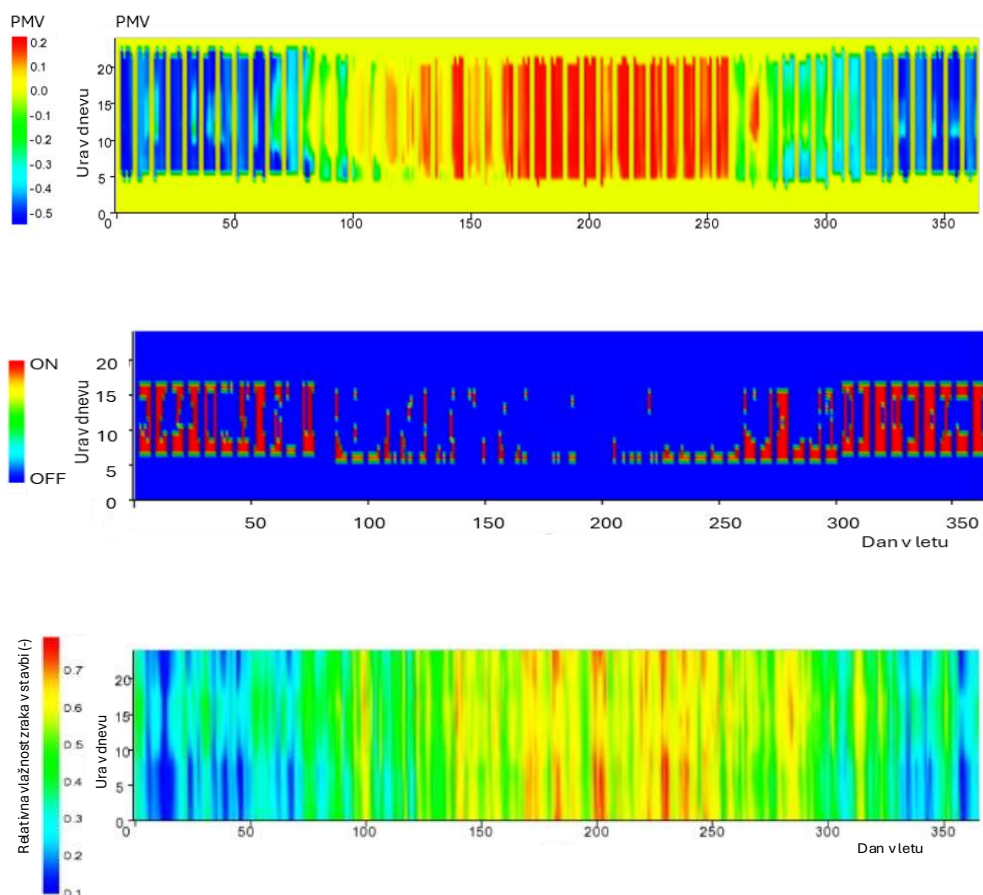


Priročnik za dinamično modeliranje energijske učinkovitosti stavb (BEM)



Priročnik za dinamično modeliranje energijske učinkovitosti stavb (BEM)

NAROČNIK: Ministrstvo za naravne vire in prostor Republike Slovenije
Dunajska cesta 48
1000 Ljubljana

IZVAJALEC: Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo
Laboratorij za okoljske tehnologije v zgradbah (LOTZ)
Aškerčeva ulica 6
1000 Ljubljana

AVTORJI: prof. dr. Sašo Medved, u.d.i.s.
dr. Suzana Domjan, u.d.i.s.

LETO IZDAJE: 2025

KAZALO

1. NAMEN PRIROČNIKA	1
2. FIZIKALNE OSNOVE STATIČNEGA IN DINAMIČNEGA MODELIRANJA ENERGIJSKIH LASTNOSTI STAVB 4	
2.1. Statično modeliranje (toplotnega odziva stavb).....	5
2.2. Polno dinamično modeliranje / modeliranje CFD (toplotnega odziva stavb).....	5
2.3. Poseben primer – poenostavljeno dinamično modeliranje	7
2.4. Modeliranje stavb skladno s PURES-3 in Tehnično smernico TSG-1-004	10
2.5. Referenčna prostora	11
3. DINAMIČNO MODELIRANJE ZUNANJEGA OKOLJA	14
3.1. zbirke meteoroloških podatkov	14
3.2. Sončno obsevanje – solarna geometrija	16
3.3. Sončno obsevanje – urni in sončni čas	17
3.4. Sončno sevanje na vodoravno ravnino – priprava podatkov za BEM	18
3.5. Osvetljenost zunanje (vodoravne) površine	21
3.6. Temperatura zemljine.....	24
3.7. Hitrost vetra v grajenem okolju	25
3.8. Temperatura neba in faktor sevalne izmenjave (toplotnega toka).....	26
4. DINAMIČNO MODELIRANJE NOTRANJEGA OKOLJA	31
4.1. Standardizirani razredi kakovosti notranjega okolja (IEQ).....	31
4.2. IEQ: Toplotno ugodje v notranjem okolju (Indoor Environmental Quality – IEQ)	32
4.2.1. Primer dinamičnega modeliranja toplotnega okolja	34
4.3. Svetlobno notranje okolje	35
4.4. Kakovost zraka (Indoor Air Quality - IAQ).....	36
4.4.1. Dinamično modeliranje koncentracije onesnažil v stavbi.....	38
4.4.2. Zaščita pred hrupom: dinamično modeliranje ravni zvočnega tlaka pri naravnem in hibridnem prezračevanju	41
5. DINAMIČNO MODELIRANJE GRADNIKOV TOPLOTNEGA OVOJA STAVB	45
5.1. Dinamično modeliranje toplotnega odziva netransparentnih gradnikov.....	45
5.1.1. Primerjava statičnega in dinamičnega modeliranja prehoda toplote	48
5.2. Modeliranje toplotnega odziva netransparentnih gradnikov s fazno spremenljivimi snovmi (FSS)	51
5.3. Modeliranje ozelenjenih gradnikov toplotnega ovoja stavbe	53
5.4. Selektivne optične lastnosti površin netransparentnih gradnikov stavb.....	55
5.5. Modeliranje transparentnih gradnikov toplotnega ovoja stavb	58
5.6. Modeliranje senčenja gradnikov toplotnega ovoja stavb.....	62
5.7. Modeliranje toplotnih mostov	64
6. DINAMIČNO MODELIRANJE STAVB	69
6.1. Potrebna količina toplote za ogrevanje $Q_{H,nd}$ in odvedene toplote za hlajenje $Q_{C,nd}$	69

6.2. Parametrično modeliranje.....	72
6.3. Modeliranje naravnega in hibridnega prezračevanja in hlajenja s prezračevanjem	73
6.3.1. Enostransko in prečno prezračevanje.....	74
6.3.2. Zemeljski prenosniki toplote (GHX) za aktivno naravno ogrevanje in hlajenje	76
7. DINAMIČNO MODELIRANJE TEHNIČNIH STAVBNIH SISTEMOV	79
7.1. Modeliranje tehnologij za izkoriščanje sončne energije na stavbi	79
7.1.1. Dinamično modeliranje solarnih toplotnih sistemov (TSOL)	79
7.1.1.1. Primer dinamičnega modeliranja TSOL	83
7.1.2. Modeliranje proizvodnje električne energije s fotonapetostnimi sistemi (PV)	84
7.1.2.1. Primer dinamičnega modeliranja FIPV	85
7.2. Dinamično modeliranje generatorjev toplotnih črpalk za ogrevanje in hlajenje	87
7.2.1. Kazalniki učinkovitosti in dinamično modeliranje toplotnih črpalk	88
7.2.2. Primer 1. Modeliranje ogrevanja s TČ v primerjavi z idealnim generatorjem toplote.....	90
7.2.3. Primer 2. Modeliranje ogrevanja s TČ	92
7.3. Dovedena energija za TSS mehanskega prezračevanja	93
7.4. Dinamično modeliranje prezračevalnega sistema.....	95
7.5. Dinamično modeliranje prezračevalnega sistema, ki je nadgrajen v toplozračni ogrevalni sistem.....	97
7.6. Dinamično modeliranje prezračevalnega sistema s hlapilnim hlajenjem	99
8. SKLEP	104
8.1. Kazalniki energijske učinkovitosti modelirane stavbe po PURES-3.....	107
8.1.1. Kazalniki učinkovite rabe energije za področje gradbene fizike	107
8.1.2. Kazalniki učinkovite rabe energije za področje pretvarjanja energij	108

1. NAMEN PRIROČNIKA

V priročniku o dinamičnem modeliranju stavb se njihovi načrtovalci seznanijo s fizikalnimi modeli za napovedi vrednosti spremenljivk, ki vplivajo na kakovost notranjega okolja in rabo energije v stavb, ter z razlikami med statičnim in dinamičnim modeliranjem odziva gradnikov in stavb, ki se izvede pri časovno spreminjajočih dejavnikih v zunanjem in notranjem okolju.

Primeri dinamičnega modeliranja, prikazani v priročniku, so izvedeni z upoštevanjem minimalnih zahtev in metodologije, ki jo opredeljuje Direktiva (EU) 2024/1275 Evropskega parlamenta in Sveta z dne 24. aprila 2024 o energetske učinkovitosti stavb (UL L št. 2024/1275 z dne 8. 5. 2024; v nadaljnjem besedilu direktiva in EPBD) in je zajeta v tehničnih podpornih standardih EPBD, Pravilniku o učinkoviti rabi energije v stavbah (Uradni list RS, št. 70/22, 161/22, 129/23 in 103/24; v nadaljnjem besedilu: PURES-3) in pripadajoči tehnični smernici TSG-1-004. Predvideno je, da bo dinamično modeliranje po prehodnem obdobju treba uporabiti za dokazovanje energetske učinkovitosti energetske zahtevnih stavb s kazalniki, ki jih predpisuje PURES-3 (slika 1). Teh kazalnikov, predvsem pa specifične tehnologije učinkovite rabe energije (URE) in izkoriščanja obnovljivih virov energije (OVE), ni mogoče ustrezno določiti s statičnim modeliranjem.

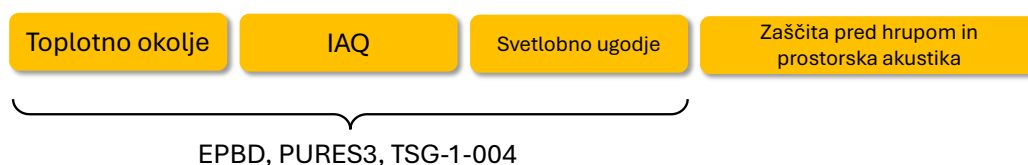
Kazalniki energetske učinkovitosti stavb za področje gradbene fizike		energetsko nezahtevna stavba	energetsko manj zahtevna stavba	energetsko zahtevna stavba
	oznaka kazalnika			
1	toplotne prehodnosti gradnikov toplotnega ovoja stavbe	U (W/(m ² K))	da	da
2	linijske (Ψ_{fa}) in točkovne (χ_{fa}) toplotne prehodnosti toplotnih mostov	Ψ_{fa} (W/(m K)) χ_{fa} (W/K)	ne	da ³
3	prehod vodne pare v gradbenih konstrukcijah		da	da
4	faktor površinske temperature gradnikov toplotnega ovoja stavbe	f_{RS} (-)	da ⁴	da ⁵
5	faktor toplotne stabilnosti gradnikov toplotnega ovoja stavbe ⁶	f (-)	ne	da
6	specifični koeficient transmisij toplinskih izgub	H_{tr} (W/(m ² K))	ne	da
7	skupna prehodnost sončnega sevanja transparentnih površin na ovoju stavbe s senčili $g_{tot,ef}$	$g_{tot,ef}$ (-)	ne	da
8	presevnost naravne svetlobe zasleklive ali transparentnega dela toplotnega ovoja stavbe ⁷	τ_{vis} (%)	ne	da
9	faktor dnevne svetlobe	FDS_{tr} , FDS_{int} (%)	ne	da
10	tesnost toplotnega ovoja stavbe n_{50} , w_{50}	n_{50} (h ⁻¹), w_{50} (m ³ /h m ²)	ne	da
11	koeficient transmisij H_v in ventilacijskih H_{ve} toplinskih izgub	H_v , $H_{v,rm}$, H_{ve} (W/K)	ne	da
12	potrebna toplota za ogrevanje	$Q_{h,nd,an}$ (kWh/an)	ne	da
13	razmerek toplote za ogrevanje	H_{nd} (-)	ne	da ⁸ , z izjemami
14	potrebna odvedena toplota za hlajenje	$Q_{c,nd,an}$ (kWh/an)	ne	da
15	razmerek odvedene toplote za hlajenje	C_{nd} (-)	ne	da, z izjemami ⁹

Tabela 3: Sistemi za pretvarjanje OVE, ki se uporabljajo pri določanju energetske učinkovitosti stavb

	Za nove in rekonstruirane stavbe		
	energetsko manj zahtevne stavbe	energetsko zahtevne stavbe	
Sistemi za pretvarjanje OVE	stacionarno modeliranje	nestacionarno modeliranje	nestacionarno modeliranje
1 pasivni sistemi ogrevanja	da posredno z zmanjšano $Q_{h,nd}$, se ne vrednotijo kot dovedena energija		
2 pasivni sistemi hlajenja	ne	da, posredno z zmanjšano $Q_{c,nd}$, se ne vrednotijo kot dovedena energija	
3 pasivni sistemi, naravna osvetlitev	da posredno, zmanjšana dovedena energija za razsvetljavo, se ne vrednotijo kot dovedena energija		
4 solarni toplotni ogrevalni sistemi vina/ob stavbi	da	da	da
5 solarni toplotni hladilni sistemi vina/ob stavbi ali druge tehnike solarnega hlajenja	ne	da	da
6 aktivno naravno ogrevanje ali hlajenje	ne	da	da
7 energija okolja za ogrevanje in hlajenje z zemeljskim prenosnikom toplote	ne	da	da
8 toplota okolja za delovanje TČ	da	da	da
9 SPTE na stavbi ali v bližini stavbe z obnovljivim energentom	da	da	da
10 Toplota, proizvedena s SPTE, v stavbi ali v bližini stavbe s fosilnim energentom	da	da	da
11 daljinsko hlajenje z ohlajeno vodo, sorpcijsko (geotermalno, na biomaso, s toploto iz energetske učinkovite SPTE)	da	da	da
12 proizvodnja električne energije PV, PV/T, z vetrno elektrarno na/ob stavbi ali neposredni bližini (pripadajočem zemljišču)	da	da	da
13 proizvedeni energent iz biogoriva ali vodika (z upoštevanjem deleža obnovljivega dela energenta)	da	da	da
14 proizvodnja električne energije z gorivnimi celicami, tudi če se uporablja fosilni energent	da	da	da
15 skupna kotlovnica na biomaso ali TČ	da	da	da
16 električna energija, proizvedena v oddaljenih sistemih z energenti s $f_{sp,ren} > 0$	da	da	da

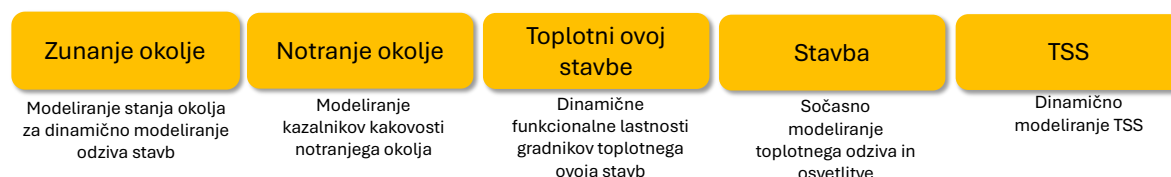
Slika 1: Kazalniki energetske učinkovitosti stavb, ki jih je glede na določbe PURES-3 treba opredeliti z dinamičnim modeliranjem.

Direktiva EPBD ob kazalnikih energijske učinkovitosti stavb in njihovem »pametnem« delovanju velik poudarek namenja tudi zagotavljanju ustrezne kakovosti bivalnega in delovnega notranjega okolja. Pri načrtovanju stavb zahtev, ki jih opredeljujejo tehnični standardi (tudi standard SIST EN 15255 po EPBD) in TSG-1-004, ni mogoče preveriti drugače kot z dinamičnim modeliranjem. Kakovost notranjega okolja (IEQ) se preverja v štirih domenah (slika 2). V tem delu se osredotočamo na dinamično modeliranje treh izmen njih: toplotno okolje, osvetljenosti in kakovost zraka.



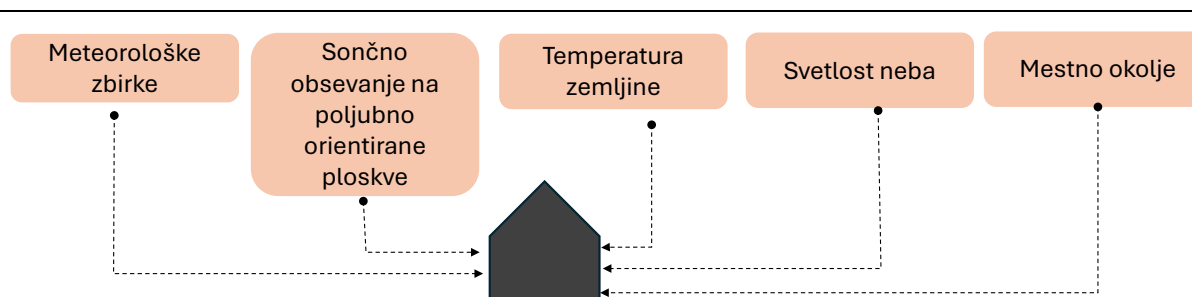
Slika 2: Domene kakovosti notranjega okolja, ki jih preverjamo hkrati z energijskimi kazalniki stavb; v tem delu se osredotočamo na dokazovanje kakovosti toplotnega okolja, osvetljenosti in kakovosti zraka v notranjih prostorih.

Priročnik je razdeljen na pet tematskih sklopov, navedenih na sliki 3: modeliranje stanja spremenljivk zunanjega okolja kot robnih vrednosti pri dinamičnem modeliranju, modeliranje domen notranjega okolja (slika 2), dinamično modeliranje transparentnih in netransparentnih gradnikov toplotnega ovoja stavb, modeliranje potrebne energije za ogrevanje, hlajenje in osvetlitev stavb ter dinamično modeliranje tehničnih stavbnih sistemov, za katere PURES-3 predpisuje uporabo dinamičnega modeliranja (slika 1).



Slika 3: Tematski sklopi dinamičnega modeliranja, obravnavani v priročniku.

Vsak tematski sklop je razdeljen na tematska poglavja, v katerih je dinamično modeliranje opisano s teoretičnimi podlagami in fizikalnim modelom, delovnimi primeri ter primerjavo med dinamičnim in statičnim modeliranjem. Slika 4 prikazuje tematska poglavja v sklopu o zunanjem okolju.



Slika 4: Tematska poglavja v sklopu o zunanjem okolju, obravnavana v priročniku.

2. FIZIKALNE OSNOVE STATIČNEGA IN DINAMIČNEGA MODELIRANJA ENERGIJSKIH LASTNOSTI STAVB

Statično modeliranje je računski postopek, pri katerem fizikalne spremenljivke, na primer prehod toplote skozi gradnike toplotnega ovoja stavbe ali raba energije za ogrevanje, izračunamo za dejavnike, ki se s časom ne spreminjajo. Na primer, toplotne izgube stavbe izračunamo pri načrtovani temperaturi zraka v stavbi in zunanjem okolju, ki se ne spreminjata s časom. Ker to v stavbi in naravi ni resnično, moramo opazovati procese v dolgih časovnih obdobjih, v katerih predvidimo, da povprečja fizikalnih spremenljivk ustrezno nadomestijo časovno spreminjajoče se vrednosti, ki jih napovedujemo. Najkrajše obdobje, ki ga uporabljamo pri statičnem modeliranju stavb, je mesec dni. Odstopanja, ki so posledica dejanskega stanja fizikalnih veličin v notranjem in zunanjem okolju ter gradnikih stavb in tehničnih stavbnih sistemih (TSS), pa zmanjšamo tako, da:

- omejitve kazalnikov prilagodimo statičnem modeliranju; tak primer je faktor toplotne stabilnosti gradnikov ali faktor dnevne svetlobe, ki ga uporabimo za napoved rabe energije za razsvetljavo v celotnem letu ali za preverjanje prehoda vodne pare v gradnikih z Glaserjevo mesečno metodo;
- uporabimo korekcijske faktorje, s katerimi rezultat statičnega modeliranja izkustveno "popravimo" v boljši približek dejanskim vrednostim v naravi; tak primer sta faktorja učinkovitosti toplotnih dobitkov in ponorov pri izračunu potrebne količine dovedene in odvedene toplote za ogrevanje in hlajenje stavbe ($Q_{H,nd}$ in $Q_{C,nd}$), ki v napoved potrebne količine dovedene in odvedene toplote empirično vključita toplotno akumulacijo stavbe.

Statično modeliranje se je zaradi enostavnosti in tudi majhnega števila potrebnih podatkov, s katerimi opisujemo dejavnike v zunanjem in notranjem okolju ter lastnosti gradnikov stavb in TSS, uveljavilo v inženirski praksi in se zato predpisuje tudi v nacionalnih dokumentih s področja dokazovanja energijskih lastnosti stavb.

Vendar pa nekaterih pomembnih lastnosti stavb ne moremo opredeliti s statičnim modeliranjem. Na primer, določitev, v katerem razredu kakovosti notranjega okolja bodo bivali in delovali uporabniki stavb v najtoplejšem tednu v letu ter kako bo na naravno osvetlitev vplival način krmiljenja okenskih senčil, če se ta prilagajajo sončnemu sevanju ali temperaturi v stavbi. Teh značilnosti stavbe s povprečnimi vrednostmi vplivnih spremenljivk, ki jih obravnavamo pri statičnem modeliranju, ne moremo določiti. Prav tako tudi na primer ni mogoče napovedati, kolikšna bo raba električne energije za delovanje toplotne črpalke v različnih tarifnih razredih in koliko na stavbi proizvedene električne energije bo na voljo za delovanje toplotne črpalke. Te značilnosti stavbe in TSS se lahko določijo le z uporabljam dinamičnega modeliranja.

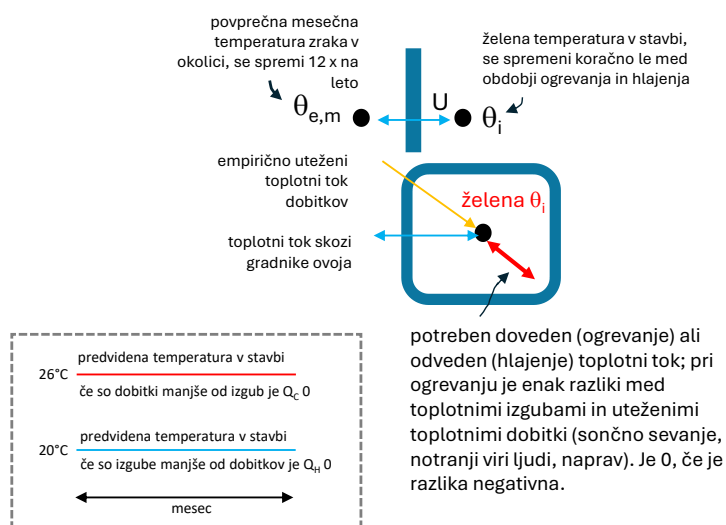
Dinamično modeliranje pa ni le modeliranje v krajših časovnih korakih, kot je mesec, praviloma v urnih, lahko celo krajših, temveč se od statičnega modeliranja razlikuje tudi po računskih pristopih/metodah. Na slikah 5 in 6 so prikazane najpomembnejše razlike med obema načinoma modeliranja potrebne

toplote za ogrevanje $Q_{H,nd}$ in hlajenje $Q_{C,nd}$ glede na robne pogoje pri statičnem in dinamičnem modeliranju.

2.1. STATIČNO MODELIRANJE (TOPLOTNEGA ODZIVA STAVB)

Za statično modeliranje energijskih lastnosti stavb so značilni:

- modeliranje se izvede za daljše časovne korake, na primer en mesec ali leto;
- informacije o gradnikih stavbe in stavbi (na primer temperature gradnikov ovoja, temperatura zraka v stavbi) se ne prenašajo v naslednje računsko obdobje kot začetno stanje (na primer med aprilom in majem);
- lastnosti gradnikov (λ , τ_{vis} , g) so časovno in prostorsko nespremenljive;
- v opazovanem obdobju se vsak gradnik stavbe obravnava kot samostojni element (zid 1, zid 2, okno 1) brez upoštevanja medsebojnega vpliva na toplotni odziv drugih gradnikov stavbe;
- temperature in toplotni tokovi kot robni pogoji (temperatura zraka v okolici, sončno sevanje, temperatura, pri kateri je stavba temperirana (pri ogrevanju in hlajenju) toplotni tok v gradnikih ovoja stavbe, ventilacijski toplotni tok itn.) so konstantni v računskem koraku (mesec) (slika 5).



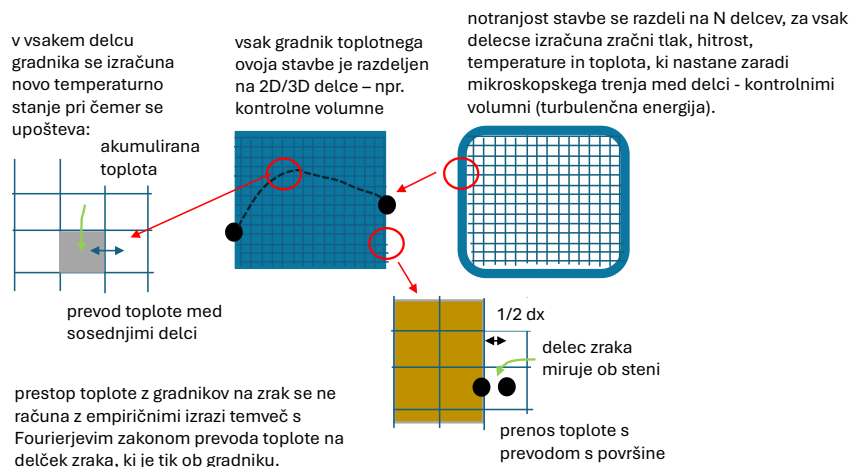
Slika 5: Postopek statičnega modeliranja, prikazan na primeru izračuna potrebne količine dovedene toplote za ogrevanje $Q_{H,nd}$ in odvedene toplote za hlajenje $Q_{C,nd}$.

2.2. POLNO DINAMIČNO MODELIRANJE / MODELIRANJE CFD (TOPLOTNEGA ODZIVA STAVB)

Polno dinamično modeliranje temelji na fizikalnih zakonih, s katerimi pri vsakem časovnem koraku opazovanja izračunamo polje temperatur, hitrosti, tlaka zraka, koncentracije onesnažil v zraku,

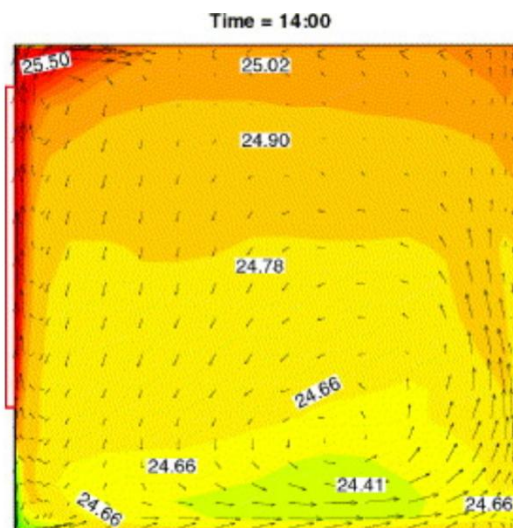
turbulence v majhnem delcu stavbe, na primer končnem elementu ali končnem volumnu (slika 6). Za polno dinamično modeliranje toplotnega odziva gradnikov in stavbe je značilno:

- fizikalni zapis naravnih pojavov za zelo majhen delec (δx) in zelo majhen časovni korak (δt) v obliki diferencialnih enačb. V računskem postopku se te spremenijo v diferenčne (dx , dt) (algebraične) in oblikujemo v sistem povezanih algebraičnih enačb, ki so poznane kot Navier-Stokesove enačbe;
- modeliranje se izvede skladno z zakonom o ohranitvi energije in drugimi konstitutivnimi zakoni za krajša časovna obdobja, tako da je računska shema „stabilna“. Konstitutivni zakoni so matematični zapis (enačbe) s katerimi popišemo dogajanja v naravi. v primeru stabilne rešitve so izračunana stanja vedno termodinamično pravilna, npr. doveden toplotni tok v opazovan diferenčni delec stavbe povzroči, da je v tem časovnem koraku notranja energija (temperatura) delca višja; tipični časovni korak pri dinamičnem modeliranju stavb je 1 ura ali tudi krajši;
- število diferenčnih delcev gradnikov opredeljuje število temperaturnih vozlišč na/v gradnikih ter stavbi; za vsak delec gradnika ali delec zraka v stavbi dobimo podatek o njegovi temperaturi, hitrosti in drugih termodinamičnih spremenljivkah, zato lahko podrobno preučimo tudi kakovost notranjega okolja;
- za prenos toplote s konvekcijo med gradniki in zrakom v stavbi ali okolici ne uporabljamo izkustvenih konstant, temveč se toplotni tok izračuna za vsak delec površine gradnika pri nezdrskih pogojih (non-slip conditions), saj predpostavimo, da diferenčni delec zraka ob površini gradnika miruje; zato se toplotni tok, ki prestopa na ali z gradnika izračuna s Fourierjevim zakonom prevoda toplote;
- toplotni tok, ki se prenaša s sevanjem med diferenčnimi površinami gradnikov, se določi sočasno z upoštevanjem optičnih lastnosti površin (z emisivnostjo ε_{IR}) in geometrijskih faktorjev, ki opredeljuje kako se površini dveh delčkov med katerima se izmenjuje toplotni tok, »vidita«;
- glede na položaj transparentnih gradnikov ovoja stavbe se izračuna tudi sončno sevanje (kratkovalovno), ki ga sprejme diferenčna površina gradnika (z absorptivnostjo sončnega sevanja α_{sol}) in odbito sončno sevanje (z odbojnostjo sončnega sevanja ρ_{sol}), ki ga sprejmejo preostali gradniki toplotnega ovoja.



Slika 6: Postopek dinamičnega modeliranja prehoda toplote skozi netransparentni gradnik toplotnega ovoja stavbe.

V primerjavi s statičnim modeliranjem, kjer je temperatura zraka v stavbi opredeljena s stalno vrednostjo za celotno prostornino stavbe, se pri polnem dinamičnem modeliranju izračuna za vsak kontrolni volumen v stavbi (slika 7). Sočasno se določijo tudi druge spremenljivke stanja zraka, kot sta hitrost in vlažnost. Tako lahko določimo tudi temperaturni gradient zraka, sevalno asimetrijo in druge kazalnike toplotnega ugodja, česar statično modeliranje stavbe ne omogoča.



Slika 7: S polnim dinamičnim modeliranjem lahko preverimo kazalnike kakovosti notranjega okolja, ki jih s statičnim modeliranjem ni mogoče, na primer temperaturni gradient, sevalno asimetrijo, hitrosti zraka, turbulenco.

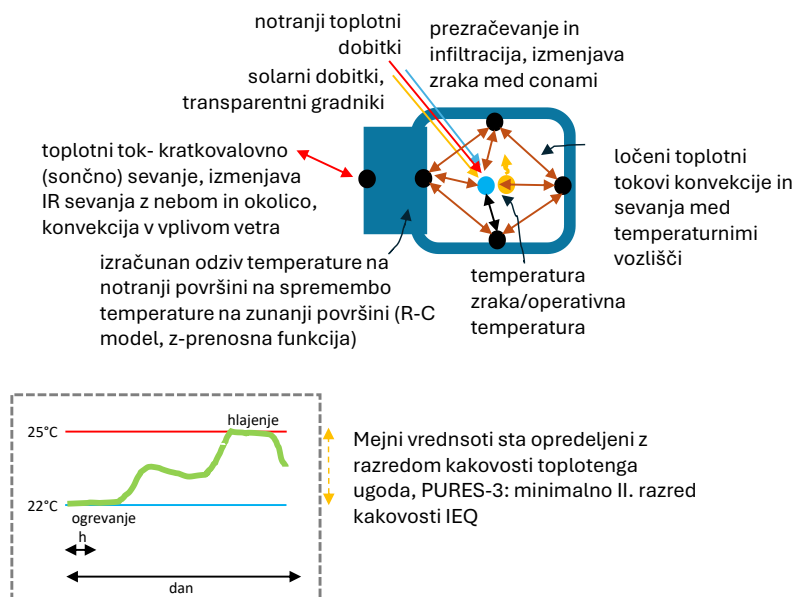
2.3. POSEBEN PRIMER – POENOSTAVLJENO DINAMIČNO MODELIRANJE

Ker dinamično modeliranje stavb pri njihovem načrtovanju še ni popolnoma uveljavljeno, je v tehničnem standardu SIST EN 52016-1 po EPBD ob metodi statičnega modeliranja potrebne količine toplote za ogrevanje $Q_{H,nd}$ in odvedene toplote za hlajenje $Q_{C,nd}$ opisana tudi metoda poenostavljenega

modeliranja dinamičnega odziva stavb. To modeliranje temelji na določitvi temperature in toplotnih tokov za vsako uro z upoštevanjem urnih vrednosti spremenljivk zunanjega okolja (temperature zraka, sončno sevanje itn.), je pa modeliranje dinamičnega odziva gradnikov toplotnega ovoja poenostavljeno. Tako načrtovalcu stavbe ni treba dodajati podatkov o tehničnih in toplotnih lastnostih stavbe ob tistih, uporabljenih pri statičnem modeliranju. Posebnosti poenostavljenega dinamičnega modeliranja (po SIST EN 52016-1) so:

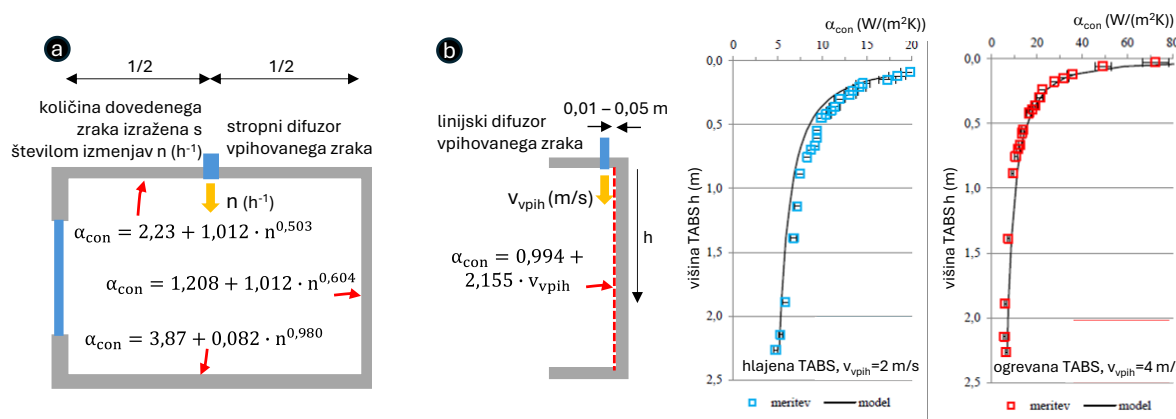
- modeliranje odziva stavbe se izvede z meteorološkimi spremenljivkami, ki so oblikovane v podatkovne datoteke s časovnim korakom ene ure in ohranjajo dinamiko sprememb, značilno za zunanje okolje, zato z njimi natančneje napovemo odziv stavbe;
- modeliranje toplotnega odziva gradnikov stavb ne temelji le na prevodu toplote, temveč tudi na njenem shranjevanju v gradnikih kot posledica časovno spreminjajočih se stanj v okolju in stavbi;
- temperatura zraka v stavbi je opisana z enim temperaturnim vozliščem (slika 8);
- za vsak gradnik (transparentni na primer zasteklitev in netransparentni na primer zunanji zid, streha) se določi le ena temperatura zunanje in notranje površine, ki je na celotni površini gradnika enaka, v vsakem časovnem koraku modeliranja; v naslednjem časovnem koraku se lastnosti gradnika lahko spremenijo (npr. vključi se senčilo ob transparentnem gradniku);
- vsak netransparentni gradnik ima pet temperaturnih vozlišč (tri v notranjosti, poleg vozlišč na notranji in zunanji površini), ki so virtualna, prehod toplote s prevodom med njimi pa načrtovalec opredeli le s petimi kategorijami razporeditve akumulacijske mase (zunaj, znotraj, enakomerno, itn.); za transparentne gradnike sta opredeljeni samo dve vozlišči (na zunanji in notranji površini gradnika);
- prenos toplote s površine ali na površino gradnika s konvekcijo in sevanjem se modelira z empiričnimi izrazi; toplotni tok, ki se prenaša s sevanjem, se razporedi na preostale površine gradnikov, toplotni tok, ki s površine gradnikov prestopa s konvekcijo, pa se poveže z (enim) temperaturnim vozliščem temperature zraka v stavbi;
- količina potrebne dovedene toplote za ogrevanje se na priemr določi tako, da je dosežena želena (termostatirana) temperatura, pri čemer ima lahko generator toplote/hladu neskončno moč ali pa jo omejimo;
- če iz energijske balance stavbe (tj. toplotne cone) izhaja, da toplote v tem časovnem koraku ni treba dovesti v stavbo, se določi nova (višja) temperatura zraka. Če je ta višja od temperature, ki pomeni zgornjo vrednost toplotnega ugodja, se določi odvedena toplota za hlajenje, ki zagotavlja, da v tem časovnem koraku območje želene temperature (razred kakovosti toplotnega ugodja) ne bo preseženo (slika 8).

Poenostavljeno dinamično modeliranje se praviloma uporablja tudi v BIM-orodjih in inženirski praksi kot kompromis med fizikalno ustreznim in stroškovno opravičljivim načinom modeliranja kazalnikov energijske učinkovitosti in kakovosti notranjega okolja.



Slika 8: Za poenostavljeno dinamično modeliranje po metodi SIST EN 52016-1 je značilno, da ima stavba eno temperaturno vozlišče (θ_i), ki prestavlja temperaturo zraka v stavbi in eno temperaturno vozlišče, ki predstavlja povprečno temperaturo površin gradnikov toplotnega ovoja (θ_{mrt}); temperaturi združimo v operativno temperaturo θ_{op} ; temperatura zraka ali operativna temperatura (glede na izbiro presojevalca) pa se v vsakem časovnem koraku primerja z območjem izbranega razreda toplotnega ugodja; če je nižja, se izračuna potrebna količina dovedene toplote, če je višja, pa se izračuna potrebna količina odvedene toplote za hlajenje. Navedeno velja za stavbe s termostatisirano temperaturo.

Pri statičnem modeliranju toplotne tokove, ki prestopajo s površin gradnikov s sevanjem in konvekcijo, določimo z združenimi empiričnimi konstantami, katerih vrednosti so odvisne zgolj od položaja gradnika oz. smeri toplotnega toka (vodoravno, navzgor, navzdol). Pri poenostavljenem dinamičnem modeliranju pa oba mehanizma prenosa toplote obravnavamo ločeno. Tako ima presojevalec možnost, da preuči vpliv emisivnosti površin gradnikov, ki odstopajo od tipičnih gradbenih snovi in barv ($\epsilon_{IR} = 0,9$). Pri modeliranju prestopa toplote s konvekcijo lahko toplotne prestopnosti α_{con} prilagodimo resničnim okoliščinam, na primer hitrosti zraka pri intenzivnem prezračevanju ali določenemu položaju difuzorjev dovodnega zraka pri mehanskem prezračevanju. Na sliki 9 so navedeni izbrani empirični izrazi s katerimi določimo konvektivne toplotne prestopnosti α_{con} na notranji površini gradnikov v stavbi/prostoru z mehanskim prezračevanjem in na površini toplotno vzbujene stene (thermal activated building structure TABS) ob kateri je nameščen linijski difuzor za vpihovanje zraka za prezračevanje.



Slika 9: Empirični izrazi za določitev povprečnih (a) in lokalnih (b) konvektivnih toplotnih prestopnosti α_{con} ($\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$) na notranji površini gradnikov toplotnega ovoja v mehansko prezračevani stavbi/prostoru glede na vrsto in položaj difuzorja; v prikazanih primerih α_{con} značilno odstopa od konstant uporabljenih pri statičnem modeliranju v primeru (a) stropnega difuzorja na sredini prostora in (b) pri vpihovanju zraka za prezračevanje skozi linijski difuzor ob toplotno vzbujeni ogrevani ali hlajeni steni (TABS).

Vir (a) Fisher, D.E. and C.O. Pedersen. 1997. "Convective Heat Transfer in Building Energy and Thermal Load Calculations", ASHRAE Transactions, Vol. 103, Pt.

