultate minimalno vpliva.

10.3 Potreba po celotni energiji, potrebni za obratovanje računskih modelov stavbe

Ob primerjavi mesečnih vrednosti celotne energije, potrebne za obratovanje, presenečenj ni. Pri končni varianti so vrednosti v vseh mesecih nižje kot pri izhodiščni, z največjimi odstopanji v obdobju ogrevanja (Grafikon 31).



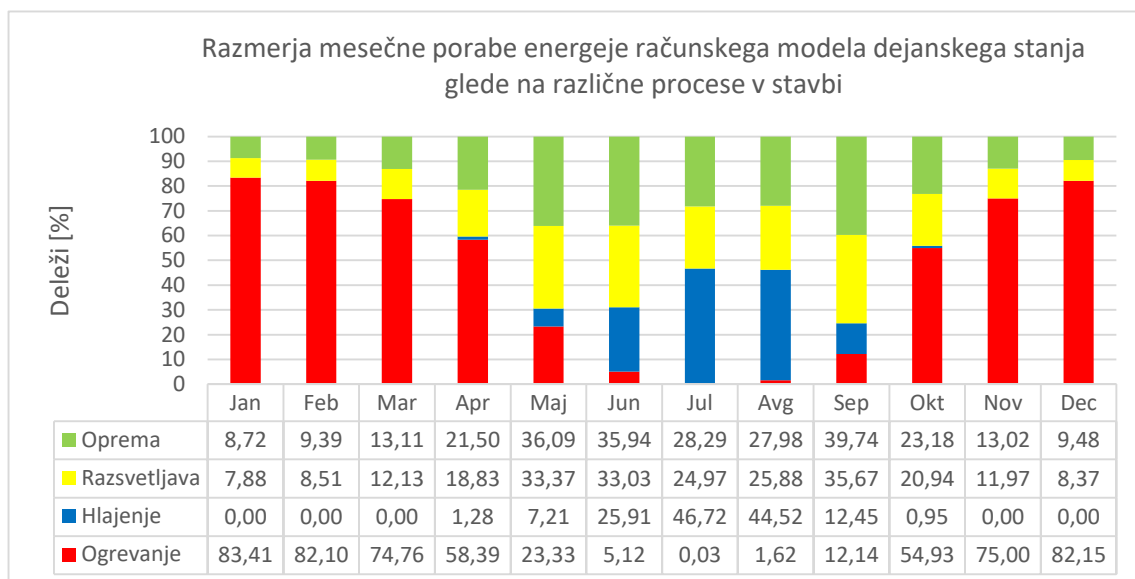
Grafikon 31: Primerjava mesečnih vrednosti potrebne energije za obratovanje stavbe in pripadajočih mesečnih prihrankov med izhodiščno in končno varianto.

Najmanj energije, potrebne za obratovanje, stavba potrebuje v maju in septembru, ki predstavljata prehodna meseca, v katerih se spremeni energetska ravnovesje v stavbi. Tako se z majem konča obdobje ogrevanja in začne naraščati potreba po hlajenju, v mesecu septembru pa se situacija obrne in začne potreba po ogrevanju naraščati, medtem ko se potreba po hlajenju manjša. Na grafikonu 31 tako lepo

ločimo viške zaradi hlajenja poleti in zaradi ogrevanja pozimi. Največ prihrankov pri porabi energije imamo v odboju ogrevanja stavbe, največ januarja (197,7 MWh).

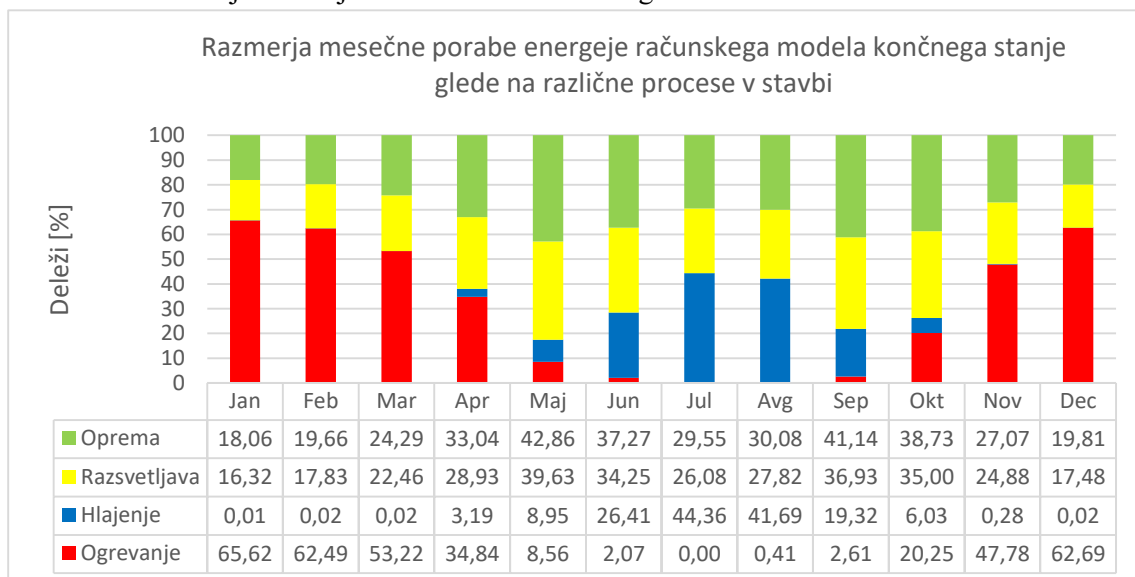
Če sedaj ločeno pogledamo še mesečne potrebe po energiji za posamezna modela, razčlenjene na različne procese, lahko opazujemo, kako se spreminjajo energetska razmerja med posameznimi procesi (Grafikona 32 in 33).

Za primer dejanskega stanja opazimo, da znaša potreba po ogrevanju v najhladnejših mesecih zime čez 80 % vse mesečne potrebne energije. Potreba po hlajenju pa meseca avgusta in julija obsega približno 45 % celotne potrebe po energiji. Delež elektrike, potrebne za delovanje opreme in razsvetljave, pa je najvišji meseca septembra, ko znaša skupni delež obeh 75 % vseh mesečnih energetskih potreb.



Grafikon 32: Razmerja mesečne porabe energije računskega modela dejanskega stanja glede na različne procese v stavbi.

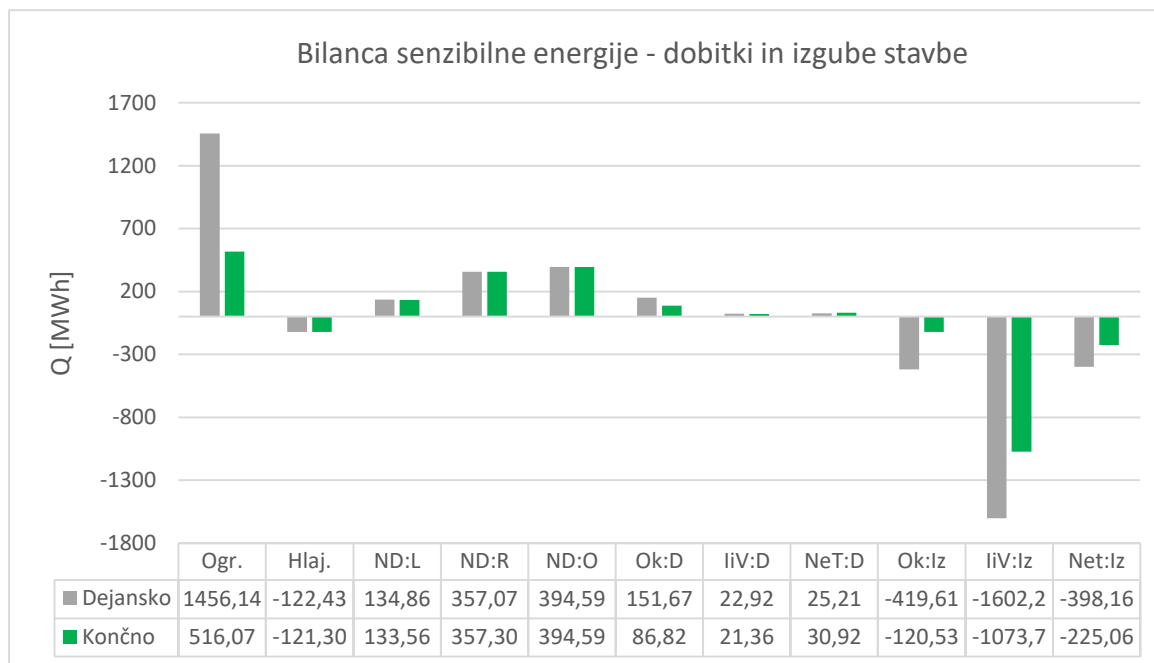
Pri modelu končnega stanja pa so razmerja nekoliko drugačna. Ogrevanje med najhladnejšimi meseci porabi dobrih 60 % mesečne potrebne energije. Meseca julija in avgusta je delež porabljene energije za hlajenje primerljiv z deležem pri modelu dejanskega stanja, tj. približno 42,5 %. Električna oprema in razsvetljava pa predstavlja največji delež v mesecu maju, in sicer okoli 82,5 %. Računski model končnega stanja torej izkaže najmanjše potrebe po kondicioniranju stavbe ob koncu sezone ogrevanja, medtem ko pri izhodiščnemu stanju to stanje dosežemo na začetku ogrevalne sezone.



Grafikon 33: Razmerja mesečne porabe energije računskega modela končnega stanja glede na različne procese v stavbi.

10.4 Primerjava toplotnih dobitkov in izgub računskih modelov stavbe

Primerjajmo še vrednosti dobitkov in izgub na nivoju celotne stavbe. Program EP omogoča spremljanje bilance senzibilne energije na nivoju posameznih temperaturnih con in celotnega modela stavbe (Grafikon 34). Pozitivne vrednosti pomenijo dobitke, negativne pa izgube.



Grafikon 34: Bilanca senzibilne energije v stavbi pri računskem modelu dejanskega in končnega modela. Za pomen oznak glej opombo pod črto*.

Notranji dobitki zaradi ljudi, razsvetljave in opreme bi morali biti enaki za oba računski modela, vendar kot vidimo v grafikonu 34 pride do malenkostnih razhajanj. Do teh napak lahko pride zaradi napak pri zaokroževanju ali zaradi minimalnih razlik pri samih računskih modelih (npr. razlika pri kondicionirani površini ali urnikih, na podlagi katerih se računajo dobitki). Seštevek vseh notranjih dobitkov znaša 886,66 MWh pri modelu dejanskega stanja, kar znaša dobrih 60 % potrebne toplote za ogrevanje. Pri modelu končnega stanja pa so notranji dobitki večji od potreb po ogrevanju! Seštevek notranjih dobitkov je za dobrih 40 % višji od potreb po ogrevanju stavbe.

Pri dobitkih in izgubah skozi okna pride pri računskih modelih do velikih razhajanj. Glede na izhodiščno stanje se dobitki zmanjšajo za 43 % (iz 151,67 MWh na 86,82 MWh), izgube pa za 71 % (iz -419,61 MWh na -120,53 MWh). Na dobitke skozi okna imajo vpliv tako lastnosti oken (prehodnost za sončno sevanje) kot tudi senčila. Na zmanjšanje dobitkov in izgub v največji meri vpliva nižja toplotna prehodnost oken, saj pozicija senčila pri modelu dejanskega stanja ni takšna, da bi omogočala velike solarne dobitke. Primerjava med dobitki in izgubami nam pove (izgube odštejemo od dobitkov), da pri dejanskemu stanju okna povzročajo izgube v velikosti -327,94 MWh, pri končnem stanju pa -33,71 MWh. Tako znaša razlika 294,23 MWh energije.

*POMEN OZNAK: Ogr. = ogrevanje, Hlaj. = hlajenje, ND:L = notranji dobitki ljudje, ND:R = notranji dobitki razsvetljava, ND:O = notranji dobitki oprema, Ok:D = dobitki skozi okna, IiV:D = dobitki zaradi infiltracije in ventilacije, NeT:D = dobitki skozi netransparentne zunanje površine, Ok:Iz = izgube skozi okna, IiV:Iz = izgube zaradi infiltracije in ventilacije, Net:Iz = izgube skozi netransparentne zunanje površine

Izgube skozi netransparentni del ovoja se zmanjšajo za 43 % (iz -398, 16 MWh na 225,06 MWh), kar lahko pripišemo nižji toplotni prehodnosti ovoja. Zanimivo pa je, da so dobitki skozi transparentni del ovoja, ki so sicer veliko manjši od izgub (npr. pri dejanskemu stanju 25,21 MWh), večji pri modelu končnega stanja (za 5,7 MWh). To je presenetljivo, saj bi pričakoval, da bodo ti manjši zaradi nižje toplotne prehodnosti ovoja. Obstaja možnost, da so se ti povečali zaradi večje specifične toplotne kapacitete ovoja, ki jo prispeva dodatna toplotna izolacija. Za potrditev te hipoteze bi bile potrebne dodatne simulacije, ki pa jih zaradi majhnih vrednosti dobitkov v primerjavi z izgubami nisem izvedel.