Vir (b) Venko, S., de Ventos D. V., Arkar C., Medved S.; An experimental study of natural and mixed convection over cooled vertical room wall Energy and Buildings 68:387-395; 2014

2.4. MODELIRANJE STAVB SKLADNO S PURES-3 IN TEHNIČNO SMERNICO TSG-1-004

Izbir metode modeliranja kazalnikov energijske učinkovitosti stavb opredeljujejo zahteve direktive o energijski učinkovitosti stavb (EPBD) ter pravilnik o učinkoviti rabi energije PURES-3 in tehnična smernica TSG-1-004. Ti dokumenti navajajo zahteve, ki izhajajo iz modeliranja energijskih lastnosti stavb v stroki in omejitev oziroma prednosti dveh metod določitve kazalnikov energijske učinkovitosti stavb – statičnega in dinamičnega modeliranja.

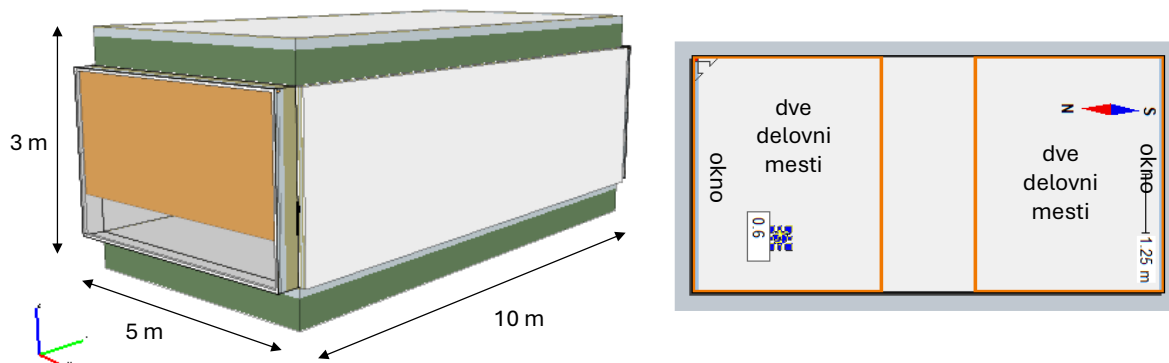
PURES-3 določa uporabo statične ali dinamične metode za izračun kazalnikov glede na velikost kondicionirane površine stavbe (A_{use}). Stavbe so tako razdeljene na energetske nezahtevne stavbe ($A_{\text{use}} \leq 50 \text{ m}^2$), energetske manj zahtevne stavbe ($A_{\text{use}} \geq 50 \text{ m}^2 < 500 \text{ m}^2$) in energetske zahtevne stavbe ($A_{\text{use}} \geq 500 \text{ m}^2$). PURES-3 določa, da se statično modeliranje lahko uporablja za energetske nezahtevne in energetske manj zahtevne stavbe ter stanovanjske stavbe brez omejitev velikosti. Za energetske zahtevne stavbe se uporabljajo dinamično modeliranje. PURES-3 opredeljuje tudi prehodno obdobje za uveljavitev metode dinamičnega modeliranja pri načrtovanju in presoji stavb. TSG-1-004 opredeljuje robne pogoje za modeliranje energijskih kazalnikov stavb po obeh metodah modeliranja. Ker metodi zaradi fizikalnih omejitev omogočata izračun različnih kazalnikov, so zahteve oziroma kazalniki energijske učinkovitosti stavb temu prilagojeni (slika 1; Priloga 1 PURES-3).

Čeprav se bo v skladu z določili PURES-3 zahtevnejše dinamično modeliranje energijskih lastnosti stavb uveljavilo za energetske zahtevne stavbe, je tako modeliranje smiselno uporabiti tudi za energetske manj zahtevne stavbe. Glavni razlogi zato so:

- modeliranje toplotnega odziva stavb, ki je bližje fizikalnim zakonom, pri čemer se le nekateri procesi modelirajo z empirično določenimi spremenljivkami;
- možnost modeliranja vpliva spremenljivih fizikalnih lastnosti gradnikov stavb, kot je prehod sončnega sevanja glede na položaj sonca ali temperaturno odvisna specifična toplota pri shranjevanju latentne toplote v gradnikih stavbe;
- možnost vključevanja nekaterih tehnik izkoriščanja naravnih virov v presojo energijske učinkovitosti stavb, ki jih ni mogoče modelirati s statičnim modeliranjem, kot je naravno hlajenje s prezračevanjem, hlapilno hlajenje, aktivno solarno hlajenje ali toplotno vzburjeni gradniki, hranilniki s temperaturnim razslojevanjem;
- vključevanje podrobneje opredeljenih časovno odvisnih spremenljivk zelenih stanj v stavbi in načina uporabe stavbe v modeliranje stavb;
- ob presoji kazalnikov energijske učinkovitosti hkratno preverjanje kazalnikov kakovosti bivalnega in delovnega okolja.

2.5. REFERENČNA PROSTORA

Primeri dinamičnega modeliranja so v priročniku prikazani za posamezne gradnike stavb, ko želimo poudariti razlike, ki nastanejo med statičnim in dinamičnim modeliranjem njihovega toplotnega odziva ali pri vrednotenju njihovih toplotnih lastnosti, ki jih s statičnim modeliranjem ne moremo določiti. Za prikaze vrednotenja kakovosti notranjega okolja, dinamičnega modeliranja toplotnega odziva stavb, delovanja algoritmov krmiljenja tehničnih stavbnih sistemov in rabe energije v stavbah pa bomo uporabili referenčni prostor. Referenčni prostor REF 1 je poslovni prostor s štirimi delovnimi mesti (slika 10).

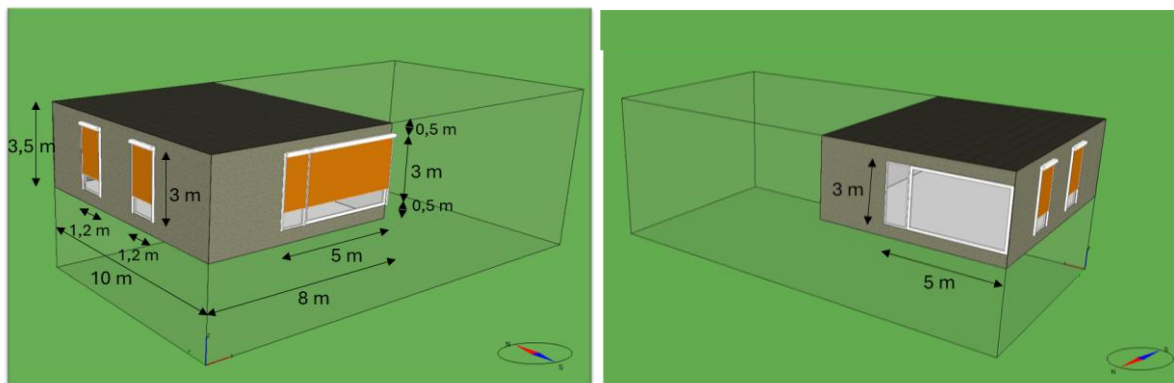


Slika 10: Primeri dinamičnega modeliranja, prikazani v priročniku, za referenčni pisarniški prostor REF 1 s štirimi delovnimi mesti.

Referenčni prostor REF 1 ima te značilnosti:

- 5 × 10 m, višina 3 m + strop, spuščen za spuščen za 0,5 m (2 × 20 m² »delovne« površine + 10 m² hodnika);
- orientacija S-J, enako okno na obeh fasadah, $U_{zid} = 0,166 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$;
- okno 5 × 3 m, U_s in g sta spremenljivki, delež okvirja 10 %, $U_{okv} = 2,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$; notranja senčila (BRIS, $SF.g = 0,65$, $SF.\tau_{sol} = 0,16$);
- krmilnik za spuščanje: vpadni kot proti normalni površini zasteklitve (15° na J, V ali Z, 0° na S) zaščita pred bleščanjem OR temperatura zraka v prostoru $T_{i,set, air}$ večja od (23,5 °C na J, V ali Z, 25,5 °C na S); deluje vse dni v letu (tudi ob koncu tedna);
- infiltracija $n_{50} 0,5 \text{ ACH}$ (pri 50 Pa);
- električna moč svetilk: izračunana glede na želeno osvetlitev (500 lux) in obliko prostora 183,5 W (150 lm/W);
- notranji viri: 4 osebe (urnik), luči (183,5 W = 3,67 W/m²), oprema (160 W = 3,2 W/m²), vse po urniku delovnika;
- vgrajena sta idealna generatorja toplote in hladu, ki vzdržujeta stalno temperature zraka (22 °C/25 °C), vse dni v letu (24/265), idealni generator ima neskončno moč in idealno krmiljenje delovanja (brez odstopanj od želene temperature);
- prezračevanje: mehansko z vračanjem toplote, vse dni v letu (24/365), delovanje z obtokom (min. temp. vpiha 18 °C), izkoristek vračanja toplote $\eta_{rek} = 85 \%$, 240 m³/h; električna moč ventilatorjev: dovodni ventilator SPF (0,75 kW/(m³/s; 50 W), odvodni ventilator SPF (0,50 kW/(m³/s; 33 W).

Nekateri primeri so zaradi posebnih urnikov uporabe oziroma delovanja stavbe izdelani za referenčni prostor REF 2 (slika 11).



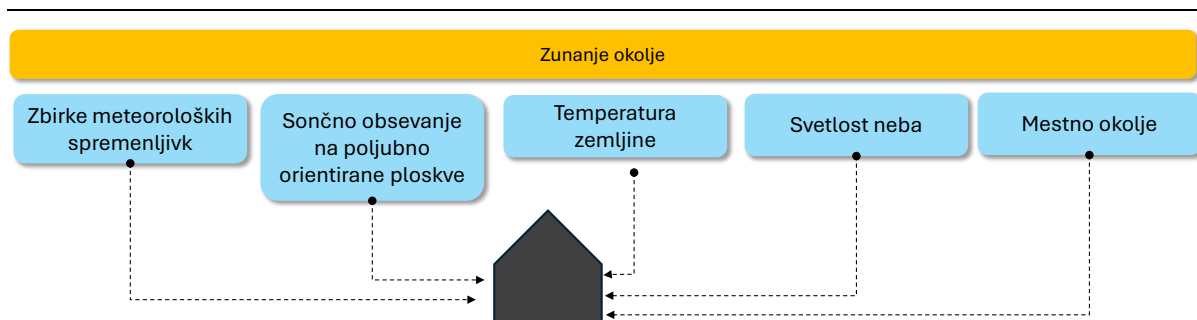
Slika 11: Nekateri primeri dinamičnega modeliranja so prikazani za referenčni prostor REF 2 v poslovni stavbi.

Referenčni prostor 2 ima te značilnosti:

- 8×10 m, svetla višina 3 m, $A_{use} = 80 \text{ m}^2$;
- notranji viri: 4 osebe (urnik), luči ($183,5 \text{ W} = 3,67 \text{ W/m}^2$), oprema ($160 \text{ W} = 3,2 \text{ W/m}^2$), vse po urniku prisotnosti (od 8. do 17. ure, 5 dni na teden (5/7));
- okna $U_s = 0,7 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$; in $g = 0,65$, z deležem okvirja 10 %, $U_{okv} = 1,3 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$; notranja senčila (BRIS, $SF \tau_{sol} = 0,16$);
- krmilnik za spuščanje senčil: sončno sevanje na površino zasteklitve $\geq 100 \text{ W/m}^2$ ali $G_{beam} > 10 \text{ W/m}^2$ + temperatura zraka v toplotni coni $\theta_i > 24 \text{ }^\circ\text{C}$ + vpadni kot sončnih žarkov $> 10^\circ$; vse ure v letu (24/365);
- infiltracija $n_{50} = 0,5 \text{ ACH}$ (pri 50 Pa);
- električna moč svetilk izračunana glede na zeleno osvetlitev (500 lux; 150 lm/W) in obliko prostora;
- idealna generatorja toplote in hlada, ki vzdržujeta predvideno temperature notranjega zraka θ_i ali predvideno operativno temperaturo $\theta_{op,i}$ (na primer $22 \text{ }^\circ\text{C}/24,5 \text{ }^\circ\text{C}$), idealni generator ima neskončno moč, brez energijskih izgub in idealno krmiljenje delovanja (brez odstopanj od želene temperature);
- prezračevanje: mehansko z vračanjem toplote, vse dni v letu, delovanje z obtokom (min. temp. vpiha $18 \text{ }^\circ\text{C}$), izkoristek vračanja toplote 85 %, dovod zraka po SIST EN 17772-2:2018 za II. razred kakovostni IAQ in zelo malo emisijske stavbe (4 osebe) $172 \text{ m}^3/\text{h}$; električna moč ventilatorjev - dovodni ventilator SPF ($0,75 \text{ kW/(m}^3/\text{s)}$; 50 W), odvodni ventilator SPF ($0,50 \text{ kW/(m}^3/\text{s)}$; 33 W).

3. DINAMIČNO MODELIRANJE ZUNANJEGA OKOLJA

Tematski sklop o zunanjem okolju je razdeljen na poglavja, prikazana na slika 12. V tem poglavju navajamo modele za izračun časovno odvisnih vrednosti spremenljivk, ki niso vključene v podatkovne zbirke meteoroloških podatkov in jih mora načrtovalec stavbe oziroma TSS prilagoditi dejanskemu stanju v naravi ali grajenem okolju.



Slika 12: Tematska poglavja v tematskem sklopu o zunanjem okolju.

3.1. ZBIRKE METEOROLOŠKIH PODATKOV

Za modeliranje dinamičnega odziva stavb se uporabljajo urni intervali meteoroloških spremenljivk, ki so oblikovane na podlagi statističnega vrednotenja izmerjenih meteoroloških spremenljivk v zgodovini in jih imenujemo tipična meteorološka referenčna leta (TML) (angl. TRY Typical Reference Year). Za TML velja, da bolj sledijo povprečju kot ekstremnim meteorološkim dogodkom, ki v teh podatkovnih zbirkah niso razvidni. Zgodovinsko obdobje se med zbirkami podatkov razlikuje in načrtovalec stavbe mora biti na to pozoren. Podatkovne zbirke za kraje v Sloveniji oblikuje Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO).

Za dinamično modeliranje stavb različna programska orodja uporabljajo različne zapise TML/TRY. Te podatkovne zbirke so lahko prilagojene splošni uporabi in shranjene kot CSV ali tekstovne datoteke ali pa so prilagojene posameznim lastnostim orodij za energijsko modeliranje stavb (angl. Building Energy Modelling - BEM), na primer EPW (Energy Plus Weather).

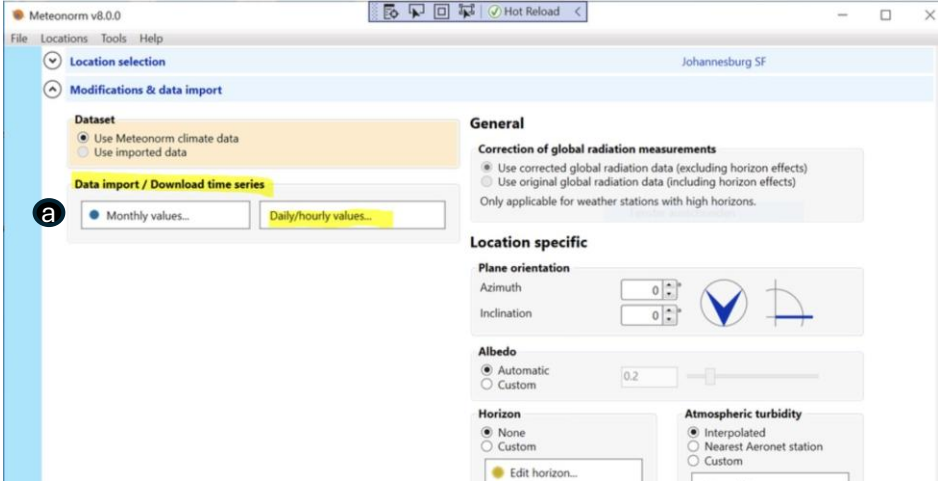
Zbirke TML je za območje Slovenije izdelal ARSO na podlagi podatkov iz obdobja od leta 2001 do 2015. Oblikovanih je 23 TML, ki so dostopni z geografskimi koordinatami (X,Y) lokacije stavbe, kot se ta navaja v PURES-3. Datoteke so v zapisu CSV.

V svetovnem merilu so zelo razširjene meteorološke zbirke ASHRAE (ameriškega združenja inženirjev za ogrevanje, hlajenje in klimatizacijo oziroma American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers). Poleg podatkovnih zbirk TML so na voljo tudi tako imenovani ASHRAE Climate Design Data s podatki za dimenzioniranje TSS (ogrevanje, hlajenje, klimatizacija) na podlagi

meteoroloških spremenljivk, ki se pojavijo le pri 0,4 %, 1 % ali 2 % časa v dolgoletnih obdobjih (ekstremno visoke in nizke temperature).

Različna BEM-orodja prepoznavajo različne zapise TML. Zato je potrebno podatkovne baze, ki jih je pripravil ARSO, prilagoditi z namenski računalniškimi orodji. Tako programsko orodje je na primer Meteororm podjetja Meteotest AG (www.meteororm.com) (slika 13).

Programsko orodje Meteororm omogoča uvoz podatkovnih zbirk TML ARSO (slika 13, a) in jih prilagodi zapisu, ki ga prepoznajo najbolj razširjena BEM-orodja (slika 13, b).



a

Intro Meteororm Version 8 Time series **Details** Downloads Support Buy de en

b

Output formats for building simulations

TRNSYS	Format for simulation tool TRNSYS
HELIOS-PC	Format for simulation tool HELIOS-PC
DOE	Format for simulation tool DOE-2
SIA 380/1	SIA 380/1 Format (only monthly values) [SIA = Swiss Society of Engineers and Architects]
SIA 2028	Format according SIA 2028 "Merkblatt" (Swiss test reference year format)
LESOSAI	Format for simulation tool Lesosai (monthly values)
Energyplus	Format for simulation tool Energyplus (EPW format)
Dynbil	Format for simulation tool Dynbil
PHPP/Wave	Format for simulation tool PHPP (< version 8) and Wave
PHPP 8	Format for simulation tool PHPP (version 8)
WUFI/WAC	Format for simulation tool WUFI / WAC
IDA/ICE	Format for simulation tool IDA/ICE
IBK-CCM	Format for simulation tool IBK-CCM
VIP-Energy	Format of simulation tool VIP-Energy (Strusoft)
Pleiades/Comfie	Format for simulation tool Pleiades/Comfie

Slika 13: Programsko orodje Meteororm omogoča uvoz podatkovnih zbirk TML ARSO (a) in jih prilagodi zapisu, ki ga prepoznajo najbolj razširjena BEM-orodja (b).

3.3. SONČNO OBSEVANJE – URNI IN SONČNI ČAS

Določitev položaja Sonca na nebu in tako časa, ko so gradniki čez dan osončeni, lahko poenostavimo s predpostavko, da bo na primer zahodno usmerjeni navpični zid vsak dan v letu prvi trenutek obsijan ob 12. uri na naših urah (po urnem času) – to je ob sončnem poldnevu, ko je Sonce ta dan najvišje na nebu. Pri natančnejšem opazovanju narave pa ugotovimo, da to ni res ker:

- pot Zemlje okoli Sonca ni popolna krožnica, temveč elipsa; to fizikalno dejstvo modeliramo z “enačbo časa” (angl. Equation of Time - EOT), s katero za posamezni dan v letu napovemo, koliko Sonce “prehiteva” ali “zaostaja” (v minutah);
- imamo ure nastavljene enako znotraj dogovorjenih časovnih pasov, ki so opredeljeni s standardnim poldnevnikom; za Slovenijo je to -15° poldnevnik (ki prečka med drugim Trebnje), Zemlja pa potrebuje eno uro, da opravi pot med skrajnima točkama časovnega pasu (idealno si sledijo s poldnevniki oddaljenimi za 15°), to razliko pa upoštevamo tako, da izračunamo razliko med geografsko dolžino opazovanega kraja in standardnim poldnevnikom. Ta razlika bo enaka za vse dneve v letu.

Primer: Ženeva ima zemljepisno dolžino $6,1459^{\circ}$ in je torej za $8,8541^{\circ}$ zahodneje od Trebnjega (standardnega poldnevnika časovnega pasu). Ker se Zemlja vrti proti vzhodu, to pomeni, da bo opazovalec v Ženevi videl Sonce na najvišji točki na nebu vsak dan $((15^{\circ}-6,1459^{\circ})/15^{\circ}) \cdot 60 \text{ min}$, 36 minut pozneje kot opazovalec v Trebnjem (slika 15).

Slika 15: Ura s prikazom lokalnega sončnega poldneva na osnovi EOT ter geografske oddaljenosti kraja od standardnega časovnega poldnevnika. Izdelana za kraj bivanja lastnika. Vir: Audemar Pique, EOT watch.

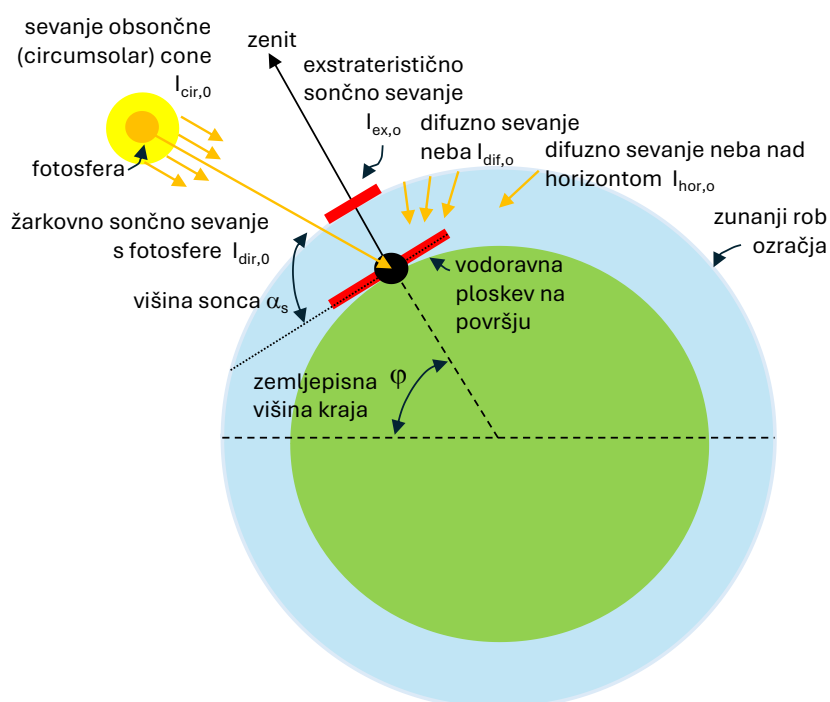
kazalnik, ki prikazuje sončno poldne (12 uro po soncu), v štirih dneh v letu bo v položaju “0” (ob 12:36 min), v preostalih dnevih bo Sonce najvišje na nebu nekoliko prej (vendar ne pred 12:20) ali malo kasneje (vendar ne po 12:51); to razliko popiše EOT. EOT velja za vse kraje na planetu, položaj “o” na luneti pa je odvisen od razlike v zemljepisni dolžini opazovanega kraja in standardnega poldnevnika (15°E na naš časovni pas) : opomba poletni čas ni upoštevan.



Za natančno modeliranje senčenja in naravne osvetlitve v stavbah glede na urnik zasedenosti (ta se “ravna” po urnem času) ter modeliranje sistemov za vodenje svetlobe v stavbah je treba uporabiti “pravi” sončni čas. To je pravilo tudi v BEM-orodjih.

3.4. SONČNO SEVANJE NA VODORAVNO RAVNINO – PRIPRAVA PODATKOV ZA BEM

Orodja BEM potrebujejo različno navedene podatke o urnem sončnem obsevanju na vodoravno ploskev, ki se lahko glede na način vrednotenja razlikujejo od razpoložljivih podatkov v TML ARSO. Tipična meteorološka leta ARSO navajajo podatke o globalnem oziroma skupnem urnem sončnem obsevanju $I_{glob,0}$, ki je vsota direktnega in razpršenega oziroma difuznega sončnega sevanja neba. Tehnični standard SIST EN 52010-1 navaja model neizotropnega neba s tremi komponentami difuznega sevanja (slika 16) s katerim $I_{glob,0}$ iz TML razdelimo na komponenti direktnega in difuznega sevanja. To sta najpogosteje potrebna vhodna podatka za BEM.



Slika 16: Komponente urnega sončnega obsevanja na horizontalno ploskev $I_{glob,0}$, ki jih obravnava model neizotropnega neba v tehničnem standardu SIST EN 52010-1:2017.

V inženirski praksi lahko uporabimo tudi preprostejši model izotropnega neba z eno samo komponento difuznega sevanja (metoda 2, SIST EN 52010-1). V tem primeru je globalno sončno obsevanje vsota direktnega in difuznega urnega obsevanja:

$$I_{glob,0} = I_{dir,0} + I_{dif,0} = \left(\frac{Wh}{m^2 \cdot h} = \frac{W}{m^2} \right)$$

- v računskem postopku najprej določimo urni indeks jasnega neba k_T (v uri h):

$$k_{T,h} = \left(\frac{I_{glob,0}}{I_{ex,0}} \right)$$

$\xleftarrow{\text{TML ARSO (W/m}^2\text{)}} I_{glob,0}$
 $\xleftarrow{\text{urno sončno obsevanje na zunanjem robu ozračja (W/m}^2\text{)}} I_{ex,0}$

- in urno sončno obsevanje na vodoravno ploskev na robu ozračja $I_{ex,o,h}$ (v uri h)

$$I_{ex,o,h} = \frac{12}{\pi} \cdot G_{ex} \cdot \left(\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi \cdot (\omega_2 - \omega_1)}{180} \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta \right) \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

$G_{ex} = 1370 \cdot \left[1 + 0,033 \cdot \cos \left(\frac{360}{365} \cdot n \right) \right] \left(\frac{W}{m^2} \right)$

urni kot na koncu urnega intervala (°) urni kot na začetku urnega intervala (°)
 solarna konstanta – sončnega sevanje v smeri sončnih žarkov (W/m²) zaporedni dan v letu

- komponento difuznega urnega obsevanja določimo z indeksom jasnosti neba k_T z empiričnimi izrazi (prikazan Orgill-Hollands-ov model):

$$\frac{I_{dif,0}}{I_{glob,0,ARSO}} = \begin{cases} 1 - 0,249 \cdot k_T \\ 1,557 - 1,84 \cdot k_T \\ 0,177 \end{cases}$$

- če je za BEM-orodje potreben podatek o žarkovnem urnem sončnem obsevanju, se ta določi z izrazom:

$$I_{beam,h} = \frac{I_{dir,0}}{\sin \alpha_{sol}} \left(\frac{Wh}{m^2h} \right)$$

- če je za BEM-orodje potreben podatek o oblačnosti neba, ki ga TML ARSO prav tako ne navaja, lahko uporabimo empirični model (glej poglavje 3.8.).

Pojasnilo: Indeks jasnosti neba k_T je opredeljen v SIST EN 52010-1 s solarno konstanto G_{ex} in ne z ekstraterestričnim urnim sončnim obsevanjem na vodoravno ploskev $I_{ex,0}$.

Pojasnilo: Uporabljene oznake so povzete po podpornem standardu SIST EN 52010-1:2017 iz direktive EPBD. Ker BEM-orodja praviloma potrebujejo podatke o urnih vrednostih (če izvajajo numerično modeliranje v krajših časovnih korakih, sevanje interpolirajo), bomo energijski tok sončnega sevanja "G" (W/m²) zapisali kot sončno obsevanje, torej energijo, ki jo ploskev sprejme v obdobju 1 ure, z oznako "I" (Wh/(h·m²) = W/m²). Z indeksom "0" navajamo urno sončno obsevanje na vodoravno ploskev.

Primer: komponenti sončnega sevanja za 15. oktober med 10 in 11 uri v Ljubljani sta:

$$n = 288, \delta = -9,6^\circ, \omega_2 = -15^\circ, \omega_1 = -30^\circ, \varphi = 46^\circ, I_{\text{glob},0,\text{ARSO}} = 420 \text{ W/m}^2$$

$$G_{\text{ex}} = 1370 \cdot \left[1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360}{365} \cdot 288\right) \right] = 1381 \text{ W/m}^2$$

$$I_{\text{ex},0,h} = \frac{12}{\pi} \cdot 1381 \cdot (\cos 46 \cdot \cos(-9,6) \cdot (\sin(-15) - \sin(-30)) + \frac{\pi \cdot (-15 - (-30))}{180} \cdot \sin 46 \cdot \sin(-9,6))$$

$$I_{\text{ex},0,h} = 706 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \rightarrow k_{T,h} = \frac{420}{706} = 0,595 \rightarrow \frac{I_{\text{dif},0}}{I_{\text{glob},0}} = 1,557 - 1,84 \cdot 0,595 = 0,462$$

$$I_{\text{dif},0,h} = 0,462 \cdot 420 = 194 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad I_{\text{dir},0,h} = 420 - 194 = 226 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

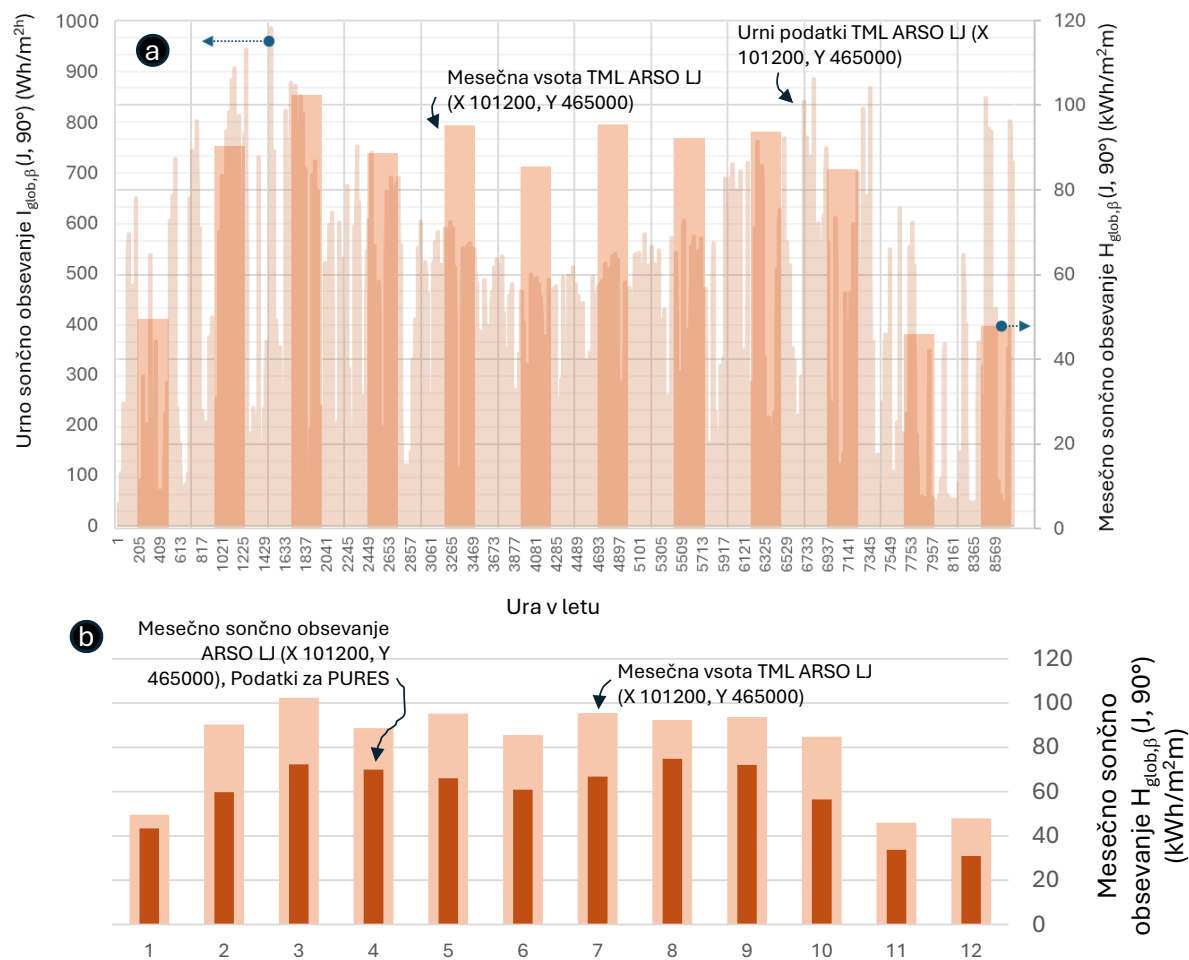
Pri statični in dinamični metodi v orodjih BEM se razlikujejo tudi zbirke meteoroloških podatkov, ki jih uporabljajo programska orodja. To je lahko eden od razlogov za razliko med modeliranim toplotnim odzivom stavbe. Pri statičnem modeliranju programska orodja uporabljajo tipična referenčna leta ARSO, ki navajajo mesečna povprečja spremenljivk. Poleg tega ne uporabljajo modelov za izračun sončnega obsevanja na poljubno usmerjeno ploskev, saj se tudi to za diskretne usmeritve (naklon, azimut) tudi prenese s portala ARSO. Primer za lokacijo X 101000, Y 462000 je prikazan na sliki 17.

a	Smer	Naklon	Jan (Wh/m ²)	Feb (Wh/m ²)	Mar (Wh/m ²)	Apr (Wh/m ²)	Maj (Wh/m ²)	Jun (Wh/m ²)	Jul (Wh/m ²)	Avg (Wh/m ²)	Sep (Wh/m ²)	Okt (Wh/m ²)	Nov (Wh/m ²)	Dec (Wh/m ²)	Letna energija (kWh/m ²)
	Vodoravno	0	917	1731	2759	4049	4894	5274	5469	4739	3354	1911	983	698	1121

b	Smer	Naklon	Jan (Wh/m ²)	Feb (Wh/m ²)	Mar (Wh/m ²)	Apr (Wh/m ²)	Maj (Wh/m ²)	Jun (Wh/m ²)	Jul (Wh/m ²)	Avg (Wh/m ²)	Sep (Wh/m ²)	Okt (Wh/m ²)	Nov (Wh/m ²)	Dec (Wh/m ²)	Letna energija (kWh/m ²)
	J	90	1401	2134	2334	2329	2129	2026	2154	2413	2400	1821	1126	997	707

Slika 17: Mesečno sončno obsevanje na vodoravno ploskev iz zbirke TML ARSO za lokacijo X 101000, Y 462000 (a) in iz te zbirke izračunano mesečno sončno obsevanje na J/90°orientirani ploskev po modelu ARSO (b).

Pri dinamičnem modeliranju imajo orodja vgrajene algoritme za izračun komponent urnega sončnega obsevanja na poljubno orientirano ploskev. Zaradi tega so lahko razlike med statičnim in dinamičnim modeliranjem še večje. Primer na sliki 18. to potrjuje.



Slika 18: Sončno obsevanje na vodoravno ploskev iz zbirke TML ARSO za lokacijo X 101000, Y 462000 in iz te zbirke izračunano mesečno sončno obsevanje (a) - mesečno sončno obsevanje na navpični gradnik toplotnega ovoja stavbe, usmerjen proti jugu, izračunano iz modelov navedenih v standardu SIST EN 52010-1:2017 v EPBD in (b) sončno obsevanje navedeno v podatkovni zbirki ARSO.

3.5. OSVETLJENOST ZUNANJE (VODORAVNE) POVRŠINE

Modeliranje osvetljenosti stavbe oziroma prostorov v BEM-orodjih je razdeljeno na:

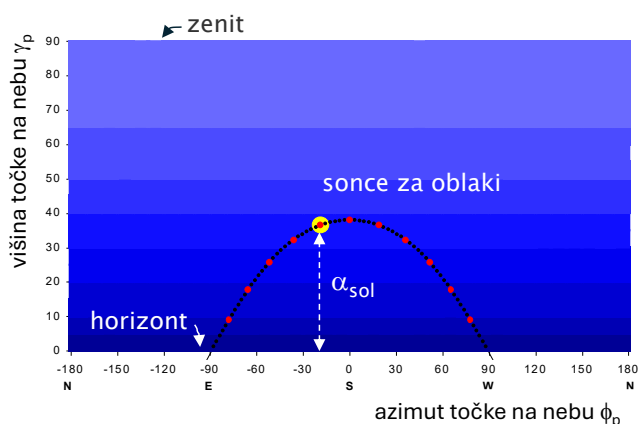
- statično modeliranje faktorja dnevne svetlobe FDS, ki se izračuna pri dogovorjenih pogojih svetlosti neba le enkrat in je konstrukcijska karakteristika stavbe oziroma prostora;
- dinamično modeliranje osvetljenosti izbrane ravnine v stavbi oziroma prostoru, ki se izvede v vsakem časovnem koraku modeliranja z upoštevanjem stanja neba v tem času; nebo je tako lahko jasno, delno oblačno ali enakomerno oblačno.

Po pravilu se FDS izračuna pri enakomerno oblačnem vremenu, pri katerem porazdelitev svetlosti (nebesne poloble) ustreza modelu CIE (Mednarodne organizacije za razsvetljavo ali angl. International Commission on Illumination). Glavni značilnosti modela svetlosti neba CIE sta: točke, ki so enako nad horizontom, imajo enako svetlost ne glede na nebesno smer, torej bo enak prostor v stavbi z odprtinami na primer proti jugu ali severu imel enak FDS. Svetlost točk na nebu pa se spreminja med horizontom in zenitom v razmerju ena proti tri (točka zenita je trikrat svetlejša od točk na horizontu). Svetlost posamezne točke na nebu L_p , ki ustreza CIE modelu in je nad horizontom kot, določimo z izrazom, v katerem je L_z trenutna svetlost točke v zenitu:

$$L_p = L_z \cdot \left(\frac{1 + 2 \cdot \sin \gamma_p}{3} \right) \left(\frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \right) \quad L_z = \frac{9}{7 \cdot \pi} \cdot (300 + 2100 \cdot \sin \alpha_{\text{sol}}) \left(\frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \right)$$

Torej se svetlost pri modelu CIE oblačnega neba spreminja v dnevu glede na položaj Sonca (višino α_{sol}) za oblaki v opazovanem trenutku v dnevu (slika 19).

Slika 19: Svetlost neba, določena z modelom enakomerno oblačnega neba CIE, ki se uporablja za določitev faktorja dnevne svetlobe.



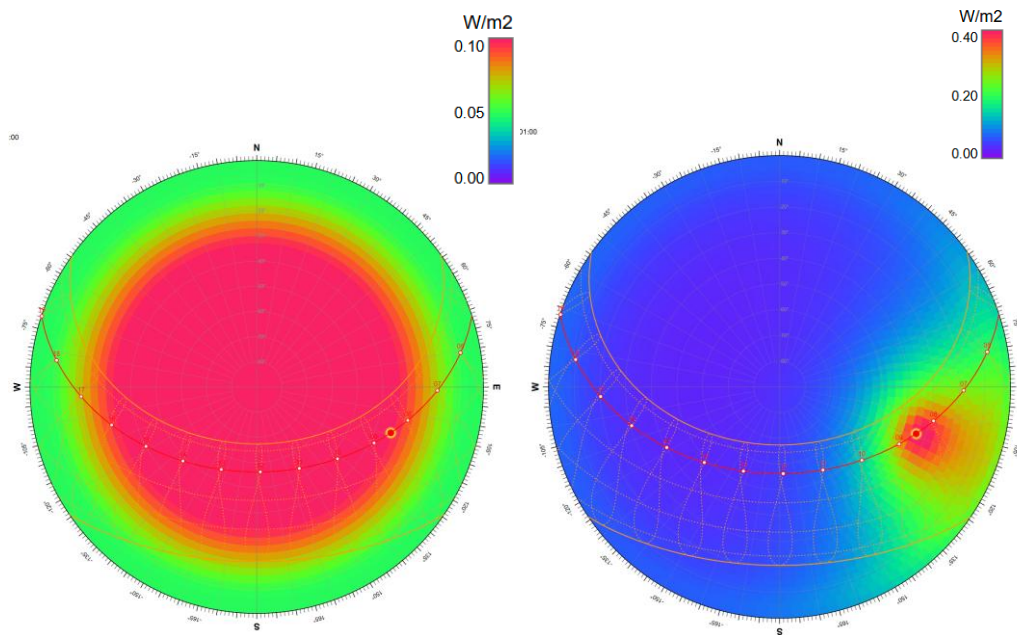
Model enakomerno oblačnega neba CIE se uporablja pri izračunu faktorja dnevne svetlobe FDS. Za dinamično modeliranje stavb lahko uporabimo tudi druge modele svetlosti neba, ki jih je opredelila Mednarodna komisija za razsvetljavo (CIE) (slika 20):

CIE STANDARD GENERAL SKY TYPES

NONE

- 01. CIE Standard Overcast Sky
- 02. Overcast, steep grade, some Sun
- 03. Overcast, moderate grade, no Sun
- 04. Overcast, moderate grade, some Sun
- 05. CIE Standard Uniform Sky
- 06. Partly cloudy, no grade, some Sun
- 07. Partly cloudy, no grade, more Sun
- 08. Partly cloudy, no grade, distinct corona

- 09. Partly cloudy, obscured Sun
- 10. Partly cloudy, circumsolar region
- 11. White-blue sky, distinct corona
- 12. CIE Standard Clear Sky, low turbidity
- 13. CIE Standard Clear Sky, some pollution
- 14. Cloudless turbid sky, broad corona
- 15. White-blue turbid sky, broad corona
- 16. Traditional CIE Overcast Sky



Lokacija: Ljubljana ($\varphi = 46,05^\circ$, $\phi = 14,50^\circ$; 21. avgust 2024, čas 8:31)

Slika 20: CIE je opredelila različne modele svetlosti neba (zgoraj), primer energijskega toka neba pri oblačnem in jasnem nebu za izbrano uro v letu (spodaj). (Vir: <https://andrewmarsh.com/software/cie-sky-web/>).

Drugače od sončnega sevanja v zbirkah meteoroloških spremenljivk (TML) praviloma ni podatkov o osvetljenosti okolice v vsakem časovnem koraku (uri). Zato se pogosto uporabljajo konstante svetlobnega učinka sončnega sevanja K_s , s katerimi podatek o sončnem sevanju (kot globalno, direktno ali difuzno) preračunamo v gostoto svetlobnega toka na površino, ki sprejema sončno sevanje kot njeno osvetljenost. Za pretvorbo se uporabljajo izkustvene konstante svetlobnega učinka sončnega sevanja. Nekaj primerov navaja slika 21.

$$E_{p, \text{horizontalno}} = \frac{K_{s, \text{glob}} \cdot G_{\text{glob}}}{K_{s, \text{dif}} \cdot G_{\text{dif}} \cdot \left(\frac{\text{lm}}{\text{m}^2} = \text{lx} \right)}$$


	Ks (lm/W)
oblačno nebo	107
jasno nebo, difuzno sevanje	144
jasno nebo, direktno sevanje	$51,8 + 1,646 \cdot \alpha_{\text{sol}} - 0,01513 \cdot \alpha_{\text{sol}}^2$
jasno nebo, globalno sončno sevanje	$91,2 + 0,702 \cdot \alpha_{\text{sol}} - 0,00063 \cdot \alpha_{\text{sol}}^2$

višina sonca ↑

Slika 21: Osvetljenost vodoravne nesenčene površine lahko določimo z empiričnimi izrazi na podlagi sončnega sevanja.

3.6. TEMPERATURA ZEMLJINE

Toplota okolja je obnovljiv vir energije, ki ga lahko izkoriščamo z aktivnimi sistemi, na primer toplotnimi črpalkami, ali z aktivnimi naravnimi sistemi, na primer zemeljskimi prenosniki toplote. V obeh primerih gre za "plitve" geotermalne sisteme, ki izkoriščajo toploto od sončnega obsevanja. Vpliv, ki ga zaznamo s periodičnim spreminjanjem temperature zemljine do globine približno 15 m pod površjem. Za dinamično modeliranje učinkovitosti tehničnih stavbnih sistemov, ki ta obnovljivi energijski vir izkoriščajo, je vplivna spremenljivka časovno spreminjajoča se temperatura zemljine. Ob nekaterih sprejemljivih predpostavkah (na primer gostota odvedenega toplotnega toka ne vpliva na temperaturo zemljine, toplotne lastnosti zemljine se med letom ne spreminjajo) temperaturo zemljine $\theta_{z,n}$ na globini z (m) pod površjem v tekočem dnevu n v letu določimo z izrazom (tudi slika 22):

temperatura zemljine na globini z (m) v dnevu n v letu povprečna letna temperatura zunanega zraka letna amplituda temperature zunanega zraka število dni po 1.1. ko je povprečna dnevna θ_e najnižja

$$\theta_{z,n} = \theta_{e, \text{avg}, \text{an}} - A_{e, \text{an}} \cdot e^K \cdot \cos \left[\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot (n - \Delta n) - \frac{z}{\left(\frac{365 \cdot a_{\text{zemljina}}^*}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}}} \right] \text{ (}^\circ\text{C)}$$

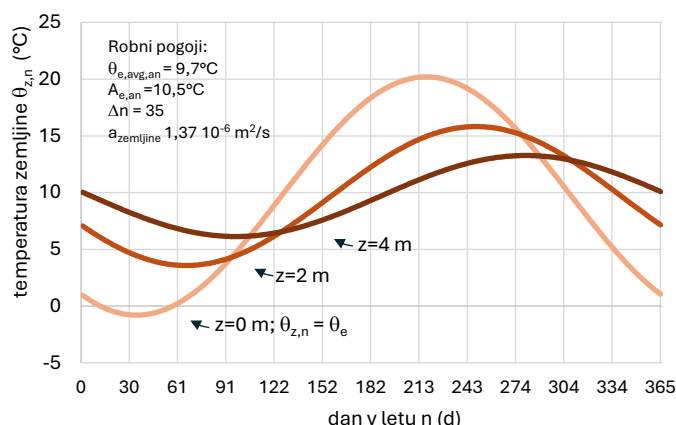
	θ_e (°C)	A_e (°C)	Δn (d)
primorsko podnebje	13,8	9	37
celinsko podnebje	9,2	11	35
alpsko podnebje	8,2	11	32

$$K = -z \cdot \left(\frac{\pi}{365 \cdot a_{\text{zemljina}}^*} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ (-)}$$

ekvivalentna toplotna difuzivnost zemljine toplotne lastnosti, ki vplivajo na dinamični prenos toplote v zemljini

$$a_{\text{zemljine}}^* = a_{\text{zemljine}} \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24 \text{ (} \frac{\text{m}^2}{\text{d}} \text{)}$$

	a_{zemljine} (m ² /s)
kamenje	$2,22 \cdot 10^{-7}$
glina	$1,01 \cdot 10^{-6}$
granit	$1,37 \cdot 10^{-6}$



Slika 22: Temperatura zemljine v letu izračunana za robne pogoje, ki so navedeni na sliki.

Temperatura zemljine je meteorološki podatek in je vključena v nekatere podatkovne zbirke, na primer IWEK (International Weather for Energy Calculation). To je zelo razširjena zbirka tipičnih meteoroloških let, ki jo je razvil ASHRAE (<https://tpc.ashrae.org>). Vsebuje podatke za več kot 3000 krajev po svetu, tudi za Ljubljano/Brnik (postaja WMO 130140). Brezplačne podatkovne zbirke so na voljo tudi v drugih zapisih, na primer kot EPW (EnergyPlus Weather) za uporabo v BEM-orodju EnergyPlus. Slika 23 prikazuje del datoteke IWEK za Ljubljano/Brnik z vrednostmi temperature zemljine.

- Monthly Calculated "undisturbed" Ground Temperatures** °C												
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0.5 m	3.6	0.3	-0.6	0.2	4.7	9.7	14.4	17.9	18.9	17.3	13.4	8.5
2.0 m	6.6	3.5	2.0	1.9	4.3	7.8	11.5	14.7	16.3	16.0	13.8	10.4
4.0 m	8.6	6.1	4.7	4.2	5.1	7.1	9.6	12.0	13.7	14.1	13.1	11.1

- **These ground temperatures should NOT BE USED in the GroundTemperatures object to compute building floor losses.
- The temperatures for 0.5 m depth can be used for GroundTemperatures:Surface.
- The temperatures for 4.0 m depth can be used for GroundTemperatures:Deep.
- Calculations use a standard soil diffusivity of 2.3225760E-03 {m**2/day}

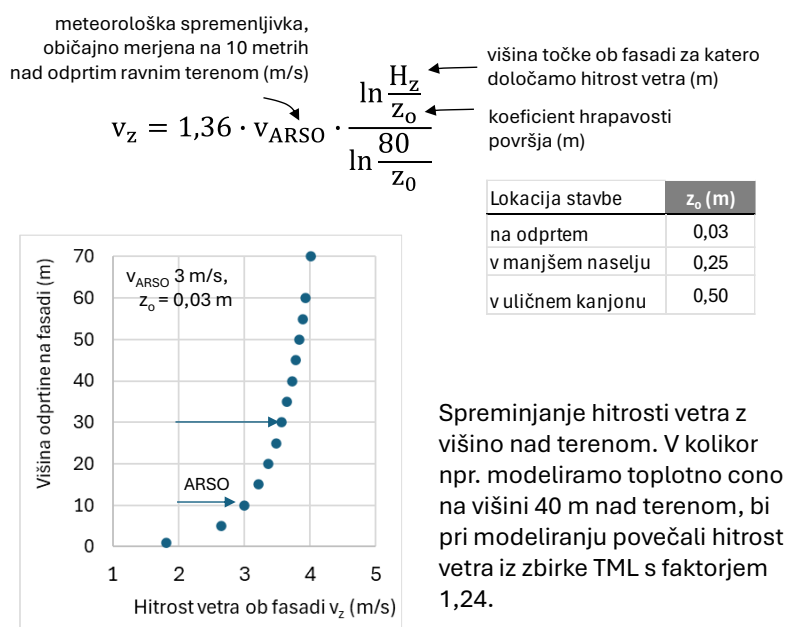
Slika 23: Del datoteke IWEK za Ljubljano/Brnik (WMO 130140) s podatki o temperaturi zemljine; izračunano z $\alpha_{zemljine} = 2,32257 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{dan}$.

3.7. HITROST VETRA V GRAJENEM OKOLJU

Zbirke meteoroloških spremenljivk so oblikovane za odprto okolje, zato je treba njihove vrednosti v mestnem okolju prilagoditi lokalnim danostim. Hitrost vetra ob fasadi na primer vpliva na vdor zraka, predvsem pa na izmenjavo zraka med stavbo in okolico pri naravnem prezračevanju in hlajenju stavb z naravnim prezračevanjem. V grajenem okolju lahko hitrost vetra določimo s fizikalnim modeliranjem polja temperatur, hitrosti in zračnega tlaka ter koncentracij snovi (vodne pare, onesnažil) v majhnih delcih, na katere razdelimo ozračje z upoštevanjem enačb ohranitve (energije, mase in gibalne količine), znanih pod imenom Navier-Stokesove enačbe. Uporabimo jih lahko tudi za določitev temperatur v gradnikih stavb. Tak način določanja spremenljivk stanja imenujemo računska dinamika kapljev (angl. Computational Fluid Dynamics - CFD). V uporabi je veliko programskih orodij, vendar

je določitev spremenljivk stanj v zunanjem okolju, gradnikih in notranjem okolju časovno zahtevno in ne omogoča celoletnega modeliranja. Orodja BEM praviloma nimajo modulov za računsko dinamiko tekočin (angl. Computational Fluid Dynamics CFD) zaradi kompleksnosti opisa geometrije in potrebnega računskega časa, zato uporabljajo empirične enačbe, s katerimi opisujemo, kako se na natančno določenem območju, na primer ob fasadi visoke stavbe, spreminjajo lastnosti zunanjega okolja.

V tehničnem standard SIST EN 12831-1:2017 po EPBD je naveden empirični izraz, s katerim ocenimo hitrost vetra pred fasadami visokih stavb na podlagi meteoroloških podatkov o hitrosti vetra, ki pa so izmerjene v odprtem prostoru, običajno na višini 10 m (slika 24). Empirični izraz, ki ga navaja ta standard, je prilagojen grajenemu okolju, z njim pa določimo hitrosti vetra v_z ob fasadi stavb na višini z nad terenom:



Slika 24: Model za izračun hitrosti vetra na višini z nad terenom, kakor ga navaja EPBD tehnični standard SIST EN 12831-1:2017 po EPBD.

3.8. TEMPERATURA NEBA IN FAKTOR SEVALNE IZMENJAVE (TOPLLOTNEGA TOKA)

Sevalno hlajenje gradnikov toplotnega ovoja stavb je proces, ki je odvisen od toplotnega toka, ki ga gradnik izmenjuje z okoliškimi površinami – terenom in grajenim okoljem ter predvsem z nebom. Kakor je to značilno za prenos toplotnega toka s sevanjem, vse okoliške površine “pošiljajo” toplotni tok na gradnik in ta ga absorbira. Koliko od prejetega toplotnega sevanja se v gradniku spremeni v toploto, opredeljuje absorptivnost toplotnega sevanja a_{IR} površine gradnika. Hkrati pa gradnik ovoja stavbe oddaja toplotno sevanje s svoje površine proti vsem okoliškim površinam, ki jih “vidi” proporcionalno z emisivnostjo toplotnega sevanja ε_{IR} . Kako velike so te površine, opredelimo s faktorjem sevalne

izmenjave F_{i-j} . Če gradnik oddaja sevalni toplotni tok s svoje površine "1" samo na eno okoliško površino "2", na primer ravna streha stavbe proti prostemu nebu, bo F_{1-2} enak 1. Če je površin, s katerimi gradnik stavbnega ovoja izmenjuje toplotni tok s sevanjem, več, bo vsaka okoliška površina "j" imela drugačen F_{1-j} , vendar bo vsota faktorjev sevalne izmenjave enaka 1, gradnik pa bo toplotni tok s sevanjem najbolj izmenjeval s površino z najvišjim faktorjem sevalne izmenjave. Glede na temperature gradnikov narave in grajenega okolja se med gradniki prenaša dolgovalovno toplotno sevanje (z valovnimi dolžinami $\lambda \gg 3 \mu\text{m}$) (slika 25).

Pojasnilo: optični lastnosti površine gradnika za dolgovalovno toplotno sevanje α_{IR} in ε_{IR} povezuje Kirchhoffov zakon: $\alpha_{\text{IR}} = \varepsilon_{\text{IR}}$.

Pojasnilo: sevalno hlajenje je proces, ki se dogaja ves dan, vendar ima na temperaturo gradnika večji vpliv v obdobju brez sončnega sevanja ("nočno sevalno hlajenje"). Učinek sevalnega hlajenja podnevi povečamo, če ima površina osončenega gradnika ob visoki emisivnosti toplotnega sevanja ε_{IR} nizko absorptivnosti kratkovalovnega (sončnega sevanja) α_s . Glejte tudi: poglavje 5.4. Selektivne optične lastnosti površin netransparentnih gradnikov stavb.

Če predpostavimo, da gradnik toplotnega ovoja stavbe izmenjuje toplotni tok le z nebom je izmenjan specifični toplotni tok s sevanjem $\dot{q}_s$ je enak:

$$\dot{q}_s = 5,67 \cdot \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{IR}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{sky}}} - 1} \cdot F_{\text{sky}} \cdot \left[\left(\frac{\theta_{\text{se}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_{\text{sky}} + 273}{100} \right)^4 \right]$$

$\swarrow$
 0,65 za jasno nebo
 0,95 za oblačno nebo

Slika 25: Vplivne spremenljivke sevalnega hlajenja.

Emisivnost neba ε_{sky} in navidezna temperatura neba θ_{sky} sta odvisni od njegove pokritosti neba z oblaki. Ker TML ARSO tega podatka ne vključuje, uporabimo empirični izraz (Martin-Berdahlov model) na podlagi temperature rosišča θ_{dew} :

relativna vlažnost zraka (%) ↗

$$\theta_{\text{dew}} = \frac{237,7 \cdot \ln\left(\frac{\varphi_e}{100}\right) + 17,27 \cdot \theta_e}{17,27 - \ln\left(\frac{\varphi_e}{100}\right) - \frac{17,27 \cdot \theta_e}{237,7 + \theta_e}}$$

↙ temperatura rosišča (°C)

$$\varepsilon_{\text{sky}} = 0,711 + 0,56 \cdot \left(\frac{\theta_{\text{dew}}}{100}\right) + 0,73 \cdot \left(\frac{\theta_{\text{dew}}}{100}\right)^2$$

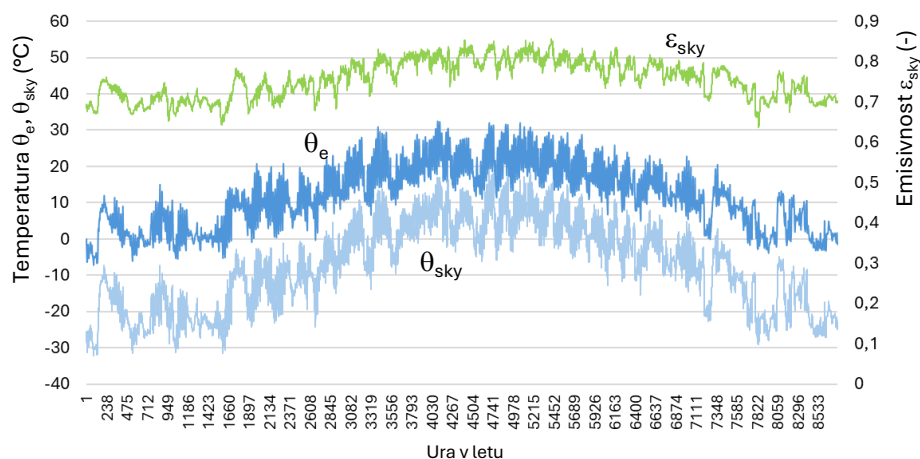
Vir: Zang et al: Sky Temperature Estimation and Measurement for Longwave Radiation Calculation, Building Simulation 2017.

Tudi za temperature neba v literaturi najdemo veliko empiričnih izrazov, med drugimi tudi izraz: (Berdahl-Frombergov model):

$$\theta_{\text{sky}} = \left(\varepsilon_{\text{sky}}^{0,25} \cdot (\theta_e + 273) \right) - 273$$

Vir: Zang et al: Sky Temperature Estimation and Measurement for Longwave Radiation Calculation, Building Simulation 2017.

Primer izračuna emisivnosti ε_{sky} in temperature neba θ_{sky} prikazuje slika 26.



Slika 26: Temperatura zunanjega zraka, temperatura neba in emisivnost neba, izračunane s podatki TML ARSO za Ljubljano.

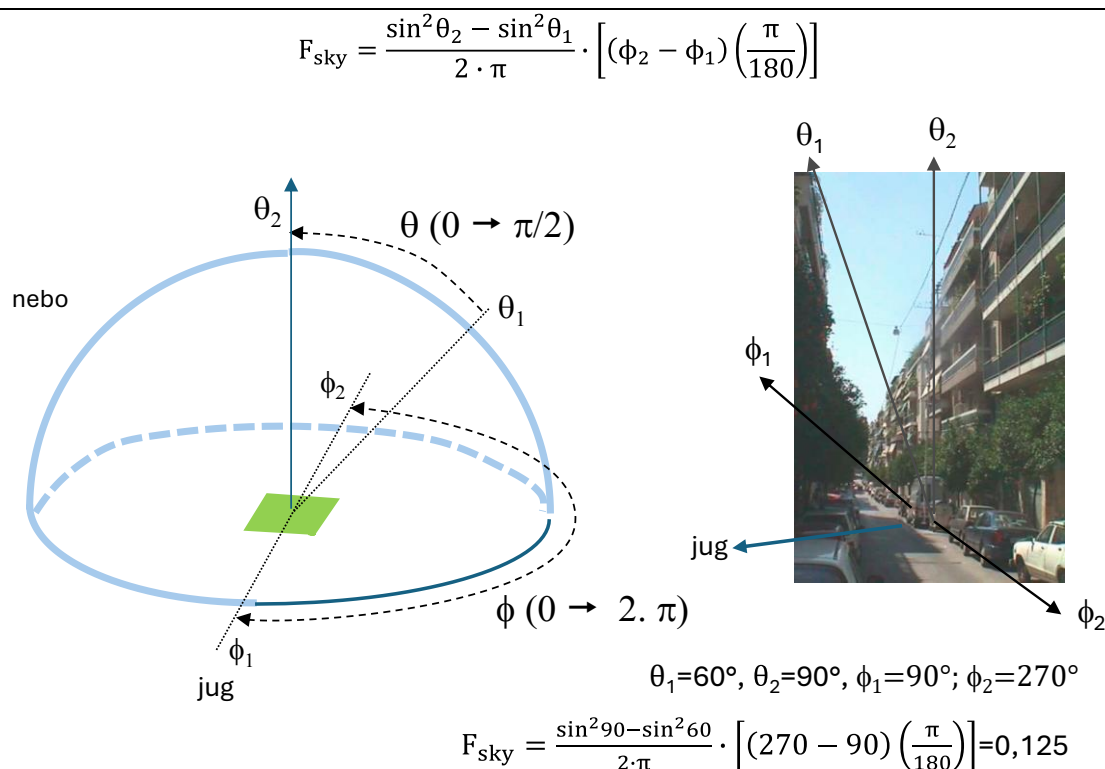
Nekatera orodja BEM potrebujejo za izračun temperature neba podatek o faktorju oblačnosti f_{cloud} (od 0 do 1 = enakomerno oblačno nebo). Ker ta podatek ni vključen v TML ARSO, se lahko uporabi empirični izraz:

$$f_{\text{cloud}} = \left(1,4286 \cdot \frac{I_{\text{dif},o}}{I_{\text{glob},o}} - 0,3 \right)^{0,05}$$

Vir: Zang et al: Sky Temperature Estimation and Measurement for Longwave Radiation Calculation, Building Simulation 2017.

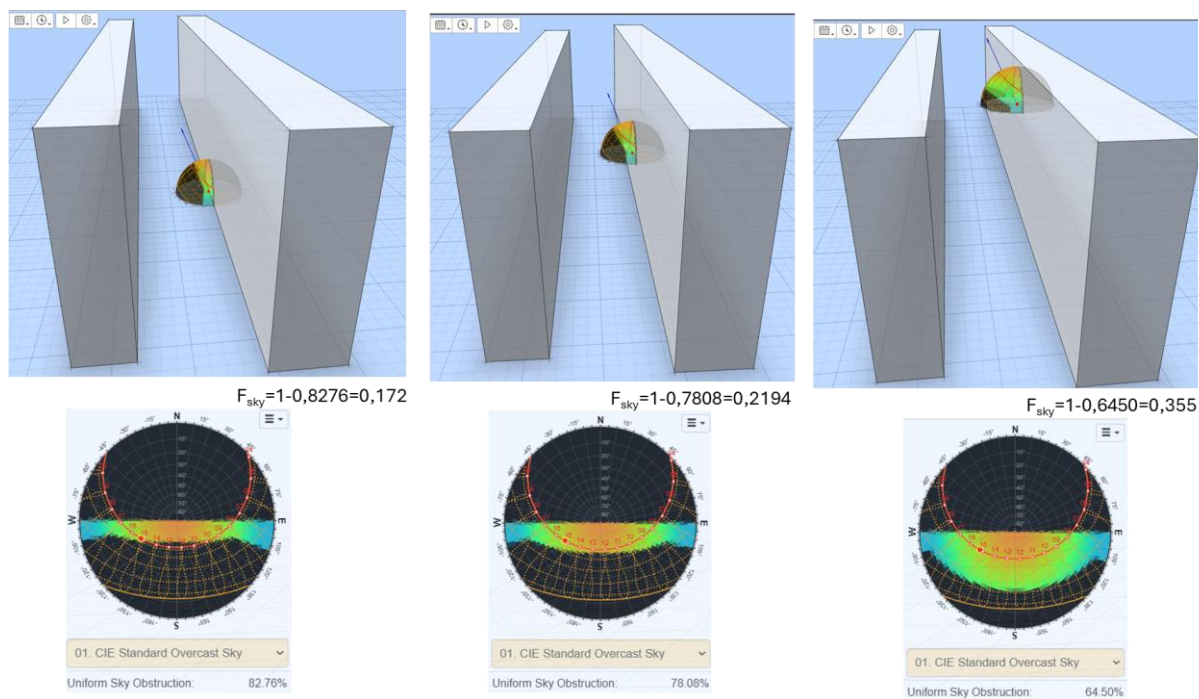
Model s katerim določimo difuzno komponento urnega sončnega obsevanja na vodoravno nesenčeno ploskev $I_{dif,o}$ je naveden v poglavju Sončno sevanje in obsevanje, medtem, ko je celotno sončno sevanje $I_{glob,o}$ vključeno v TML ARSO. V temnem delu dneva ($I_{glob,o} = 0$) se privzame povprečni popoldanski faktor.

V mestnem okolju, v uličnih kanjoni, je učinek sevalnega hlajenja zmanjšan zaradi zastrtega "pogleda" gradnikov stavb proti nebu. F_{sky} v takih primerih določimo z vključitvijo površine polkrogle (neba) med geometrijskimi omejitvenimi koti (slika 27).



Slika 27: Omejitveni kot neba in računski primer izračuna faktorja vidnega neba F_{sky} .

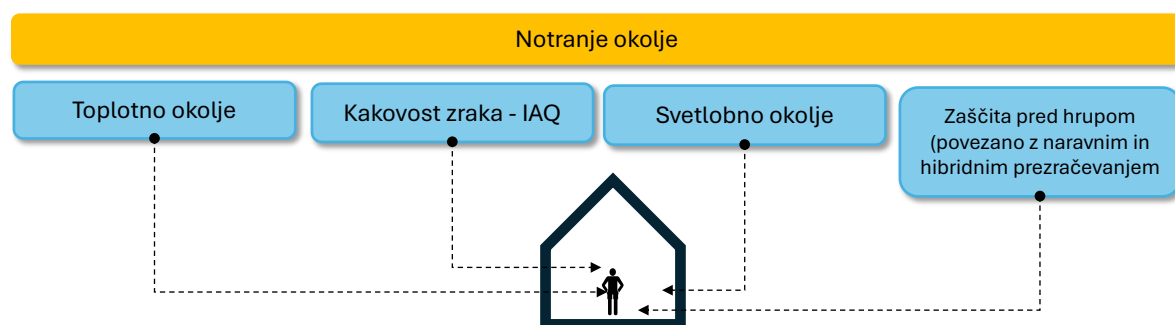
V mestnem okolju je sevalno hlajenje precej manj učinkovito zaradi nižjega faktorja vidnega neba F_{sky} , vendar so lahko razlike med izpostavljenimi toplotnimi conami v stavbi lahko velike. Primer faktorja vidnega neba v vitki ulici na različnih višinah stavbe (toplotne cone) je prikazan na sliki 28. Izračunan je bil z namenskim orodjem BIM.



Slika 28: Faktor vidnega neba se v uličnih kanjonih bistveno razlikuje glede na višino toplotne cone nad terenom. (Vir: <https://andrewmarsh.com/software/shading-box-web/>).

4. DINAMIČNO MODELIRANJE NOTRANJEGA OKOLJA

V stavbah, namenjenih bivanju in delu, moramo zagotoviti zdravo, storilno in prijetno notranje okolje. Pri načrtovanju stavb upoštevamo izkustvena pravila, opredeljena z razredi kakovosti na podlagi štirih osnovnih domen presoje, ki so navedenih na sliki 29.



Slika 29: Tematska poglavja v tematskem sklopu o notranjem okolju.

4.1. STANDARDIZIRANI RAZREDI KAKOVOSTI NOTRANJEGA OKOLJA (IEQ)

Pri načrtovanju stavb napovedujemo stanje notranjega okolja s predpostavkami in poenostavitvami. Izkušnje, pridobljene pri že zgrajenih stavbah, pa potrjujejo, da bodo stavbe zdrave in prijetne za bivanje ter da bo opravljanje dela v njih pa učinkovito, če bodo pri načrtovanju doseženi vsaj predpisani razredi kakovosti notranjega okolja. Le z dinamičnim modeliranjem notranjega okolja v stavbah lahko namreč ustrezno preverimo njihovo kakovost stavb in skladnost z načrtovano kakovostjo notranjega okolja. Zahteve so opredeljene za izbrane spremenljivke, njihova primerna vrednost pa opredeljena z razredi kakovosti, ki pomenijo sprejemljiva odstopanja od teoretično idealnih vrednosti spremenljivk. Nekaj dokumentov, v katerih so v Sloveniji opredeljene zahteve IEQ, in opisi razredov kakovosti (od I do IV) so navedeni na sliki 30.

GZ: člen 155. (podaljšanje uporabe izvršilnih predpisov)

Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb UL RS 42/02; EN ISO 7730; na ta pravilnik se sklicuje tudi PURES 2010. Minimalna zahteva: razred C

SIST EN 15251:2007 – „Merila notranjega okolja za načrtovanje in ocenjevanje toplotnih lastnosti stavb z upoštevanjem notranje kakovosti zraka, toplotnega okolja, svetlobe in hrupa (A, B, C, D)

PURES 2022 (UL RS 70/22)

Prevzeti standard za EPD – **SIST EN 16798—1:2019** Energijske lastnosti stavb – Prezračevanje stavb – 1. del: Vstopni podatki notranjega okolja za projektiranje in ocenjevanje energijskih lastnosti stavb glede kakovosti notranjega zraka, toplotnega ugodja, razsvetljave in akustike.

Zahteva II.razred IEQ; opredeljeno posebej podrobno za toplotno okolje in IAQ



Kategorija IEQ	Opis
I	Visoka stopnja kakovosti, priporočeno za stavbe v katerih bivajo občutljive osebe – dojenčki, otroci; oboleli, starejše osebe
II	Pričakovana stopnja kakovosti, za nove in obnovljene stavbe
III	Še sprejemljivo, srednja stopnja kakovost, za obstoječe stavbe
IV	Sprejemljivo za kratka obdobja v letu

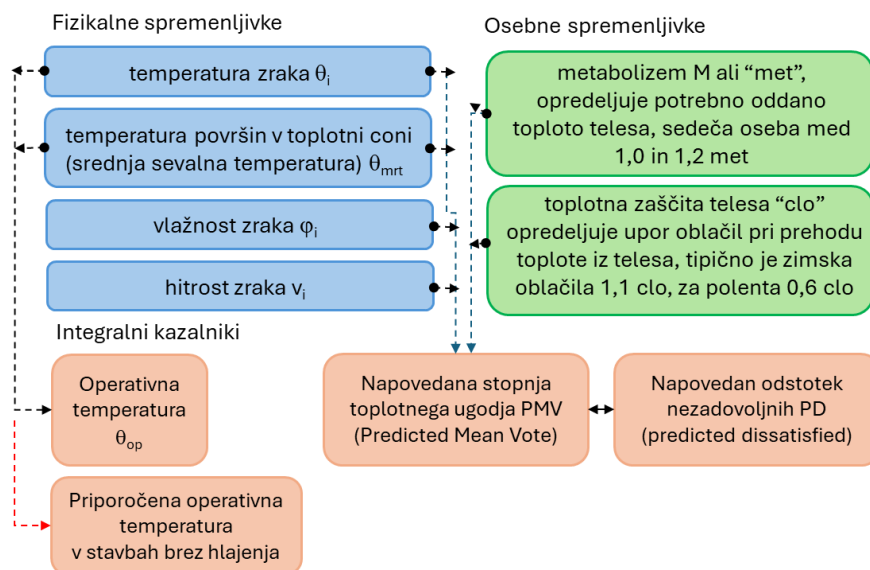
ne pomeni nevarnosti za zdravje !

Slika 30: Standardizirani razredi kakovosti notranjega okolja; v stavbah moramo zagotoviti najmanj II. razred kakovosti vseh kazalnikov IEQ.

4.2. IEQ: TOPLOTNO UGODJE V NOTRANJEM OKOLJU (INDOOR ENVIRONMENTAL QUALITY – IEQ)

Toplotno ugodje je občuteno stanje bivanja, ki ga zaznamo pri prenosu toplote iz telesa v notranje okolje. V tem pogledu je telo toplotni stroj, ki notranjo energijo, proizvedeno z metabolizmom, pretvarja v mehansko delo. Kot vsak toplotni stroj, tudi telo ne more pretvoriti vse notranje energije v delo, temveč mora razliko v obliki toplote oddati v okolico. Za to uporablja vse mehanizme prenosa senzibilne toplote – konvekcijo in sevanje s površine kože, prevod na delih, s katerimi smo v stiku s konstrukcijami, pa tudi latentno toploto pri hlapijenju vode na koži in navlaževanju izdihanega zraka. Če nobenega od teh procesov ne občutimo kot motečega, je doseženo največje toplotno ugodje.

Za načrtovanje notranjega toplotnega okolja moramo poznati vplivne spremenljivke. Te delimo na globalne, s katerimi ocenjujemo celotno toplotno cono (prostor) in lokalne, kot na primer temperaturni gradient, turbulence ali sevalna asimetrija, ki jih preverjamo v posamezni točki (na primer delovnem mestu) toplotne cone. Pri dinamičnem modeliranju pridobimo informacije o celoviti oceni toplotnega okolja v vsakem časovnem koraku modeliranja. Vplivne spremenljivke presoje toplotnega ugodja so fizikalne in osebne, kakor to prikazuje slika 31, ter so opredeljene v SIST EN 16798-1 (ISO 17772-1), PURES-3 in TSG-1-004. Pomembno je, da lahko fizikalne spremenljivke določimo le z dinamičnim modeliranjem toplotnega odziva stavb.



Slika 31: Nabor fizikalnih in osebnih spremenljivk, ki so vključene v presojo toplotnega ugodja v notranjem okolju; presojo toplotnega ugodja s temi kazalniki lahko pridobimo le z dinamičnim modeliranjem.

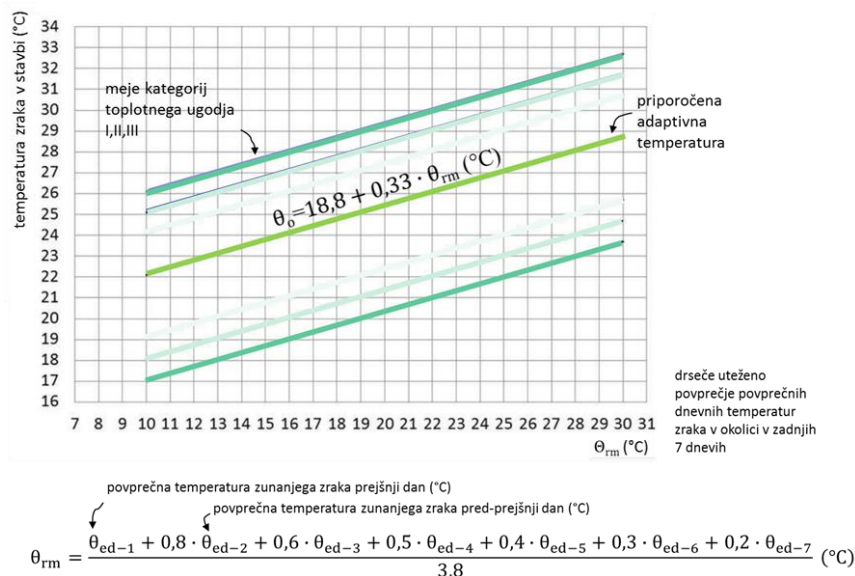
SIST EN 16798-1 (oziroma ISO 17772-1) opredeljuje mejne vrednosti fizikalnih spremenljivk in integralnih kazalnikov toplotnega ugodja ter jih razvršča v štiri razrede kakovosti, navedene na sliki 32. Mejne vrednosti se nekoliko razlikujejo glede na vrsto stavbe (na primer stanovanjske, poslovne stavbe, zdravstvene ustanove). Ob tem je v PURES-3 in TSG-1-004 opredeljeno, da mora biti v stavbah, namenjenih bivanju in delu, biti dosežen vsaj drugi razred kakovosti fizikalnih spremenljivk in integralnih kazalnikov. Pri dinamičnem modeliranju ne opredelimo v naprej obdobja ogrevanja in hlajenja stavb, saj sta odvisni od energijskih lastnosti stavbe. Priporočamo, da se za računski "preklop" med nivojema temperiranja stavbe uporabi drseče 48-urno povprečje temperature zunanjega zraka in za podnebje v Sloveniji vrednost $\theta_{e,48avg}$ 15 °C.

razred toplotnega ugodja	operativna temperatura θ_{op} (°C) stanovanjske stavbe		operativna temperatura θ_{op} (°C) poslovne stavbe		PMV	PD
	obdobje ogrevanja	obdobje hlajenja	obdobje ogrevanja	obdobje hlajenja		
I	21,5 - 25,0	23,5 - 25,5	21,0 - 23,0	23,5 - 25,5	- 0,2 do + 0,2	< 6 %
II	20,0 - 25,0	23,0 - 26,0	20,0 - 24,0	23,0 - 26,0	- 0,5 do + 0,5	< 10 %
III	18,0 - 25,0	22,0 - 27,0	19,0 - 25,0	22,0 - 27,0	- 0,7 do + 0,7	< 15 %
IV	17,0 - 25,0	21,0 - 28,0	17,0 - 25,0	21,0 - 28,0	- 1,0 do + 1,0	< 25 %

ISO 17727-1:2017; SIST EN 16798-1:2018

Slika 32: Vrednosti integralnih kazalnikov kakovosti toplotnega ugodja v notranjem okolju, kakor jih za dinamično modeliranje stavb opredeljujeta PURES-3 in TSG-1-004. Prvi zahteva, da je dosežen najmanj drugi razred kakovosti (II).

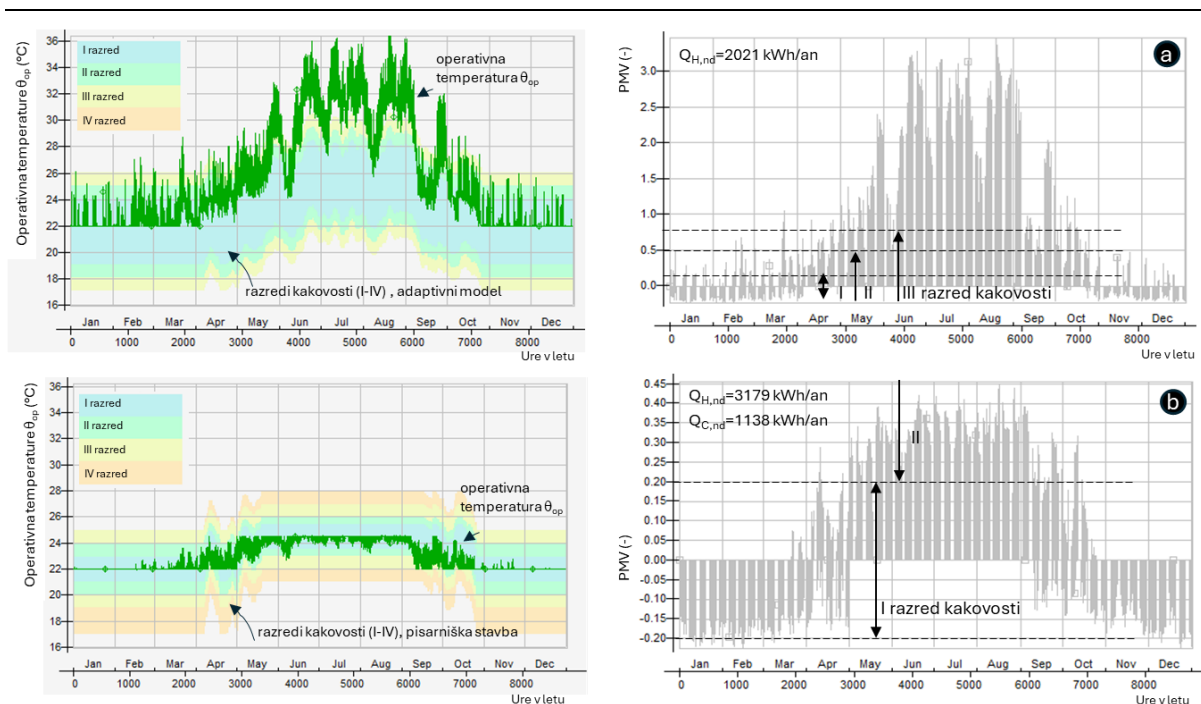
Tehnični standard za stavbe brez mehanskega hlajenja predlaga adaptivno območje operativne temperature, ki se zvišuje glede na temperaturo zunanjega okolja. Ta se opredeli z drsečim povprečenjem temperature okolice v zadnjem tednu, pri čemer imajo bolj oddaljeni dnevi manjšo utež vpliva (slika 33). Kakor opredeljuje PURES-3, da mora načrtovalec stavbe, v kateri TSS mehanskega hlajenja ni vgrajen, dokazati ustreznost toplotnega okolja z dinamičnim modeliranjem. Dodatna zahteva je, da zmnožek razlike modelirane in mejne operativne temperature ter trajanja pregrevanja ne sme biti večji od 200 Kh.



Slika 33: Območja razredov kakovosti toplotnega ugodja v notranjem okolju v stavbah brez mehanskega hlajenja; vrednosti območij so odvisne od uteženega drsečega uteženega povprečja temperature okolice zadnjega tedna θ_{rm} pred trenutkom, za katerega modeliramo toplotno okolje.

4.2.1. Primer dinamičnega modeliranja toplotnega okolja

Kot primer dinamičnega modeliranja toplotnega ugodja v notranjem okolju prikazujemo dva integralna kazalnika (operativno temperaturo θ_{op} in napovedano stopnjo toplotnega ugodja PMV) v referenčnem prostoru REF 2 (slika 11 z opisom robnih pogojev). V prvem primeru (slika 34, a) prostor ni mehansko hlajen, transparentni gradniki (J, Z) pa nimajo senčil. V drugem primeru (slika 34, b) ko je prostor REF 2 mehansko hlajen (ogrevan in hlajen z idealnima generatorjema), transparentni gradniki na J in Z pa imajo zunanja senčila ($S_f \cdot g = 0,05$). Primera potrjujeta prednost dinamičnega modeliranja, saj statično modeliranje načrtovalcem ne omogoča, da bi preverili kakovost notranjega bivalnega in delovnega notranjega okolja.