Preostanejo še dobitki in izgube zaradi infiltracije zunanega zraka in prezračevanja stavbe. Dobitki so pri obeh modelih podobno nizki, malenkost nižje dobitke izkazuje končni model, in sicer 21,36 MWh, ker je 1,55 MWh manj (po vsej verjetnosti zaradi nižje vrednosti infiltracije). Pri izgubah zaradi ventilacije in infiltracije, ki predstavljajo največji delež vseh izgub, pa je razhajanje zelo veliko, saj so izgube pri končnem modelu manjše za 33 %, z -1602,28 MWh na -1073,79 MWh. To je zaradi rekuperacije toplote prezračevanega zraka.

11 ZAKLJUČKI

Poslovne stolpnice spadajo v posebno skupino nestanovanjskih stavb, saj zaradi svoje velikosti, oblike, tendence k uporabi velikih steklenih površin in načina uporabe za obratovanje porabijo veliko energije. Tudi na lokacijah, kjer prevladuje potreba po ogrevanju, poslovne stolpnice zaradi velikih notranjih in solarnih dobitkov izkazujejo nagnjenost k pregrevanju in tako potrebo po hlajenju stavbe oz. ukrepe na nivoju fasadnega ovoja, ki zmanjšujejo to potrebo. Podobno se je izkazalo tudi na primeru v tej magistrski nalogi obravnavanega poslovnega nebotičnika.

S pomočjo dinamičnega programa za računanje porabe energije v stavbi EnergyPlus sem izvedel analize različnih ukrepov na nivoju fasadnega ovoja, s katerimi sem vplival na porabo energije v stavbi. Izdelava računskega modela obstoječe poslovne stolpnice se je izkazala kot časovno precej potratna, program EnergyPlus pa zahteva od uporabnika poglobljeno razumevanje njegovega delovanja.

Za najbolj učinkovit ukrep na nivoju stavbnega ovoja se izkaže zmanjšanje transmisijskih izgub. Na primeru obravnavane stolpnice sem predvidel namestitev dodatne toplotne izolacije na notranjo stran in zamenjavo obstoječe na zunanji strani stene ter zamenjavo oken na celotni stolpnici. Zaradi boljše zrakotesnosti toplotno izoliranega ovoja stolpnice sem v programu predvidel manjšo infiltracijo zunanjega zraka. Poraba toplotne energije se je zaradi tega ukrepa zmanjšala za 53 %, skupna poraba energije pa za 46 %. To potrjuje prvo hipotezo, in sicer da bo zaradi klimatskih danosti lokacije stolpnice (Ljubljana) najbolj učinkovit ukrep na nivoju fasadnega ovoja tisti, ki bo minimaliziral transmisijske izgube skozi njega in s tem zmanjšal potrebo po ogrevanju.

Od štirih ukrepov, ki sem jih preverjal na fasadnem oboju, se trije ukvarjajo z zmanjševanjem potrebe po hlajenju. Z zmanjšanjem toplotne prehodnosti ovoja in infiltracije zunanjega zraka močno naraste potreba po hlajenju stavbe (naraste za dobrih 50 MWh oz. za 35 %). Tako sem s simulacijo nočnega hlajenja stavbe, optimiziranjem kontrole senčil in z uporabo – z vidika senčenja – optimalno zasnovanih zunanjih fiksnih senčil zmanjševal potreben hlad za zagotavljanje ustreznih temperaturnih razmer v stavbi. Z optimalno kombinacijo ukrepov sem uspel znižati potrebo po hlajenju na nivo pred zmanjšanjem toplotne prehodnosti ovoja. Nočno hlajenje stavbe se izkaže kot pomemben ukrep, saj samo z njim zmanjšamo potrebo po hlajenju za 20 %. Delež energije, ki odpade na hlajenje, je pri izhodiščnem modelu stavbe dobrih 6 %, pri končnem modelu stavbe pa dobrih 10 % vse porabljene energije. Če se osredotočim le na ogrevanje in hlajenje (z ukrepi na nivoju fasadnega ovoja sem vplival le na potrebo po ogrevanju in hlajenju, poraba električne energije za razsvetlavo in notranjo opremo pa se pri različnih računskih modelih ne spreminja), znaša razmerje med energijo za hlajenje in ogrevanje stavbe pri izhodiščnem računskem modelu 10 %, pri končnem računskem modelu pa kar 30 %. S tem delno potrdim drugo hipotezo, v kateri trdim, da zaradi velikih notranjih dobitkov v stavbi potreba po hlajenju predstavlja pomemben del skupne energije. Energija za hlajenje predstavlja najmanjši delež pri skupni porabi energije med vsemi procesi v stavbi, vendar se je njen pomen pri končni varianti stavbe močno povečal.

Tretja hipoteza o pomembnem vplivu vrste in kontrole senčil na potrebe po ogrevanju in hlajenju se izkaže kot pravilna. Z optimizacijo kontrole delovanja zunanjih žaluzij (avtomatsko vodeno delovanje zunanjih žaluzij) lahko zmanjšamo porabo energije za 26,5 MWh oz. 2 %. Na obravnavani stolpnici lahko z uporabo ustrezno zasnovanih fiksnih zunanjih senčil namreč dosežemo primerljivo porabo energije kot z avtomatsko vodenimi zunanjimi žaluzijami, ki se prilagajajo glede na zunanje vremenske razmere. Ker so stroški vzdrževanja nižji in je možnost za nepredvidljivo delovanje senčil manjša, za končni model fasadnega ovoja predlagam varianto senčenja z zunanjimi fiksnimi senčili.

Poslovne stolpnice so zaradi svoje oblike, načina uporabe in specifičnih energijskih procesov v njih posebne, zaradi tega je vprašljiva primernost zahtev iz PURES-a glede omejitve porabe energije v njih. Izkaže se, da tudi pri računskem modelu, kjer sem ventilacijske izgube toplote zmanjšal na minimum (teoretično stanje, kjer sem upošteval 100-odstotno učinkovito prezračevanje s sistemom rekuperacije toplote odpadnega zraka), zahteve o maksimalni dovoljeni potrebni toploti za ogrevanje niso bile izpolnjene. Omenjen pravilnik ne predpisuje nobenih zahtev o omejitvi energije, potrebne za hlajenje

nestanovanjskih stavb. V obravnavanih primerih se izkaže, da bi stavba brez ukrepov za zmanjšanje potreb po hlajenju na letni ravni potrebovala več kot 50 MWh dodatne koristne energije. Pod vprašaj postavljam tudi smiselnost o enako strogih zahtevah glede maksimalne dovoljene porabe energije za nove stavbe in rekonstrukcije. Oblika stavbe je namreč pomemben faktor, ki vpliva na porabo energije, predvsem pa je ključen parameter (oblika stavbe je zajeta v oblikovnem faktorju f_0) v enačbi za računanje mejne dovoljene vrednosti porabe po PURES-u. Za rekonstrukcije stavb bi bilo smiselno podati ločene zahteve glede dovoljene porabe energije. Če se ozremo čez severno državno mejo lahko ugotovimo, da je to možno, saj avstrijska tehnična smernica loči zahteve za nove stavbe in tiste za rekonstrukcije, poleg tega pa podaja omejitve glede maksimalno dovoljenega hladu tudi za nestanovanjske stavbe.

Obravnavana poslovna stolpnica vsekakor izkazuje ogromen potencial glede prihrankov energije. Ukrepi na nivoju fasadnega ovoja se izkažejo kot pomemben faktor za zmanjševanje potrebne energije za obratovanje stavbe. Ob primerjavi računskega modela dejanskega in končnega stanja s sistemom rekuperacije toplote prezračevanega zraka se izkaže, da se poraba energije na letni ravni zmanjša za 40 %, kar znaša 941,5 MWh koristne energije.

VIRI

- [1] Directive 2012/27/EU of the European parliament and of the council of 25 October 2012 on energy efficiency, Official Journal of the European Union.
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1399375464230&uri=CELEX:32012L0027> (Pridobljeno 23. 11. 2016.)
- [2] O energetske učinkovitosti stavb v Evropski Uniji.
<https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>. (Pridobljeno 23. 11. 2016.)
- [3] Raji B. et al.. 2015. An assessment of energy-saving solutions for the envelope design of high-rise buildings in temperate climates: A case study in the Netherlands.
- [4] SIST EN ISO 13790: 2008 Energijske lastnosti stavb - Račun rabe energije za ogrevanje in hlajenje prostorov.
- [5] Šestan, P. 2012. Primerjava delovanja programskih orodij za izračun porabe energije v stavbah. Diplomsko naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- [6] Program EnergyPlus.
<https://energyplus.net/>. (Pridobljeno 1. 9. 2016.)
- [7] Program OpenStudio
<https://www.openstudio.net/>. (Pridobljeno 1. 9. 2016.)
- [8] Definicija besede stolpnica po SSKJ.
http://bos.zrc-sazu.si/cgi/a03.exe?name=sskj_testa&expression=stolpnica&hs=1. (Pridobljeno 4. 11. 2016)
- [9] The Editors of Encyclopedia Britannica, Encyclopædia Britannica.
<https://www.britannica.com/technology/skyscraper>. (Pridobljeno 4. 11. 2016.)
- [10] Craighead, G. 2009. High-Rise Building, Definition, Development and Use. V: Craighead, G High-Rise Security and Fire Life Safety.
http://booksite.elsevier.com/samplechapters/9781856175555/02~Chapter_1.pdf. (Pridobljeno 3. 11. 2016.)
- [11] Uredba o klasifikaciji vrst objektov in objektih državnega pomena, Uradni list RS. št. 109/2011. priloga 1.
- [12] Ali, M. Armstrong, P. 2010. Sustainability and the Tall Building: Recent Developments and future Trends. Council on Tall Buildings and Urban Habitat.
<http://global.ctbuh.org/resources/papers/download/318-sustainability-and-the-tall-building-recent-developments-and-future-trends.pdf>. (Pridobljeno 3. 11. 2016.)
- [13] Oldfield, P. Trabucco, D. Wood, A. 2008. Five Energy Generations of Tall Buildings: A historical Analysis of Energy Consumption in High Rise Buildings. CTBUH 2008 8th World Congress, Dubai
- [14] Depecker, P. Menezo, C. Virgone, J. Lepers, S. 2001. Design of building shape and energetic consumption. Building and Environment 36: 627-635.
- [15] Stein, R. G. 1977. Observations on Energy Use in Buildings. Journal of Architectural Education, Vol. 30, No. 3. 36-41.

- [16] Slika Tour Fiat.
<http://defense-92.fr/batiments/tour-cb-2>. (Pridobljeno 3. 11. 2016.)
- [17] Slika Tour Elf, avtorska slika: Hans- Peter Kneip.
- [18] Ayers, A. 2004. Ther Architecture of Paris. Stuttgart. Edition Axel Menges: 415 str.
- [19] Bahrain World Trade Center.
https://en.wikipedia.org/wiki/Bahrain_World_Trade_Center. (Pridobljeno 23. 11. 2016.)
- [20] Slika Commerzbank.
<https://rist2230.wordpress.com/2014/09/>. (Pridobljeno 3. 11. 2016.)
- [21] Slika Bahrain World Trade Center.
http://www.allposters.com/-sp/Bahrain-World-Trade-Center-Manama-Bahrain-Middle-East-Posters_i10514952_.htm. (Pridobljeno 23. 11. 2016.)
- [22] Economidou, M. et al. 2011. Europe's buildings under the microscope. Buildings Performance Institute Europe.
<http://bpie.eu/publication/europes-buildings-under-the-microscope/>. (Pridobljeno 5. 11. 2016.)
- [23] Akcijski načrt za skoraj nič- energijske stavbe za obdobje do leta 2020. 2015. Ministrstvo za infrastrukturo.
http://www.energetika-portal.si/fileadmin/dokumenti/publikacije/an_snes/ansnes_final_apr_2015.pdf. (Pridobljeno 25. 7. 2016)
- [24] Poraba energije poslovne stavbe v hladnem podnebju.
<https://www.eonenergy.com/for-your-business/small-to-medium-energy-users/saving-energy/energy-advice/offices>. (Pridobljeno 3. 11. 2016.)
- [25] Poraba energije poslovne stavbe v toplemu podnebju.
<http://www.slideshare.net/rbarnwell/cmcfusersrm-barnwellmy-documentsrmb-docsintegrative-design-working-with-your-mep-final>. (Pridobljeno 3. 11. 2016.)
- [26] The Gherkin Tower, London
https://en.wikipedia.org/wiki/30_St_Mary_Axe. (Pridobljeno 28. 11. 2016.)
- [27] Lee, Eleanor. Selkowitz, S. Bazjanav, V. Inkarojrit, V. Kohler, C. 2002. High-Performance Commercial Building Facades, Kalifornija, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California: 133 str.
<http://gaia.lbl.gov/btech/papers/50502.pdf>. (Pridobljeno 14. 2. 2016.)
- [28] Zakon o gradbenih proizvodih (ZGPro-1). Uradni list RS. št. 82/2003: 9183-9187.
- [29] Kautsch, P. Dreyer, J. Hengsberger, H. et.al.. 2002. Thermisch-hygrisches Verhalten von GlasDoppelFassaden unter solarer Einwirkung, Theorieevaluierung durch Vorort-Messung. Dunaj, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie: 207 str.
https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/hdz_pdf/kautsch_eb_3602.pdf. (Pridobljeno 15.2. 2016.)
- [30] Lang, W. Thomas H. 2000. Using multiple skins to clad buildings. Architectural Record: 171–182.
- [31] Boake, M, T. et al.. 2003. Understanding the General Principles of the Double Skin Facade System, Kanada, School of Architecture, University of Waterloo.
http://www.tboake.com/pdf/double_facade_general.pdf. (Pridobljeno 14. 2. 2016.)