Slika 34: Modelirana integralna kazalnika (θ_{op} , PMV) toplotnega ugodja v referenčnem prostoru REF 2 (slika 11); primer (a) za prostor brez mehanskega hlajenja in s transparentnimi gradniki brez senčil ($\theta_{op,H,set} = 22^\circ\text{C}$, $\theta_{op,C,set} = -$), primer (b) za mehansko hlajeni prostor ($\theta_{op,H,set} = 22^\circ\text{C}$ in $\theta_{op,C,set} = 24,5^\circ\text{C}$) s transparentnimi gradniki z zunanjimi senčili.

4.3. SVETLOBNO NOTRANJE OKOLJE

Svetlobno ugodje v notranjem okolju je povezano z več fizikalnimi spremenljivkami, s katerimi presojamo, kako bodo uporabniki stavb prepoznavali okolje z vidom in kako bo osvetlitev vplivala na njihovo počutje. Presoja svetlobnega okolja je kompleksen multidisciplinarni proces, ki pa ga pri dinamičnem modeliranju stavb za določitev energijskih kazalnikov omejimo na dinamično modeliranje osvetljenosti površin in preprečevanja motečega bleščanja. Prva naloga vključuje modeliranje naravne osvetlitve stavbe oziroma prostora ter algoritme za prilagajanje delovanja električne osvetlitve glede na razpoložljivosti naravne svetlobe v vsakem časovnem koraku modeliranja in na urnike zasedenosti stavbe. V dinamično modeliranje rabe električne energije za osvetlitev vključimo sijalke z opisom instalirane električne moči in svetlobnim učinkom (lm/W). Ciljna spremenljivka je osvetljenost virtualne/delovne tlorisne površine, običajno 0,8 m nad podom. Modeliranje lahko izvedemo na dva načina:

- z delovanjem sijalk s stikalom ON/OFF, ki delujejo s konstantno projektno električno močjo, ko naravna osvetlitev ne zagotavlja želene osvetlitve $E_{L,set}$ (lx) – ta je odvisna od kompleksnosti dejavnikov, ki jih uporabnik stavbe mora določiti pri bivanju ali delu – od 350 lx v stanovanjskih, 550

lx v poslovnih do 1500 lx v prostorih z zelo zahtevnim vizualnim delom; ciljna osvetlitev se običajno opredeli za izbrano točko na virtualni ravnini v prostoru;

Algoritem uravnavanja delovanja je lahko: $E_{L, set}$ 550 lx, sijalke se vklopijo v časovnem koraku modeliranja naravna osvetlitev ne zagotavlja osvetljenosti 350 lx in izklopijo ko je večja od 550 lx in je stanje časovnika zasedenosti 1.

- z “zatemnjevanjem sijalk”, ki ga modeliramo z linearnim zmanjševanjem električne moči (in oddanega svetlobnega toka) glede na razliko med osvetlitvijo stavbe oziroma prostora z naravno svetlobo in želeno vrednostjo $E_{L, set}$.

Preprečevanje bleščanja je povezano z delovanjem senčil, kar vpliva na količini potrebne dovedene toplote za ogrevanje in potrebne odvedene toplote za hlajenje. Algoritmi, ki vključujejo različne vplivne spremenljivke in robne pogoje, so opisani v poglavju 5.5., slika 50.

4.4. KAKOVOST ZRAKA (INDOOR AIR QUALITY - IAQ)

Splošno znano je, da je zrak v stavbah bolj onesnažen kot je zunanji zrak. Onesnažila v stavbah oddajajo ljudje, živali, materiali in naprave. Njihovo vsebnost lahko zmanjšamo z izločevalniki:

- s filtri, na primer za trdne delce (tudi bakterije in viruse);
- z adsorpcijo molekul na površinah poroznih snovi (na primer aktivno oglje) ali absorpcijo v kapljevini (vodi) za hlapne organske spojine (angl. Volatile Organic Compound - VOC);
- s kemično reakcijo, na primer UV-sevanjem, ki jo vzbudimo z dovodom energije, da molekule onesnažila razpadejo v nenevarne (manj nevarne) molekule.

Pojasnilo: proces izločevanja molekul onesnažil z “odlaganjem” na površinah kapilar v poroznih snoveh imenujemo adsorpcija, izločanjem molekul v kapljevini, najpogosteje vodi, v katero vpihujemo zrak pa absorpcija.

Vendar je najobičajnejši način odstranjevanja onesnažil zraka prezračevanje, tj. proces izmenjave zraka med stavbo in zunanjim okoljem. Učinkovitost prezračevanja merimo s kazalniki kakovosti zraka. Pri modeliranju z orodji BEM se osredotočimo predvsem na onesnažila, ki jih oddajajo ljudje, kar je napovedljiv proces. Zato lahko kot kazalnik (ki bo pričakovano zagotovil primerno kakovost zraka) uporabimo specifično količino izmenjanega zraka (dovedeni zunanji zrak). Vrednosti kazalnikov so določene na podlagi zaznane kakovosti zraka (z vonjem).

Tako kot druge segmente kakovosti notranjega okolja, tudi kakovost zraka (angl. Indoor Air Quality - IAQ) ocenjujemo s štirimi razredi kakovosti (slika 35). Za stavbe, v katerih so največji onesnaževalci zraka ljudje (z dihanjem), je predpisan tehnični standard SIST EN 16798-1:2018 po EPBD. Namesto

kazalnika CO₂ se lahko uporabijo tudi dodatni, na primer delež nezadovoljnih s kakovostjo zraka. S kakovostjo zraka pogosto povezujemo tudi relativno vlažnost zraka v stavbi.

Slika 35: Standardizirani razredi kakovosti IAQ opredeljeni na podlagi koncentracije CO₂ v stavbi.

Razred IAQ	koncentracija CO ₂ v stavbi nad zunanjim okoljem (ppm)
I	550
II	800
III	1350
IV	nad 1350
Opomba; tipična vsebnost CO ₂ v zunanjem zraku je 400 ppm	

Pojasnilo: Tehnični standardi po EPBD so dokumenti, ki jih je določila Evropska komisija z Mandatom M/480, namenjeni pa so opredelitvi energijske učinkovitosti stavb in jih kot primerne standarde določa tudi EPBD v prilogi I.

Pri BEM se za presojo IAQ pogosto uporabljajo vodila/zahteve, ki jih opredeljuje ASHRAE (združenje American Society of Heating, Refrigeration and Air conditioning – ASHRAE 62.1 za stanovanjske in ASHRAE 62.2. za nestanovanjske stavbe). Standarda navajata, da naj koncentracije CO₂ ne bi presegale vrednosti 700 ppm nad zunanjim okoljem oziroma v prostoru ne več kot 1000 ppm. Standarda ASHRAE tudi določata, da je naravno prezračevanje dovoljeno, če je odpiranje prezračevalnih odprtín (oken) nadzorovano oziroma kontrolirano in se vzpostavi zadostni naravni pretok zraka med stavbo in okolico. To lahko dokazujemo le z dinamičnim modeliranjem.

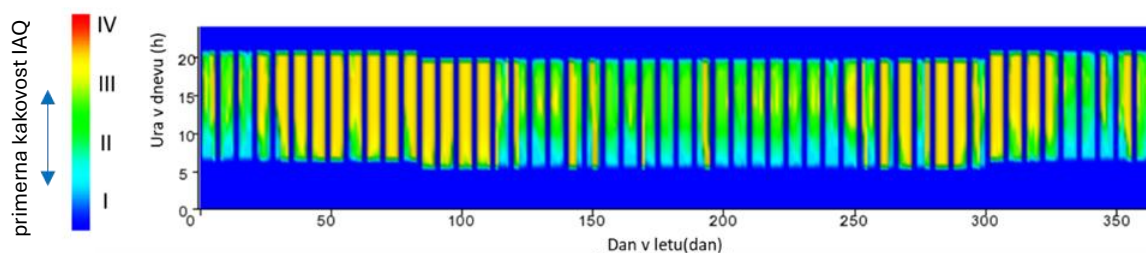
Mejne koncentracije CO₂, navedene na sliki 35, so precej pod vrednostmi, ki bi tudi ob daljši izpostavljenosti, vplivale na zdravje uporabnikov stavb. Za zaščito zdravja naj koncentracije ne bi presegale 5.000 ppm, vrednosti nad 40.000 ppm pa imajo takojšen vpliv na zdravje izpostavljenih ljudi. Opredeljene so glede na zaznano kakovost zraka (angl. perceived IAQ), zato se kot kazalnik IAQ lahko uporabi napovedan delež uporabnikov (angl. Percentage of Dissatisfied - PD_{IAQ}), ki z zaznano kakovostjo zraka ne bodo zadovoljni.

Empirični izraz, s katerim določimo PD_{IAQ} in napovemo delež uporabnikov, ki bi trenutno kakovost zraka ocenili kot “zrak se mi zdi zatohel, me moti, ni svež”, vključuje kot neodvisno spremenljivko količino svežega zraka, ki pri prezračevanju vstopa v stavbo q_{dov} (l/s):

$$PD_{IAQ} = 395 \cdot e^{-1,83 \cdot q_{dov}^{0,25}} (\%)$$

količina dovedenega zraka za prezračevanje v l/s vsaki osebi v stavbi/prostoru; izkustveno zadošča za IAQ III še vsaki osebi dovedemo 4 l/s zunanjega zraka (PD_{IAQ} 30%), za I razred kakovosti pa 10 l/s na osebo (PD_{IAQ} 15%).

Pri naravnem prezračevanju se količina zraka, ki zaradi toplotnega vzgona ali vetra vstopa v stavbo (in izstopa iz nje), spreminja v času, zato lahko primerno kakovost tega vidika bivalnega oziroma delovnega okolja dokazujemo le z dinamičnim modeliranjem. Primer za referenčni prostor prikazuje slika 36.



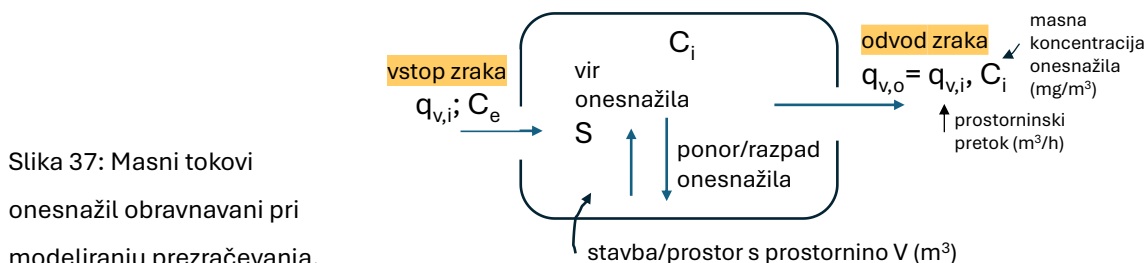
Slika 36: Primer dinamičnega modeliranja koncentracije CO₂ v referenčnem prostoru 1 med delovnikom (od ponedeljka do petka, od 7. do – 17. ure) z označenim razredom kakovosti IAQ, kar ustreza zahtevam PURES-3; razred kakovosti III (rumeno obarvana območja) pa ni primeren.

Prednost dinamičnega modeliranja je tudi v prilagajanju delovanja mehanskega prezračevanja dejanski onesnaženosti zraka v stavbi, česar statično modeliranje ne omogoča. Tako način delovanja na primer s frekvenčno regulacijo delovanja ventilatorjev poveča energijsko učinkovitost stavbe zaradi manjše količine dovedene energije za delovanje prezračevalnega sistema.

4.4.1. Dinamično modeliranje koncentracije onesnažil v stavbi

Pri modeliranju izhajamo iz dokazane predpostavke, da je zrak v stavbah bolj onesnažen kot v zunanjem okolju, zato lahko v stavbi sproščena onesnažila redčimo z dovajanjem (manj onesnaženega) zunanjega zraka s prezračevanjem.

Pri dinamičnem modeliranju koncentracije onesnažil je pomembno, ali so ta konservativna ali nekonservativna. Zadnja v zraku v stavbi razpadajo različno hitro, zato se njihova koncentracija tudi brez prezračevanja zmanjšuje, medtem ko ostaja masa konzervativnih onesnažil v stavbi brez prezračevanja in izločanja časovno nespremenljiva. Med običajnimi konservativnimi onesnažili zraka sta CO₂ in CO, torej se lahko izločita iz stavbe le s prezračevanjem. Masni tokovi onesnažila, kakor jih obravnavamo pri dinamičnem modeliranju, so prikazani na sliki 37.



Slika 37: Masni tokovi onesnažil obravnavani pri modeliranju prezračevanja.

Primer modeliranja vira onesnaževanja S s CO₂. Sedeča oseba odda 15 litrov CO₂ na uro, gostota CO₂ je 1,98 kg/m³; torej oseba odda 29,7 g CO₂ vsako uro:

$$S = 1 \cdot \frac{\dot{V}_{\text{oseba}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right)}{1000 \left(\frac{\text{lit}}{\text{m}^3} \right)} \cdot \rho_{\text{CO}_2} \cdot 10^3 \left(\frac{\text{g}}{\text{kg}} \right) = 1 \cdot \frac{15}{1000} \cdot 1,98 \cdot 10^3 = 29,7 \left(\frac{\text{g}}{\text{h}} \right)$$

Dinamična sprememba koncentracije onesnažila v volumnu zraka v stavbi po času (dC/dt) se modelira z bilančno enačbo:

$$V \cdot \frac{dC}{dt} = S + C_e \cdot q_{v,i} - C_i \cdot q_{v,o} - \frac{0,73 \cdot C_i}{K} \cdot V$$

$\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3 \cdot \text{h}} \quad \frac{\text{mg}}{\text{h}} \quad \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \quad \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \quad \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad \frac{1}{\text{h}} \quad \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \quad \text{m}^3$

Z upoštevanjem zakona o ohranitvi mase, se koncentracija onesnažila C navaja kot masna koncentracija v na primer v mg na m³ zraka. V inženirski praksi pa se pogosto navajajo prostorninske koncentracije onesnažila, torej koliko m³ onesnažila je v m³ zraka. Ker so v stavbah vrednosti nizke, se uporabljajo milijon krat manjše enote - v ppm (število delcev na milijon, angl. parts per million).

Primer: V zunanjem zraku s temperaturo 20 °C je koncentracija CO₂ C_{CO₂,e} 400 ppm; to je enako 0,73 g/m³:

$$C_{\text{CO}_2, \left(\frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right)} = C_{\text{CO}_2, \text{ppm}} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{molska masa } 44 \left(\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right)}{22,4 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{kmol}} \right)} \cdot \frac{273}{273 + \theta_e} \cdot 1000 \left(\frac{\text{g}}{\text{kg}} \right)$$

$\uparrow$ plinska konstanta $\uparrow$ temperatura zraka (°C)

$$= 400 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{44}{22,4} \cdot \frac{273}{273 + 20} \cdot 1000 = 0,73 \left(\frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right)$$

Dinamično modeliranje poteka v naslednjih korakih. Primer je prostor s prostornino V 50 m³, v katerem je ena oseba (S_{CO₂} = 29,7 g/h), prezračevan pa je z znanim številom izmenjav zraka n (0,2 h⁻¹):

- iz bilančne enačbe masnih tokov določimo koncentracijo onesnažila (CO₂, konservativno onesnažilo) po neskončnem času (ko je dC/dt = 0):

$$C_{\text{CO}_2, \infty} = \frac{S_{\text{CO}_2} + C_{\text{CO}_2, e} \cdot \dot{V}}{\dot{V} - k \cdot V} = 3,7 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = 2027 \text{ ppm}$$

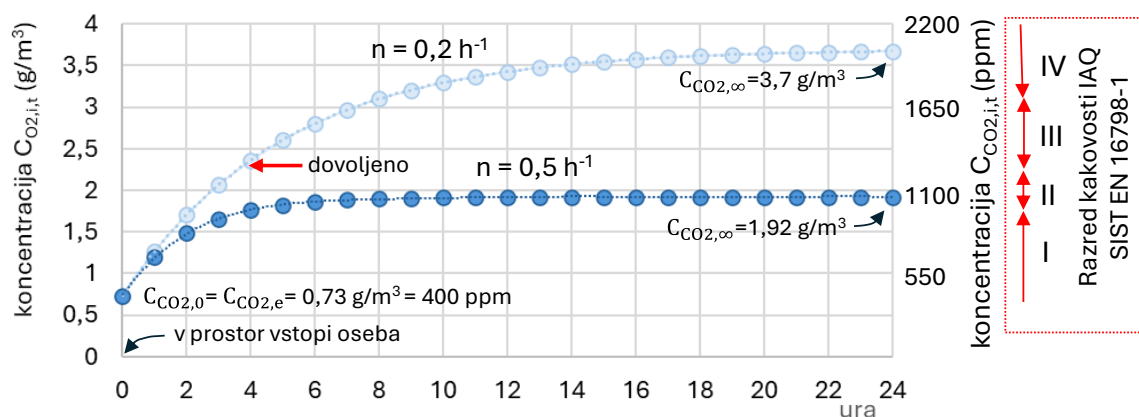
$\uparrow \dot{V} = n \cdot V \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right)$ $\sim 1600 \text{ ppm nad koncentracijo v zunanjem zraku}$

- koncentracija CO₂ v prostoru po času t od začetnega stanja C_{CO₂,0} (enako koncentraciji CO₂ v zunanjem okolju) po vstopu osebe, do konstantne vrednosti po neskončno dolgem času C_{CO₂,∞} (ne vemo sicer kdaj to bo) spreminja s funkcijo:

$$C_{CO_2,t} = C_{CO_2,\infty} + (C_{CO_2,t=0} - C_{CO_2,\infty}) \cdot e^{-\left(\frac{\dot{V}}{V} \cdot t\right)} =$$

$$= 3,7 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} + \left(0,73 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} - 3,7 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}\right) \cdot e^{-\left(\frac{0,2 \text{ h}^{-1} \cdot 50 \text{ m}^3}{50 \text{ m}^3} \cdot t\right)} \left(\frac{\text{g}}{\text{m}^3}\right)$$

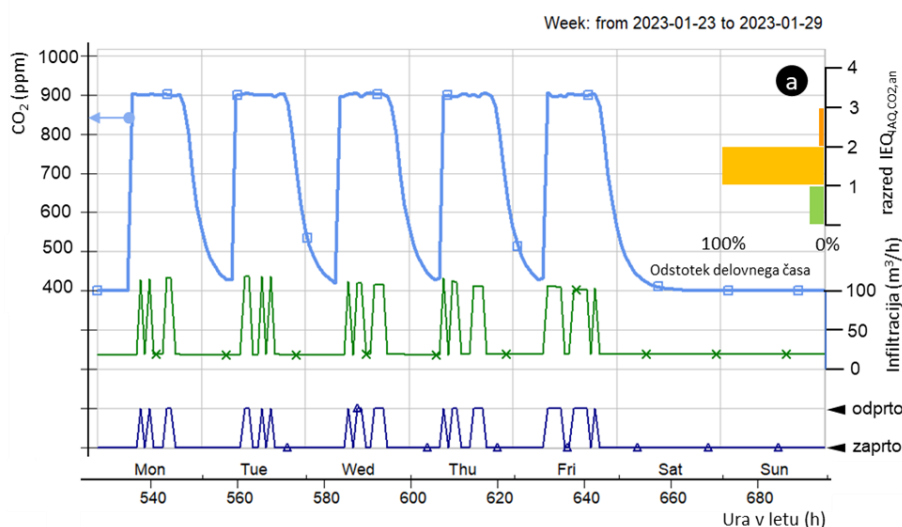
Spreminjanje koncentracije CO₂ za robne opredeljene pogoje je prikazano na sliki 38.



Slika 38: Primer dinamičnega modeliranja koncentracije CO₂.

Opomba: v prostoru z 0,2 izmenjave zraka za prezračevanje na uro, bo zgornja meja zahtevanega II. razreda kakovosti dosežena po približno štirih urah zadrževanja osebe v prostoru.

Dinamično modeliranje v BEM mora omogočati analize kazalnikov IAQ pri spremenljivih pretokih zraka za prezračevanje (na primer pri prilagojenem mehanskem prezračevanju, hibridnem prezračevanju ali pri naravnem hlajenju s prezračevanjem) ter pri spremenljivih virih onesnažil, ki jih oddaja različno število oseb.



Slika 39: Primer: modelirana vsebnost CO₂ v referenčnem prostoru s kontroliranim naravnim prezračevanjem; v modeliranje je vključen algoritem samodejnega odpiranja prezračevalnih odprtin glede na želeno mejno vrednost koncentracije CO₂ med delovnikom, tj. 900 ppm; letno trajanje razredov kakovosti IAQ v obdobju delovnika v poslovni stavbi (a) potrjuje, da je načrtovano prezračevanje ustrezno.

4.4.2. Zaščita pred hrupom: dinamično modeliranje ravni zvočnega tlaka pri naravnem in hibridnem prezračevanju

Kot zvok zaznavamo zvočno energijo. Prenos zvočne energije se dogaja s spreminjanjem zračnega tlaka, kar merimo z zvočnim tlakom. Spreminjanje zvočnega tlaka je periodično, ponovitve pa merimo s časom (frekvenco (Hz, s⁻¹)) ali s prostorsko razdaljo med sosednjima vrhoma valovanja (valovno dolžino λ (m)). Zvok sestavljajo zelo različne frekvence valovanj. Spremembe zvočnega tlaka, manjše od 10⁻⁵ Pa, ne zaznamo s sluhom, izpostavljenost zvočnemu tlaku, večjemu kot 20 Pa, pa povzroča bolečine v ušesih, ali celo trajne poškodbe sluha. Gre torej za majhne spremembe zračnega tlaka z referenčno vrednostjo 10⁻⁵ Pa. Če za merjenje zvočnega tlaka med mejnima vrednostnima (10⁻⁵ in 20 Pa) uporabimo logaritemsko skalo, jakost ali raven zvoka navajamo z glasnostjo L_p v decibelih (dB). Če upoštevamo tudi, kako posamezne frekvence zvoka zazna zdrava, mlada oseba, potem jakost zvoka navajamo z uteženo glasnostjo. Najpogosteje uporabljamo slušno krivuljo "A" in jakost zvoka navajamo v dB(A). Uteženo časovno povprečeno glasnost/raven zvoka navajamo z ekvivalentno ravni $L_{p,eq,A}$ (dB(A)). Zvočna energija, krajše zvok, vpliva na prepoznavanje govora in glasbe, na razpoloženje, storilnost pri delu in zdravje uporabnikov stavb. Zato so v standardih IEQ opredeljene mejne vrednosti

največje $L_{p,eq,A}$ posameznega kakovostnega razreda glasnosti zvoka. Če so presežene zvok postane neprijeten, moteč hrup.

Raven zvočnega tlaka v stavbi se zviša zaradi zvoka v zraku, ki se iz zunanjega okolja ali sosednjih prostorov prenaša po zraku, udarnega zvoka, ki se prenaša po gradbenih konstrukcijah, in zvoka, ki ga oddajajo naprave v prostoru. Pri dinamičnem modeliranju stavb v orodjih BEM se osredotočamo na prehod zvoka v zraku skozi zunanji ovoja stavbe oziroma prostora pri prezračevanju (naravnem in podtlačnem) in naravnem hlajenju s prezračevanjem. Prenos zvoka po zraku iz zunanjega v notranje okolje uravnavamo s primerno visoko zvočno izolirnostjo R gradnikov ovoja stavbe. Za lažji prikaza bomo v obravnavanem primeru uporabili ovrednotene zvočne izolirnosti R_w . Opomba: utežena zvočna izolirnost se izračuna po predpisanem postopku iz vrednosti v oktavni ali terčni območjih frekvenc in navaja za frekvenco zvoka 500 Hz. Skupno zvočno izolirnost stavbnega ovoja (ki ločuje notranje zvočno okolje od zunanjega) določimo z izrazom:

$$L_{p,eq,e} - L_{p,eq,i} = R_w$$

ekvivalentna raven zvoka v zunanjem okolju (dB(A)) najvišja ekvivalentna raven zvoka v stavbi glede na razred kakovosti IEQ (dB(A))

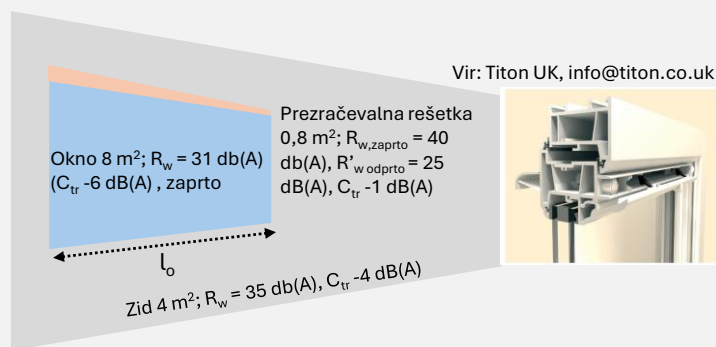
$$R_w = -10 \cdot \log \left[\frac{1}{A_{fasade}} \sum_{i=1}^n A_i \cdot 10^{\frac{R_{w,i}}{10}} \right] - \underbrace{(R_{\psi} + A_{prostor})}_{\sim 0}$$

ovrednotena zvočna izolirnost fasade (dB(A)) zvočna izolirnost dela i-tega dela fasade (dB(A)) zmanjšana izolirnost zaradi stranskega prehoda zvoka ("zvočni most"), tipično + 3 dB(A)

celotna površina fasade (m²) površina i-tega dela fasade (m²) zmanjšana raven zvočnega tlaka zaradi absorpcije zvočne energije prostoru; tipično - 3 do 5 dB(A)

Pomembno: odziv stavbnih gradnikov na zvok v zraku preverjamo z belim šumom. To je šum z enako jakostjo pri vseh frekvencah (frekvenčnih območjih). Velja za najmanj moteč hrup, denimo v primerjavi s cestnim in pisarniškim hrupom. Spektra zadnjih dveh omenjenih sta namreč za poslušalca bolj moteča kot beli šum. Zato je v primeru, ko je stavba izpostavljena cestnemu hrupu, računsko zmanjša zvočna izolirnost s faktorjem C_{tr} . Ta ima negativno vrednost med -2 in -6 dB(A)!

Primer: Prezračevalne odprtine imajo loputo, s katero se, ko je zaprta, zmanjša netesnost fasadnega ovoja in poveča zvočna izolirnost. Tipično iz R_w 25 dB(A) (odprto) na R_w 40 dB(A) (zaprto).

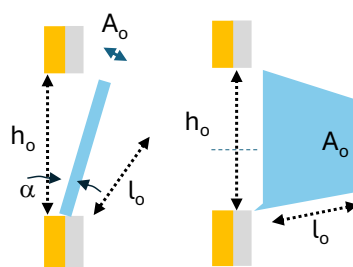


$$R_w = -10 \cdot \log \left[\frac{1}{12,8} \sum_{i=1}^n 4 \cdot 18^{-\frac{35-4}{10}} + 8 \cdot 10^{-\frac{31-6}{10}} + 0,8 \cdot 10^{-\frac{25-1,40-1}{10}} \right] - \underbrace{R_\psi + A_{prostor}}_{\sim 0}$$

Za primer na sliki je $R_{fasade,zaprto}$ 26,5 dB(A) in $R_{fasade,odprto}$ 26,0 dB(A).

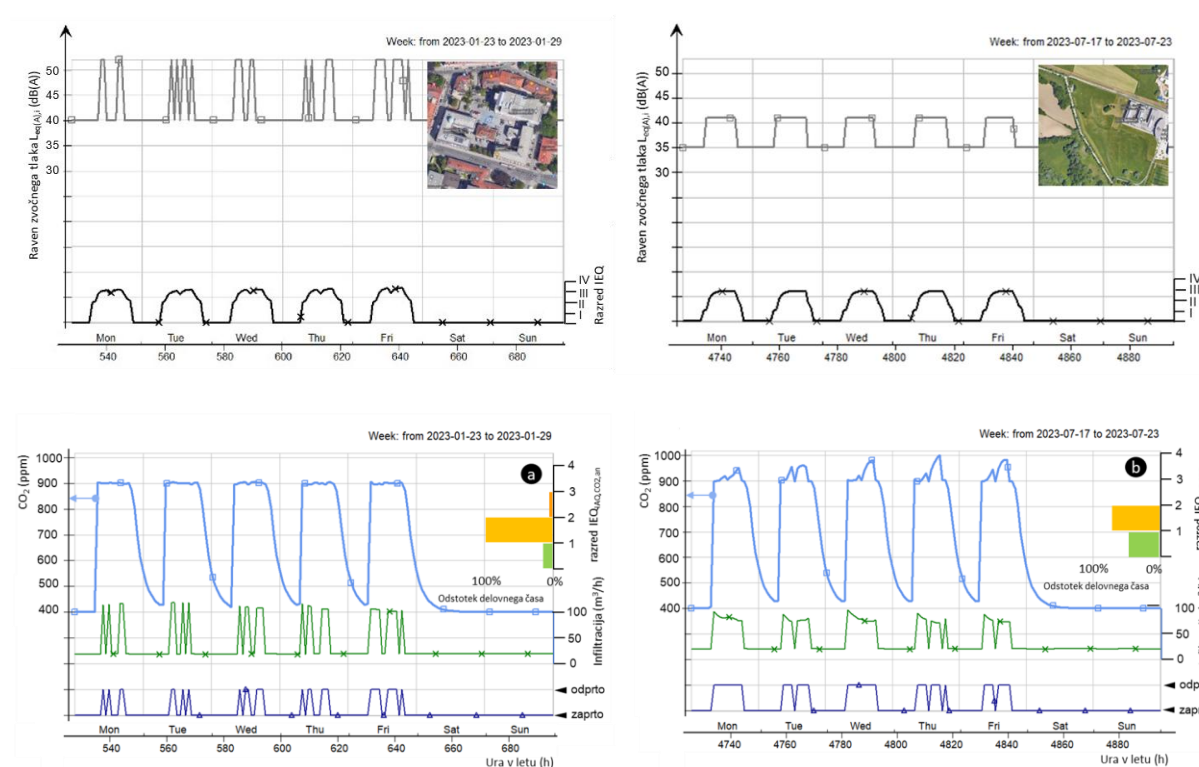
Naravno prezračevanje skozi veliko odprtino je lahko energijsko učinkovito, če je njeno odpiranje vodeno glede na temperature v stavbi in delovanje mehanskega prezračevanja usklajeno, tako, da se zmanjša raba (električne) energije za delovanje tega sistema. Tako prezračevanje omogoča tudi učinkovito naravno hlajenje. Toda hkrati se zmanjša tudi zvočna izolirnost prezračevalnih odprtin (slika 40), to pa vpliva na zaščito uporabnikov stavb pred komunalnim hrupom. Na sliki 40 navajamo eksperimentalne izsledke, ki kažejo zmanjšano zvočno izolirnosti okna, ki je odprto na kip in odprtega v celoti (okrog navpične osi).

		Zvočna izolirnost R_w (dB); A_w 1,5 m ²	
		Okno z navpično odprtim krilom	Krilo okna odprto na "kip"
zaprto okno		42	40
okno z odmaknjenim krilom		28	27
prosta	50.000 mm ²	18	21
odprtina	100.000 mm ²	17	20
$A_{eff,io}$ (m ²)	200.000 mm ²	15	19
Vir: NANR116: Open/closed windows research; Sound insulation through ventilated windows; The Building Performance Center, UK			



Slika 40: Zvočna izolirnost zaprtega in različno odprtega okna (levo), opredelitev velikosti prezračevalne odprtine A_o (desno).

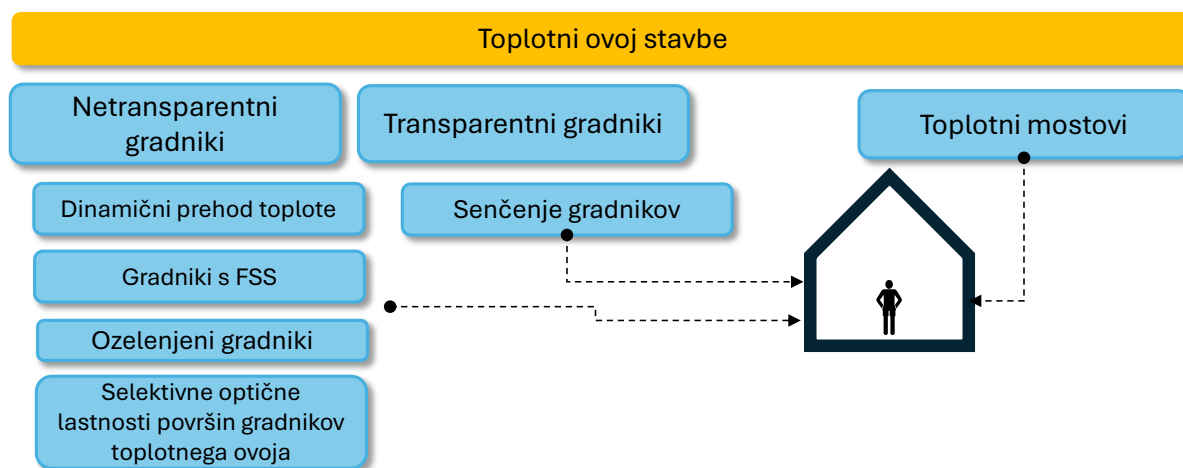
Na sliki 41 je prikazana hkratna analiza IAQ in zaščite pred hrupom v primeru nadzorovanega odpiranja prezračevalnih odprtin v referenčnem prostoru 1 glede na lokacijo stavbe (raven komunalnega hrupa). Primer potrjuje, da je pri preverjanju kakovosti notranjega okolja (razredov kakovosti IEQ) treba hkrati preveriti vse domene IEQ, kar je mogoče le z dinamičnim modeliranjem IEQ.



Slika 41: Ravni zvočnega tlaka v referenčnem prostoru REF 1 v stavbi v mestnem (v najhladnejšem tednu v letu) in primestnem okolju (v najtoplejšem tednu leta) ter razredi kakovosti notranjega okolja z vidika zaščite pred hrupom (zgoraj, levo in desno); razredi kakovosti IAQ, koncentracija CO_2 in položaj prezračevalnih odprtin za oba primera (spodaj a, b) s ponazoritvijo trajanja razredov kakovosti IAQ v letu; dinamično modeliranje z meteorološkimi podatki iz TML ARSO za Ljubljano.

5. DINAMIČNO MODELIRANJE GRADNIKOV TOPLOTNEGA OVOJA STAVB

Pomembna razlika med statičnim in dinamičnim modeliranjem stavb je v postopku modeliranja toplotnega toka, ki prehaja gradnik toplotnega ovoja. Značilne primere, opisane v tem poglavju prikazuje slika 42.



Slika 42: Tematska poglavja v tematskem sklopu o gradnikih toplotnega ovoja.

5.1. DINAMIČNO MODELIRANJE TOPLOTNEGA ODZIVA NETRANSARENTNIH GRADNIKOV

Dinamični toplotni odziv netransparentnega gradnika ovoja stavbe v programskih orodjih modeliramo na naslednji način:

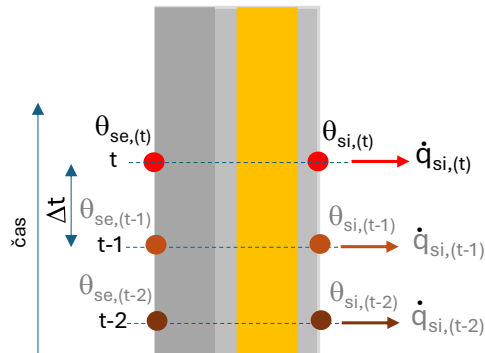
- s prenosno funkcijo (metoda, ki jo uporablja ASHRAE in je vgrajena npr. v orodju EnergyPlus, TRNSYS) ali
- električno analognim modelom s katerim prehod toplote modeliramo z električnimi spremenljivkami: električni upor tokokroga R predstavlja upor prevodu toplote (odvisen od toplotne prevodnosti λ), kapacitivnost kondenzatorja toplotno vsebnosti gradnika (odvisna od gostote ρ in specifične toplote gradnika c_p), električni tok nadomesti toplotni tok in napetost, ki je analogna razliki temperatur.

Obe metodi sta značilni za poenostavljeno dinamično modeliranje (1D, planparalelni površini gradnika).

Prenosna funkcija je zapisana kot časovna vrsta za izračun toplotnega toka na notranji površini $q_{si,t}$ v trenutnem časovnem koraku simulacije (t), v kateri so vključeni utežene temperature na obeh površinah gradnika v sedanjem in preteklem času ter toplotni tok na notranji površini, ki vstopa v stavbi v preteklih časovnih korakih (slika 43):

$$q_{si,(t)} = \sum_{n=0}^N X_n \cdot \theta_{si,(t-(\Delta t \cdot n))} + \sum_{n=0}^N Y_n \cdot \theta_{se,(t-(\Delta t \cdot n))} + \sum_{n=1}^N Z_n \cdot q_{si,(t-(\Delta t \cdot n))}$$

Slika 43: Ponazoritev
spremenljivk pri modeliranju
dinamičnega (nestacionarnega)
prehoda toplote v
netransparentnem gradniku
ovoja stavbe s prenosno
funkcijo.



Temperatura zunanje površine gradnika θ_{se} se določi z energijsko bilanco kratkovalovnega (absorbirano sončno sevanje), dolgovalovnega toplotnega toka (toplotno sevanje med gradnikom in okolico ter nebom) ter konvektivnega toplotnega toka in toplotnega toka, ki se prevaja v gradnik v vsakem časovnem koraku Δt . Pri urnem časovnem koraku modeliranja toplotnega odziva stavbe, praviloma zadoščajo do 4 vrednosti spremenljivk iz zgodovine (N). Koeficienti X, Y in Z so določeni v naprej glede na vrsto in sestavo konstrukcij. ASHRAE je do približno leta 2000 objavljala vrednosti koeficientov za veliko število konstrukcij iz nabora, ki pa jih načrtovalec moral izbrati iz ponujene baze. Danes se, zaradi zmogljivosti strojne opreme, koeficienti samodejno določijo za poljubne netransparentne gradnike. Ker v izrazu nastopajo tudi vrednosti v trenutnem časovnem koraku (t), se vrednosti spremenljivk poiščejo z numeričnimi metodami (poskušanje oziroma preverjanje). Pomembno je, da pri dinamičnem modeliranju prevoda toplote s prenosno funkcijo ne dobimo podatkov o temperaturah v notranjosti gradnika, lastnosti vgrajenih snovi se po času ne spreminjajo. Prav tako ne moremo modelirati konstrukcij z virom ali ponorom toplote, kot so TABS.

Pri električno analognem modelu dinamičnega modeliranja se vsak sloj gradnika razdeli na en ali več elementov, katerih debelina je odvisna od toplotne difuzivnosti a ($\frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$) ($\frac{m^2}{s}$) snovi. Debelina elementa naj ne bo večja od globine toplotnega odziva na 24 urno periodično spreminjajočega okolja d_p ($d_p = 165 \cdot a^{0.5}$ (m)). Splošno pravilo je, da se gradnike z večjo toplotno maso razdeli na več elementov, npr. sloj betona na 3 - 5, toplotno izolacijo na 1 element. Slika 44 prikazuje temperaturna vozlišča v enostavnem primeru gradnika, ki ga modelirano s 4R-C modelom. Značilnosti R-C modela dinamičnega (nestacionarnega) toplotnega odziva netransparentnih gradnikov toplotnega ovoja stavbe so naslednje:

Energijska bilanca temperaturnega vozlišča = elementa gradnika pri nestacionarnem prehodu toplote in temperature gradnika v naslednjem časovnem koraku dinamičnega modeliranja.

$$C_i \frac{\delta \theta_{i,(t)}}{\delta t} = \sum_{1D: j=i-1}^{j=i+1} \frac{\theta_{j,(t)} - \theta_{i,(t)}}{R_{i,j}} \rightarrow \theta_{i,(t+\delta t)} = \theta_{i,(t)} + \delta \theta_{i,(t)}$$

Spremenjena količina shranjene toplote v diferencialnem časovnem koraku δt .

Toplotni tok, ki vstopa v in iz elementa gradnika; v notranjosti s prevodom, na površinah tudi s sevanjem in konvekcijo.

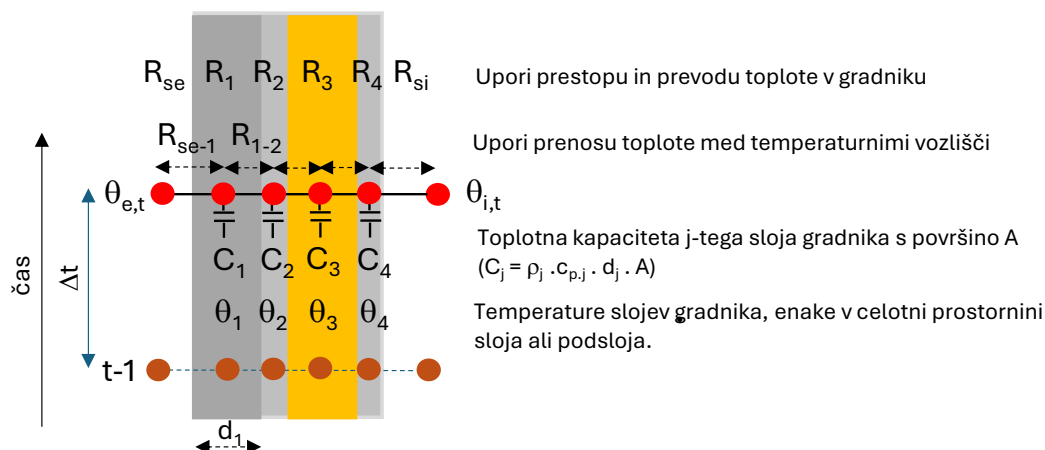
Nova temperature elementa gradnika 1 v računskem času t ; časovni korak je številčno opredeljen (diferencial d zamenja merljiva razlika Δ).

$$C_1 \frac{\Delta \theta_1}{\Delta t} = \frac{\theta_{e,(t)} - \theta_1}{R_{se-1}} + \frac{\theta_2 - \theta_1}{R_{1-2}}$$

$$R_{se-1} = \frac{R_{se} + R_1}{2} \quad R_{1-2} = \frac{R_1 + R_2}{2}$$

Ker je temperatura celotne prostornine elementa gradnika enaka, se toplotni tok, ki prestopa na ali z 1 m^2 velike površine gradnika določi na naslednji način (za primer na sliki, - vstopa v gradnik, + izstopa iz gradnika)):

$$\dot{q}_{si,(t)} = \frac{\theta_{4,(t)} - \theta_{i,(t)}}{R_{si}}$$

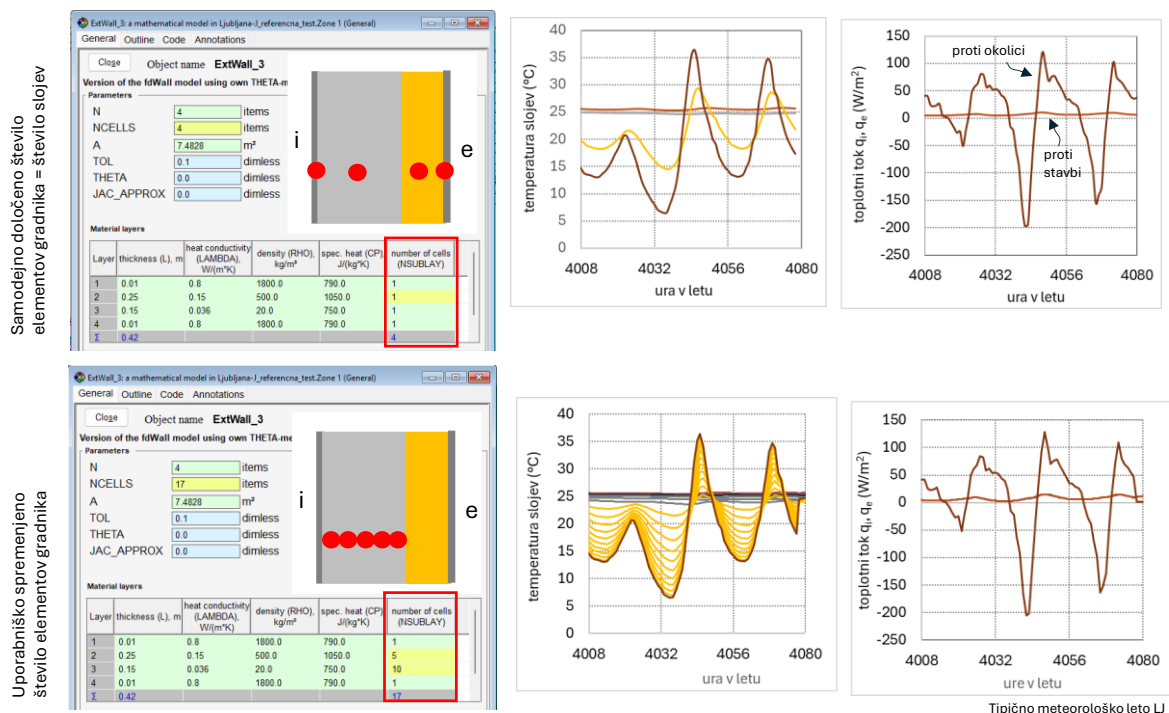


Slika 44: Ponazoritev spremenljivk pri modeliranju dinamičnega (nestacionarnega) prehoda toplote v netransparentnem gradniku ovojja stavbe z R-C modelom.

Predstavljen R-C model rešimo tudi eksplicitni pristopom, saj nove temperature elementov določimo posebej za posamezni element. To je sicer numerično enostaven postopek saj lahko izračunamo vsako od temperatur elementov gradnika posebej. Vendar bodo temperature v gradnikih termodinamično smiselne le, če časovni korak izračuna novih temperature Δt prilagodimo toplotnim lastnostim elementov gradnika (d_p).

Če pa v izračun novih temperature $\theta_{i,(t+\Delta t)}$ vključimo tudi temperature iz prejšnjega časovnega koraka, bodo izračunane temperature vedno smiselne. To je način reševanja R-C modela z implicitnim pristopom. Moramo pa v tem primeru vse temperature elementov gradnika izračunati sočasno z reševanjem sistema linearnih enačb. Sodobna računska orodja uporabljajo implicitni pristop. Ta ima prednost tudi v tem, da lahko gradnike razdelimo na večje število elementov (slika 45), v kolikor nas na

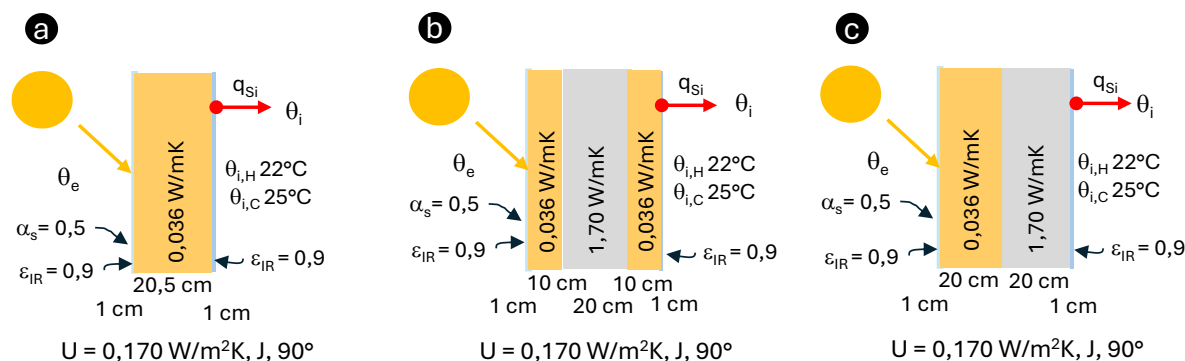
primer zanima ravnina zmrzovanja ali modeliramo toplotno aktivirane konstrukcije (TABS). Pri metodi prenosne funkcije namreč vir ali ponor toplote v gradniku ni mogoče modelirati.



Slika 45: Ponazoritev spremenljivk pri modeliranju dinamičnega (nestacionarnega) prehoda toplote v netransparentnem gradniku ovoja stavbe z R-C modelom.

5.1.1. Primerjava statičnega in dinamičnega modeliranja prehoda toplote

Razlike med statično in dinamično modeliranim toplotnim odzivom netransparentnih gradnikov toplotnega ovoja stavb prikazujemo s tremi gradniki z enako toplotno prehodnostjo U , a z različno razporeditvijo akumulacijske mase (slika 46).



Slika 46: Netransparentni gradniki toplotnega ovoja, ki bodo obravnavani s primeri.

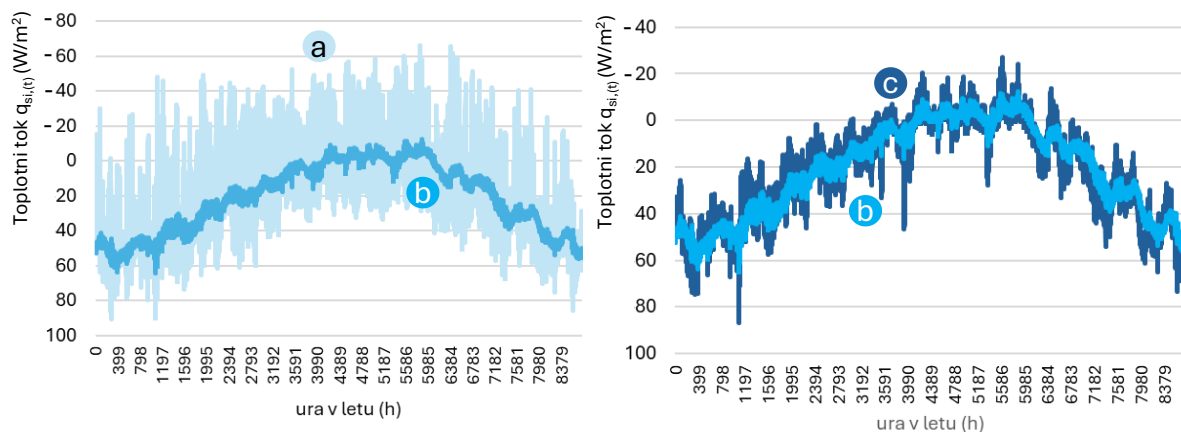
Pri statičnem modeliranju določimo povprečni specifični mesečni toplotni tok, ki prehaja gradnik s površino 1 m^2 in predstavlja transmisijske toplotne izgube, z zmnožkom toplotne prehodnosti U in razlike med povprečni temperaturi zraka na obeh straneh gradnika:

$$q_{tr,m,si} = U \cdot \theta_{i,m} - \theta_{e,m} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

Glede na povprečne mesečne temperature zraka $\theta_{e,m}$ na območju Slovenije in zahteve toplotnega ugodja, je toplotni tok $q_{tr,m,si}$ v vseh mesecih pozitiven (vedno prehaja iz stavbe v okolico), saj sončno obsevanje računsko na transmisijske toplotne izgube ne vpliva (slika 47). Dobitki sončnega sevanja se izračunajo kot dodatni toplotni tok z upoštevanjem mesečnega sončnega obsevanja na površino gradnika in absorptivnosti sončnega sevanja. Dobitki ne vplivajo na izračunane transmisijske toplotne izgube, so pa odvisni od toplotne prehodnosti U gradnika.

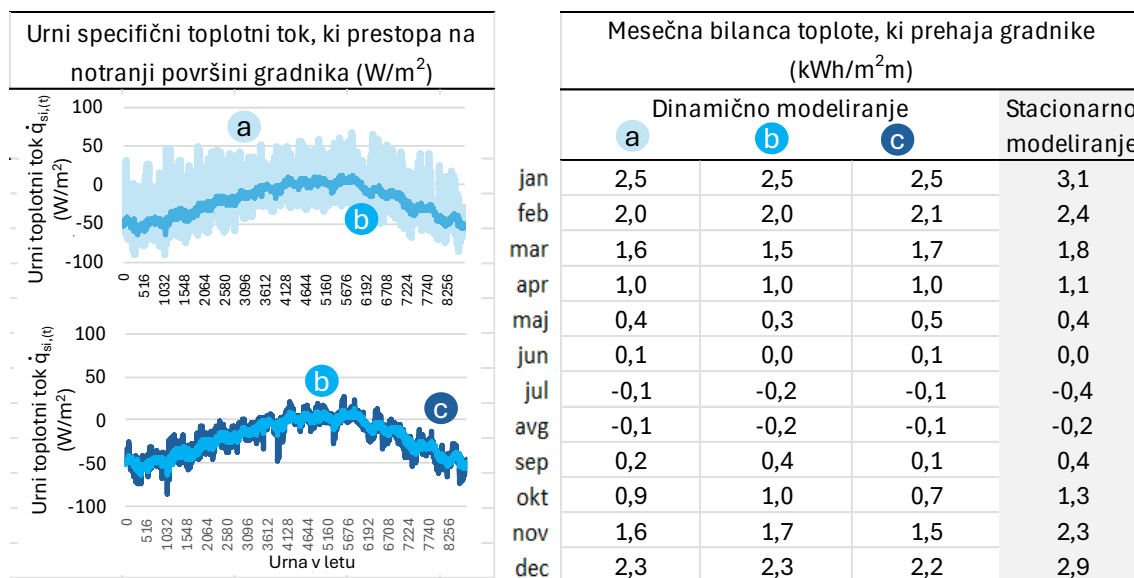
	1	2	3
jan	21	3,3	- 0,2
feb	19	2,7	- 0,3
mar	14	2,2	- 0,4
apr	10	1,5	- 0,4
maj	5	0,8	- 0,4
jun	2	0,3	- 0,3
jul	0	0,0	- 0,4
avg	1	0,2	- 0,4
sep	5	0,8	- 0,4
okt	10	1,6	- 0,3
nov	16	2,4	- 0,1
dec	19	3,0	- 0,1
	$\dot{q}_{si,tr,m}$ W/m ²	$q_{tr,m}$ kWh/(m ² m)	$q_{sol,m}$ kWh/(m ² m)

Dinamično modeliran toplotni odziv istih netransparentnih gradnikov (a, b in c, slika 46), je prikazan na sliki 48 s specifičnim toplotnim tokom, ki prestopa na notranji površini gradnikov $q_{si,(t)}$. Izračunan je z urnim korakom in meteorološkimi podatki TML ARSO za Ljubljano. Povprečni letni toplotni tok $q_{si,an}$, ki prestopa na notranji površini gradnikov se sicer med gradniki skoraj ne razlikuje: (a) $21,02 \text{ W/m}^2$, (b) $21,04 \text{ W/m}^2$, (c) $20,98 \text{ W/m}^2$. Nasprotno pa urni toplotni tokovi $q_{si,(t)}$ zaradi velikih razlik med gradniki (z enako toplotno prehodnostjo U) potrjuje smiselnost dinamičnega modeliranja, saj bosta tako izračun moči tehničnih stavbnih sistemov in presoja bivalnega ugodja bistveno ustreznejša.



Slika 48: Povprečni urni toplotni tok $q_{si,t}$, ki prestopa na notranji površini gradnikov a, b in c prikazanih na sliki 46.

Pri statičnem in dinamičnem modeliranju se uporabljajo različne meteorološke zbirke podatkov, ki jih sicer pripravlja ARSO (arso.gov.si). Za analizo razlike med obema načinoma modeliranja je potrebno rezultate prikazati v enakih (mesečnih) časovnih obdobjih in z mesečnimi povprečji meteoroloških spremenljivk določenih z zbirke, ki se uporabljaj pri dinamičnem modeliranju (TRL). Kako primerjavo povzema slika 49. Prikazane so mesečne bilance toplote, pri čemer negativne vrednosti predstavljajo bilančne toplotne izgube. Kljub razlikam, pa lahko potrdimo korektnost statičnega modeliranja, kar je pomembno predvsem pri določitvi kazalnikov energijske učinkovitosti stavb.

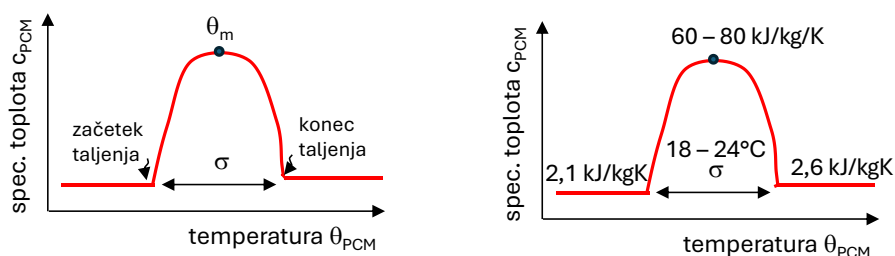


Slika 49: Mesečne energijske bilance specifičnih toplotnih tokov $q_{si,t}$ ($kWh/(m^2 \text{ mesec})$) za gradnike, prikazane na sliki 46, določene z dinamičnim in statičnim modeliranjem; pri statičnem modeliranju razlik ni, saj je toplotna prehodnost U vseh gradnikov enaka.

5.2. MODELIRANJE TOPLOTNEGA ODZIVA NETRANSARENTNIH GRADNIKOV S FAZNO SPREMENLJIVIMI SNOVMI (FSS)

Shranjevanje toplote in hladu v zunanjih in notranjih netransparentnih gradnikih stavb pomembno vpliva na potrebno količino toplote za ogrevanje in hlajenje. Shranjevanje toplote običajno zagotovimo s spremembo temperature gradnikov. Tako shranjujemo senzibilno toploto. Slabost tega načina je, da morajo imeti gradniki veliko maso (gostoto in prostornino), shranjevanje večje količine toplote in hladu pa lahko povzroči toplotno neugodje. Zato bi bilo primerneje, če bi toploto shranjevali brez pregrevanja ali podhlajevanja konstrukcij, torej pri temperaturi, ki je le nekaj stopinj (5 do 7 °C) nad (pri ogrevanju) ali pod (pri hlajenju) območjem toplotnega ugodja. To je mogoče, če notranjo energijo (toploto) ne spreminjamo s temperaturo gradnika, temveč s spremembo agregatnega stanja ene od snovi v gradniku. Na ta način shranjujemo latentno toploto. Snov, ki omogoča poleg shranjevanja senzibilne tudi shranjevanje latentne toplote, imenujemo fazno spremenljiva snov (FSS) ali angl. Phase Change Material (PCM). Tak način shranjevanja imenujemo tudi shranjevanje s fazno spremembo (FSS), snovi pa fazno spremenljive snovi PCM (angl. Phase Change Materials). Iz termodinamičnih in stroškovnih razlogov se v stavbah najpogosteje uporabljajo zmesi voskov. Za njih je značilno, da spreminjanje agregatnega stanja poteka v širšem območju temperatur (slika 50).

Pojasnilo: "hlad" se v stavbah shranjuje posredno z ohlajevanjem gradbenih konstrukcij, ki pri poznejšem pregrevanju stavbe del toplotnih dobitkov shranijo ob nižji temperaturi v stavbi.



Slika 50: Spreminjanje specifične toplote PCM-snovi s temperaturo (levo), značilne toplotne lastnosti PCM-materialov, ki se uporabljajo v gradbenih konstrukcijah (desno); v BEM-orodjih se specifična toplota določi z interpolacijo tabeliranih diskretnih vrednosti specifične toplote PCM, ki se določa eksperimentalno s kalorimetrično metodo ali Gausovim porazdelitvenim modelom v območju fazne spremembe.

Vir: Arkar C., Medved S.: Influence of accuracy of thermal property data of a phase change material on the result of a numerical model of a packed bed latent heat storage with spheres. *Thermochimica acta* 438, št. 1/2, str. 192-201.

Shranjevanje senzibilne in latentne toplote lahko proučimo le z dinamičnim modeliranjem toplotnega odziva gradnikov stavbe. Pri modeliranju se najpogosteje uporablja metoda temperaturno odvisne specifične toplote c_p . Optimizacija gradnikov vključuje določitev optimalne temperature θ_m in Gaussovega koeficienta σ (slika 50), ki opredeljuje kako se v temperaturnem območju taljenja/strjevanja specifična toplota posamezne PCM-snovi spreminja, medtem ko se specifična toplota PCM pri temperaturah pod in nad območjem tališča privzame kot konstanta po podatkih proizvajalca ali na osnovi opravljenega eksperimenta.

V BEM-orodjih se temperaturno odvisna specifična toplota PCM-snovi modelira z interpolacijo tabeliranih vrednosti v temperaturnem območju »delovanja« PCM ali z Gaussovim modelom porazdelitve v temperaturnem območju spremembe agregatnega stanja, proces taljenja in strjevanja pa sta modelirana enako (brez histereze):

$$c_{p,\theta} = c_{p,\text{trdno}} + \frac{\Delta H}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{\left(-\frac{(\theta_{\text{PCM}} - \theta_m)^2}{2 \cdot \sigma^2} \right)}$$

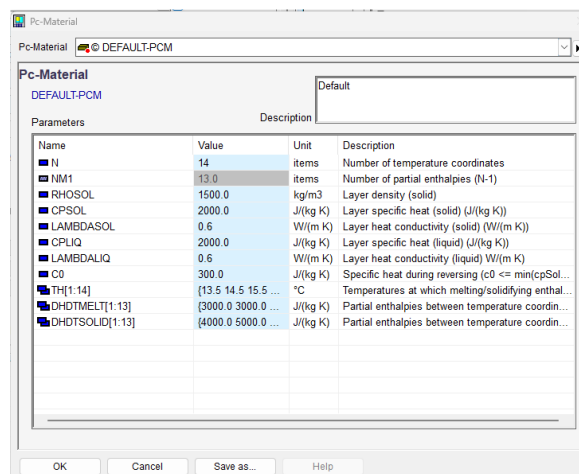
latentna toplota PCM (npr. 200 kJ/kg) ΔH

temperatura pri največji specifični toploti fazne spremembe (°C) θ_m

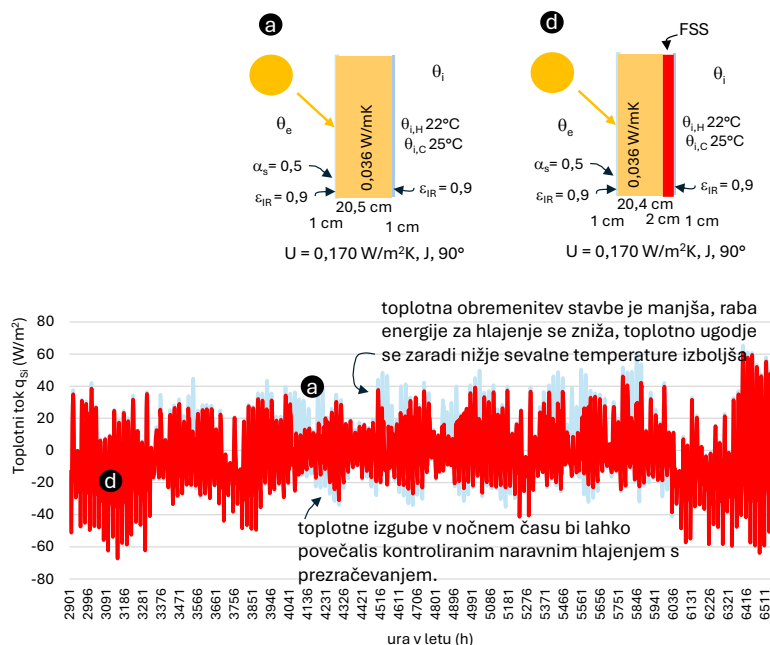
specifična toplota PCM v trdnem stanju (npr. 2,5 kJ/kg/K) $c_{p,\text{trdno}}$

Gaussov koeficient σ

Slika 51 prikazuje uporabniško okno za vnos tabelarnih vrednosti toplotnih lastnosti PCM v BEM-orođu IDA-ICE. Primer dinamičnega modeliranja netransparentnega gradnika (a) s slike 46 in gradnika s PCM prikazuje slika 52.



Slika 51: Primer snovnih lastnosti, s katerimi se opredelijo toplotne lastnosti PCM-snovi v BEM-orođu.

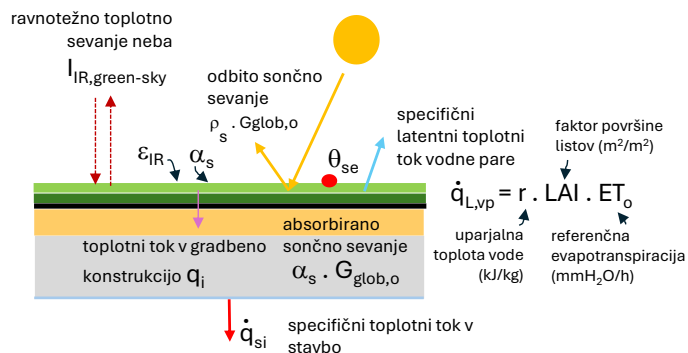


Slika 52: Specifični toplotni tok $q_{si,t}$ na notranji površini lahkega gradnika na ovoju stavbe (a) in nadgrajenega gradnika s 2 cm debelim slojem PCM (d) v poletnem obdobju leta; robni pogoji upoštevani pri dinamičnem modeliranju so prikazani na skici gradnikov; uporabljena je bila podatkovna zbirka TML ARSO LJ.

5.3. MODELIRANJE OZELENJENIH GRADNIKOV TOPLOTNEGA OVOJA STAVBE

Ozelenjene gradnike ovoja gradimo za povečanje biotske raznovrstnosti, zadrževanje meteornih padavin, uravnavanje mikroklimatskih razmer v grajenem okolju in za zmanjšanje toplotnega toka, ki prehaja v stavbo. Zadnji dve navedeni lastnosti lahko proučimo le z dinamičnim modeliranjem toplotnega odziva, ki zajema vse relevantne toplotne tokove (slika 53). Spremenjen prehod toplote je posledica prenosa latentne toplote s hlapenjem vode iz zemljine /substrata in listov rastlin. Ta proces imenujemo evapotranspiracija (ET). Za referenčno rastlino, gosto travnato površino z višino rastlin z 20 cm visokimi rastlinami je evapotranspiracija meteorološka spremenljivka, ki jo označujemo z ET_0 . Ker se površina listov na m^2 tal posameznih rastlin razlikuje, se dejanski prenos vodne v zrak ovrednoti še z razmernikom površine listov (angl. Leaf Area Index - LAI). Referenčna rastlina ima $LAI = 1$, gost gozd približno $LAI = 5-6$. Ker se meteorološke spremenljivke spreminjajo s časom, lahko učinek ozelenjenih gradnikov ovrednotimo le z dinamičnim modeliranjem.

Slika 53: Energijski tokovi na ozelenjenih gradnikih ("zeleni strehi"), ki jih obravnavamo pri dinamičnem modeliranju. Za mestno okolje je pomembna razlika v temperaturi površine glede na neozelenjene gradnike, za toplotno obremenitev zmanjšani toplotni tok Q_{si} , ki prehaja v stavbo.



V literaturi se za določitev referenčne evapotranspiracije ET_0 najpogosteje uporablja naslednji izraz:

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (\alpha_s \cdot G_{glob,o} - I_{IR,green-sky} - Q_i) + \gamma \cdot \frac{37}{\theta_a + 273} \cdot u_w \cdot (p_{sat} - p_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_w)} \quad (\text{mm/h m}^2)$$

$\alpha_s \cdot G_{glob,o}$ (absorpirano sončno sevanje (W/m²)) u_w (hitrost vetra (m/s)) p_{sat} (tlak nasičenja vodne pare (kPa))
 p_a (dejanski tlak vodne pare (kPa))
 Δ (temperatura zraka (°C))

pri čemer je dolgovalovni toplotni tok, ki ga gradnik izmenjuje z okolico (naravnim okoljem, nebom) enak:

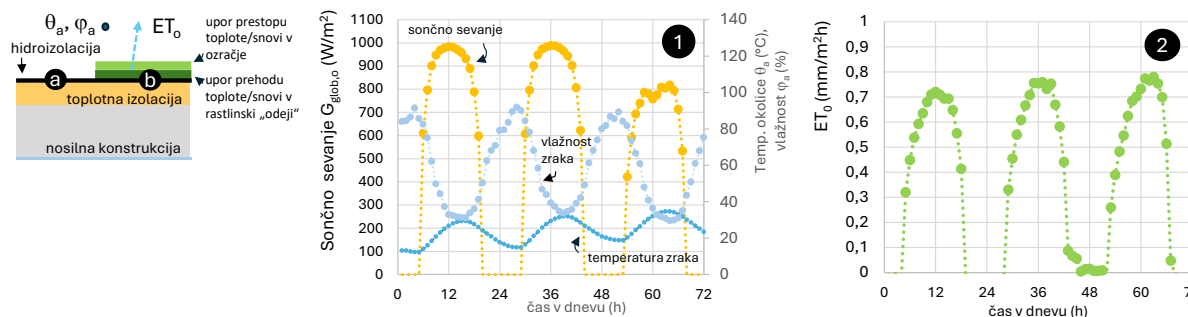
$$I_{IR,green-sky} = \underbrace{\sigma \cdot T_a^4}_{5,67 \cdot 10^{-8} \text{ (W/m}^2\text{K}^4)} \cdot (0,34 - 0,14 \cdot \sqrt{p_a}) \cdot (1,35 \cdot k_t - 0,35) \quad (\text{W/m}^2)$$

σ (Stefan-Boltzmannova konstanta) k_t (indeks jasnega neba (-))

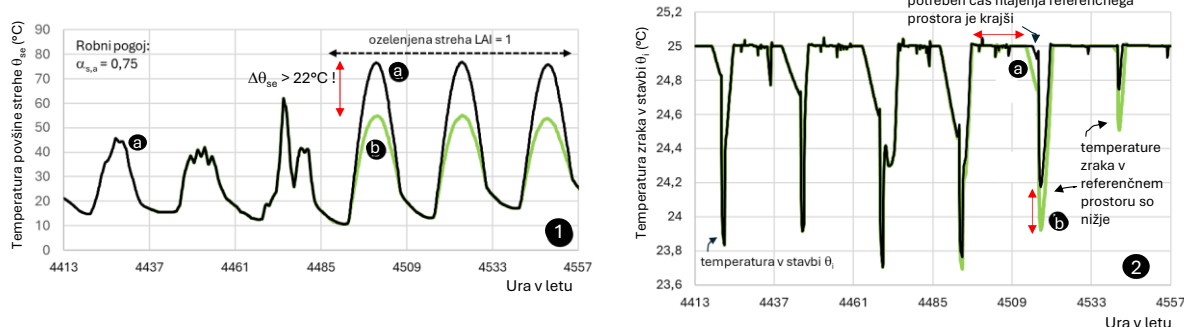
Druge spremenljivke so opredeljene s temi izrazi:

Tlak nasičenja vodne pare v zraku:	$p_{sat}(\theta_a) = 0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot \theta_a}{\theta_a + 237,3}\right) \quad (\text{kPa})$
Naklon krivulje tlaka nasičenja v točki θ_a :	$\Delta = 4098 \cdot \frac{0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot \theta_a}{\theta_a + 237,3}\right)}{(\theta_a + 237,3)^2} \quad \left(\frac{\text{kPa}}{^\circ\text{C}}\right)$
Psihrometrična konstanta	$\gamma = 0,665 \cdot 10^{-3} \cdot p_{atm} \left(\frac{\text{kPa}}{^\circ\text{C}}\right)$ $\uparrow$ zračni tlak $\sim 10^5 \text{ Pa}$

Primer dinamičnega modeliranja toplotnega odziva neozelenjene (a) in ozelenjene ravne strehe (b) je prikazan na slikah 54 in 55. Sestava gradnika in meteorološke spremenljivke za tri dnevno obdobje dinamičnega modeliranja (1) med 4485. in 4557 uro v letu (MTL ARSO Lj,) so prikazane na sliki 54, prav tako tudi modelirana referenčna evapotranspiracija ET_0 (2).



Slika 54: Sestava nezelenjene temne ($\alpha_{sol} = 0,75$) (a) in ozelenjene (b) ravne strehe, meteorološki podatki (1) uporabljeni pri dinamičnem modeliranju in modelirana referenčna evapotranspiracija ET_o (2).



Slika 55: Temperature površine nezelenjene (1a) in ozelenjene (1b) strehe ter temperature v referenčnem prostoru 1 s termostatisirano temperaturo 25°C (2); v grajenem okolju z ozelenjenimi gradniki zmanjšamo toplotni tok (1) in rabo energije, saj je potrebno obdobje hlajenja stavbe krajše (2a), temperature v stavbi, kadar hlajenje ni potrebno, pa nižje (2b).

5.4. SELEKTIVNE OPTIČNE LASTNOSTI POVRŠIN NETRANSARENTNIH GRADNIKOV STAVB

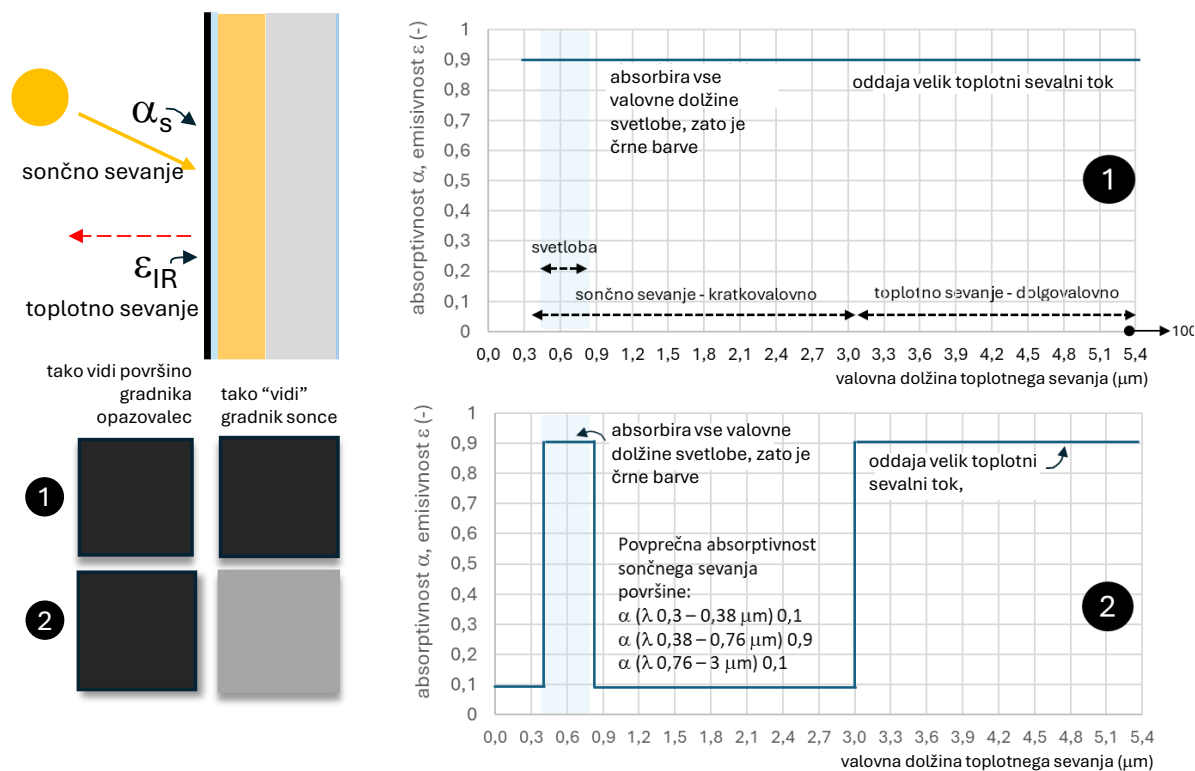
Optične lastnosti gradnikov opredeljujejo odziv gradnikov na sprejet in oddan sevalni toplotni tok. Lastnost sevalnega toplotnega toka opredeljuje poleg njegove jakosti (merjeno v W) tudi območje valovnih dolžin λ (μm) elektromagnetnega valovanja, ki to sevanje sestavljajo. Sevalni tok oddajajo površine teles katerih temperatura je višja od absolutne ničle, torej vse površine, ki nas v naravi in stavbi obdajajo. Torej bodo gradniki stavb toplotni tok s sevanjem tako oddajali, kot tudi sprejemali od drugih gradnikov stavb ali naravnih elementov. V inženirski praksi pri dinamičnem modeliranju stavb delimo toplotno sevanje na kratkovalovno in dolgovalovno na osnovi valovnih dolžin oddanega sevalnega toplotnega toka. Meja med njima je največja valovna dolžina valovanja, ki jo prepušča običajno steklo. To je $3\mu\text{m}$. Za večje valovne dolžine je steklo neprepustno. Fotosfera sonca s temperaturo $\sim 6000\text{ K}$ oddaja 97% sevalnega toplotnega toka v območju valovnih dolžin, ki jih prepušča

običajno steklo, medtem, ko površine gradnikov stavb, vključno z ogrevali, oddajajo dolgovalovno sevanje z večjimi valovnimi dolžinami.

Optična lastnost površine gradnika, ki opredeljuje tudi kolikšen toplotni tok bo površina oddala s sevanjem, je emisivnost ε . Optična lastnosti, s katerimi opišemo, kako bo površina sprejela na njo prihajajoč sevalni toplotni tok, pa so absorptivnost α , ki opredeljuje, koliko toplotnega sevanja bo površina zadržala/absorbirala, odbojnost ρ , ki opredeljuje delež odbitega sprejetega toplotnega, in za prozorne/prosojne snovi tudi transmitivnost τ , ki opredeljuje, koliko sprejetega sevalnega toplotnega toka gradnik prepusti.

Če posamezna optična lastnost gradnika (ε , α , ρ , τ) ni enaka pri katerikoli valovni dolžini λ oddanega ali sprejetega toplotnega sevanja, mu pripisujemo lastnost selektivnosti. Ta je lahko naravna lastnost gradnika - na primer, že omenjeno običajno steklo zelo dobro prepušča valovne dolžine toplotnega sevanja, krajše od 3 μm (torej sončno sevanje), zadrži pa daljše valovne dolžine toplotnega sevanja (npr. toplotno sevanje ogrevala pred zasteklitvijo). Zaradi te lastnosti, selektivnosti, steklo omogoča učinkovito naravno ogrevanje stavb.

Glede na željeni učinek lahko optične lastnosti gradnikov (umetno, tehnološko) prilagodimo, da bo njihov vpliv na bivalno ugodje in učinkovito rabo energije največji. V tem primeru je treba vedeti, kako se optične lastnosti za ta gradnik razlikujejo pri posamezni valovni dolžini ali območju valovnih dolžin. Povprečne vrednosti optičnih lastnosti, ki jih nato uporabljamo pri dinamičnem modeliranju, določimo s posebnim načinom povprečenja, ki ga bomo prikazali na primeru "hladne barve" sicer temno opleskanega zidu. S takim zaključnim slojem dosežemo, da ima gradnik (slika 56) sicer zeleno temno barvo, se pa med tem, ko je osončen, segreje na nižjo temperaturo kot gradnik z neselektivnim opleskom. Optične lastnosti neselektivnega (1) in selektivnega nanosa (2) so prikazane na sliki 56.



Slika 56: Netransparentni gradnik toplotnega ovoja (levo) z neselektivnim (1) in selektivnim (2) opleskom zunanje površine.