- [32] O Computational Fluid Dynamics (CFD). https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics. (Pridobljeno 5. 11. 2016.)
- [33] Kim, D, W. Park, C, S. 2011. Difficulties and limitations in performance simulation of a double skin facade with EnergyPlus. *Energy and Buildings* 43: 3635-3645.
- [34] New York Time's Building Wiki https://en.wikipedia.org/wiki/The_New_York_Times_Building. (Pridobljeno 9. 11. 2016.)
- [35] Študija o načrtovalskih ukrepih na fasadnem ovoju poslovne stolpnice New York Times Building. <https://facades.lbl.gov/newyorktimes>. (Pridobljeno 9. 11. 2016.)
- [36] Slika NY Times Building. <http://www.ctbuh.org/TallBuildings/FeaturedTallBuildings/Archive2008/NewYorkTimesBuilding/tabid/1836/language/en-US/Default.aspx>. (Pridobljeno 9. 11. 2016.)
- [37] Radiance – program za simulacijo osvetljenosti prostorov. <https://radiance-online.org/> (Pridobljeno 29. 11. 2016)
- [38] O Post Tower stolpnici. <http://www.ctbuh.org/LinkClick.aspx?fileticket=GJyX5oE2xPs%3D&tabid=6979&language=en-US>. (Pridobljeno 9. 11. 2016.)
- [39] O stavbi Occidental Chemical Center (Hooker Building). Boake, T, M. Chatham, A. The Tectonics of the Double Skin <http://www.tboake.com/ds/hooker.pdf>. (Pridobljeno 9. 11. 2016)
- [40] EPBD-r 2010/31/ES – Directive 2010/31/EU of the parliament and of the council on the energy performance of buildings (recast), 19. 5. 2010
- [41] Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah. Ur. L. RS, št 52/2010: 7840
- [42] Tehnična smernica za graditev TSG-1-004 Učinkovita raba energije
- [43] SIST EN ISO 13790:2008 Energijske lastnosti stavb - Račun rabe energije za ogrevanje in hlajenje prostorov
- [44] Tehnična smernica TSG-1-001-2010 Požarna varnost v stavbah
- [45] Muster-Hochhaus-Richtlinie – MHR, 2008.
- [46] Pravilnik o zahtevah za zagotavljanje varnosti in zdravja delavcev na delovnih mestih. 1999. Uradni list RS, št. 89/99, 39/05 in 43/11 – ZVZD-1.
- [47] Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb. 2002. Uradni list RS, št. 42/2002: 4139.
- [48] ASHRAE Standard 189.1-2009: Standard for the Design of High-Performance Green Buildings Except Low-Rise Residential Buildings
- [49] OIB-Richtlinie 6, Energieeinsparung und Wärmeschutz, 2011
- [50] Jereb, S. 2004. Toplotni odziv stavb po evropskem predstandardu prEN ISO 13790. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- [51] Corrado, V. Fabrizio, E. 2007. Assessment of Building cooling energy need through a quasi-steady state model: Simplified correlation for gain-loss mismatch. *Energy and Buildings* 39(5): 569–579.

- [52] Josikalo, J. Kurnitski, J. 2007. Performance of EN ISO 13790 utilisation factor heat demand calculation method in a cold climate. *Energy and Buildings* 39(2): 236–247.
- [53] Georgios, K. Clarke, J. Strachan, P. 2007. Impact of using different models in practice – A case study with the simplified methods of ISO 13790 standard and detailed modelling programs. Energy Systems Research Unit, University of Strathclyde.
- [54] ESP-r – simulacijski program za računanje porabe energije v stavbah.
<http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>. (Pridobljeno 10. 11. 2016.)
- [55] Program Climate Consultant.
<http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/>. (Pridobljeno 5. 3. 2016.)
- [56] Program U-Wert.
<https://www.u-wert.net/?lv=1>. (Pridobljeno 5. 3. 2016.)
- [57] Progra Window 7.4.
<https://windows.lbl.gov/software/window/window.html>. (Pridobljeno 5. 3. 2016.)
- [58] Program SketchUp Make.
<http://www.sketchup.com/>. (Pridobljeno 5. 3. 2016.)
- [59] EnergyPlus™ Documentation, v 8.4.0. Getting Started With EnergyPlus.
- [60] EnergyPlus™ Documentation, v8.4.0, Engineering Reference.
- [61] Spleta stran z datotekami vremenskih podatkov za EnergyPlus.
<https://energyplus.net/weather>. (Pridobljeno 5. 3. 2016.)
- [62] Slika OS aplikacije in njenih orodnih vrstic. OpenStudio 1.9.0. Basic Workflow Guide.
http://nrel.github.io/OpenStudio-user-documentation/img/pdfs/openstudio_interface_quickstart.pdf. (Pridobljeno 4. 12. 2016.)
- [63] Spletna stran nemškega urada za standardizacijo DIN.
<http://www.din.de/de/>. (Pridobljeno 29. 11. 2016.)
- [64] Podatki o katastrski občini in parceli stavbe.
http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso. (Pridobljeno 29. 11. 2016.)
- [65] Vargec, T. 2011. Energetska sanacija javne stavbe. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo.
- [66] Arhitekturni načrti stavbe. Osebna komunikacija s predstavnikom lastnika stavbe (februar. 2016.)
- [67] Slika obravnavane poslovne stolpnice. Letno poročilo družbe Petrol d.d. za leto 2013.
https://www.petrol.si/sites/www.petrol.si/files/attachment/letno_porocilo_2013_0.pdf. (Pridobljeno 4. 12. 2016.)
- [68] Koppengeiger-jeva podnebna klasifikacija.
https://sl.wikipedia.org/wiki/K%C3%B6ppenova_podnebna_klasifikacija. (Pridobljeno 28. 6. 2016.)

- [69] Karta Evrope glede na Köpenn- Geigerjevo podnebno klasifikacijo.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Europe_Koppen_Map.png. (Pridobljeno 28. 8. 2016)
- [70] Informacije o podnebj v Ljubljani.
<https://sl.wikipedia.org/wiki/Ljubljana#Podnebje>. (Pridobljeno 28. 8. 2016.)
- [71] Vremenski podatki za Ljubljano. Agencija republike Slovenije za okolje.
<http://www.arso.gov.si/vreme/napovedi%20in%20podatki/ljubljana.html>. (Pridobljeno 28. 8. 2016.)
- [72] Odstopanja povprečnih temperatur za leti 2014 in 2015 v Ljubljani
<http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/current/last-12-months/archive>. (Pridobljeno 28. 11. 2016.)
- [73] EnergyPlus™ Documentation, v8.4.0. Tips and Tricks Using EnergyPlus.
- [74] Spleta stran z navodili o izbiri epw. datotek.
<https://energyplus.net/weather/simulation>. (Pridobljeno 5. 3. 2016.)
- [75] Building automation – impact on energy efficiency. Application per EN 15232 eu.bac. product certification.
<http://w3.siemens.com/market-specific/global/en/data-centers/documents/bau-impact-on-energy-efficiency.pdf>. (Pridobljeno 29. 11. 2016.)
- [76] Povezava do spletne strani American Society od Heting, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)
<https://www.ashrae.org/>. (Pridobljeno 29. 11. 2016.)
- [77] Medved, S. 2014. Gradbena fizika. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo: 328 str.
- [78] EnergyPlus™ Documentation, v8.4.0. Input Output Reference.
- [79] Hella. Technical documentation 2016. Outdoor blinds, venetian blinds
- [80] Rešitve za izvedbo ravnih streh
<http://www.fragmat.si/si/gradbeni-program/resitve>. (Pridobljeno 30. 11. 2016.)
- [81] Tehnične karakteristike aktuatorja za odpiranje oken *Electric chain actuator TOPP, model C20*
http://window-openers.com/wp-content/uploads/2015/11/c20_uk.pdf. (Pridobljeno 28. 8. 2016.)
- [82] Košir, M. Predavanja pri predmetu Učinkovita raba energije. Bioklimatsko načrtovanje & pasivno solarna arhitektura 2. del.
- [83] Košir, M. 2016. Adaptive Building Envelope: An Integral Approach to Indoor Environment Control in Buildings. V: Ponce, P. Gutierrez, A., M. Ibbara, M., L. 2016. Automation and Control Trends. InTech: 200 str.
<http://www.intechopen.com/books/automation-and-control-trends/adaptive-building-envelope-an-integral-approach-to-indoor-environment-control-in-buildings>. (Pridobljeno 1. 11. 2016.)

PRILOGE

PRILOGA A: REZULTATI ČLANKA *Impact of using different models in practice – A case study with the simplified methods of ISO 13790 standard and detailed modelling programs* [53].

Preglednica A1: Primerjava letne potrebne energije za ogrevanje stavbe za različne računske metode

Table 1. Annual heating energy requirements (kWh/m²)

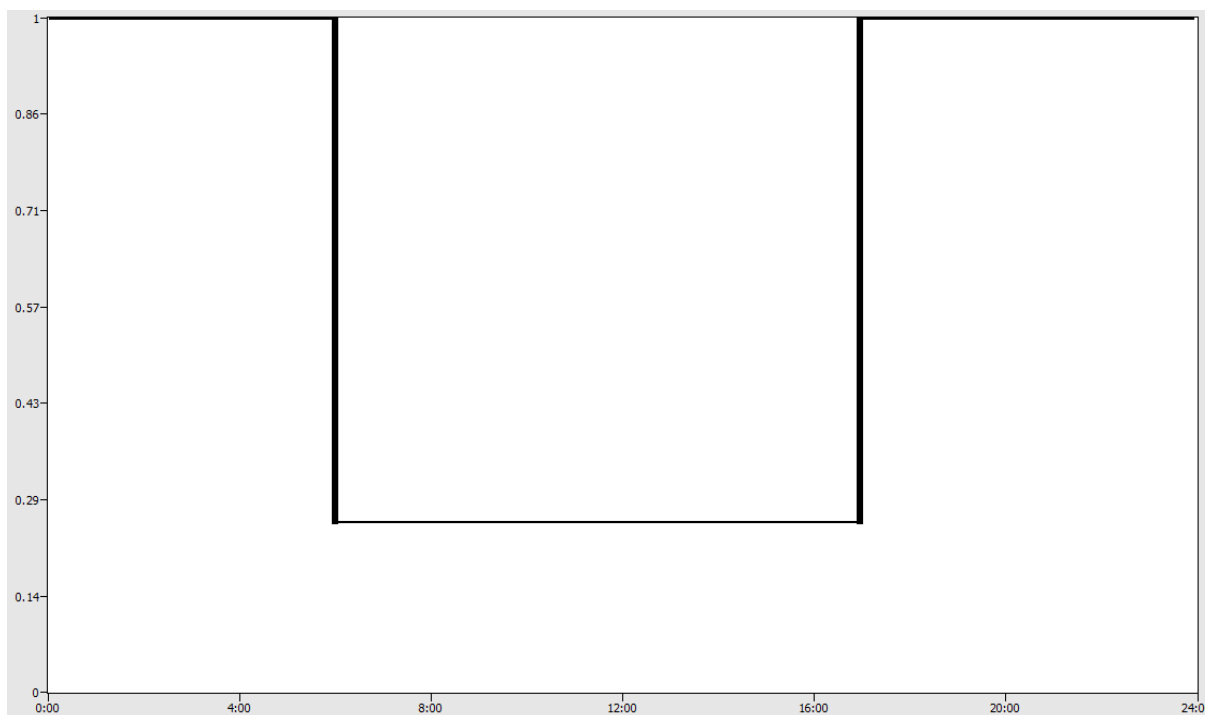
	Monthly 13790	Hourly 13790	EnergyPlus	ESP-r	ESP-r (unconstrained)
Base Case (Amsterdam – 19 °C setpoint)	61.1	56.1	50.3	46.3	45.4
Climate Aberdeen	73.7	66.5	58.2	53.8	52.8
Climate Athens	14.0	12.0	5.2	4.6	3.9
Internal Gains averaged hourly (7 days/week)	61.1	48.0	47.0	44.9	43.7
Int. Gains averaged hourly (Weekdays/Weekends)	61.1	49.2	47.9	45.8	44.6
High internal gains	50.7	44.0	35.1	31.5	31.3
Low internal gains	76.6	74.7	71.7	67.0	65.8
Glazing area: double	77.9	70.8	63.9	56.5	51.6
Glazing area: half	53.2	49.8	44.9	42.8	41.0
Construction: very lightweight	68.3	63.3	57.1	55.4	53.9
Construction: heavyweight (Cm=231.56 kJ/m ² K)	47.2	46.7	47.4	45.4	43.9
Construction: heavyweight, no insulation	138.0	125.0	141.8	142.0	125.1
Ventilation daily schedule	61.1	52.9	48.5	46.8	44.4
Ventilation Weekday/Weekends schedule	61.1	53.2	48.7	47.0	44.3
High ventilation rates (1.5 ach)	113.4	111.5	106.5	99.7	91.9
Low ventilation rates (0.3 ach)	35.3	29.8	23.8	23.9	22.4
Rotate 90° anticlockwise	63.9	58.7	55.1	53.0	50.6
Rotate 180° anticlockwise	60.8	56.1	50.6	48.8	46.0
Setpoint @ 21 °C	79.5	73.0	67.1	64.6	60.6
Setpoint @ 17 °C	45.3	42.5	35.8	34.5	32.1
Intermittent heating 7-17.00h	18.2	9.2	28.1	24.3	18.6
Intermittent heating 0-10.00h	18.2	29.9	38.0	35.6	29.5
Intermittent heating (different periods @ 19 °C)	9.1	7.3	27.5	22.6	16.1

Preglednica A2: Primerjava letne potrebne energije za hlajenje stavbe za različne računske metode.