Povprečno absorptivnost sončnega sevanja, ki bi jo za ta gradnik upoštevali pri dinamičnem modeliranju, določimo v teh korakih:

- iz priložene tabele odčitamo deleži toplotnega toka F_{0-lx} , ki ga sprejme gradnik od vira (Sonca) z absolutno temperaturo 5760 K v območju valovnih dolžin 0 μm in $l_x \mu m$, tako, da mejni valovni dolžini (0 μm in $l_x \mu m$) pomnožimo z absolutno temperaturo fotosfere Sonca:

$$\begin{aligned} &\text{temperatura sonca } 5760 \text{ K} \\ &\lambda_0 \cdot T \rightarrow F_{0-\lambda_0} \\ &\text{in } \lambda_1 \cdot T \rightarrow F_{0-\lambda_1} \end{aligned}$$

$\lambda \cdot T$ ($\mu\text{m} \cdot \text{K}$)	$F_{(0-\lambda)}$	$\lambda \cdot T$ ($\mu\text{m} \cdot \text{K}$)	$F_{(0-\lambda)}$	$\lambda \cdot T$ ($\mu\text{m} \cdot \text{K}$)	$F_{(0-\lambda)}$	$\lambda \cdot T$ ($\mu\text{m} \cdot \text{K}$)	$F_{(0-\lambda)}$
200	0,0000	3200	0,3181	6400	0,7692	12000	0,9451
400	0,0000	3400	0,3617	6600	0,7832	13000	0,9551
600	0,0000	3600	0,4036	6800	0,7961	14000	0,9629
800	0,0001	3800	0,4434	7000	0,8081	15000	0,9700
1000	0,0003	4000	0,4809	7200	0,8192	16000	0,9738
1200	0,0021	4200	0,5160	7400	0,8295	18000	0,9809
1400	0,0078	4400	0,5488	7600	0,8391	20000	0,9856
1600	0,1971	4600	0,5793	7800	0,8480	25000	0,9922
1800	0,0393	4800	0,6076	8000	0,8563	30000	0,9953
2000	0,0667	5000	0,6337	8500	0,8746	40000	0,9980
2200	0,1009	5200	0,6590	9000	0,8900	50000	0,9990
2400	0,1403	5400	0,6804	9500	0,9031	75000	0,9997
2600	0,1831	5600	0,7010	10000	0,9142	100000	0,9999
2800	0,2279	5800	0,7202	10500	0,9237		
2898	0,2501	6000	0,7378	11000	0,9319		
3000	0,2732	6200	0,7541	11500	0,9400		

- z znanimi absorptivnostmi v posameznih območjih valovnih dolžin sevanja, ki ga sprejema gradnik, določimo povprečno absorptivnost sončnega sevanja opleska z izrazom:

$$\alpha_s = \alpha_{\lambda_1-\lambda_2} \cdot (F_{0-\lambda_2} - F_{0-\lambda_1}) + \alpha_{\lambda_2-\lambda_3} \cdot (F_{0-\lambda_3} - F_{0-\lambda_2}) + \dots + \alpha_{\lambda_{n-1}-\lambda_n} \cdot (F_{0-\lambda_n} - F_{0-\lambda_{n-1}})$$

Primer za gradnik z neselektivnim nanosom na sliki 47 (1):

$$\alpha_s = 0,9 \cdot (0,976 - 0) = 0,878$$

delež celotnega sončnega sevanja do $\lambda = 3 \mu\text{m}$;
 $\lambda \cdot T = 17280 \mu\text{mK}$

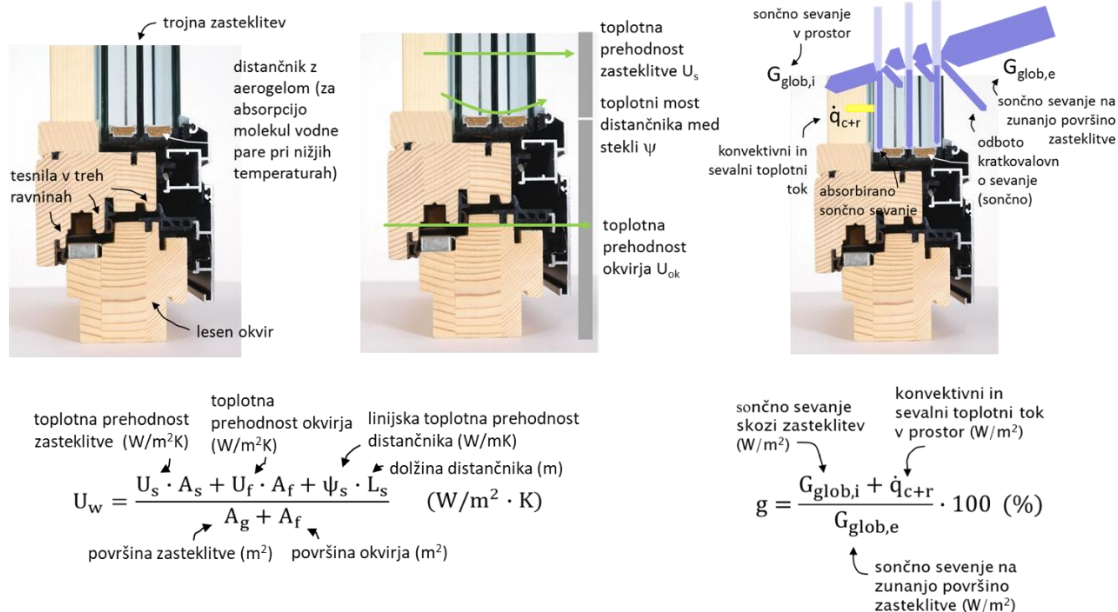
Za gradnik s selektivnim opleskom na sliki 47 (2):

$$\alpha_{s,sel} = 0,1 \cdot (0,100) + 0,9 \cdot (0,530 - 0,100) + 0,1 \cdot (0,976 - 0,530) = 0,442$$

Na enak način določimo tudi povprečno emisivnost toplotnega sevanja, ki ga oddaja selektivno opleskani gradnik s svoje površine.

5.5. MODELIRANJE TRANSPARENTNIH GRADNIKOV TOPLOTNEGA OVOJA STAVB

Pri statičnem modeliranju se transparentni gradniki opišejo s toplotno prehodnostjo U_w , skupno energijsko prehodnostjo sončnega sevanja zasteklitve g in transmitivnostjo svetlobe τ_{vis} (slika 57). Pogosto se pri statičnem modeliranju privzamejo minimalne zahteve, ki jih določa PURES-3 ($U_{w,dov} = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g_{min} = 0,5$ in $\tau_{vis,min} = 0,5$). Transparentni gradniki se obravnavajo kot gradniki brez toplotne mase.

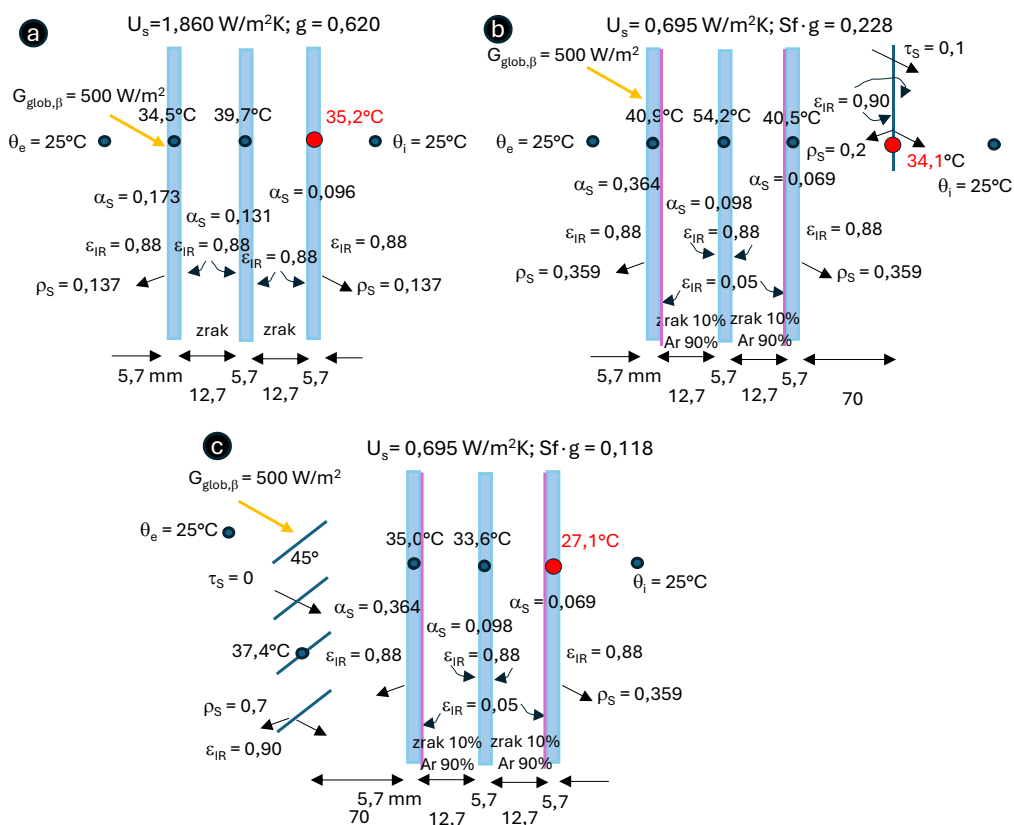


Slika 57: Pri statičnem modeliranju transparentnih gradnikov se upoštevajo energijske lastnosti, opredeljene s konstantami (U_w, g); τ_{vis} navaja razmerje med svetlobnim tokom, ki prehaja zasteklitev, in svetlobnim tokom, ki ga sprejema zunanja površina zasteklitve iz fotosfere Sonca in z neba ter po odboju z okoliških površin.

Transparentni gradniki ovoja v smeri med SV-J-SZ morajo biti opremljeni z zunanji senčili tako, da je skupna energijska prehodnost sončnega sevanja sistema senčilo+zasteklitev ($SF \cdot g$) manjša od 0,17. Pri statičnem modeliranju ni mogoče upravljati s senčili, zato je pravilo, da se upošteva, da so senčila odstranjena pri izračunu potrebne toplote za ogrevanje $Q_{H,nd}$ in aktivna pri izračunu potrebne odvedene toplote pri hlajenju $Q_{C,nd}$ v vseh mesečnih računskih obdobjih.

Dinamično modeliranje toplotnega odziva transparentnih gradnikov omogoča, kljub temu, da se pri modeliranju prenosa toplote uporabljajo empirični modeli s katerimi se npr. ovrednoti prestop toplote s konvekcijo v odvisnosti od hitrosti vetra in prestop toplote v zaprtih regah zasteklitve glede na vitkost rege (razmerje med širino in višino) in vrsto polnilnega plina, bolj podrobno fizikalno modeliranje v naslednjem:

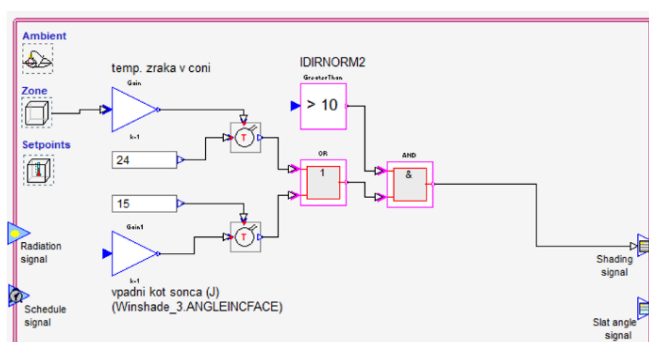
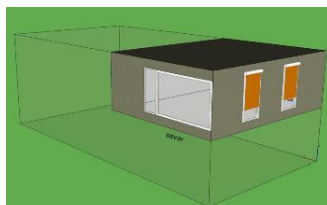
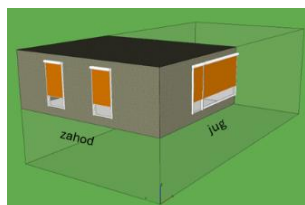
- načrtovalec lahko sestavi okno s poljubnimi komponentami za katere opredeli geometrijske optične in toplotne lastnosti (slika 58). Optične lastnosti so običajno podane v integralnih spektrih sevanja – 0,3 μm do 3 μm za sončno sevanje, 3 μm do 100 μm za IR sevanje. Izbere se lahko tudi plin ali zmes plinov v posamezni regi med stekli. Rezultat fizikalnega modela so toplotna prehodnost zasteklitve, skupna energijska prehodnost sončnega sevanja g (brez in s senčilom). Z bolj natančni modeli se izračuna tudi prehod sevanja pri različnih vpadnih kotih (0 – 90°), saj se z večanjem vpadnega kota prehod sevanja zmanjšuje.



Slika 58: Primeri izračunane toplotne prehodnosti zasteklitve U_s ter spremenljivke geometrijskih in snovnih lastnosti, ki jih je pri fizikalnem modeliranju treba opredeliti; pomemben rezultat modeliranja je temperatura na notranji površini zasteklitve θ_{si} ali notranjega senčila, saj vpliva na toplotno ugodje (na povprečno sevalno temperaturo v toplotni coni (θ_{MRT}), zato naj bo čim bližje temperaturi notranjega zraka θ_i ; (a) trojna zasteklitev brez nizkoemisijskih nanosov na steklu, (b) sodobna troslojna zasteklitev z notranjim senčilom, (c) enaka zasteklitev z zunanji žaluzijami (nagnjenimi pod kotom 45°), kot nastavitve lamel se pri dinamičnem modeliranju toplotnega odziva stavbe oziroma toplotne cone lahko optimizira v vsakem časovnem koraku.

Načrtovalec lahko uporabi oziroma razvije različne algoritme za vodenje senčil in kontrolne spremenljivke optimizira (slika 59):

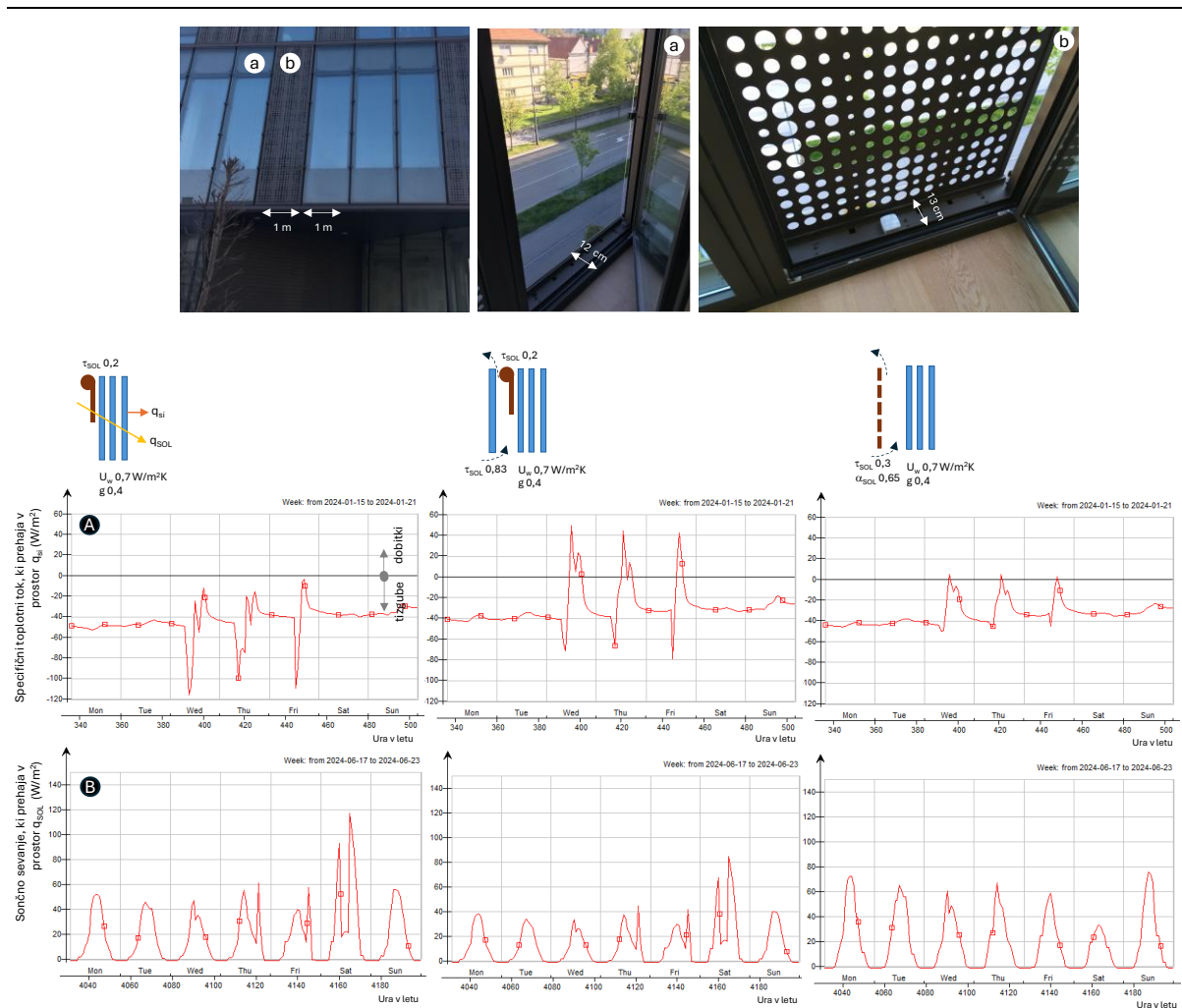
Slika 59: Uporabniški algoritem za krmiljenje senčil na oknih referenčnega prostora REF 2 izdelan z vizualnim programiranjem v BIM okolju, ki omogoča izbiro med : 1) konvencionalnim algoritmom krmiljenja senčil - senčila so spuščena pri $G_{glob,\beta} \geq 100 \text{ W/m}^2$ in 2) pametno delovanje senčil - senčila spuščena, če je hkrati a) $G_{beam,\beta} > 10 \text{ W/m}^2$ (jasno nebo), b) temperatura zraka v coni $\theta_i \geq 24 \text{ °C}$ (naravno ogrevanje in preprečuje pregrevanje) in c) vpadni kot direktnega sončnega sevanja na površino okna $i \leq 15^\circ$ (preprečevanje bleščanja).



Vpliv senčil in algoritma krmiljenja senčil v referenčnem prostoru REF 2 na potrebno letno količino specifične toplote za ogrevanje $Q'_{H,nd}$ ter hlajenje $Q'_{C,nd}$ in dovedena energija za električno osvetlitev E'_{L} : uporabljeno TML za Ljubljano, $\theta_{set,H} = 20 \text{ °C}$, $\theta_{set,C} = 26 \text{ °C}$, prekop H/C pri drsečem 48 urnem povprečju $\theta_{e,avg,48} 15^\circ\text{C}$.

	kWh/m ² an REF 2	Algoritem krmiljenja senčila		
		brez zunanjih senčil	$G_{glob,\beta}$	$G_{beam} + \theta_i + i$
Specifična potrebna toplota za ogrevanje	$Q'_{H,nd}$	22,04	37,79	22,81
Specifična potrebna odvedena toplota za hlajenje	$Q'_{C,nd}$	24,96	8,73	6,71
Specifična dovedena električna energija za razsvetljavo	$E'_{L,det}$	1,29	1,77	1,34

- dinamično modeliranje lahko vključimo posebne izvedbe senčil, ki so značilne za sodobno arhitekturo (primer na sliki 60):



Slika 60: Posebni izvedbi senčil na stanovanjski stavbi: (a) dvojna zastekljena fasada z vmesnim premičnim senčilom (rolo), (b) nepremična perforirana senčila; kot rezultat dinamičnega modeliranja je prikazan specifični toplotni tok q_{si} na notranji površini zasteklitve v hladnem tednu leta za primerjane arhitekturne zasnove fasad, (B) sončno sevanje $q_{sol,i}$, ki vstopa v prostor v toplen tednu leta; uporabljeni meteorološki podatki iz TML za Ljubljano.

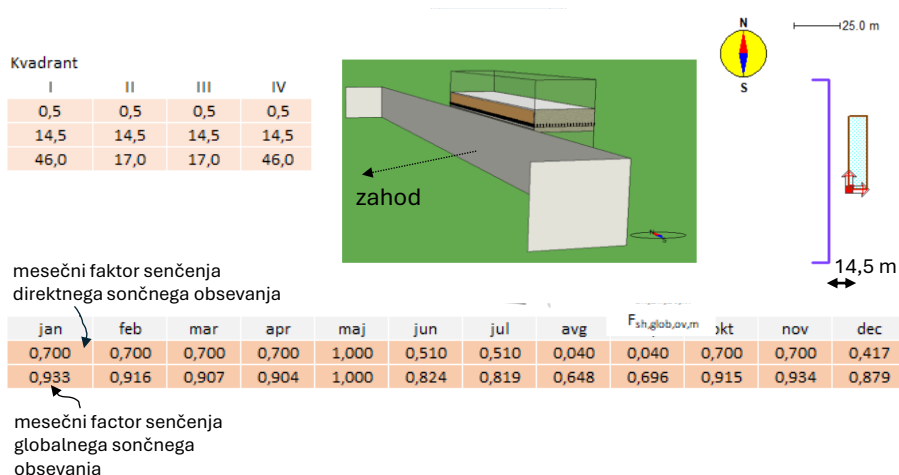
Prehod toplote skozi okvir transparentnega gradnika ovoja sicer lahko numerično modeliramo (glej poglavje 5.7. Toplotni mostovi). Ker pa ti elementi ne vplivajo občutno na dinamični odziv prostora/stavbe, jih modeliramo enako kot pri statičnem modeliranju (A_{ok} , U_{ok}) z dodatkom vpliva toplotnega mostu distančnikov v zasteklitvi.

5.6. MODELIRANJE SENČENJA GRADNIKOV TOPLOTNEGA OVOJA STAVB

Pri statičnem modeliranju v skladu s tehničnim standardom SIT EN 52016-1 po EPBD senčenje gradnikov (netransparentnih in transparentnih) toplotnega ovoja modeliramo z zmanjšanim mesečnim globalnim sončnim obsevanjem zunanje površine gradnikov $H_{glob,b,m}$, poenostavljeno z mesečnimi

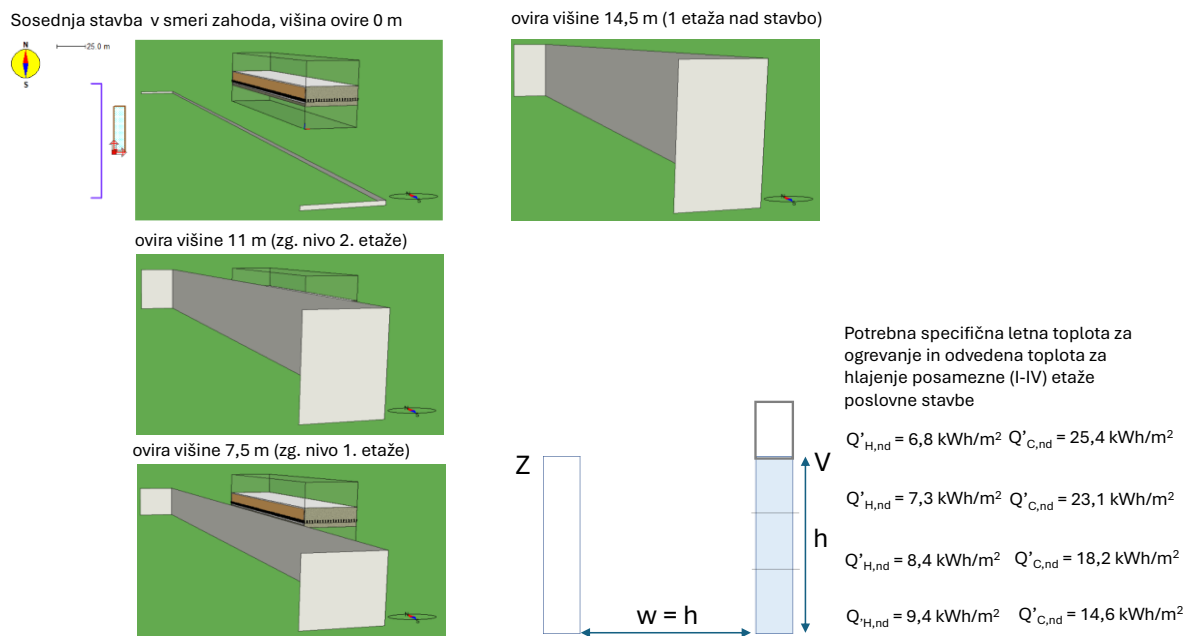
faktorji senčenja. Določimo ga posebej za fasadne ovire kot $F_{sh,dir,fas,m}$ ter okoliške naravne in grajene ovire kot $F_{sh,dir,ov,m}$ za vsak mesec v letu. Značilno je, da se faktor senčenja upoštevajo zgolj pri komponenti direktnega sončnega obsevanja (slika 61):

$$H_{glob,\beta,m} = H_{dir,\beta,m} \cdot F_{sh,dir,fas,m} \cdot F_{sh,dir,ov,m} + H_{dif,\beta,m} = \left(\frac{Wh}{m^2 \cdot dan} \right)$$



Slika 61: Pri statičnem modeliranju se senčenje gradnikov toplotnega ovoja z ovire na fasadi in sosednjih objektih določi na podlagi višine in oddaljenosti ovir v štirih prostorskih kvadrantih (v skladu z metodo SIST EN 52016-1).

Pri dinamičnem modeliranju pa se senčenje gradnikov toplotnega ovoja določi za vsako uro v letu ter ločeno za direktno in difuzno komponento urnega sončnega obsevanja. Načrtovalec mora pri modeliranju natančno upoštevati vpliv senčenja, tako, da razdeli stavbo na enako senčene toplotne cone. Slika 62 prikazuje vpliv senčenja sosednjega objekta na letno specifično količino potrebne toplote za ogrevanje $Q'_{H,nd}$ in količino odvedene toplote za hlajenje $Q'_{C,nd}$ posamezne etaže (toplotne cone) poslovnega objekta v uličnem kanjonu.



Slika 62: Pri dinamičnem modeliranju je vpliv senčenja gradnikov toplotnega ovoja (predvsem transparentnih) na modelirano rabo energije izrazitejši in ga mora načrtovalec natančno opredeliti.

5.7. MODELIRANJE TOPLOTNIH MOSTOV

Orodja BEM praviloma ne omogočajo dinamičnega modeliranja toplotnega odziva nehomogenih gradnikov toplotnega ovoja stavb, torej takih, pri katerih vektor toplotnega toka ni pravokoten na notranjo/zunanjo površino gradnika. Pogostejše odstopanja od dinamičnega toplotnega odziva homogenih gradnikov obravnavamo ločeno /dodatno kot toplotne mostove oziroma z linijskimi ali točkovnimi toplotnimi prehodnostmi.

Pri uporabi statičnega modeliranja je sicer dovoljena poenostavljeni način obravnave vpliva toplotnih mostov s povečanjem toplotne prehodnosti gradnikov toplotnega ovoja U z empirično določeno konstanto $\Delta\psi$. V PURES-3 je opredeljena vrednost konstante $\Delta\psi = 0,04 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ za nove in $0,06 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ za že zgrajene, neobnovljene stavbe.

Vendar so za sodobne stavbe značilni številni kompleksni tehnični detajli, ki vplivajo na prehod toplote skozi gradnik. Ker se toplotni tok, ki prehaja skozi gradnik, praviloma poveča, se lokalno tudi zniža računska temperatura notranje površine in s tem faktor površinske temperature f_{RSI} . Zato je za energetsko zahtevne stavbe predpisana uporaba numeričnih orodij za določitev vpliva toplotnega mostu na toplotno prehodnost gradnika U oziroma koeficient transmisijских toplotnih izgub celotnega toplotnega ovoja stavbe H'_{tr} .

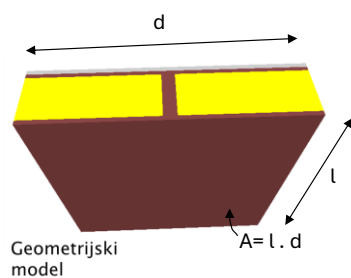
Dvodimenzionalen/tridimenzionalen toplotni tok skozi gradnik, ki ga povzroči toplotni most, se v inženirski praksi izračuna z uporabo numeričnih orodij. Postopek sicer ni zahteven, mora pa načrtovalec določiti vplivno območje toplotnega mostu. Pravila so:

- velikost gradnika naj bo tolikšna, da so izoterme na robu območja vzporedne (torej je toplotni tok eno-dimenzionalen (1D) in usmerjen v smeri normale na površino gradnika);
- vplivno območje naj bo na sredini med dvema toplotnima mostovoma, če zgornje zahteve ni mogoče upoštevati;
- toplotne mostove v stiku gradnikov z zemljino izračunamo s tako veliko prostornino zemljine, da letno spreminjanje njene temperature ne vpliva na oceno toplotne prehodnosti toplotnega mostu.

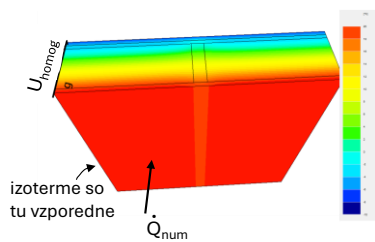
Orodja BEM le izjemoma omogočajo izračun toplotnega toka skozi gradnike toplotnega ovoja stavbe, ki niso homogeni (torej vektor toplotnega toka ni pravokoten na notranjo/zunanjo površino gradnika).

Postopek numeričnega modeliranja toplotnih mostov poteka v teh korakih:

- toplotni most kot detajl toplotnega ovoja stavbe mora opredeliti načrtovalec stavbe;
- določiti mora vplivno območje toplotnega mostu, ki opredeljuje geometrijski model toplotnega mostu. To območje mora biti tako veliko, da je na robovih modela toplotni tok enak kot pri homogenem gradniku. V tem primeru povečanje območja toplotnega mostu ne bo vplivalo na izračun oziroma le v okviru numerične napake. Z območjem ne smemo poseči v vplivno območje sosednjega toplotnega mostu;



- izberemo temperaturo zraka v stavbi θ_i in okolici θ_e . Priporoča se, da je razlika med njima najmanj 20 °C;
- na podlagi numerične simulacije, na primer z metodo končnih volumnov, bo računsko orodje izračunalo toplotni tok Q_{num} , ki pri izbrani temperaturni razliki prehaja modeliran del gradnika;



- iz razlike med numerično izračunanim toplotnim tokom $\dot{Q}_{num}$ in toplotnim tokom, ki bi pri enaki razliki v temperaturah prehajal homogeni gradnik (U_{homog}), se izračuna linijska toplotna prehodnost toplotnega mostu ψ .

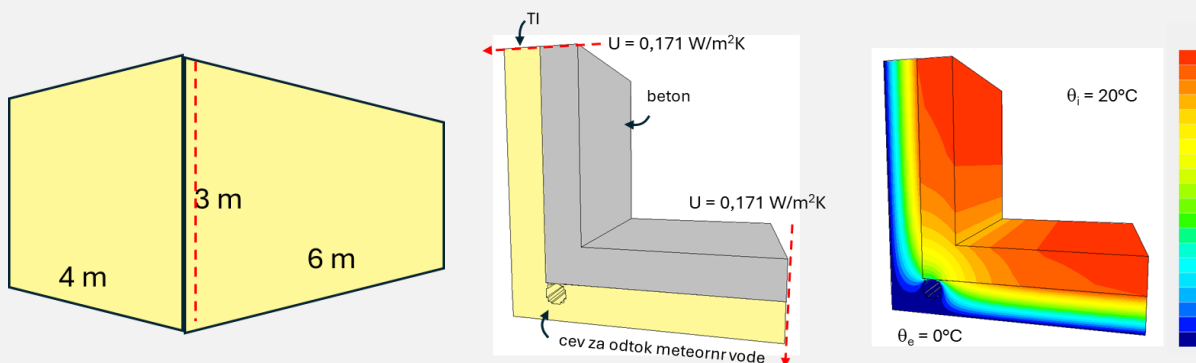
Toplotni tok, ki ga izračuna numerično orodje

$$\dot{Q}_{num} = (U_{homog} \cdot A + \psi \cdot l) \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (W)$$

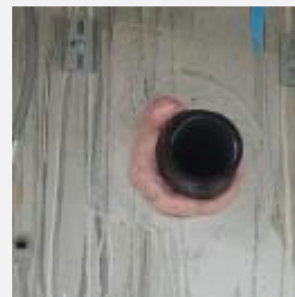
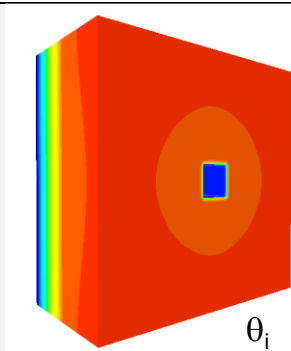
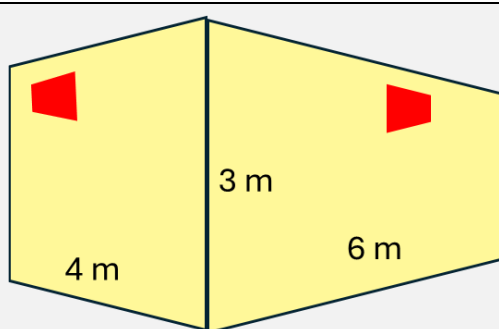
$$\psi = \frac{\frac{\dot{Q}_{num}}{(\theta_i - \theta_e)} - (U_{homog} \cdot A)}{l} \quad \left(\frac{W}{mK}\right)$$

Toplotna prehodnost linijskega toplotnega mostu (v tem primeru 1D)

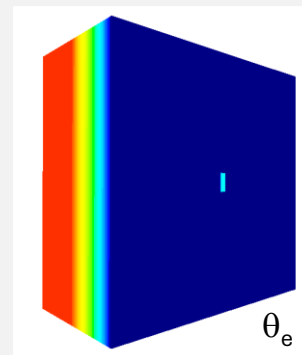
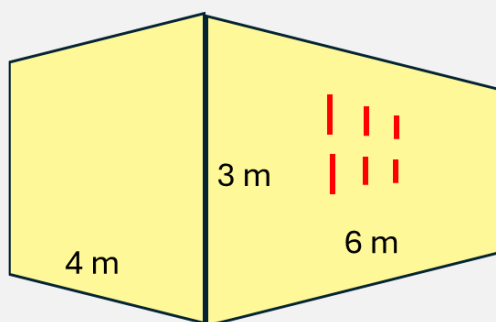
Primeri numeričnega modeliranja toplotnih mostov s katerimi poudarjamo pomen numeričnega modeliranja vpliva toplotnih mostov.



Če bi želeli zagotoviti enak toplotni tok, ki prehaja vogalna gradnika brez odtočne cevi meteorne vode ($U = 0,171 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$), bi morali ob vgradnji odtočne cevi povečati debelino toplotne izolacije konstrukcijskega sklopa povečati iz 21 cm na 30 cm (+ 2,7 m³).



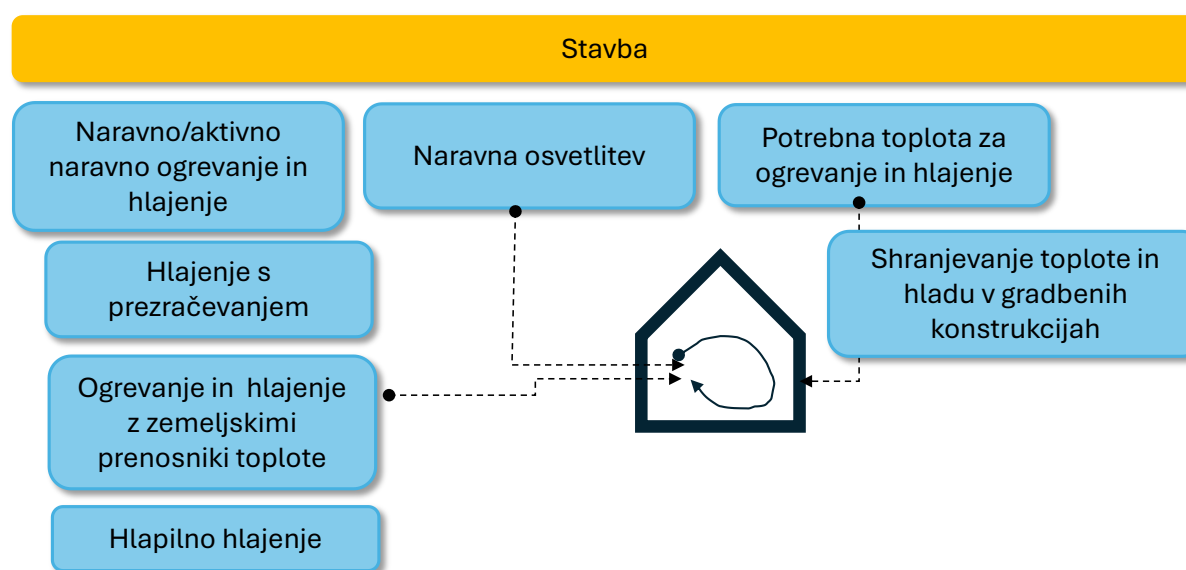
Dve odprtini prezračevalnega sistema povzročita točkovna toplotna mostova s točkovno toplotno prehodnostjo toplotnega mostu ($\chi = 0,219 \text{ W/K}$). Toplotna prehodnost homogenega zidu $U_{\text{homog}} = 0,171 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ se zaradi točkovnih toplotnih mostov poveča na $0,184 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$. Imata enak učinek, kot če bil homogeni zid (z debelino TI = 21,5 cm) bil izoliran z 2 cm tanjšim slojem toplotne izolacije.



Kovinska sidra fasadnih plošč ($4/\text{m}^2$) s točkovno toplotno prehodnostjo $\chi = 0,026 \text{ W/K}$ imajo enak učinek, kot če bi bil homogeni zid (z debelino TI 21,5 cm) toplotno izoliran le z 12,8 cm debelim slojem toplotne izolacije; toplotna prehodnost konstrukcijskega elementa $U_{\text{homog}} = 0,171 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ se zaradi točkovnih toplotnih mostov poveča na $0,275 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$.

6. DINAMIČNO MODELIRANJE STAVB

Dinamično modeliranje omogoča presojo tehnologij in tehnik, s katerimi ob uporabi naravnih virov povečamo ugodje bivanja ter optimiziramo rabo energije za ogrevanje, hlajenje, prezračevanje in osvetlitev stavb. Statično modeliranje tega ne omogoča, saj pri njem za opredelitev naravnih virov uporabljamo mesečna povprečja, in ne urnih vrednosti stanj spremenljivk zunanjega okolja. V tem poglavju opisujemo procese, ki so prikazane na sliki 63.



Slika 63: Tematska poglavja v tematskem sklopu o gradniki toplotnega ovoja.

6.1. POTREBNA KOLIČINA TOPLOTE ZA OGREVANJE $Q_{H,ND}$ IN ODVEDENE TOPLOTE ZA HLAJENJE $Q_{C,ND}$

Dinamično modeliranje toplotnega odziva stavb na prvi ravni vodi do izračuna potrebne količine energije za zagotavljanje toplotnega ugodja in oskrbe s TSV. To je količina energije, ki v vsakem časovnem koraku modeliranja zagotovi načrtovano notranje toplotno okolje ter predvideno količino in temperaturo TSV. Potrebna količina toplote za TSV je podlaga za izračun količine dovedene energije za delovanje sistema in se določa v skladu z zahtevami sanitarnega inženirstva. Potrebni količini toplote za ogrevanje $Q_{H,nd}$ in hlajenje $Q_{C,nd}$ sta samostojna kazalnika energijske učinkovitosti stavbe, ki morata ustrezati zahtevam PURES-3. Vrednost $Q_{H,nd}$ je tudi temelj za določitev razreda energijske učinkovitosti stavbe (A1 – G), ki se navede na njeni energetski izkaznici.

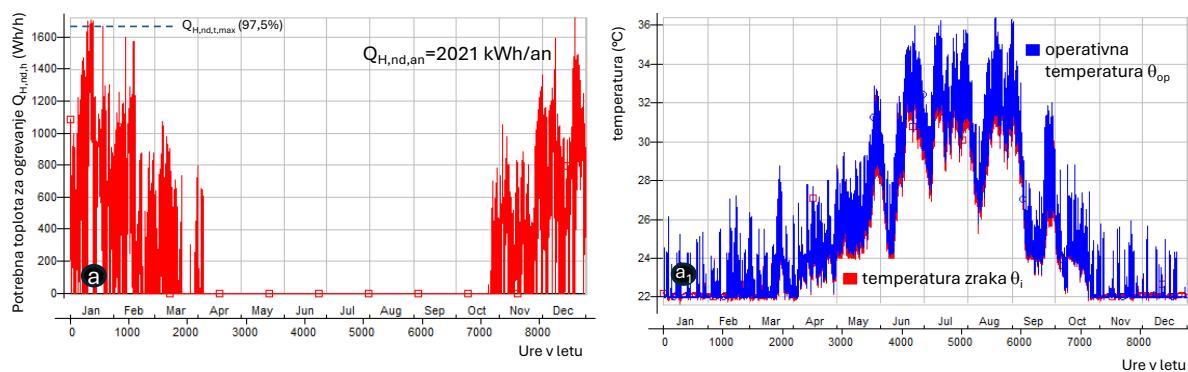
$Q_{H,nd}$ in $Q_{C,nd}$ se določita pri namišljenem idealnem ogrevalnem in hladilnem sistemu - idealni sistem ima generator toplote ali hladu neskončne moči, je brez energijskih izgub generatorja, v razvodu in na končnih prenosnikih toplote ter ne potrebuje dodatne rabe energije (E_{aux}) za delovanje komponent

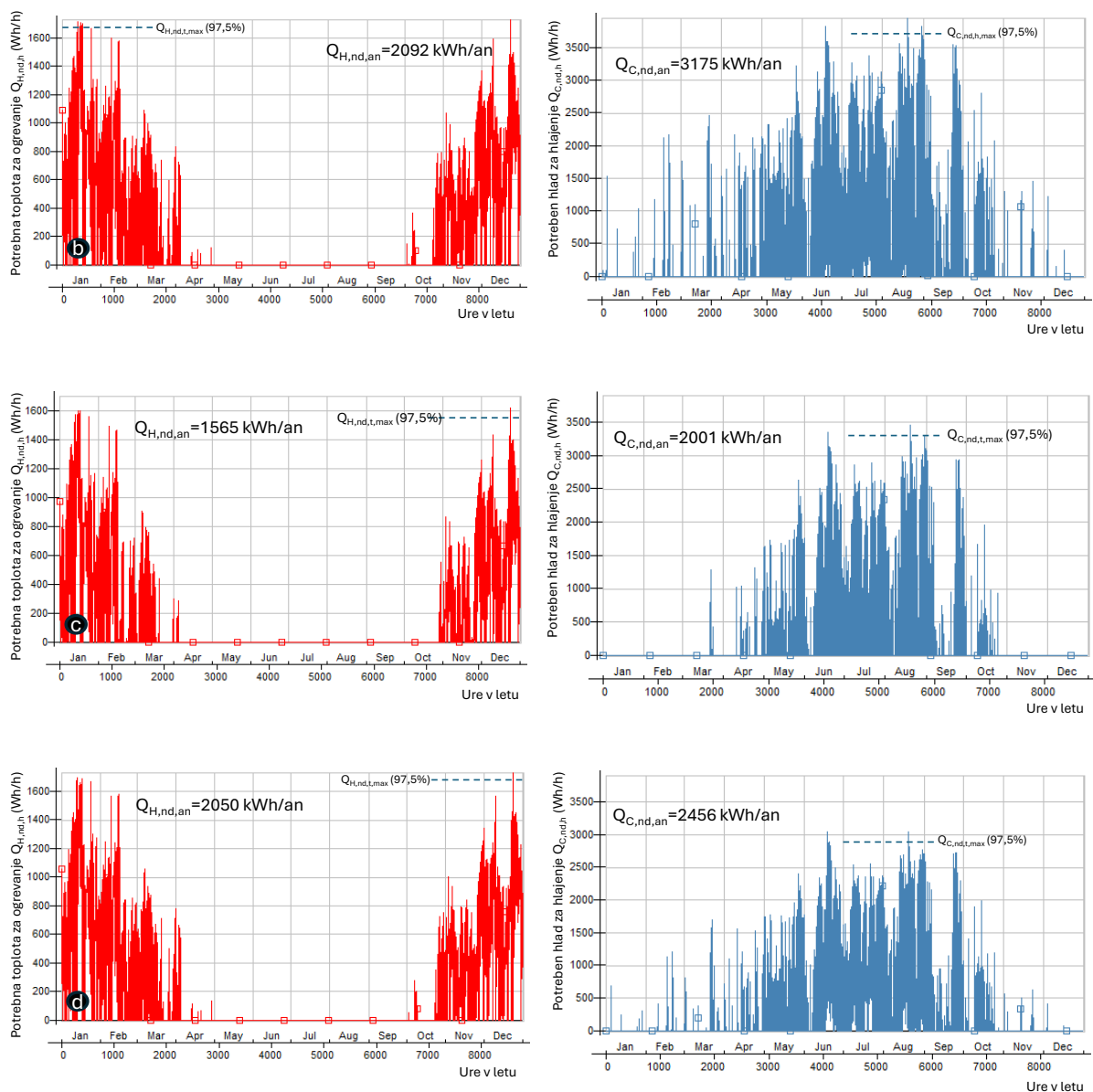
sistema. Oba sistema (ogrevalni in hladilni) idealno vzdržujeta željeno termostatisirano operativno temperaturo v notranjem okolju ob dovodu ustrezne količine zraka za prezračevanje za vzdrževanje IAQ.