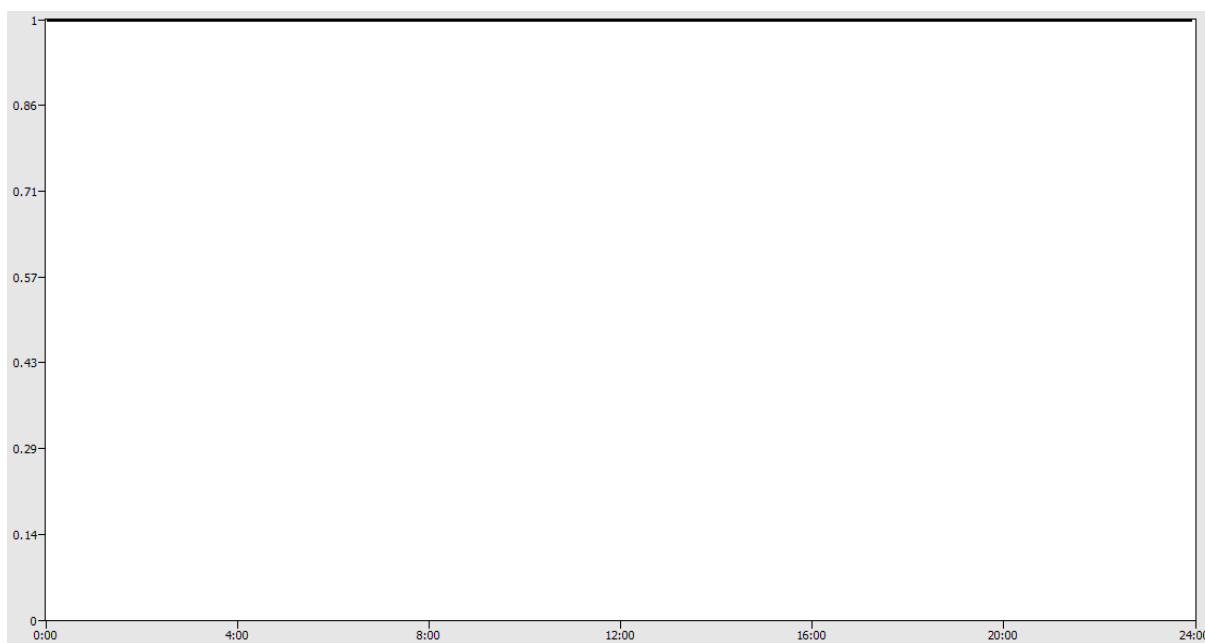
Table 2. Annual cooling energy requirements (kWh/m^2)

	Monthly 13790	Hourly 13790	EnergyPlus	ESP-r	ESP-r (unconstrained)
Base Case (Amsterdam - 24 °C setpoint)	43.8	32.0	22.3	24.1	26.0
Climate Aberdeen	34.3	18.6	9.3	10.6	12.4
Climate Athens	116.3	106.1	98.2	100.2	105.2
Internal Gains averaged hourly (7 days/week)	43.8	23.5	18.6	20.0	21.8
Int. Gains averaged hourly (Weekdays/Weekends)	43.8	24.6	19.2	20.6	22.4
High Internal Gains	66.4	52.1	39.0	41.4	44.1
Low Internal Gains	23.5	16.4	9.7	10.9	12.1
Glazing area: double	75.3	58.8	42.0	40.7	43.2
Glazing area: half	29.0	19.9	13.0	14.0	15.5
Construction: very lightweight	43.9	31.8	22.1	24.0	26.5
Construction: heavyweight ($C_m=231.56 \text{ kJ/m}^2\text{K}$)	27.0	20.9	20.5	22.1	24.7
Construction: heavyweight, no insulation	27.3	15.8	12.9	13.9	22.3
Ventilation daily schedule	43.8	30.0	22.4	24.1	25.9
Ventilation Weekday/Weekends schedule	43.8	29.9	26.2	23.8	25.6
High ventilation rates (1.5 ach)	35.5	22.5	13.3	14.8	16.8
Low ventilation rates (0.3 ach)	51.2	41.6	32.0	33.7	36.0
Rotate 90° anticlockwise	42.5	29.9	22.0	23.6	25.7
Rotate 180° anticlockwise	45.4	32.0	22.5	24.3	26.0
Setpoint @ 26 °C	37.8	24.2	14.3	15.9	17.8
Setpoint @ 22 °C	51.4	41.4	32.2	34.2	36.1
Intermittent heating 7-17.00h	31.3	28.3	20.7	21.7	21.8
Intermittent cooling 0-10.00h	31.3	6.1	9.1	9.4	9.3
Intermittent cooling (different periods @ 24 °C)	31.3	17.1	19.7	18.4	16.7
Base Case (Athens - 24 °C setpoint)					
Base Case (Athens - 24 °C setpoint)	116.3	106.1	98.2	100.2	105.2
Internal Gains averaged hourly (7 days/week)	116.3	97.4	94.6	96.1	101.1
Int. Gains averaged hourly (Weekdays/Weekends)	116.3	98.2	94.9	96.4	101.4
High Internal Gains	148.9	137.6	129.5	132.3	138.2
Low Internal Gains	82.3	76.3	70.3	71.7	75.7
Glazing area: double	184.7	167.5	155.9	164.1	151.2
Glazing area: half	82.8	75.2	69.6	70.5	74.6
Construction: very lightweight	117.1	107.5	100.4	102.6	109.3
Construction: heavyweight ($C_m=231.56 \text{ kJ/m}^2\text{K}$)	103.1	93.6	97.9	99.5	107.4
Construction: heavyweight, no insulation	134.7	107.3	120.9	123.2	148.9
Ventilation daily schedule	116.3	105.5	99.8	101.6	106.7
Ventilation Weekday/Weekends schedule	116.3	104.9	101.6	100.8	105.7
High ventilation rates (1.5 ach)	110.7	101.3	94.0	95.4	101.1
Low ventilation rates (0.3 ach)	121.5	112.3	106.1	108.1	113.1
Rotate 90° anticlockwise	117.6	104.4	101.2	102.5	107.1
Rotate 180° anticlockwise	118.8	104.0	96.4	98.4	103.0
Setpoint @ 26 °C	99.9	89.2	79.6	81.5	86.7
Setpoint @ 22 °C	133.7	125.6	119.1	121.2	125.9
Intermittent cooling 7-17.00h	99.0	80.4	84.0	84.3	83.2
Intermittent cooling 0-10.00h	99.0	33.1	60.1	59.3	56.8
Intermittent cooling (different periods @ 24 °C)	99.0	50.2	80.4	73.5	66.5

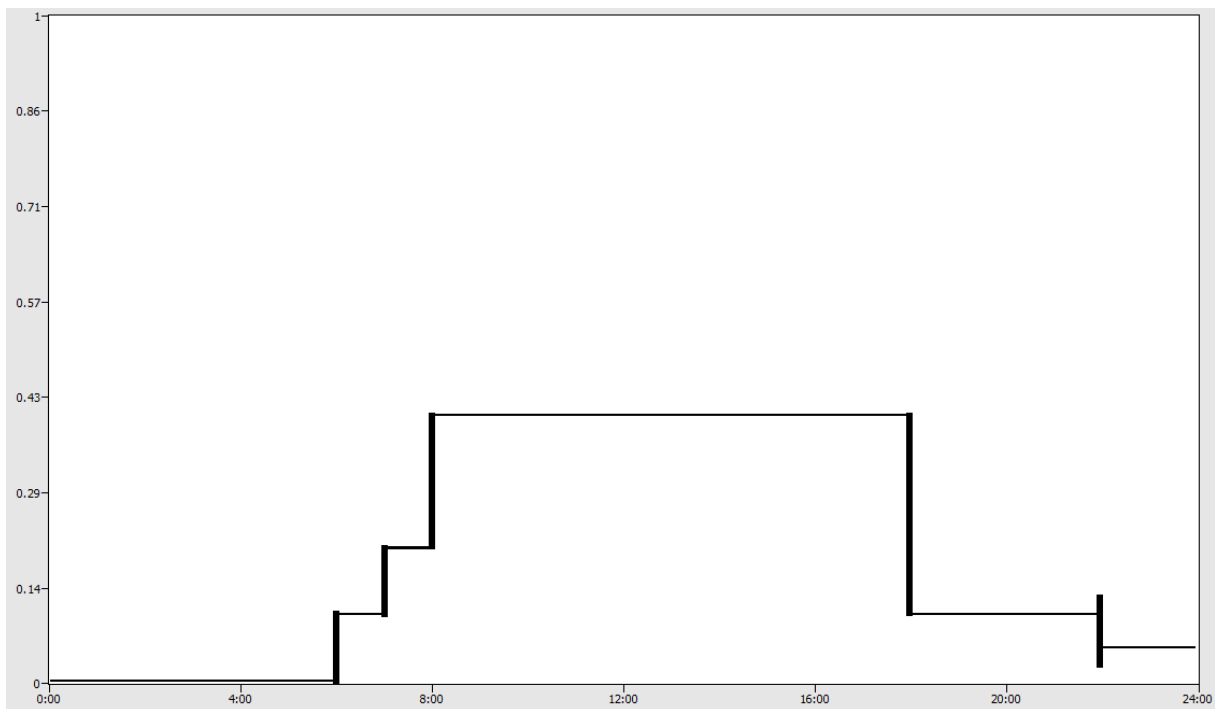
PRILOGA B: UPOŠTEVANI URNIKI OBRATOVANJA STAVBE



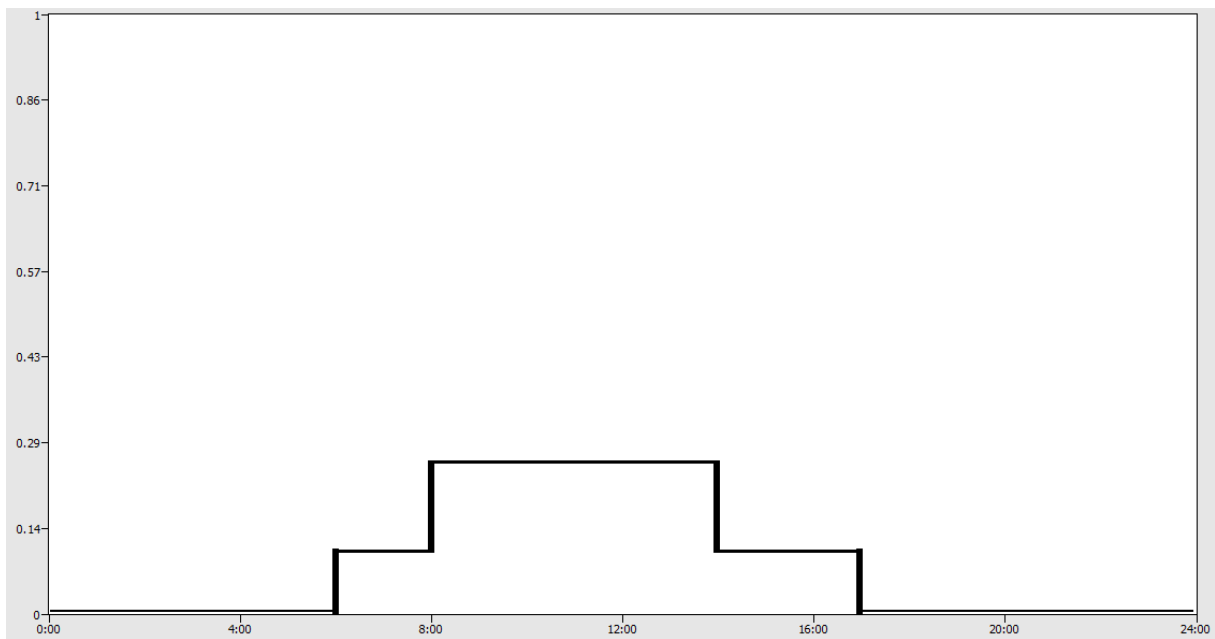
Grafikon B1: Urnik infiltracije zunanjega zraka: ponedeljek–sobota.



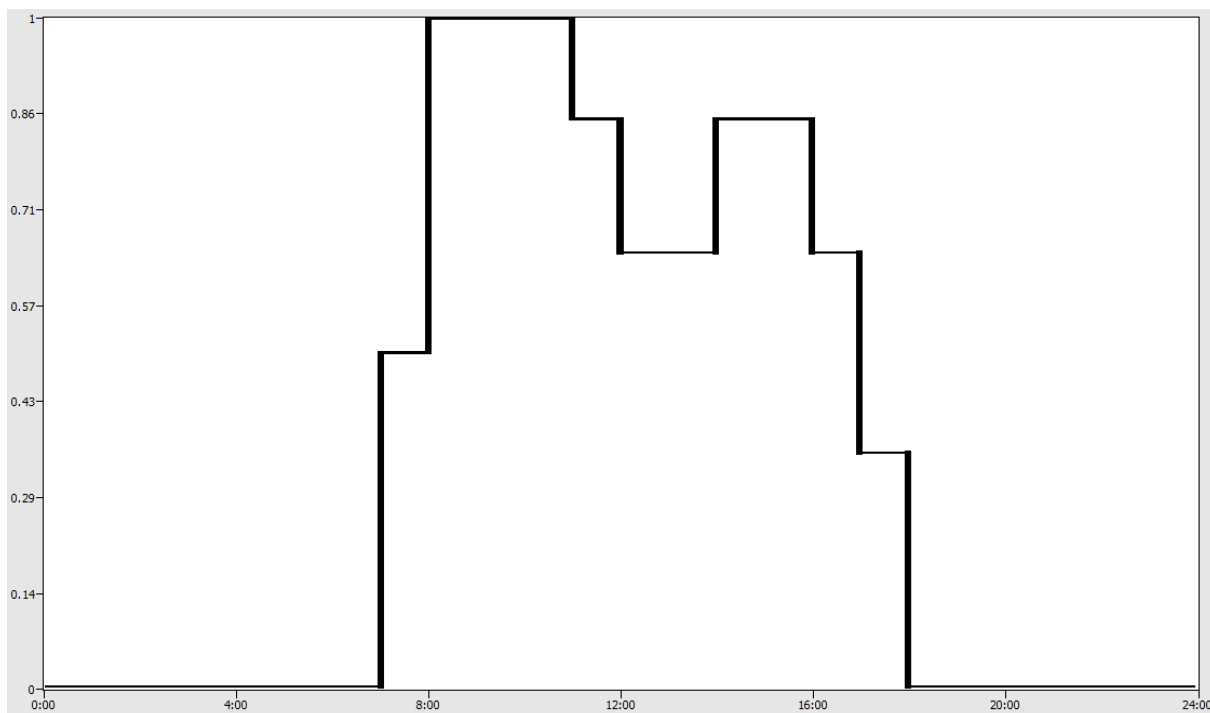
Grafikon B2: Urnik infiltracije zunanjega zraka: nedelja



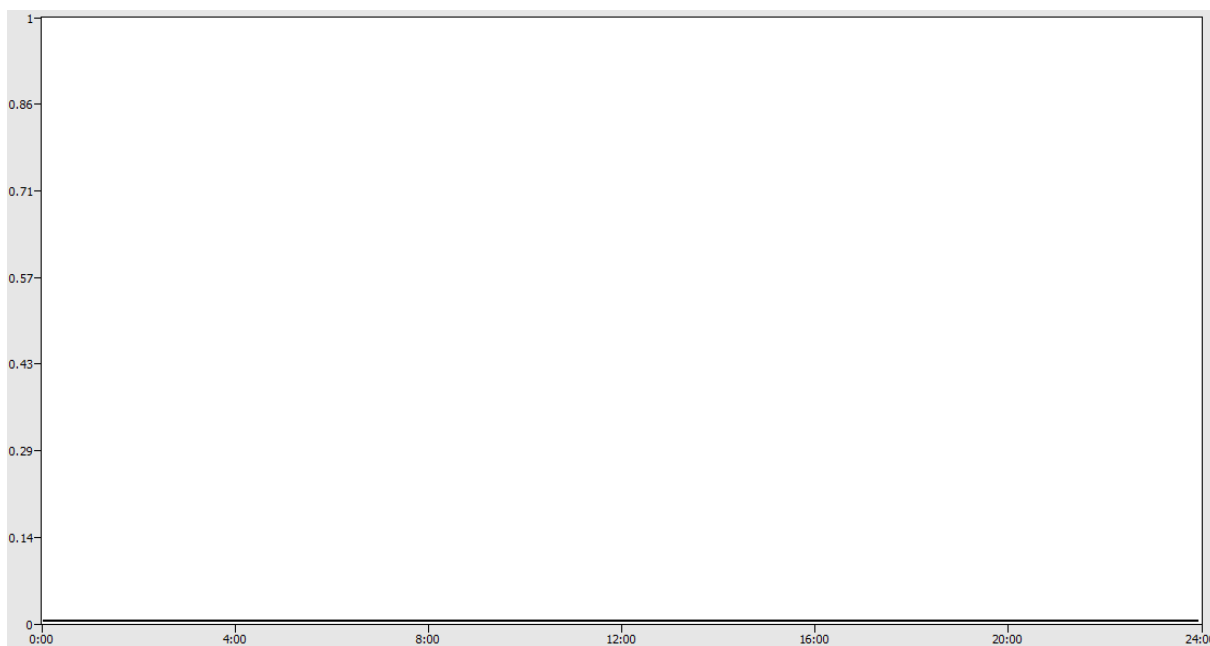
Grafikon B3: Urnik zasedenosti za sejne sobe: ponedeljek–petek.



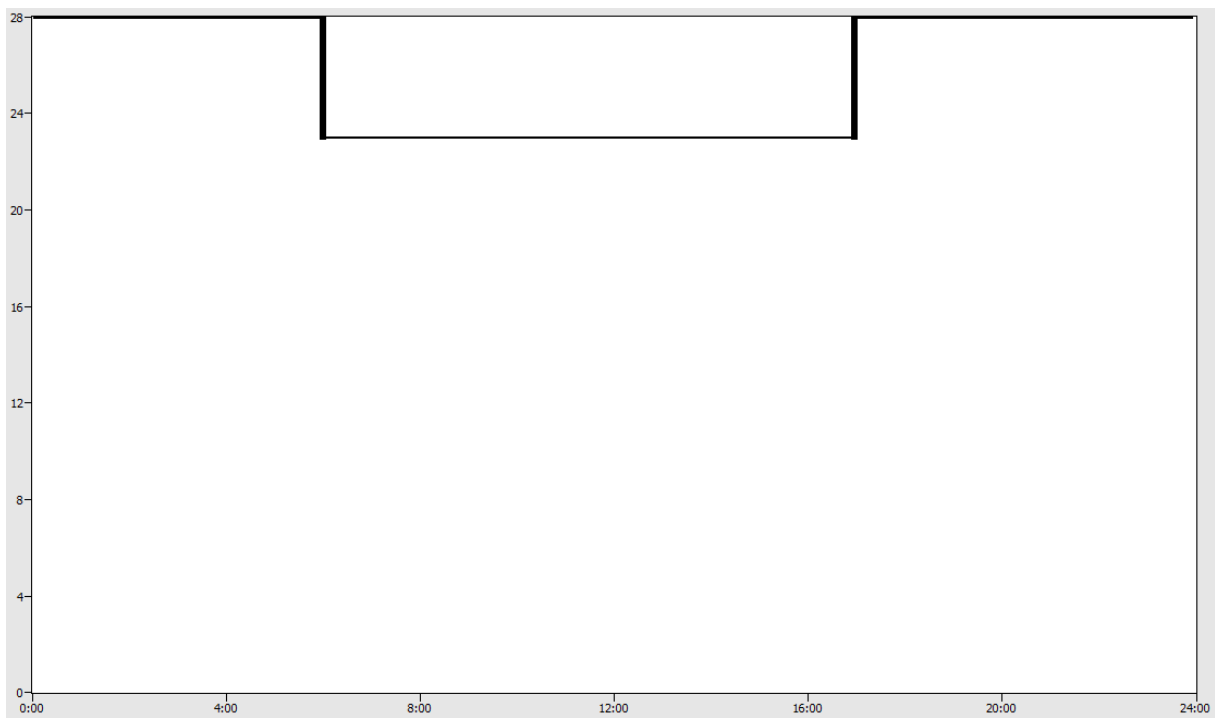
Grafikon B4: Urnik zasedenosti za sejne sobe: sobota.



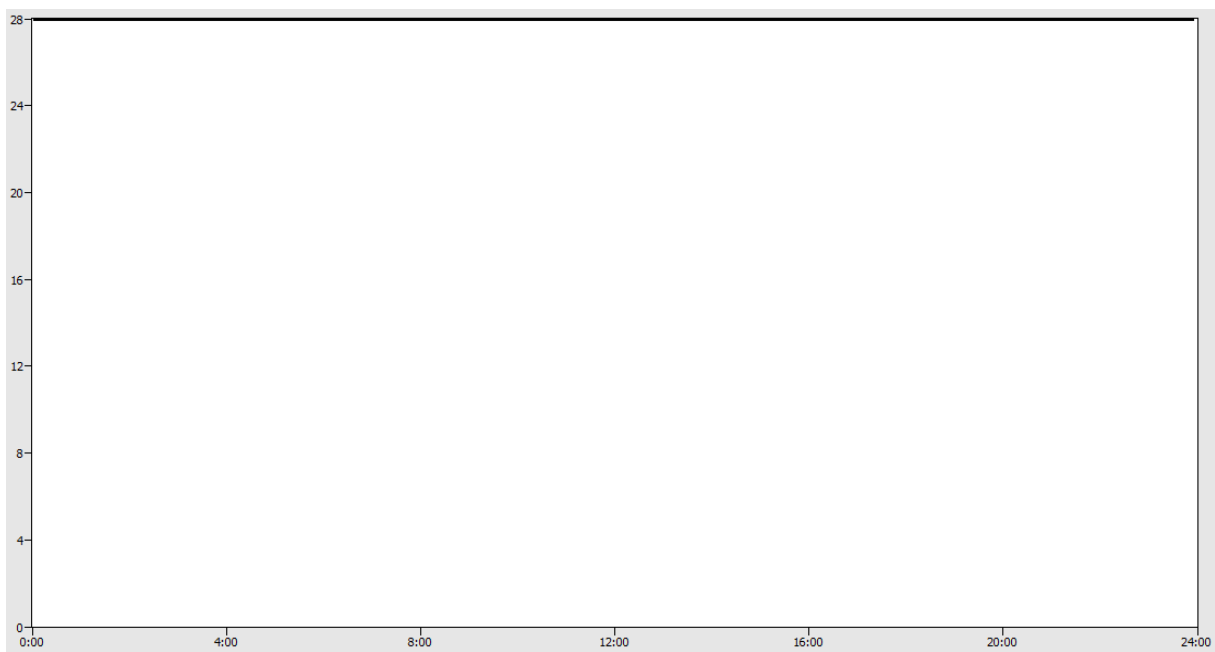
Grafikon B5: Urnik zasedenosti za pisarne: ponedeljek–petek.



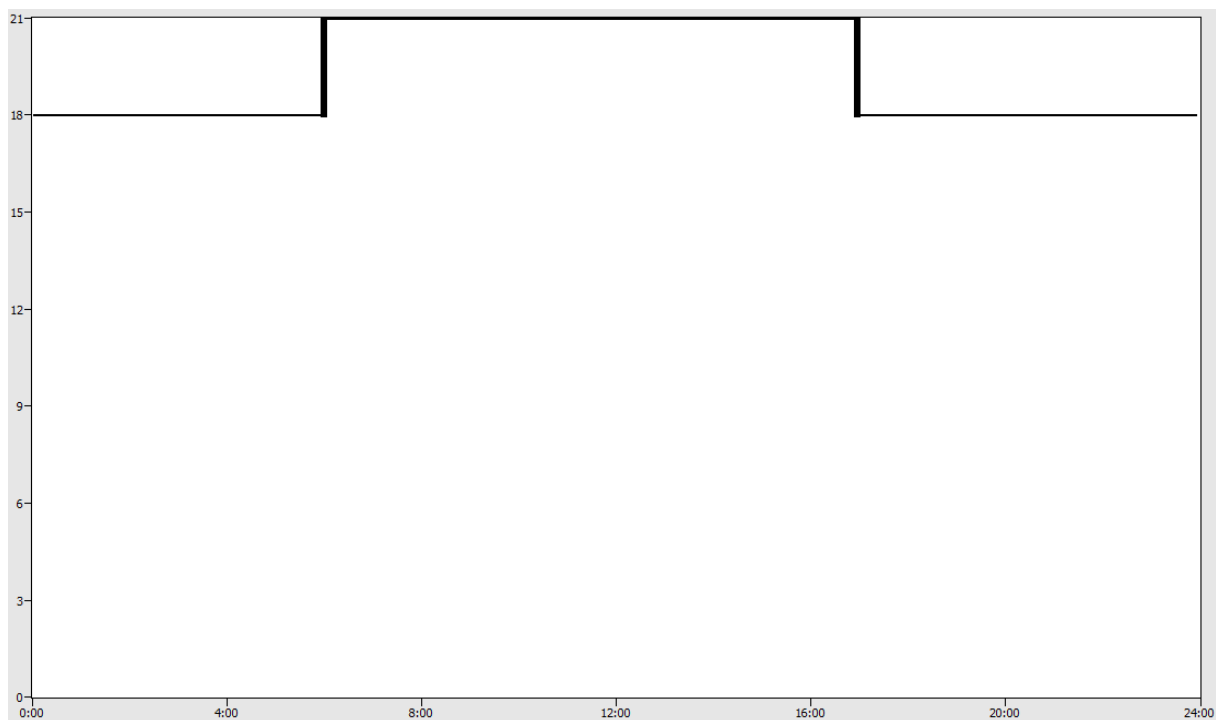
Grafikon B6: Urnik zasedenosti za sejno sobo in pisarne: nedelja



Grafikon B7: Urnik hlajenja za kondicionirane prostore v stavbi: ponedeljek–petek.