Pri statičnem modeliranju se izračun $Q_{H,nd}$ in $Q_{C,nd}$ izdelata popolnoma ločeno, zato procesa ogrevanja in hlajenja med seboj nimata vpliva. Pri dinamičnem modeliranju je izračun zahtevnejši saj:

- izračun $Q_{H,nd}$ in $Q_{C,nd}$ poteka vzporedno, potrebujemo posebno pravilo za določitev obeh kazalnikov;
- primerna temperatura notranjega okolja ni opredeljena s stalno temperaturo, vendar – kakor to opredeljujejo tehnični standard SIST EN 17772-2:2018 in zahteve PURES-3 - mora biti zagotovljen vsaj II. razred kakovosti toplotnega okolja - torej mora biti temperatura v času zasedenosti stavbe med 20 °C in 24 °C v obdobju ogrevanja ter med 23 °C in 26 °C v obdobju hlajenja stavbe;
- termostatisirani temperaturi nisto temperaturi zraka, temveč operativni temperaturi, saj pri modeliranju upoštevamo skupen vpliv temperature zraka in povprečne sevalne temperature v stavbi ali delu stavbe.

Slika 64 prikazuje kako kriteriji kakovosti toplotnega ugodja vplivajo na potrebno količino toplote za ogrevanje in hlajenje v referenčnem prostoru REF 2 (slika 11), modelirano v urnih časovnih korakih za te primere: (a) ko v stavbi ni vgrajen sistem za hlajenje (v tem primeru sta prikazani temperatura zraka θ_i in operativna temperatura θ_{op} , (a_1)), (b) ko je termostatisirana operativna temperatura v območju I. razreda kakovosti toplotnega ugodja po SIST EN 17772-2:2018 ($\theta_{op,H,set} = 22$ °C in $\theta_{op,C,set} = 24,5$ °C), (c) ko je termostatisirana operativna temperatura v območju II. razreda kakovosti toplotnega ugodja ($\theta_{op,H,set} = 20$ °C in $\theta_{op,C,set} = 26$ °C), in (d) kot teoretični primer, ko potrebno dovedeno in odvedeno toploto modeliramo s termostatisirano temperaturo zraka in ne operativno temperaturo, kakor to predvidevata tehnični standard SIST EN 52016-1:2018 in PURES-3.





Slika 64: Potreben urni doveden $Q_{H,nd,t}$ in odveden $Q_{C,nd,t}$ toplotni tok, potrebna letna količina toplote za ogrevanje $Q_{H,nd,an}$ in hlajenje $Q_{C,nd,an}$ referenčnega prostora REF 2; v primeru ko REF 2 ni hlajen (a), (b) pri temperirani operativni temperaturi v območju I. razreda kakovosti toplotnega ugodja (22 °C, 24,5 °C), (c) pri termostatisani operativni temperaturi v območju II. razreda kakovosti toplotnega ugodja (20 °C, 26 °C), (d) teoretično, ko se kot termostatisana temperatura predvidi temperature zraka in ne operativna temperatura; navedene so tudi toplotna in hladilna obremenitev $Q_{H,nd,t,max}$ in $Q_{C,nd,t,max}$, določene kot 97,5% povprečja 5 ekstremnih vrednosti urnih toplotnih tokov $Q_{H,nd}$ in $Q_{C,nd}$.

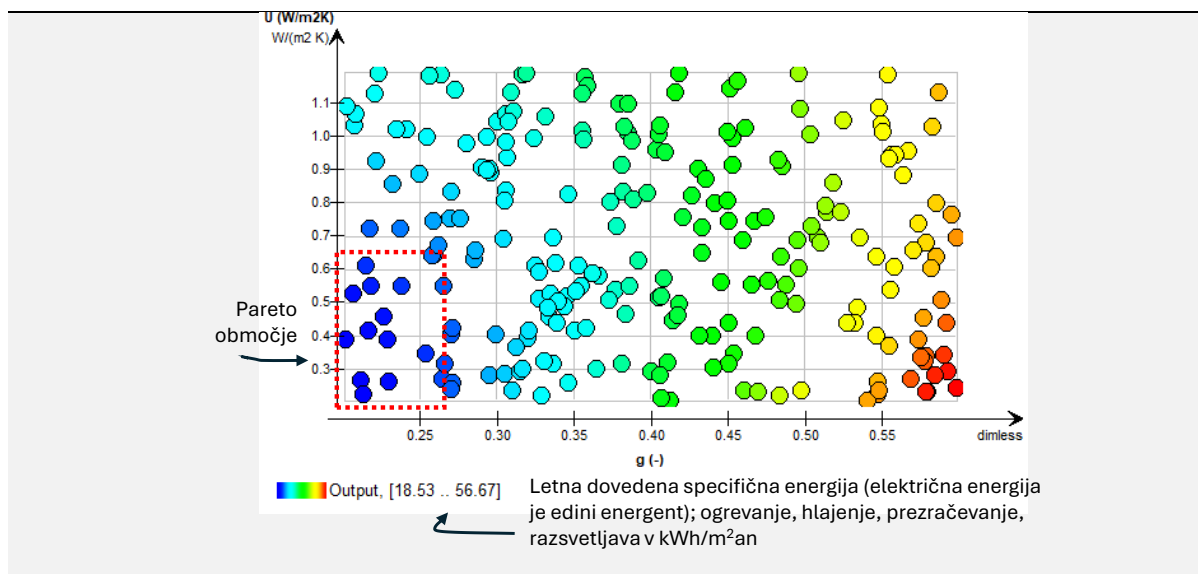
Zaradi velikih razlik v vrednostih $Q_{H,nd,an}$ in $Q_{C,nd,an}$, ki sta osnovna kazalnika energijske učinkovitosti stavbe, moramo njun izračun z dinamičnim modeliranjem izvesti z upoštevanjem naslednjih predlaganih pravil:

- potrebni energiji za ogrevanje $Q_{H,nd,an}$ in hlajenje $Q_{C,nd,an}$ se določita z idealnim ogrevalnim in hladilnim sistemom, tudi, če kateri od teh tehničnih stavbnih sistemov na stavbi ni vgrajen;
- $Q_{H,nd,t}$ in $Q_{C,nd,t}$ se določita pri srednji vrednosti operativne temperature glede na II. razred kakovosti toplotnega ugodja (ta je odvisna od vrste stavbe), kakor navajata SIST EN 17772-2:2018 in PURES-3;
- toplotna cona/stavba je prezračevana s količino svežega zraka, ki ustreza kakovosti IDA 2 oziroma II. razredu kakovosti IAQ, kakor to navaja SIST EN 17772-2:2018 in PURES-3 za zelo nizko emisijske stavbe;
- upošteva se adaptivni model ciljne termostatisane temperature na podlagi sedemdnevne zgodovinske vrednosti temperature okoliškega zraka, kakor to predvideva SIST EN 17772-2:2018;
- alternativno se za neadaptirane osebe "računski preklon" med ciljno operativno temperaturo v obdobju ogrevanja in hlajenja se izvede na podlagi 48 urnega drsečega povprečja temperature zunanjega zraka, priporočena vrednost $q_{a,e,avg,48}$ je 15 °C.

6.2. PARAMETRIČNO MODELIRANJE

Nekatera orodja BIM/BEM orodja za dinamično modeliranje omogočajo, da presojevalec opredeli območje spremenljivk lastnosti gradnikov in TSS za katere potem orodje BEM orodje izvede samodejno modeliranje kazalnikov energijske učinkovitosti. Orodje lahko tudi samodejno izbere kombinacije vrednosti spremenljivk, ki so pogosto s statistično metodo Monte-Carlo.

Primer parametričnega modeliranja referenčnega prostora 1 (slika 10). Primer prikazuje rezultate parametričnega modeliranja dovedene električne energije za ogrevanje, hlajenje, razsvetljava in mehansko prezračevanje; $COP_H = COP_C = 3$, izkoristek obeh sistemov 0,7 in vključuje toplotne izgube generatorja ($\eta_{gen} = 0,95$), razvoda ($\eta_{dis} = 0,80$) in končnih prenosnikov toplote ($\eta_{em} = 0,94$); kot parametra sta bila izbrana toplotna prehodnost oken U_o in skupna energijska prehodnost sončnega sevanja zasteklitve g ; obe okni (J-S in V-Z) imata enaki lastnosti, računana spremenljivka je dovedena energija E_{del} kWh/an/m² - $E_{del} = Q_{H,nd} / 2,1 + E_{H,aux} + Q_{C,nd} / 2,1 + E_{C,aux} + E_L + E_V$; uporabljeni so bili podatki iz TML ARSO Lj.



6.3. MODELIRANJE NARAVNEGA IN HIBRIDNEGA PREZRAČEVANJA IN HLAJENJA S PREZRAČEVANJEM

Naravna izmenjava zraka med okoljem in stavbo je osnovni način prezračevanja. To je poleg zagotavljanja IAQ pomembno tudi za naravno hlajenje stavb oziroma stavbnih konstrukcij v stavbi. Naravno prezračevanje temelji na naravnih fizikalnih lastnostih in zakonih in je posledica razlike v zračnem tlaku med okolico in stavbo ali prostori v stavbi. Ta razlika nastane zaradi razlike v gostoti zraka ko se temperaturi zraka v okolici in stavbi razlikujeta, naravno prezračevanje pa je v tem primeru vzgonsko. Večja razlika v zračnem tlaku pa nastane, ko se ob vetru izpostavljenih gradnikih ovoja stavbe hitrost vetra zmanjša, hkrati pa se lokalno poveča tlak zraka. Nasprotno, pa se ob vetru neizpostavljenih gradnikih hitrost zraka povečuje, to pa povzroči lokalno znižanje tlaka zraka. Če so v ovoju stavbe odprtine na vetru izpostavljenem in zavetrovanem delu ovoja, bo razlika med tlakom zraka v okolici in stavbi velika, in bo tako, t.i. vetrovno vzbujeno prezračevanje, intenzivno. Tako temperatura zraka v okolici in stavbi, kot tudi hitrost vetra so dinamične spremenljivke, zato lahko naravno prezračevanje in naravno hlajenje stavb s prezračevanjem ovrednotimo le z dinamičnim modeliranjem.

Orodja BEM praviloma ne izračunajo pretoka zraka pri prezračevanju s temeljnimi fizikalnimi zakoni in metodo polnega dinamičnega modeliranja, saj je za analizo celoletnega toplotnega odziva stavb to za zdaj časovno prezahtevno. Zato se tudi pri dinamičnem modeliranju uporabljajo izkustvene povezave med spremenljivkami. Vendar stanje oziroma vrednosti spremenljivk opazujemo v kratkih (ura ali manj) časovnih korakih. V literaturi najdemo vrsto izkustvenih modelov s katerimi ovrednotimo vzgonsko in vetrovno vzbujeno naravno prezračevanje. Skupno jim je, da opredeljujejo časovno odvisno količino zraka, ki se izmenjuje med stavbo in zunanjim okoljem pri različnih oblikah in položaju prezračevalnih odprtih v ovoju stavbe. V primerih v nadaljevanju se osredotočamo na modele, ki jih navajata standarda SIST EN SIST EN 12831-1:2017 in SIST EN 16798-8:2018 po EPBD.

Najbolj pogost način naravnega prezračevanja je prezračevanje skozi velike odprtine. Fizikalno so to odprtine, skozi katere se zrak pretaka v stavbo in iz nje hkrati (slika 65). Meja med tokovima je tlačno nevtralna ravnina, katere položaj se po višini odprtine spreminja glede na temperature zraka in hitrost vetra. Velikost odprtine opredelimo z efektivno površino $A_{\text{eff},o}$, ki je enaka zmnožku višine h_o in dolžine l_o odprtine (slika 65), pri delno, oziroma na kip, odprtih odprtinah pa se uporabi korekcijski koeficient odprtine c_α . Zožitveni koeficient c_d pa opisuje zoženje curka zraka pri pretoku skozi odprtino. Za pravokotne odprtine je pogosto privzame vrednost 0,65.

Velikos odprtine skozi katero se zrak pretaka sočasno v in iz stavbe

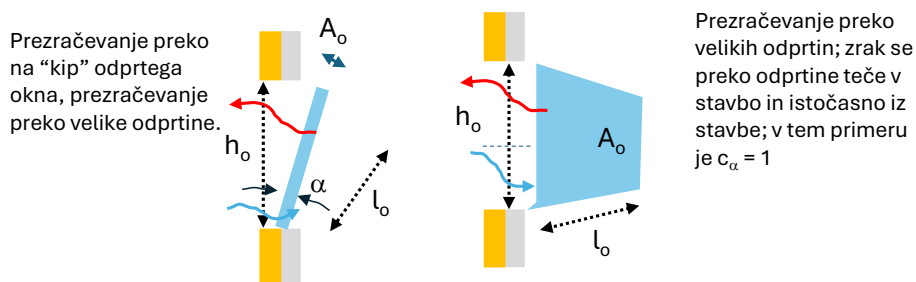
$$A_{\text{eff},io} = c_D \cdot c_\alpha \cdot A_o = c_d \cdot c_\alpha \cdot h_o \cdot l_o (\text{m}^2)$$

Standard SIST EN 16798-8:2018 za določitev korekcijskega faktorja c_α navaja izraz:

$$c_\alpha = 2,6 \cdot 10^{-7} \cdot \alpha - 1,19 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha + 1,82 \cdot 10^{-2} \cdot \alpha$$

primer $\alpha = 15^\circ$ $c_\alpha = 0,275$

Pri dinamičnem modeliranju lahko uvedemo kontrolne algoritme, ki na podlagi na primer modelirane vsebnosti CO_2 ali/in temperature v prostoru, prilagajajo kot α kriterijem učinkovite rabe energije.

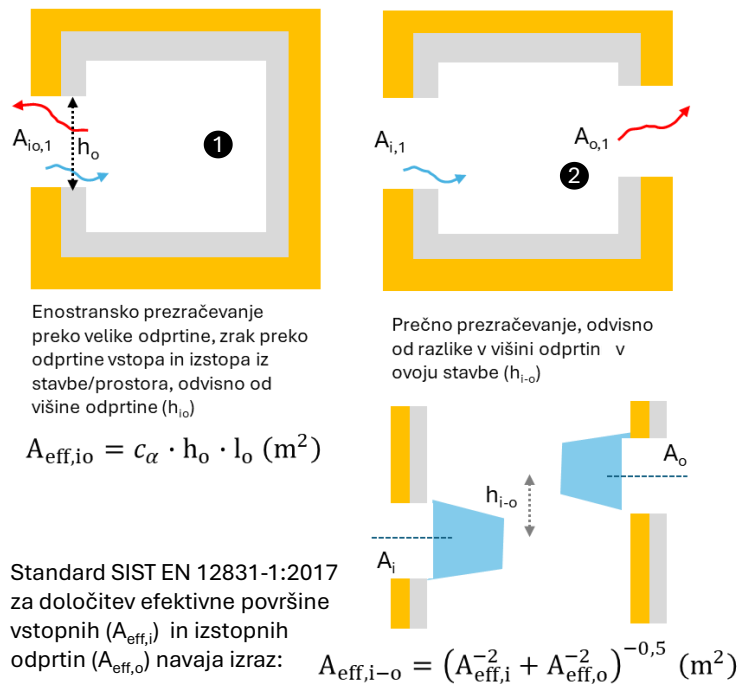


Slika 65: Ponazoritev naravnega prezračevanja skozi veliko prezračevalno odprtino.

Izmenjava zraka med okoljem in stavbo se poveča pri vzgonskem in vetrno vzbujenem prečnem prezračevanju. V tem primeru je v ovoj vgrajenih več odprtin, načrtovalec pa mora pri poenostavljenem dinamičnem modeliranju opredeli njihovo skupno površino, skozi katero zrak vstopa ($A_{\text{eff},i}$) in izstopa ($A_{\text{eff},o}$).

6.3.1. Enostransko in prečno prezračevanje

Pri poenostavljenem dinamičnem modeliranju obravnavamo dva značilna primera naravnega prezračevanja: enostransko prezračevanje skozi velike odprtine (slika 66, (1)), ter prečno prezračevanje v primeru, ko so odprtine vgrajene v več različno usmerjenih delov ovoja stavbe. V tem primeru zrak vstopa v stavbo na privetrni strani in iz nje izstopa skozi odprtine na zavetrni strani (slika 66, (2)).



Slika 66: Ponazoritev enostranskega prezračevanja preko velike odprtine (1) in prečnega prezračevanja (2); navedena sta izraza za določitev efektivne velikosti prezračevalnih odprtin v skladu z tehničnima standardoma SIST EN 12831-1:2017 in SIST EN 16798-8:2018 po EPBD.

Količina zraka, ki se izmenjuje med okolico in stavbo oziroma prostorom, je pri vzgonskem prezračevanju odvisna od razlike v temperaturi zraka v okolici in stavbi in povečanega ali zmanjšane tlaka zraka ob ovoju stavbe pri vetrno vzbujačem prezračevanju. V tehničnih standardih SIST EN 16798-7:2018 in SIST EN 16798-8:2018 po EPBD so za določitev prostorninskega pretoka zraka pri vzgonskem prezračevanju ($q_{v,io,T}$) in prezračevanju zaradi učinka vetra ($q_{v,io,w}$) navedeni naslednji izrazi:

- za enostransko prezračevanje skozi veliko odprtino (slika 62, (1)):

$$q_{v,io,T} = \frac{1}{3} \cdot c_D \cdot A_{\text{eff},io} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h_o \cdot (\theta_i - \theta_e)}{(\theta_e + 273)} \cdot 3600} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right)$$

hidravlični koeficient pravokotne odprtine, tipično 0,65

težnostni pospešek (m/s^2)

povprečna višina odprtin v fasadi (m)

temperatura zraka v stavbi (prostoru) ($^{\circ}\text{C}$)

temperatura zraka v okolici ($^{\circ}\text{C}$)

efektivna površina odprtine (m^2)

$$q_{v,io,w} = 0,05 \cdot A_{\text{eff},io} \cdot v_z \cdot 3600 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right)$$

efektivna površina odprtine (m^2)

hitrost vetra (m/s) ob fasadi na višini z (m) and terenom

- za prečno prezračevanje skozi veliko odprtino (slika 62, (2)):

$$q_{v,i-o,T} = c_D \cdot A_{\text{eff},i-o} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h_{i-o} \cdot (\theta_i - \theta_e)}{(\theta_e + 273)}} \cdot 3600 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right)$$

razlika med srednjo višino odprtih (m)

efektivna površina odprtih (m²)

$$q_{v,i-o,w} = c_D \cdot A_{\text{eff},i-o} \cdot \sqrt{\Delta C_P} \cdot v_z \cdot 3600 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right)$$

razlika v tlačnem koeficientu med vetru izpostavljeno in zavetrovano fasado

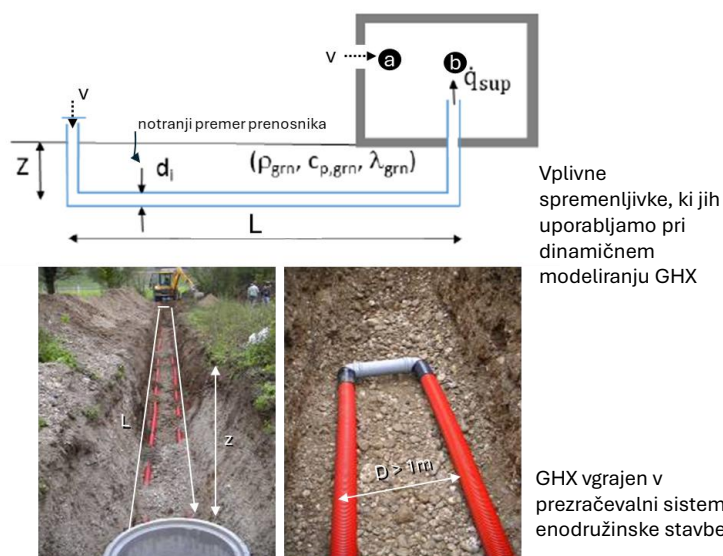
	stavba z eno fasado	stavba z več vetru izpostavljenih fasad		
ΔC_p		pritična stavba	nekaj etažna stavba	visoka stavba
na odprtem prostoru	0,05	1,125	1,359	1,5
v manjšem naselju		0,75	0,9	1,00
v uličnem kanjonu		0,375	0,45	0,5

računska količina izmenjanega zraka med okolico in stavbo je enaka:

$$q_{v,i-o} = \sqrt{q_{v,i-o,T}^2 + q_{v,i-o,w}^2} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right)$$

6.3.2. Zemeljski prenosniki toplote (GHX) za aktivno naravno ogrevanje in hlajenje

Zemeljski prenosniki toplote so naprave, ki izkoriščajo sončno energijo, shranjeno v plitvi zemljini (običajno na globini $z < 3\text{ m}$ ali pod stavbo) (slika 67). Če je nosilec toplote voda, so to cevni prenosniki z zaprtim tokokrogom, vodi v njih pa je dodano sredstvo proti zamrzovanju. Pogostejši so odprti zračni prenosniki, ki so namenjeni gretju in hlajenju zraka za prezračevanje ter so povezani s klimatom ali prezračevalno napravo. Ker se za delovanje oziroma prenos toplote/hladu iz okolja v stavbo porablja le električna energija za premagovanje dodatnega tlačnega padca (do 100 Pa), je COP teh sistemov lahko do 20 ali več.



Slika 67: Manjši zračni zemeljski prenosnik toplote za gretje/hlajenje zraka za prezračevanje in spremenljivke, ki jih uporabljamo pri dinamičnem modeliranju GHX.

Delovanje zemeljskih prenosnikov je mogoče ovrednotiti le z dinamičnim modeliranjem, kar velja tudi za dovedeno električno energijo za delovanje teh sistemov.

Zemeljske prenosnike toplote modeliramo s prenosno funkcijo tako, da v vsakem časovnem koraku modeliranja (vsako uro) izračunamo razliko v temperaturi zraka na izstopu iz GHX in vstopu v vanj:

$$\Delta\theta_{GHX,(t)} = (\theta_{grn,(t)} - \theta_{e,(t)}) \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{U_{GHX,(t)} \cdot A_{GHX}}{q_{v,i} \cdot \rho_a \cdot c_{p,a}} \right)^{0,34}} \right] \quad (K)$$

Diagram opisuje spremenljivke v enačbi:

- $\Delta\theta_{GHX,(t)}$: Sprememba temperature zraka v GHX v uri t v letu (°C)
- $\theta_{grn,(t)}$: temperatura zemljine v dnevu N in na globini z (°C)
- $\theta_{e,(t)}$: temperatura zraka v okolici, ki vstopa v GHX (°C)
- $U_{GHX,(t)}$: toplotna prehodnost zemeljskega prenosnika (W/m²K)
- A_{GHX} : prenosna površina (m²)
- $q_{v,i} \cdot \rho_a \cdot c_{p,a}$: pretok zraka v GHX (m³/h)

Toplotno prehodnost (med zemljino in zrakom) določimo z izkustvenimi izrazi. V EPBD tehničnem standard SIST EN 16798-5-1:2017 po EPBD je naveden naslednji izraz:

$$U_{GHX,(t)} = \left(4,13 + 0,23 \cdot \frac{\theta_{e,(t)}}{100} - 0,0077 \cdot \left(\frac{\theta_{e,(t)}}{100} \right)^2 \right) \cdot \frac{v^{0,75}}{d_i^{0,25}}$$

Diagram opisuje spremenljivke v enačbi:

- $U_{GHX,(t)}$: toplotna prehodnost zemeljskega prenosnika (W/m²K)
- $\theta_{e,(t)}$: temperatura zunanjega zraka
- v : hitrost zraka v zemeljskem prenosniku (m/s)
- d_i : notranji premer cevne prenosnika

Temperatura zraka, ki vstopa v stavbo ali prezračevalni sistem v njej, je enaka:

$$\theta_{sup,GHX,(t)} = \theta_{e,(t)} + \Delta\theta_{GHX,(t)}$$

Diagram opisuje spremenljivke v enačbi:

- $\theta_{sup,GHX,(t)}$: temperatura zraka na vstopu v prezračevalni sistem/stavbo (°C)
- $\theta_{e,(t)}$: temperatura zraka, ki vstopa v GHX (°C)
- $\Delta\theta_{GHX,(t)}$: sprememba temperature zraka na izstopu iz GHX (°C)

Primer dinamičnega modeliranja je prikazan na sliki 68. Meteorološke spremenljivke pri modeliranju so prevzete iz TML ARSO za Ljubljano (x = 101200, Y = 462200). Na sliki so navedeni tudi robne in toplotne lastnosti podnebja in zemljine ter konstrukcijski podatki GHX. Rezultate modeliranja prikazujemo s temperaturo zraka ($\theta_{e,(t)}$), ki iz okolice neposredno priteka v stavbo ali prezračevalni sistem (slika 68, (a)) ali posredno preko zemeljskega prenosnika ($\theta_{sup,GHX,(t)}$) (b). Prikazano je tudi, za koliko °C se pri navedenih robnih pogojih segreje zrak v GHX ($\Delta\theta_{sup,GHX,(t)}$). Učinek GHX je prikazan tudi s trajanjem razredov temperatur s katerimi zrak vsopa v stavbo neposredno ali preko GHX v rekuperator prezračevalnega sistema. Tako se zmanjša obdobje ($\theta_{sup} < 5$ °C, (c)), ko bi se v rekuperatorju lahko pojavila kondenzacija vodne pare - za skoraj 1000 ur na leto. Zrak za prezračevanje, ki vstopa v

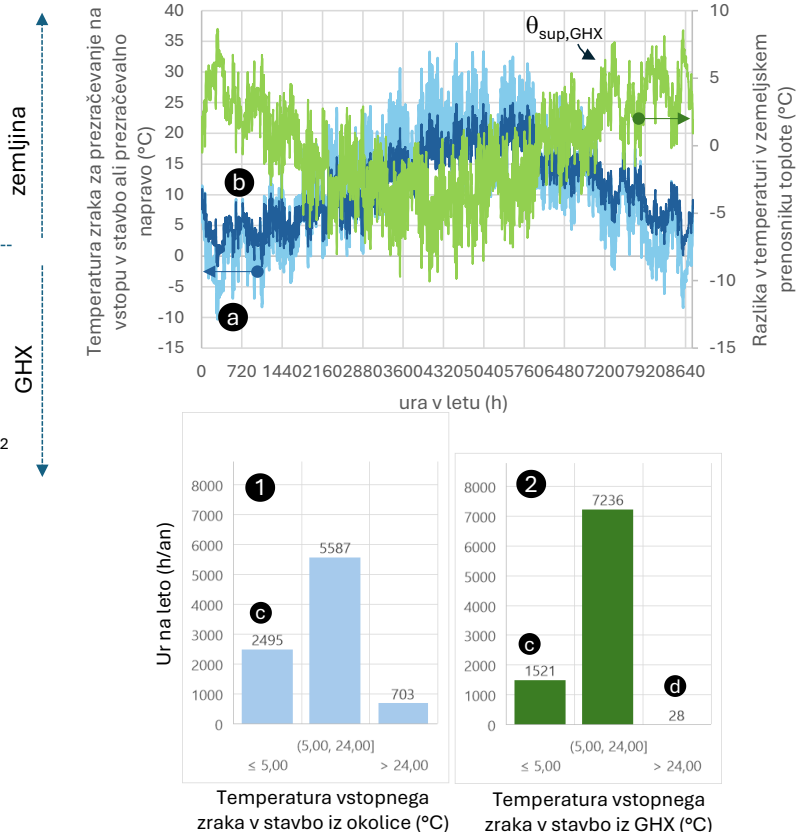
stavbo preko GHX tudi zmanjšuje pregrevanje stavbe, saj v stavbo skoraj ne vstopa zrak s temperaturo višjo od 24 °C (d).

Pojasnilo: smernice za modeliranje GHX za gretje ali hlajenje zraka in toplotne lastnosti zemljin navaja EPB tehnični standard SIST EN 16798-5-1:2017 po EPBD v dodatku C.

θ_e iz TRL ARSO Lj
 perioda ω 8760 h
 Δn 840 h
 $\theta_{e,avg,an}$ 11,2 °C
 $A_{e,an}$ 12 °C
 $a = 1,37 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
 $a^* = a \cdot 60 \cdot 60 \text{ (m}^2/\text{h)}$

$q_{sup,i} = 340 \text{ m}^3/\text{h}$
 $v = 3 \text{ m/s}$
 $L = 60 \text{ m}$
 $d_i = 0,20 \text{ m}$, $d_e = 0,22 \text{ m}$
 $z = 3 \text{ m}$

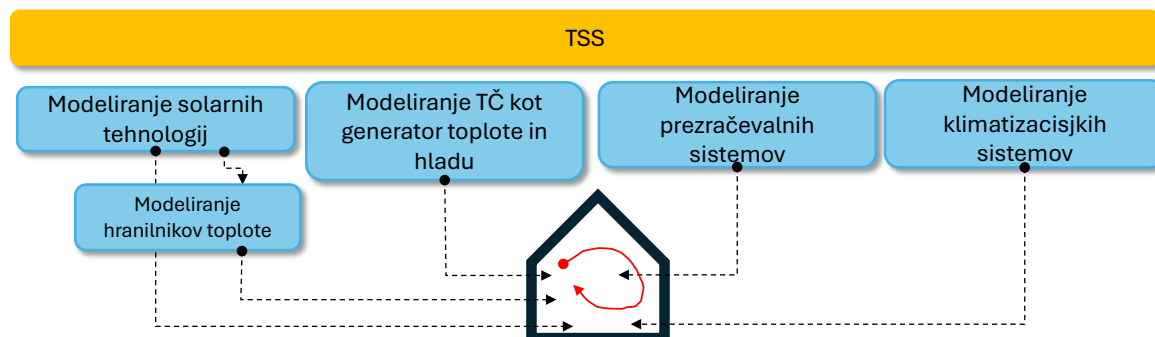
$A_{GHX} = L \cdot O = L \cdot \pi \cdot d_e = 41,6 \text{ m}^2$



Slika 68: Spremenljivke, uporabljene pri dinamičnem modeliranju letnega delovanja GHX, ki j eprikazan na sliki 67 (levo), temperaturi zraka v okolici (a) in na izstopu iz GHX (b), ter število ur v izbranem temperaturnem območju ko vstopa zrak v stavbo neposredno (1) ali pri prezračevanju z GHX (2).

7. DINAMIČNO MODELIRANJE TEHNIČNIH STAVBNIH SISTEMOV

V tem poglavju opisujemo modeliranje tehničnih stavbnih sistemov (TSS), za katere je pri dokazovanju energijske učinkovitosti treba izvesti dinamično modeliranje. Tematska poglavja prikazuje slika 69.



Slika 69: Tematska poglavja v tematskem sklopu TSS.

7.1. MODELIRANJE TEHNOLOGIJ ZA IZKORIŠČANJE SONČNE ENERGIJE NA STAVBI

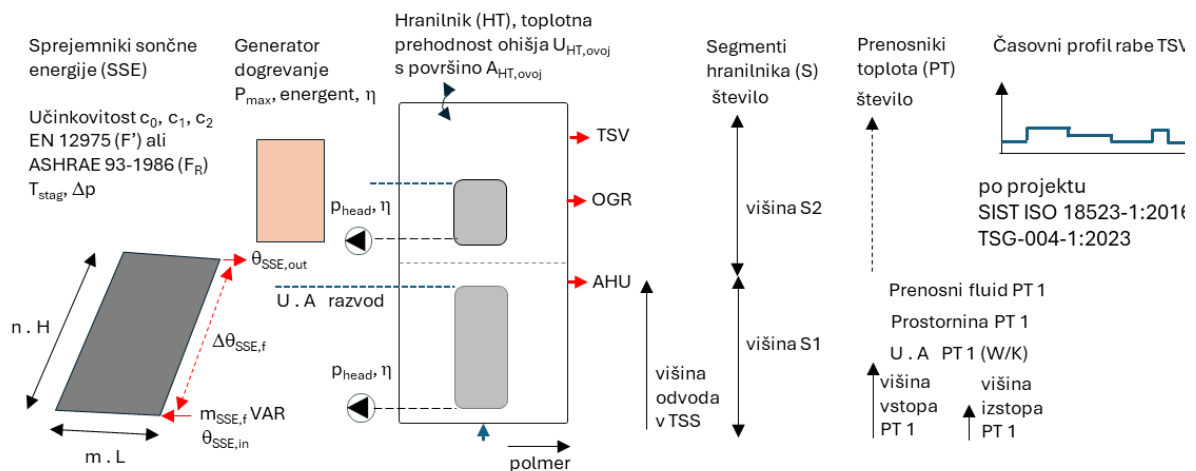
Med tehnologijami za energijsko samooskrbo stavb s toploto in električno energijo imajo solarne tehnologije z vidika stroškov produktov in okoljskih pritiskov prednosti. Izkoriščajo obnovljivi energijski vir in med delovanjem pa ne povzročajo izpustov onesažil. Poleg tega pri preverjanju zahtev kriterijev sNES kriterijev, ki jih moramo izvesti z dinamičnim modeliranjem (za nestanovanjske, energetske zahtevne stavbe z $A_{use} \geq 500 \text{ m}^2$), imajo referenčne stavbe vgrajen solarni toplotni sistem za pripravo TSV ali PV elektrarno.

7.1.1. Dinamično modeliranje solarnih toplotnih sistemov (TSOL)

Solarni toplotni sistemi na stavbi so lahko povezani z ogrevalnim sistemom ali/in sistemom za pripravo tople sanitarne vode (TSV). Zadnji so zaradi praviloma enakomerne porabe tople vode čez vse leto bolj razširjeni. Zato so, kakor predpisujeta PURES-3 in TSG-1-004, predvideni kot predizbrani sistemi v referenčnih stavbah, v katerih je poraba TSV razmeroma velika, na primer v stanovanjskih stavbah, športnih objektih in zdravstvenih ustanovah (glej TSG-1-004, točka 4.3.2.). Z dinamičnim modeliranjem TSOL lahko v modeliranje vključimo nekatere lastnosti, ki realneje opišejo delovanje in jih ni mogoče upoštevati pri statičnem modeliranju. Navedimo tri značilnosti:

- modeliranje delovanja sprejemnikov sončne energije (SSE) z variabilnim pretokom nosilca toplote,
- shranjevanje toplote v hranilnikih s toplotnim razslojevanjem in
- spreminjanje rabe TSV v dnevno, tedno ali mesecu v posameznem časovnem koraku modeliranja.

Presojevalec, kot rezultat dinamičnega modeliranja, zato razpolaga z bistveno razširjenim nizom spremenljivk stanja tehničnega sistema, vendar mora zagotoviti tudi širši niz robnih spremenljivk, ki jih povzema slika 70.



Slika 70: Izbrani parametri komponent TSOL pri dinamičnem modeliranju.

Povprečni toplotni tok $Q'_{SSE,f}$ in količina toplote $Q_{SSE,f}$, ki jo odvede nosilec toplote iz SSE v časovnem koraku modeliranja Δt , sta enaka:

$$Q'_{SSE,f} = \eta_{SSE} \cdot A_{SSE} \cdot G_{glob,SSE} \quad (W) \quad Q_{SSE,f} = Q'_{SSE,f} \cdot \Delta t = \dot{m}_{SSE,f} \cdot c_{p,f} \cdot \left(\theta_{f,izstop} - \theta_{f,vstop} \right) \quad (J) \quad (I)$$

svetla površina SSE (m²)
 η_{SSE} izkoristek SSE (-)
 $G_{glob,SSE}$ sončno sevanje na SSE (W/m²)
 $\dot{m}_{SSE,f}$ pretok nosilca toplote (kg/s)
 Δt računski korak (s)
 $c_{p,f}$ specifična toplota nosilca toplote (J/kgK)

pri čemer je A_{SSE} celotna neto (svetla) površina sprejemnikov sončne energije, $G_{glob,SSE}$ povprečno sončno sevanje na površino SSE v računskem koraku modeliranja Δt in η_{SSE} izkoristek pretvorbe sončnega obsevanja v toploto, ki jo prevzame nosilec toplote z masnim pretokom $\dot{m}_{SSE,f}$.

Količina prenesene toplote z nosilcem toplote $Q_{SSE,f}$ se določi s kalorimetrično metodo na podlagi masnega pretoka nosilca toplote $\dot{m}_{SSE,f}$, specifične toplote nosilca toplote $c_{p,f}$ in razlike temperature nosilca toplote $\Delta\theta_{SSE,f}$. Pri dinamičnem modeliranju delovanja TSOL je pravilo, da se izbere $\Delta\theta_{SSE,f}$ (na primer od 5 K do 15 K), računsko orodje pa temu iterativno v vsakem časovnem koraku prilagodi računski masni pretok nosilca toplote $\dot{m}_{SSE,f}$, kakor za izbrani primer prikazuje slika 71. Učinkovitost SSE je lastnost vgrajenih naprav in se določi eksperimentalno. Najpogosteje se uporabljata metodi standarda EN in ASHRAE. V obeh primerih je učinkovitost SSE opredeljena kot:

$$\eta_{SSE} = c_0 - (c_1 \cdot T^*) - (c_2 \cdot G_{glob,SSE,ref} \cdot T^{2*}) \quad (-)$$

$$T_{EN}^* = \frac{\left(\frac{\theta_{f,vstop} + \theta_{f,izstop}}{2} - \theta_{okolice} \right)}{G_{glob,SSE}} \quad T_{ASHRAE}^* = \frac{(\theta_{f,vstop} - \theta_{okolice})}{G_{glob,SSE}} \quad \left(\frac{Km^2}{W} \right)$$

$$M_{HT} \cdot c_{p,\theta} \cdot (\theta_{HT}^t - \theta_{HT}^{t-\Delta t}) = Q_{SSE,\Delta t} - Q_{sup} - \frac{U_{HT} \cdot A_{HT} \cdot (\theta_{HT} - \theta_{okolica}) \cdot \Delta t}{Q_{izgub,\Delta t}}$$

81

Delta

t

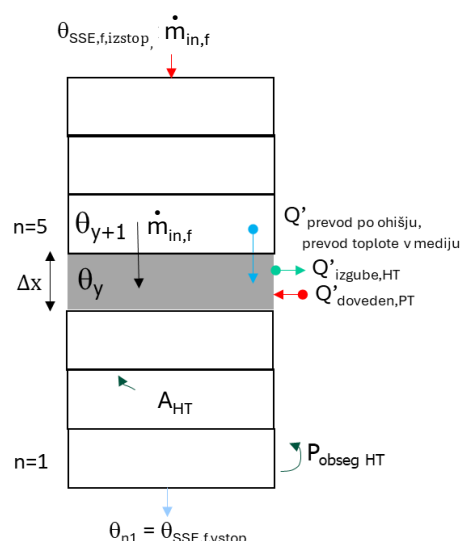
pretok nosilca toplote na vstopu v hranilnik; je enak pretoku snovi (vode) v hranilniku med segmenti y (kg/s); v kolikor se v tokokrogu sprejemnikov sončne energije uporablja nosilec toplote s proti zmrzovalno kapljevino, se predpostavi, da je vgrajen zunanji prenosnik toplote in se toplota prenaša v hranilnik z vodo

$$\frac{\Delta\theta_{y,t}}{\Delta t} = \frac{\dot{m}_{in,f} \cdot (\theta_{y+1,t} - \theta_{y,t-1})}{\rho_{f,HT} \cdot A_{HT} \cdot \Delta x} + \left(\frac{\lambda_{f,HT}}{\rho_{f,HT} \cdot c_{p,f,HT}} + \frac{K}{\text{prevod toplote v ohišju}} \right) \cdot \frac{\Delta^2 \cdot T}{\Delta x^2} - \frac{U_{HT} \cdot P_{HT}}{\rho_{f,HT} \cdot A_{HT} \cdot c_{p,f,HT}} (\theta_{y,t-1} - \theta_{ok}) + \frac{Q_{dov,PT}}{\rho_{f,HT} \cdot c_{p,f,HT}}$$

toplotne izgube segmenta y

moč dodatnega (aux) grelnika, če je vgrajen v segment y in v tem časovnem koraku deluje (W)

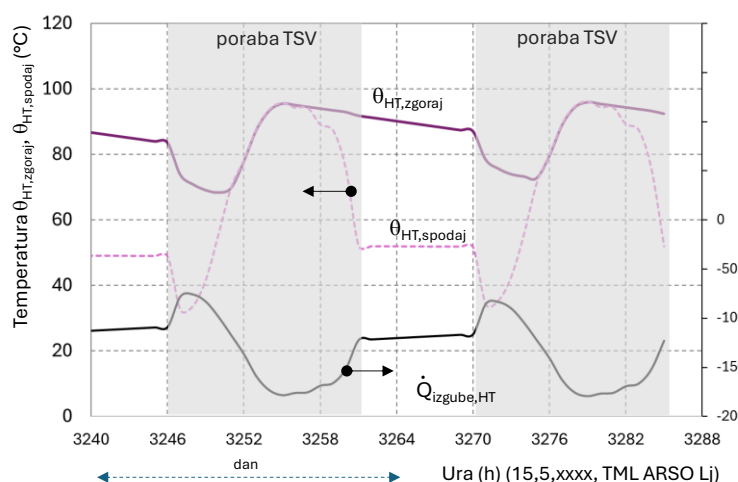
Slika 72: Toplotni tokovi, vključeni v energijski model računskega temperaturnega sloja v HT; temperatura $\theta_{y,t}$ v posameznem sloju je homogena, predznak v členu z $\dot{m}_{in,f}$ pa opredeljuje, ali gre za toplotno polnjenje ali praznjenje hranilnika z nosilcem toplote, ki se segreva v sprejemnikih sončne energije ali dodanem prenosniku toplote v katerem se toplota prenaša med sprejemniki sončne energije in hranilnikom toplote.