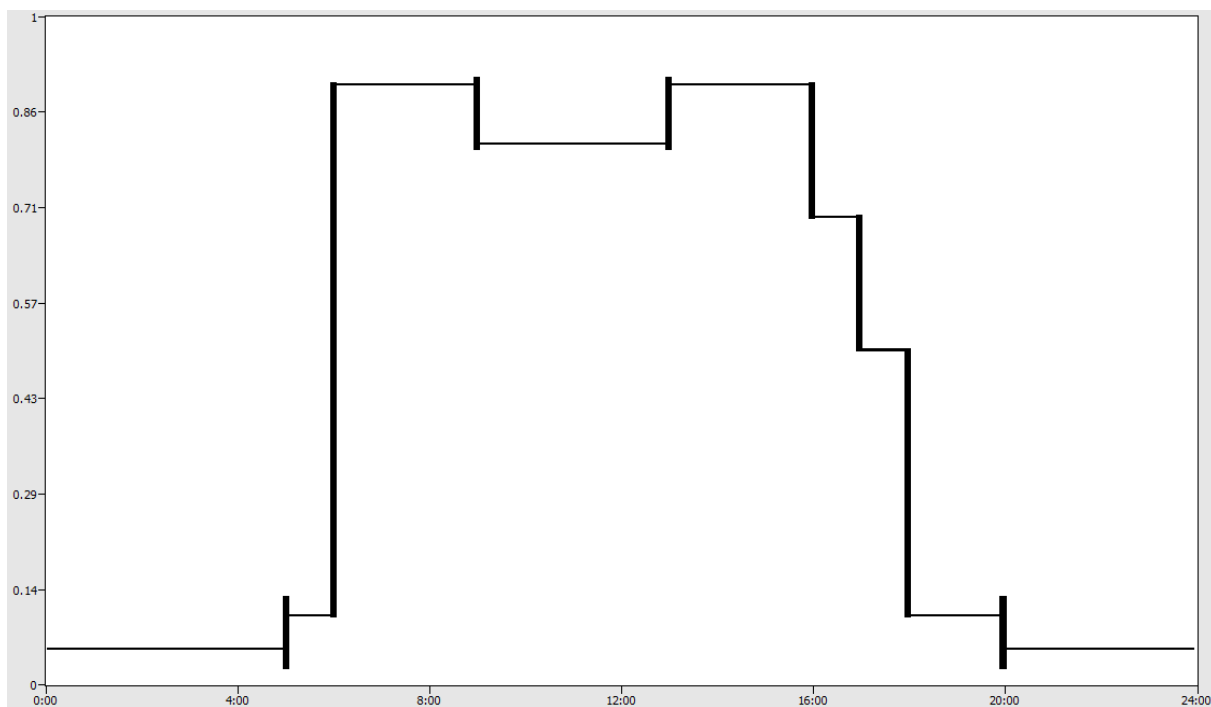
Grafikon B8: Urnik hlajenja za kondicionirane prostore v stavbi: sobota in nedelja.



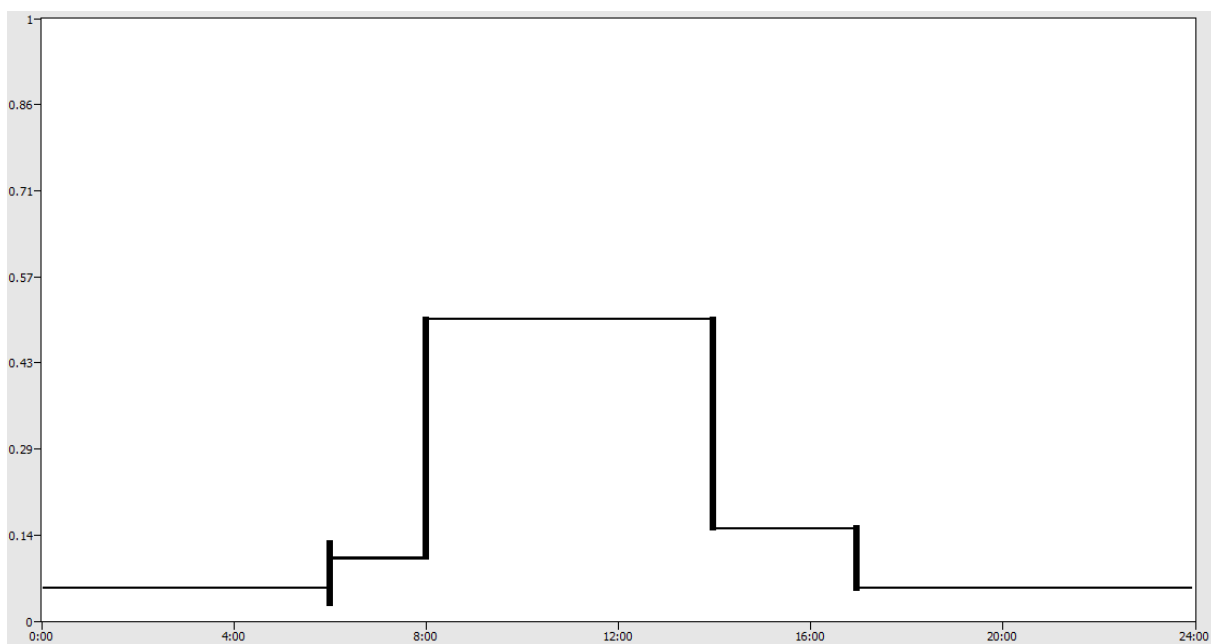
Grafikon B9: Urnik ogrevanja za kondicionirane prostore v stavbi: ponedeljek–petek.



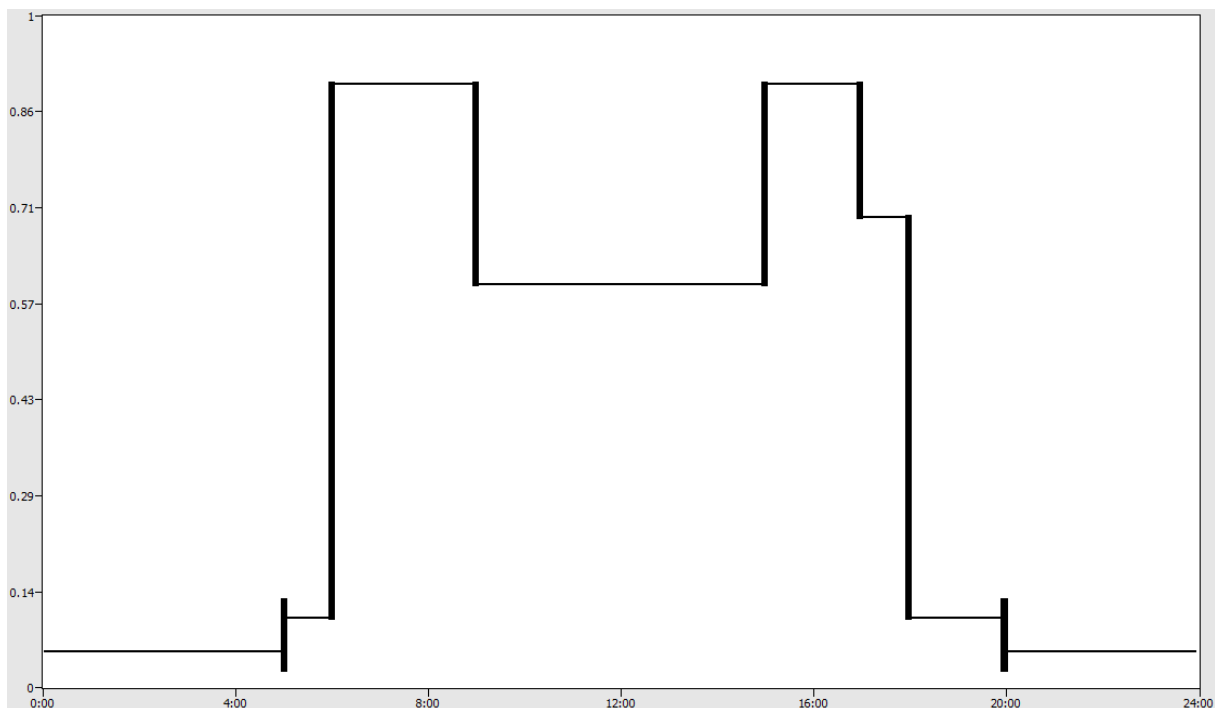
Grafikon B10: Urnik ogrevanja za kondicionirane prostore v stavbi: sobota–nedelja.



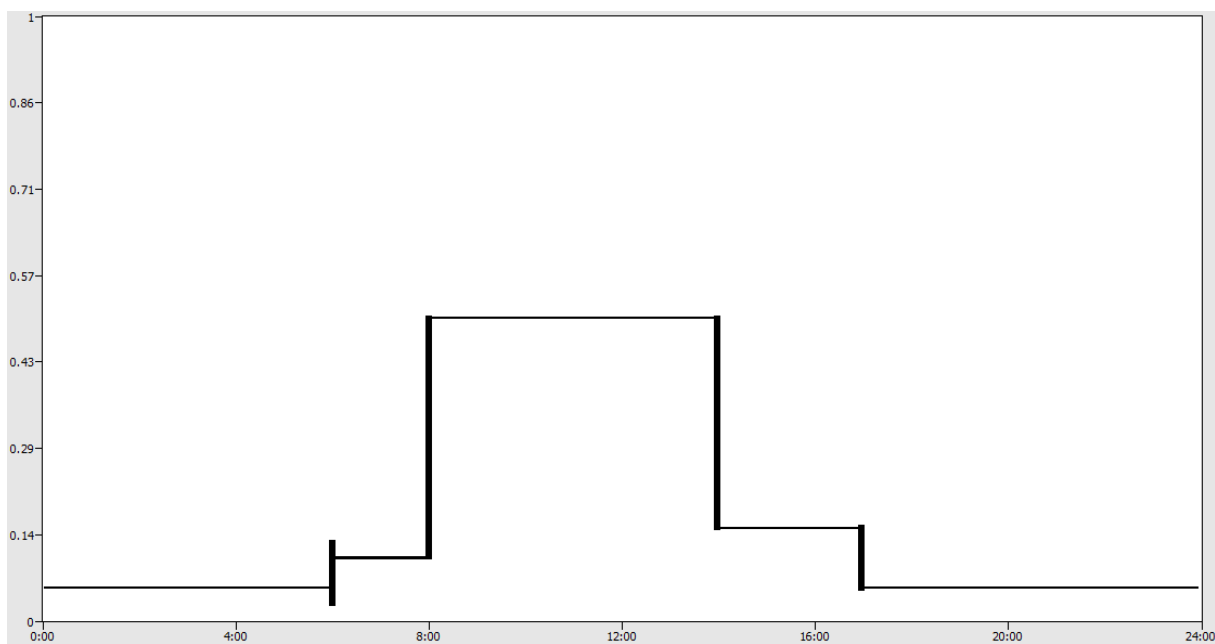
Grafikon B11: Urnik razsvetljave v jedru stavbe (hodniki, stopnišče, sanitarije): ponedeljek–petek.



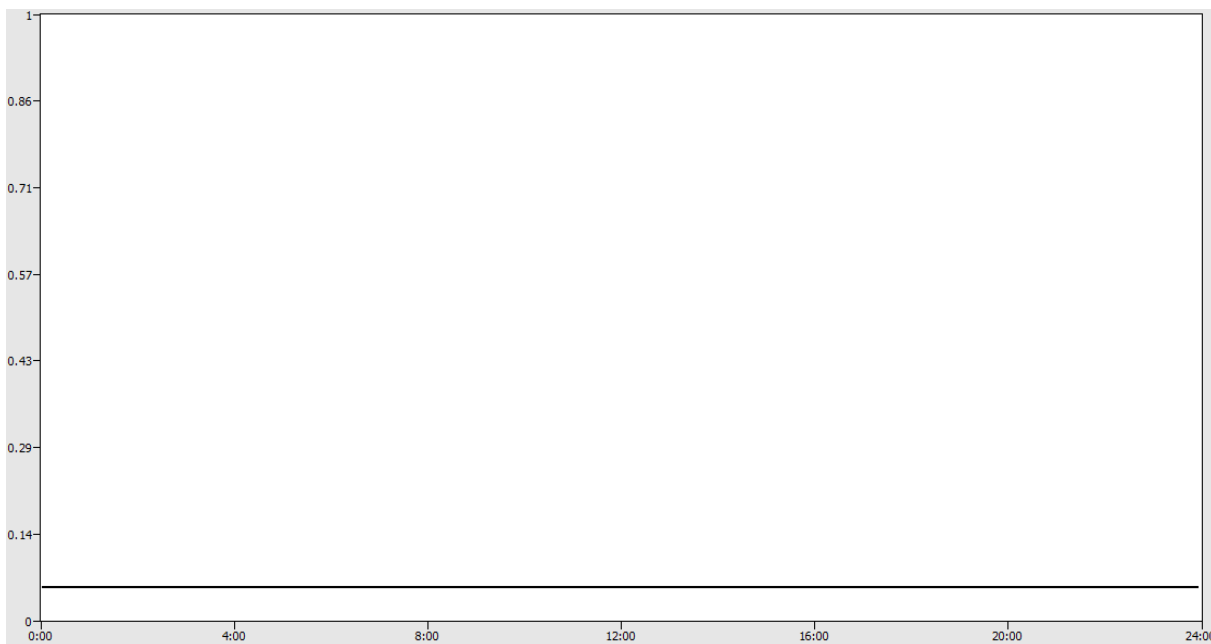
Grafikon B12: Urnik razsvetljave v jedru stavbe (hodniki, stopnišče, sanitarije): sobota.



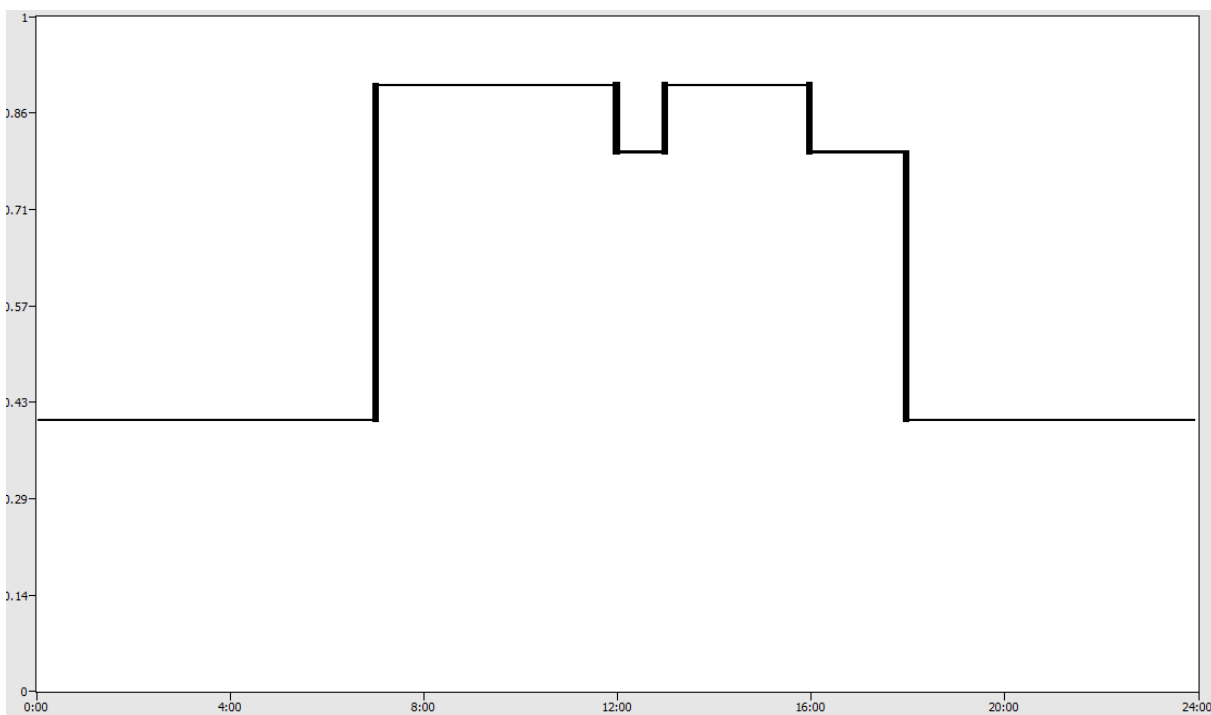
Grafikon B13: Urnik razsvetljave za obodne prostore v stavbe (pisarne, sejne sobe): ponedeljek–petek.



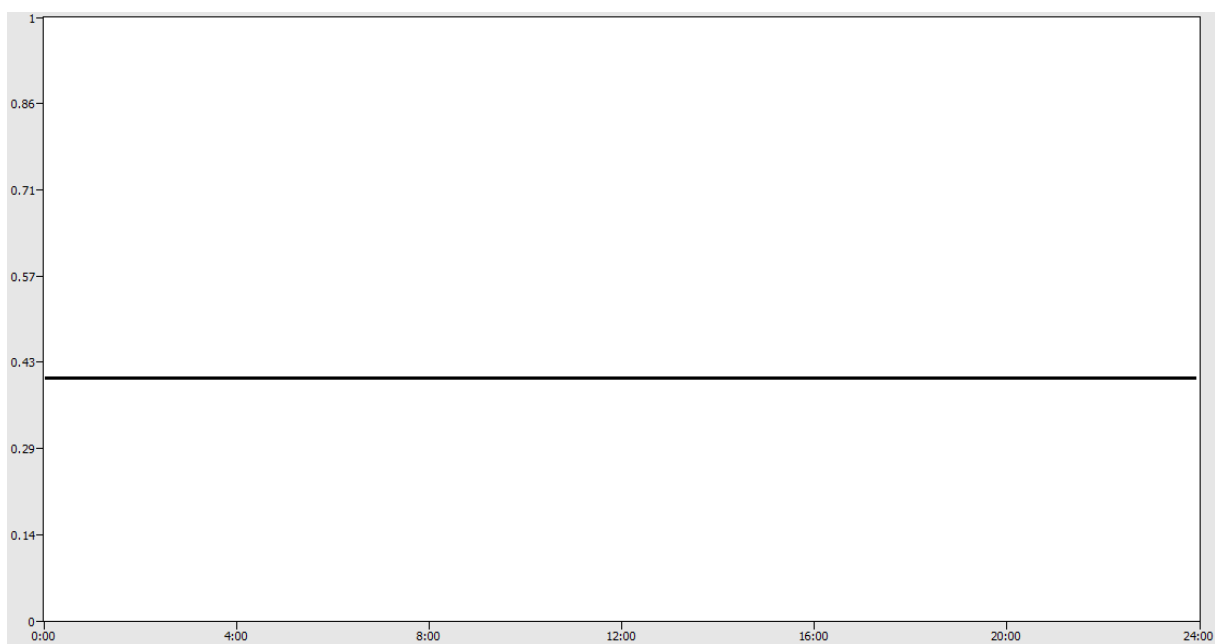
Grafikon B14: Urnik razsvetljave za obodne prostore v stavbe (pisarne, sejne sobe): ponedeljek–petek.



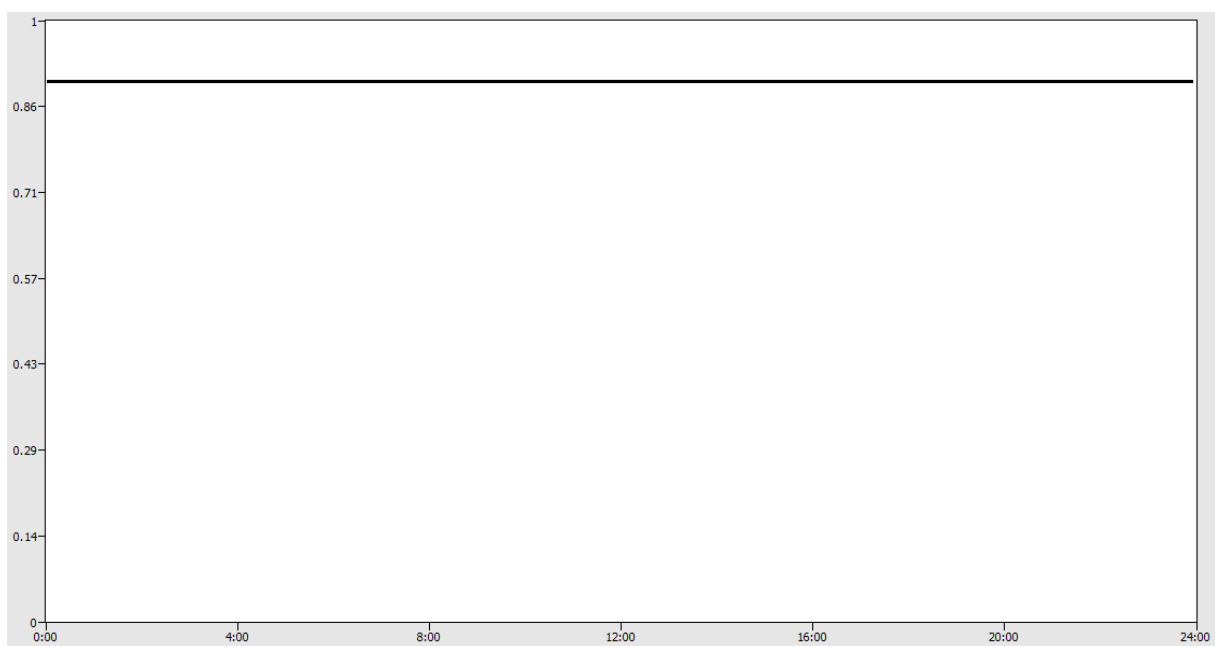
Grafikon B15: Urnik razsvetljave za prostore v jedru in na obodu stavbe: nedelja



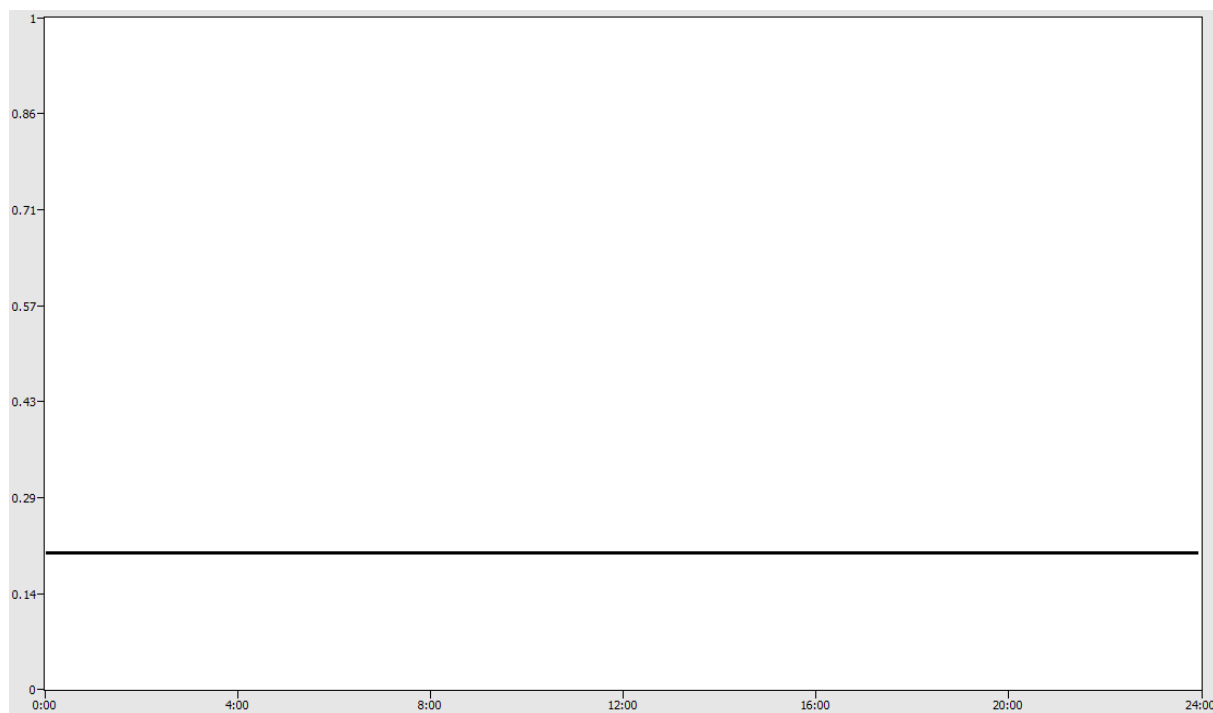
Grafikon B16: Urnik delovanja pisarniške opreme: ponedeljek–sobota



Grafikon B17: Urnik delovanja pisarniške opreme: nedelja



Grafikon B18: Urnik transparentnosti dreves (1 pomeni netransparentno, 0 pomeni popolnoma transparentno):
ponedeljek–nedelja med 1. majem in 1. oktobrom.



Grafikon B19: Urnik transparentnosti dreves (1 pomeni netransparentno, 0 pomeni popolnoma transparentno):
ponedeljek – nedelja med 2. oktobrom in 30. aprilom.

PRILOGA C: SPRIKAZ SESTAVE KONSTRUKCIJSKIH SKLOPOV

Preglednica C1: Dejansko stanje stavbe: sestava konstrukcijskih sklopov z relevantnimi materialnimi lastnostmi (materiali razvrščeni od notri proti zunaj oz. od zgoraj proti spodaj pri medetažnih sklopih), zahtevana maksimalna dovoljena vrednost toplotne prehodnosti po PURES-u in izračunana toplotna prehodnost.

Zunanja stena: severna in južna fasada		PURES: $U_{max} = 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$			
	d [cm]	λ [$\text{W/m}^2\text{K}^{-1}$]	ρ [kg/m^3]	c [J/kgK^{-1}]	
1.	Omet (apnena malta)	2	0,81	1600	1050
2.	AB stena	10	2,33	2500	960
3.	TI - porofen	5	0,04	50	1260
4.	Prezračevana zračna plast	4,5	/	/	/
5.	HI - Fasadne obloge iz umetne mase	0,5	0,2	800	1000
$U = 0,670 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$		PO PURES-u NE USTREZA			
Zunanja stena: vzhodna in zahodna fasada		PURES: $U_{max} = 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$			
	d [cm]	λ [$\text{W/m}^2\text{K}^{-1}$]	ρ [kg/m^3]	c [J/kgK^{-1}]	
1.	Omet (apnena malta)	2	0,81	1600	1050
2.	AB stena	15	2,33	2500	960
3.	TI - porofen	5	0,04	50	1260
4.	Prezračevana zračna plast	4,5	/	/	/
5.	HI-Kamnite fasadne obloge	3	2,5	2,200	900
$U = 0,660 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$		PO PURES-u NE USTREZA			
Zunanja stena: parapet pritličja		PURES: $U_{max} = 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$			
	d [cm]	λ [$\text{W/m}^2\text{K}^{-1}$]	ρ [kg/m^3]	c [J/kgK^{-1}]	
1.	Omet (apnena malta)	2	0,81	1600	1050
2.	AB stena	15	2,33	2500	960
3.	TI - porofen	5	0,04	50	1260
4.	HI – marmorne fasadne obloge	3	2,5	2200	900

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice C1

$U = 0,676 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$		PO PURES-u NE USTREZA			
Streha: nepohodna		PURES: $U_{max} = 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$			
	d [cm]	λ [$\text{W/m}^2\text{K}^{-1}$]	ρ [kg/m^3]	c [J/kgK^{-1}]	
1.	AB plošča	10	2,33	2500	960
2.	Naklonski beton C8/10	6	1,16	2000	960
3.	TI - EPS	3	0,035	38	1260
4.	HI –dvojni bitumenski trak	1	0,190	1300	1460
$U = 0,87 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$		PO PURES-u NE USTREZA			
Streha: pohodna		PURES: $U_{max} = 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$			
	d [cm]	λ [$\text{W/m}^2\text{K}^{-1}$]	ρ [kg/m^3]	c [J/kgK^{-1}]	
1.	Obešen strop (mavčno kart. plošče)	1	0,23	900	850
2.	AB plošča	5	2,33	2500	960
3.	Naklonski beton C8/10	6	1,16	2000	960
4.	TI – EPS (Fragmat 150)	3	0,035	20	1260
5.	HI –dvojni bitumenski trak	1	0,190	1300	1460
6.	Prodec	8	0,81	1700	840
$U = 0,763 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$		PO PURES-u NE USTREZA			
Tla nad neogrevanim prostorom: pritličje		PURES: $U_{max} = 0,35 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$			
	d [cm]	λ [$\text{W/m}^2\text{K}^{-1}$]	ρ [kg/m^3]	c [J/kgK^{-1}]	
1.	Tlak iz kamna	3	2,5	2200	900
2.	Cementna malta	2	0,81	1600	1050
3.	Perlit beton	5	0,042	2000	960
4.	AB plošča	18	2,33	2500	960
$U = 0,81 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$		PO PURES-u NE USTREZA			
Medetažna konstrukcija: nadzemne etaže		PURES: $U_{max} = 0,9 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$			

se nadaljuje...

... nadaljevanje preglednice C1

	d [cm]	λ [W/m ² K ⁻¹]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK ⁻¹]	
1. Tapison	0,5	2,5	2200	900	
2. Cementni estrih	4,5	1,4	2000	1000	
3. ZI-mineralna volna	2	0,039	180	840	
4. AB plošča	5	2,33	2500	960	
5. Zračni prostor (instalacije)	30	1,67	1	1000	
5. Obešen strop (mavčno kart. plošče)	1	0,23	900	850	
U = 0,87 W/m²K⁻¹		PO PURES-u USTREZA			
Tla nad zunanjim zrakom: previs nad pritličju		PURES: U_{max} = 0,30 W/m²K⁻¹			
	d [cm]	λ [W/m ² K ⁻¹]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK ⁻¹]	
1. Tapison	0,5	2,5	2200	900	
2. Cementni estrih	4,5	1,4	2000	1000	
3. ZI-mineralna volna	2	0,039	180	840	
4. AB plošča	5	2,33	2500	960	
5. Obešen strop (mavčno kart. plošče)	1	0,23	900	850	
U = 0,87 W/m²K⁻¹		PO PURES-u NE USTREZA			
Zunanja stena pod terenom		PURES: U_{max} = 0,35 W/m²K⁻¹			
	d [cm]	λ [W/m ² K ⁻¹]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK ⁻¹]	
1. AB stena	40	2,33	2500	960	
2. HI - bitumenska lepenka	4,5	0,190	1100	1460	
3. Prodec (nasutje)	15	0,81	1700	840	
U = 1,32 W/m²K⁻¹		PO PURES-u NE USTREZA			
Medetažna konstrukcija: Tla klet -1		PURES: U_{max} = 0,9 W/m²K⁻¹			
1. Tlak iz kamna	3	2,5	2200	900	
2. Cementna malta	2	0,81	1600	1050	
3. AB plošča	18	2,33	2500	960	
U = 3,01 W/m²K⁻¹		PO PURES-u NE USTREZA			
Tla v stiku s terenom: Tla klet -2		PURES: U_{max} = 0,35 W/m²K⁻¹			
	d [cm]	λ [W/m ² K ⁻¹]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK ⁻¹]	
1. Liti asfalt	2	0,75	2300	920	
se nadaljuje ...					
... nadaljevanje preglednice					
2. Betonski naboj	10	0,151	2200	960	
3. HI – bitumenska lepenka	1	0,19	1100	1460	
4. Podložni beton	10	1,51	2200	960	
5. Prodnato nasutje	15	0,81	1700	840	
U = 1,71 W/m²K⁻¹		PO PURES-u NE USTREZA			

Preglednica C2: Toplotno izolirano stanje stavbe: sestava konstrukcijskih sklopov z relevantnimi materialnimi lastnostmi (materiali razvrščeni od notri proti zunaj oz. od zgoraj proti spodaj pri medetažnih sklopih), zahtevana maksimalna dovoljena vrednost toplotne prehodnosti po PURES-u in izračunana toplotna prehodnost.

Zunanja stena: severna in južna fasada		PURES: U_{max} = 0,28 W/m²K⁻¹			
	d [cm]	λ [W/mK ⁻¹]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK ⁻¹]	
1. Mavčno kart, plošča s finalno obdelavo	1,8	0,23	900	850	
2. Zračna plast (instalacijska ravnina)	2	0,11	1,2	1000	
3. Parna ovira	0,05	0,22	260	1700	
4. TI – kamena volna	10	0,035	80	1030	
5. AB stena	10	2,33	2500	960	
6. TI – kamena volna	5	0,035	80	1030	
7. Paropropustna vodonepropustna. folija	0,038	0,23	326	1350	
8. Prezračevana zračna plast	4,5	/	/	/	
9. HI - Fasadne obloge iz umetne mase	0,5	0,2	800	1000	
U = 0,218 W/m²K⁻¹		PO PURES-u USTREZA			
Zunanja stena: vzhodna in zahodna fasada		PURES: U_{max} = 0,28 W/m²K⁻¹			

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice C2

		d [cm]	λ [W/m ² K ⁻¹]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK ⁻¹]
1.	Mavčno kart, plošča s finalno obdelavo	1,8	0,23	900	850
2.	Zračna plast (instalacijska ravnina)	2	0,11	1,2	1000
3.	Parna ovira	0,05	0,22	260	1700
4.	TI – kamena volna	10	0,035	80	1030
5.	AB stena	15	2,33	2500	960
6.	TI – kamena volna	5	0,035	80	1030
7.	Paropropustna vodonepropustna. folija	0,038	0,23	326	1350
8.	Prezračevana zračna plast	4,5	/	/	/
9.	HI-Kamnite fasadne obloge	3	2,5	2,200	900
U = 0,218 W/m²K⁻¹		PO PURES-u USTREZA			
Zunanja stena: parapet pritličja		PURES: U_{max} = 0,28 W/m²K⁻¹			
		d [cm]	λ [W/m ² K ⁻¹]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK ⁻¹]
1.	Mavčno kart, plošča s finalno obdelavo	1,8	0,23	900	850
2.	Zračna plast (instalacijska ravnina)	2	0,11	1,2	1000
3.	Parna ovira	0,05	0,22	260	1700
4.	TI – kamena volna	8	0,035	80	1030
5.	AB stena	15	2,33	2500	960
6.	TI – kamena volna	5	0,035	80	1030
4.	HI – marmorne fasadne obloge	3	2,5	2200	900
U = 0,242 W/m²K⁻¹		PO PURES-u USTREZA			
Streha: nepohodna		PURES: U_{max} = 0,20 W/m²K⁻¹			
		d [cm]	λ [W/m ² K ⁻¹]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK ⁻¹]
1.	AB plošča	10	2,33	2500	960
2.	Naklonski beton C8/10	6	1,16	2000	960
3.	Parna zapora	0,15	0,17	1100	1700
4.	TI - EPS	12	0,035	30	1500
5.	TI - EPS	5	0,035	30	1500
6.	HI – folija iz umetne mase	0,7	0,17	900	1000
U = 0,195 W/m²K⁻¹		PO PURES-u USTREZA			
Streha: pohodna		PURES: U_{max} = 0,20 W/m²K⁻¹			
		d [cm]	λ [W/m ² K ⁻¹]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK ⁻¹]
1.	Obešen strop (mavčno kart. plošče)	1	0,23	900	850
2.	AB plošča	5	2,33	2500	960
3.	Naklonski beton C8/10	6	1,16	2000	960
4.	Parna zapora	0,15	0,17	1100	1700
5.	TI - EPS	12	0,035	30	1500
6.	TI - EPS	5	0,035	30	1500
7.	Poliesterski filc	0,5	0,1	200	800
8.	HI – bitumenska lepenka	1	0,17	1100	1700
9.	Prodec	8	0,81	1700	840
U = 0,191 W/m²K⁻¹		PO PURES-u USTREZA			
Tla nad neogrevanim prostorom: pritličje		PURES: U_{max} = 0,35 W/m²K⁻¹			
		d [cm]	λ [W/m ² K ⁻¹]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK ⁻¹]
1.	Tlak iz kamna	3	2,5	2200	900
2.	Cementna malta	2	0,81	1600	1050
3.	Perlit beton	5	0,042	2000	960
4.	AB plošča	18	2,33	2500	960
5.	Parna ovira	0,15	0,17	1100	1700
6.	TI – kamena volna	8	0,035	30	1030
7.	Mavčno kartonske plošče	0,23	900	850	0,23
U = 0,28 W/m²K⁻¹		PO PURES-u USTREZA			
Medetažna konstrukcija: nadzemne etaže		PURES: U_{max} = 0,9 W/m²K⁻¹			
		d [cm]	λ [W/m ² K ⁻¹]	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK ⁻¹]
1.	Tapison	0,5	2,5	2200	900

se nadaljuje ...

... nadaljevanje preglednice C2

2.	Cementni estrih	4,5	1,4	2000	1000
3.	ZI-mineralna volna	2	0,039	180	840
4.	AB plošča	5	2,33	2500	960
5.	Zračni prostor (instalacije)	30	1,67	1	1000
5.	Obešen strop (mavčno kart. plošče)	1	0,23	900	850
U = 0,87 W/m²K⁻¹		PO PURES-u USTREZA			
Tla nad zunanjim zrakom: previs nad pritličju		PURES: U_{max} = 0,30 W/m²K⁻¹			
		d [cm]	λ [W/m²K⁻¹]	ρ [kg/m³]	c [J/kgK⁻¹]
1.	Tapison	0,5	2,5	2200	900
2.	Cementni estrih	4,5	1,4	2000	1000
3.	ZI-mineralna volna	2	0,039	180	840
4.	AB plošča	5	2,33	2500	960
5.	TI – kamena volna	10	0,035	30	1030
5.	Obešen strop (mavčno kart. plošče)	1	0,23	900	850
U = 0,245 W/m²K⁻¹		PO PURES-u USTREZA			
Zunanja stena pod terenom		PURES: U_{max} = 0,35 W/m²K⁻¹			
		d [cm]	λ [W/m²K⁻¹]	ρ [kg/m³]	c [J/kgK⁻¹]
1.	AB stena	40	2,33	2500	960
2.	HI - bitumenska lepenka	4,5	0,190	1100	1460
3.	Suh prodec (nasutje)	15	0,81	1700	840
U = 1,32 W/m²K⁻¹		PO PURES-u NE USTREZA			
Medetažna konstrukcija: Tla klet -1		PURES: U_{max} = 0,9 W/m²K⁻¹			
1.	Tlak iz kamna	3	2,5	2200	900
2.	Cementna malta	2	0,81	1600	1050
3.	AB plošča	18	2,33	2500	960
U = 3,01 W/m²K⁻¹		PO PURES-u NE USTREZA			
Tla v stiku s terenom: Tla klet -2		PURES: U_{max} = 0,35 W/m²K⁻¹			
		d [cm]	λ [W/m²K⁻¹]	ρ [kg/m³]	c [J/kgK⁻¹]
1.	Liti asfalt	2	0,75	2300	920
2.	Betonski naboj	10	0,151	2200	960
3.	HI – bitumenska lepenka	1	0,19	1100	1460
4.	Podložni beton	10	1,51	2200	960
5.	Prodnato nasutje	15	0,81	1700	840
U = 1,71 W/m²K⁻¹		PO PURES-u NE USTREZA			