Vir: Hsien J. S.; Solar Energy Engineering; Prentice-Hall, Inc.; New Jeres, 1986

Primer dinamičnega modeliranja hranilnika z dvema segmentoma (ob delovanju SSE na sliki 71), je prikazan na sliki 73.

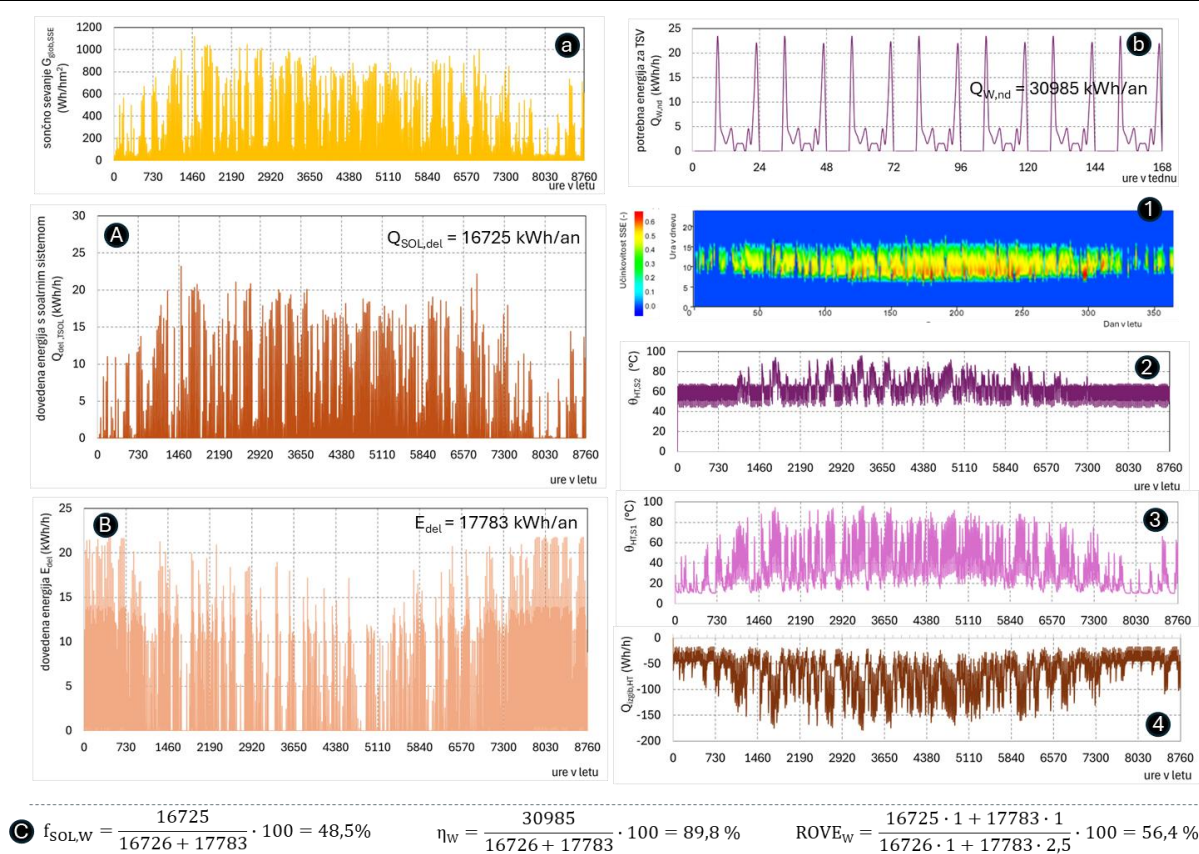
Slika 73: Primer dinamičnega modeliranja HT z dvema segmentoma temperaturnega razslojevanja; spodnji segment ima vgrajen prenosnik TSOL, zgornji pa električni grelnik za dogrevanje TSV.



7.1.1.1. Primer dinamičnega modeliranja TSOL

Na sliki 74 so prikazane vhodne in izračunane spremenljivke, določene z dinamičnim modeliranjem TSOL. Uporabljeni so bili ti vhodni in robni podatki:

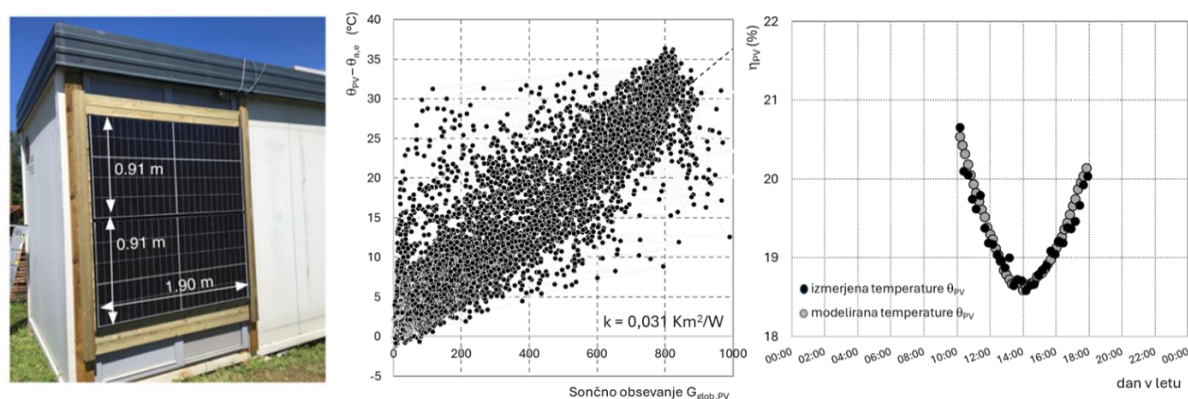
- tipično meteorološko leto (TML) Ljubljana, 40 oseb, 40 l TSV/dan, 55 °C/10 °C, TSOL + backup generator - električni grelnik (shema na sliki 70);
- nosilec toplote zmes vode in etilen glikola (zmrzišče pri -25°C), naklon 45°, J, višina SSE $H_{SSE} = 2\text{ m}$, 20 SSE v vrsti ($L_{SSE} = 20\text{ m}$), $A_{SSE} = 40\text{ m}^2$; $c_0 = 0,75$ (-), $c_1 = 4,0\text{ W/(m}^2\text{ K)}$, $c_2 = 0,005\text{ W/(m}^2\text{ K}^2)$, referenčni pretok nosilca toplote $0,02\text{ kg/(s m}^2)$, variabilni pretok prilagojen $\Delta\theta_{SSE,f} = 5\text{ K}$;
- hranilnik 1600 lit ($R_{HT} = 0,5\text{ m}$, $s_1 = s_2 = 1\text{ m}$), $U \cdot A_{HT} = 0,3\text{ W/(m}^2\text{ K)}$, $PT_{sol}: U \cdot A_{PT,S1} = 2500\text{ W/K}$, $PT_{S1}: h_{vstop} = 0,9\text{ m}$, $h_{izstop} = 0,05\text{ m}$; $PT_{S2}: h_{vstop} = 1,9$, $h_{izstop} = 1,05\text{ m}$;
- razvod: $U_{sol} = 9\text{ W/K}$, backup = 0 W/K , črpalka: $P_{sol} = 300\text{ Pa}$, $\eta_c = 0,8$, backup = 0 W .



Slika 74: Vhodni podatki in modelirane spremenljivke za vsako uro v letu; (a) sončno sevanje na površino SSE, (b) profil rabe TSV, raba TSV 1600 litrov/dan, (1) izkoristek SSE, (2) temperatura zgornjega segmenta HT z dodatnim grelnikom, (3) temperature spodnjega segmenta HT s solarnim grelnikom, (4) toplotne izgube HT; (A) toplota za TSV iz TSOL, (B) toplota za TSV, dovedena z dodatnim (električnim) grelnikom, (c) kazalniki sNES – delež TSV, pripravljene s TSOL, izkoristek sistema TSV, delež obnovljivih virov (za sistem TSV).

7.1.2. Modeliranje proizvodnje električne energije s fotonapetostnimi sistemi (PV)

Uvajanje fotonapetostnih sistemov za razogljičenje energijske oskrbe poteka v več smereh. Poleg samostojnih, stavbi prigradenih sistemov PV (angl. Building Attached PV - BAPV, slika 75, levo), je samooskrba stavb z električno energijo mogoča tudi z integriranimi sistemi. Sistemi PV so lahko vgrajeni (angl. Building Integrated PV - BIPV) ali pa kot posebna tehnologija integrirani v fasadni ovoj (angl. Facade Integrated PV - FIPV). Za BIPV in FIPV sta značilna nekatere specifične lastnosti, kot na primer pred-izbrana namestitvev in manj intenzivno hlajenje zaradi zahtevano nizkih toplotnih prehodnosti gradnikov stavb. Zadnje vpliva na učinkovitost pretvorbe sončne energije, kar lahko upoštevamo pri dinamičnem modeliranju.



Slika 75: “Balkonska elektrarna” kot FIPV (levo); razlika med temperaturo PV modulov in temperature okoliškega zraka glede na sončno obsevanje (sredina); dinamično modelirani (z izmerjeno in modelirano temperaturo) in izmerjeni izkoristek PV modulov (desno); opomba: “balkonska PV elektrarna je sistem za samooskrbo omejene moči, ki ga s samostojnim razsmernikom povežemo v lokalni električni tokokrog. (Vir: Domjan S., Rovan J., Medved S. Assessment of building renovation with modular ventilated FIPVT in terms of energy efficiency and indoor environment in office buildings. *Applied Thermal Engineering*, 279 (2025) 127497).

Dinamično modeliranje proizvodnje električne energije sistema PV obsega dva koraka: i) modeliranje temperature PV modulov in ii) modeliranje učinkovitosti proizvodnje električne energije. Prvi korak izvedemo na podlagi nazivne delovne temperature fotonapetostne celice (angl. Nominal Operating Cell Temperature - NOCT). To je tehnični podatek proizvajalca PV modula, ki navaja temperaturo celic pri gostoti sončnega sevanja na površini PV modula $G_{glob,\beta} = 800 \text{ W/m}^2$, pri temperature zraka $\theta_{a,e} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, hitrosti vetra 1 m/s in pri prosto stoječem PV modulu. Za najboljše PV module je značilna NOCT = 33 $^{\circ}\text{C}$, za slabše 58 $^{\circ}\text{C}$, tipično pa 48 $^{\circ}\text{C}$. Pri dinamičnem modeliranju se v vsakem časovnem koraku izračuna temperatura PV modulov z izrazom:

$$\theta_{PV} = \theta_{e,a} + \frac{\text{NOCT} - 20}{800} \cdot G_{glob,\beta} \text{ (}^{\circ}\text{C)}$$

Za BIPV in FIPV, v katerih so PV moduli integrirani v gradnike ovoja stavbe, velja, da so temperature PV modulov višje zaradi toplotne izolacije in akumulacije toplote v gradnikih ovoja (slika 75, sredina). V tem primeru je ena od možnosti linearna aproksimacija temperature PV modulov z izrazom:

$$\theta_{PV} = \theta_{e,a} + k \cdot G_{glob,\beta} \quad (^{\circ}C)$$

pri čemer je koeficient k (Rossov koeficient) z vrednostjo $0,021 \text{ K m}^2/\text{W}$ za prosto stoječe PV module, $0,026 \text{ K m}^2/\text{W}$ za module, postavljene na ravno streho stavbe, in $0,035 \text{ K m}^2/\text{W}$ za FIPV na sliki 75. V naslednjem koraku določimo učinkovitost modula/sistema PV na podlagi elektrotehničnih lastnosti modula PV, tako, da se najprej v vsakem časovnem koraku dinamičnega modeliranja določita generirani električni tok in napetost v točki največje moči $I_{PV,MPP}$ in $V_{PV,MPP}$ ter nato izkoristek PV modula η_{PV} v časovnem koraku dinamičnega modeliranja, če se razsmernik prilagaja točki naj večje moči (kar je običajno):

$$I_{PV,MPP} = G_{glob,\beta} \cdot 10^{-3} \cdot [I_{MPP}^0 + \alpha \cdot I_{kt} \cdot (\theta_{PV} - 25)] \quad (A)$$

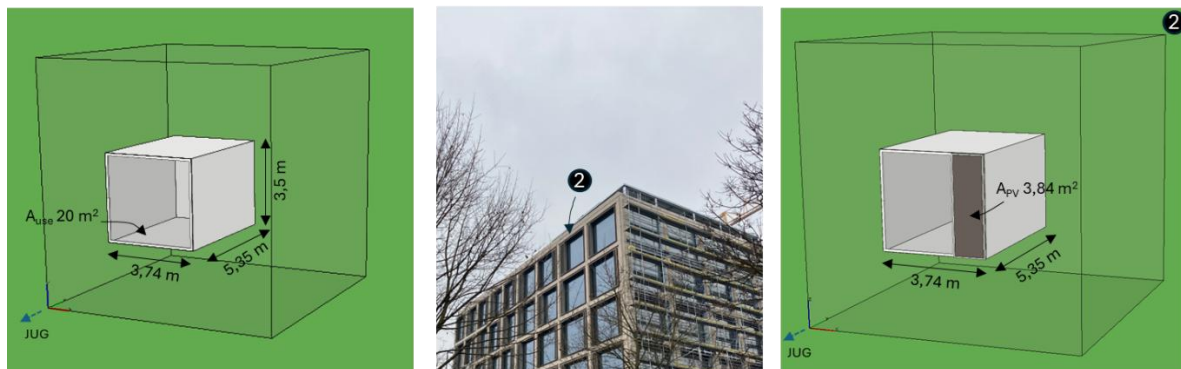
$$V_{PV,MPP} = V_{MPP}^0 + \alpha \cdot V_{os} \cdot (\theta_{PV} - 25) \quad (V)$$

$$\eta_{PV} = \frac{I_{PV,MPP} \cdot V_{PV,MPP}}{A_{PV} \cdot G_{glob,\beta}}$$

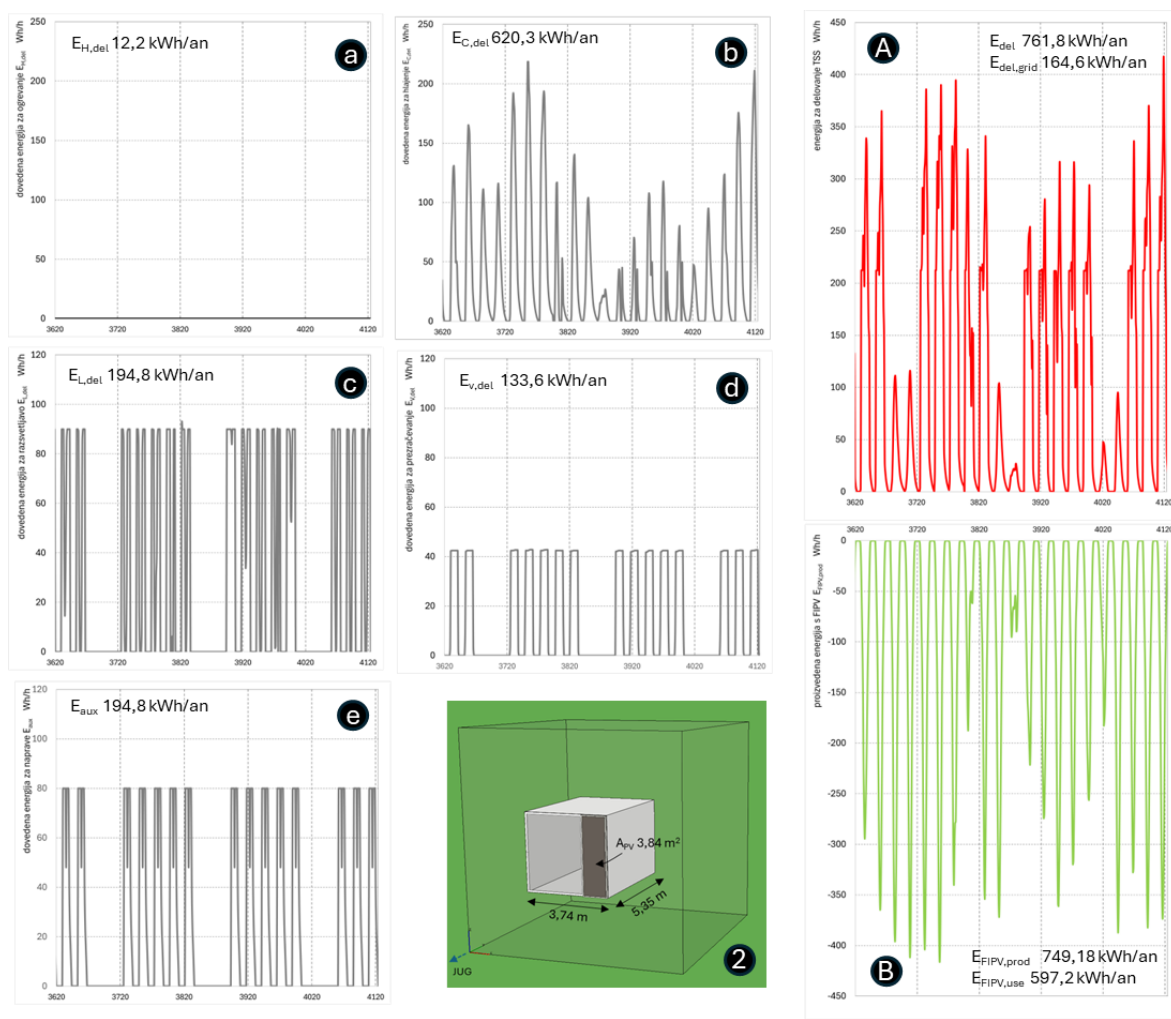
Vse spremenljivke so lastnosti PV modula in jih navede proizvajalec. Člena $\alpha \cdot I_{kt}$ in $\alpha \cdot V_{os}$ navajata kako se za določeno tehnologijo PV celic s temperature celice/modula spreminjata kratkostični tok I_{kt} in napetost odprtih sponk V_{os} . Tipične vrednosti so $\alpha \cdot I_{kt} = 0,048 \text{ (A/K)}$ (mSi) in $0,062$ za CdTe celice, ter $\alpha \cdot V_{os} = 0,29 \text{ (V/K)}$ in $-0,32 \text{ (V/K)}$ (mSi, CIS).

7.1.2.1. Primer dinamičnega modeliranja FIPV

Rabe energije za ogrevanje, hlajenje, prezračevanje, razsvetljavo in delovanje pisarniških naprav pisarniškega prostora z zastekljeno fasado brez FIPV in z njim prikazuje slika 76. Kot sistem PV je bila izbrana "balkonska elektrarna", PV sistem omejene moči ($P_p = 600W$) s certificiranim razsmernikom, kar omogoča priklop FIPV v lokalno električno omrežje brez soglasij. Pri takih PV elektrarnah se presežek proizvedene električne energije ne prenaša v omrežje in je namenjena zgolj samooskrbi. Raba energije (električna energija je edini energent) je za izbrano obdobje in leto prikazana na sliki 77.



Slika 76: Primer steklene poslovne ("all glass") stavbe s FIPV in 3D model tipičnega pisarniškega prostora v orodju BEM, ki je obravnavan v prikazanem primeru. Časovniki zasedenosti in notranji viri so povzeti po SIST ISO 18523-1:2016 [Energy performance of buildings – Schedule and conditions of building, zone and spaces usage for energy calculation; Part 1: Non-residential buildings; ISO 2016], kakor predvideva PURES-3.



$$ROVE_w = \frac{164,6 \cdot 1 + 597,2 \cdot 1}{164,6 \cdot 2,5 + 597,2 \cdot 1} \cdot 100 = 75,5 \%$$

Slika 77: Dovedena energija za delovanje TSS (ogrevanje (a), hlajenje (b), razsvetljavo (c), mehansko prezračevanje (d) in naprav (e)) v tednu v obdobju med 1.6.xx in 21.6.xx ter letne dovedene energije za delovanje TSS; skupna potrebna dovedena energija za delovanje TSS in naprav (A) ter proizvedena in na stavbi porabljena električna energija s FIPV (B) za vsak časovni korak dinamičnega modeliranja (uro) pisarniškega prostora (2); TRL Ljubljana; opomba: dovedena električna energija za ogrevanje in hlajenje je določena s COP oziroma EER.

7.2. DINAMIČNO MODELIRANJE GENERATORJEV TOPLOTNIH ČRPALK ZA OGREVANJE IN HLAJENJE

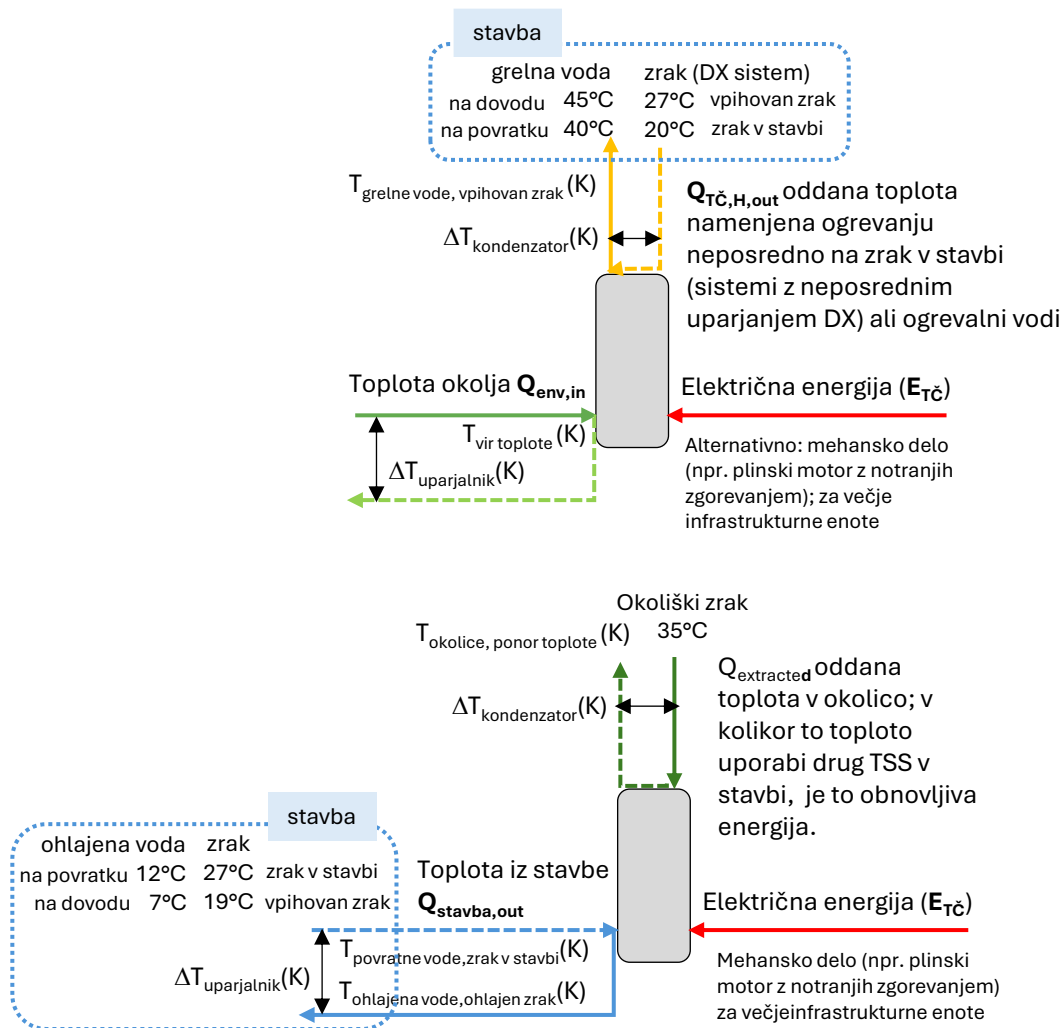
Ob prepovedi rabe trdnih in tekočih fosilnih goriv za proizvodnjo toplote v stavbah, ob upoštevanju ciljev v povezavi s preходом na nič emisijske stavbe, kar izključuje tudi rabo plinastih fosilnih goriv, ter ob razmeroma velikih izpustih onesnažil zraka pri kurjenju biomase, je učinkovita raba električne energije čedalje pomembnejši način oskrbe stavb s toploto. PURES-3 dovoljuje uporabo električne

energije za proizvodnjo toplote z uporavnimi grelniki samo, če specifična potrebna toplota za ogrevanje $Q'_{H,nd}$ ni večja od polovice dovoljene vrednosti (na nove stavbe je $Q'_{H,nd,an,dov}$ 25 kWh/m²an) in če je raba TSV zelo majhna, na primer v poslovnih stavbah. V vseh drugih primerih pa so toplotne črpalke (TČ) z vidika varovanja okolja in stroškov energenta v življenjskem obdobju stavbe, najprimernejša tehnologija. Še posebej, če isti generator uporabimo tudi za hlajenje stavbe in če električno energijo proizvajamo na stavbi ali ob njej, na primer s PV sistemom.

7.2.1. Kazalniki učinkovitosti in dinamično modeliranje toplotnih črpalk

Toplotne črpalke (TČ) lahko delujejo kot generator toplote ali hladilni agregat. Energijski tokovi v obeh režimih so prikazani na sliki 78. Pri ogrevanju je učinkovitost TČ, ki jo navajamo s COP (koeficient učinkovitosti; angl. Coefficient of Performance), opredeljena s količino toplote, ki jo odda v ogrevalni sistem oziroma neposredno na zrak v stavbi (pri sistemih DX), in potrebno količino dovedene električne energije kot $COP_{TČ,H}$, pri hlajenju ($COP_{TČ,C}$) pa z odvedeno toploto iz nosilca toplote v hladilnem sistemu oziroma neposredno iz zraka v stavbi (pri sistemih DX) in rabo električne energije za delovanje TČ:

$$COP_{TČ,H} = \frac{Q_{TČ,H,out}}{E_{TČ}} = \frac{Q_{stavba,in}}{E_{TČ}} = \frac{Q_{env,in} + E_{TČ}}{E_{TČ}} \quad COP_{TČ,C} = \frac{Q_{TČ,C,out}}{E_{TČ}} = \frac{Q_{stavba,out}}{E_{TČ}}$$



Slika 78: Energijski tokovi in spremenljivke lastnosti TČ; TČ kot generator toplote (zgoraj), TČ kot hladilni stroj (spodaj); navedene temperature so značilne za referenčne pogoje oziroma delovanje TČ pri imenski moči.

Kot toplotni/hladilni stroj je teoretično največje grelno ali hladilno število opredeljeno s Carnottovim krožnim procesom (oziroma Carnott COP). Ta je odvisen le od absolutnih temperatur vira toplote (pri ogrevanju), temperature ponora toplote (pri hlajenju) in temperature nosilca toplote/hladu (pri ogrevanju in hlajenju). Ker proces, ki ga opravlja hladivo ne poteka povračljivo in je prenos toplote v uparjalniku in kondenzatorju neidealni (nepovračljiv zaradi uporov prehodu toplote), imajo tehnične naprave nižji COP. Razliko opredelimo s eksergijsko učinkovitostjo $\gamma_{\text{TČ}}$. V realnih sistemih je COP nižji od Carnottovega tudi na zaradi ciklov odmrzovanja (pri TČ AW), učinkovitosti kompresorja in ekspanzijskega procesa. Izkušveno je eksergijska učinkovitost TČ med 0,3 ($P_{\text{H,C}} < 10 \text{ kW}$) do 0,6 ($P_{\text{H,C}} > 1 \text{ MW}$), tipične vrednosti, ki jih predpostavimo pri dinamičnem modeliranju pa so med 0,45 in 0,55 (vir: HeatpumpMonitor.org, Harvey L. D. D., A handbook on Low-Energy Buildings and District-Energy Systems, Earthscan, 2006). COP se za tehnične naprave navaja pri referenčnih temperaturnih pogojih in polni moči, pri variabilnem delovanju oziroma delni obremenitvi pa je COP nižji. Za korekcijo se

uporabi faktor moči η_p , ki je ~ 1 v območju delovanja TČ z 50% do 100% nazivne moči a se zniža za 1/3 pri delovanju z 30% imensko močjo.

Pri dinamičnem modeliranju ogrevanja in hlajenja stavbe s TČ se $COP_{PT\check{C},H}$ in $COP_{T\check{C},C}$ izračunata v vsakem časovnem koraku dinamičnega modeliranja z izrazoma:

$$COP_{T\check{C},H,(t)} = \overset{\text{realno}<1}{\widehat{\gamma}_{T\check{C}}} \cdot \overset{50\%-100\%=1}{\widehat{\eta}_p} \cdot \left(\overset{\text{Carnot COP}}{\frac{T_{\text{grelne vode,vpihovan zrak(DX)}}{T_{\text{grelne vode,vpihovan zrak(DX)} - T_{\text{vir okolje}}}} \right)$$

$$COP_{T\check{C},C,(t)} = \overset{\text{realno}<1}{\widehat{\gamma}_{T\check{C}}} \cdot \overset{50\%-100\%=1}{\widehat{\eta}_p} \cdot \left(\overset{\text{Carnot COP}}{\frac{T_{\text{ohlajene vode, vpihovan zrak (DX)}}{T_{\text{hladilne vode (okolica),zrak v stavbi (DX)} - T_{\text{ohlajene vode,vpihovan zrak (DX)}}}} \right)$$

Temperatura vira okoljske toplote se privzame iz meteorološke zbirke (TČ AW), izračuna z ločenim modelom (TČ SW) ali privzame kot konstantna vrednost (TČ WW), temperatura grelne vode se določi v vsakem urnem koraku na osnovi vrste ogrevalnega sistema in končnih prenosnikov (ogrevala, podno ogrevanje, ...) in trenutnih toplotnih izgub stavbe. Praviloma pa se privzame temperatura hladilne vode in temperaturne pogoje pri DX hlajenju kot konstante (glej sliko 78).

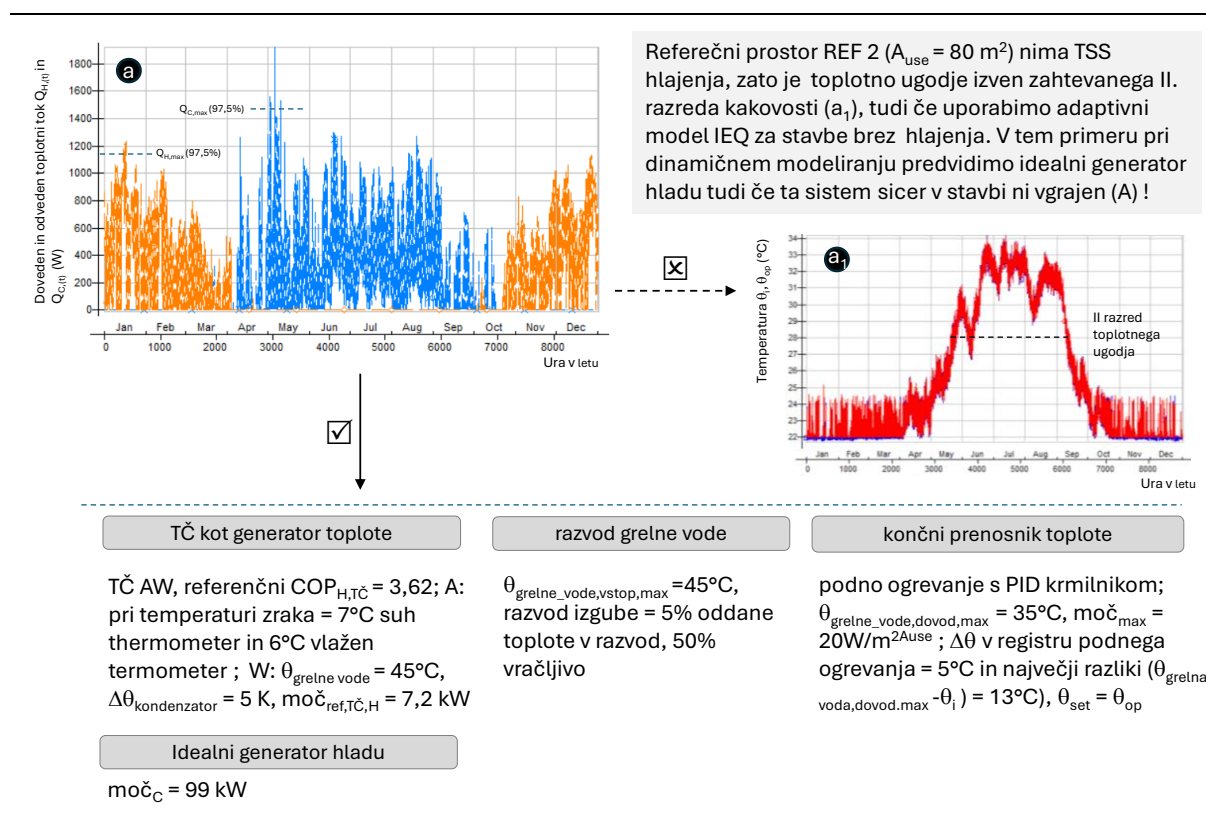
Opisan pristop s Carnottovim COP uporabljamo pri dinamičnem modeliranju delovanja TČ (in hladilnih strojev), ko toplotno-tehnične lastnosti naprave ne poznamo, oziroma ko primerjalno ugotavljamo kako na kazalnike energijske učinkovitosti stavbe vpliva posamezni vplivni parameter. Ker se TČ v sodobnih stavbah pogosto uporabljajo za ogrevanje in hlajenje imajo orodja BEM že izdelane uporabniške vmesnike in vgrajene zbirke podatkov, ki so potrebni za dinamično modeliranje TSS s TČ.

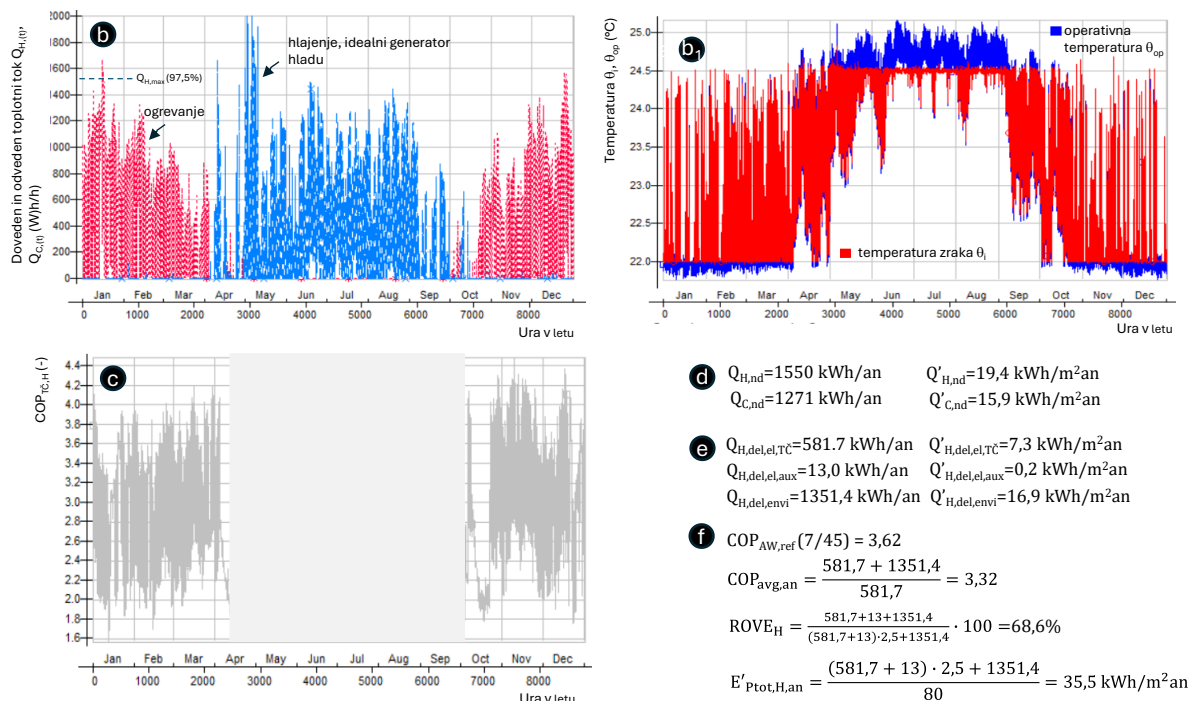
Opomba: Pri delovanju TČ kot hladilnem agregatu se učinkovitost lahko opredeli z EER (angl. Energy Efficiency Ratio). Ta je določen z enakim razmerjem, kakor ga uporabljamo pri določitvi COP, le da kot enoto odvedene toplote iz stavbe uporablja BTU (angl. British Thermal Unit). Povezava je naslednja $COP_{T\check{C},C} = EER/3,142$.

7.2.2. Primer 1. Modeliranje ogrevanja s TČ v primerjavi z idealnim generatorjem toplote

Za dinamično modeliranje TČ kot generatorja toplote drugače kot pri idealnem generatorju potrebujemo poleg realnih lastnosti generatorja tudi lastnosti sistema za razvod nosilca toplote in pogonskih elementov, ter toplotno tehnične podatke o končnih prenosnikih toplote, vključno z opisom načina regulacije (na primer ON/OFF, če je vgrajen termostatski ventil z električnim pogonom ali PI krmilnik v pametnih termostatskih ventilih). Primer dinamičnega modeliranja potrebnega dovedenega in odvedenega toplotnega toka za ogrevanje $Q_{H,nd,(t)}$ in hlajenje $Q_{C,nd,(t)}$ referenčnega prostora REF 2 z

idealnima generatorjema (a) ter doveden toplotni tok s katerim REF 2 ogrevamo s TČ in podnim ogrevanjem (b) je prikazan na sliki 79. Kljub temu, da v REF 2 ni vgrajen sistem za hlajenje, predpostavimo, da je REF 2 hlajen z navideznim idealnim generatorjem hladu ter tako zagotovimo primerno toplotno ugodje ($a_1:b_1$). To vpliva tudi na $COP_{TČ,H}$ (c) in rabo energije za ogrevanje v vsakem časovnem koraku ko REF 2 ogrevamo (e). Navidezno hlajenje z idealnim generatorjem vpliva na kazalnika potrebne dovedene toplote za ogrevanje $Q_{H,nd}$ in odvedene toplote za hlajenje $Q_{C,nd}$ (d), ne pa tudi na kazalnike dovedene energije, delež OVE in potrebno primarno energijo (e). Ker gre za študijski primer, drugi TSS (TSV, razsvetljava, prezračevanje) niso vključeni v modeliranje.

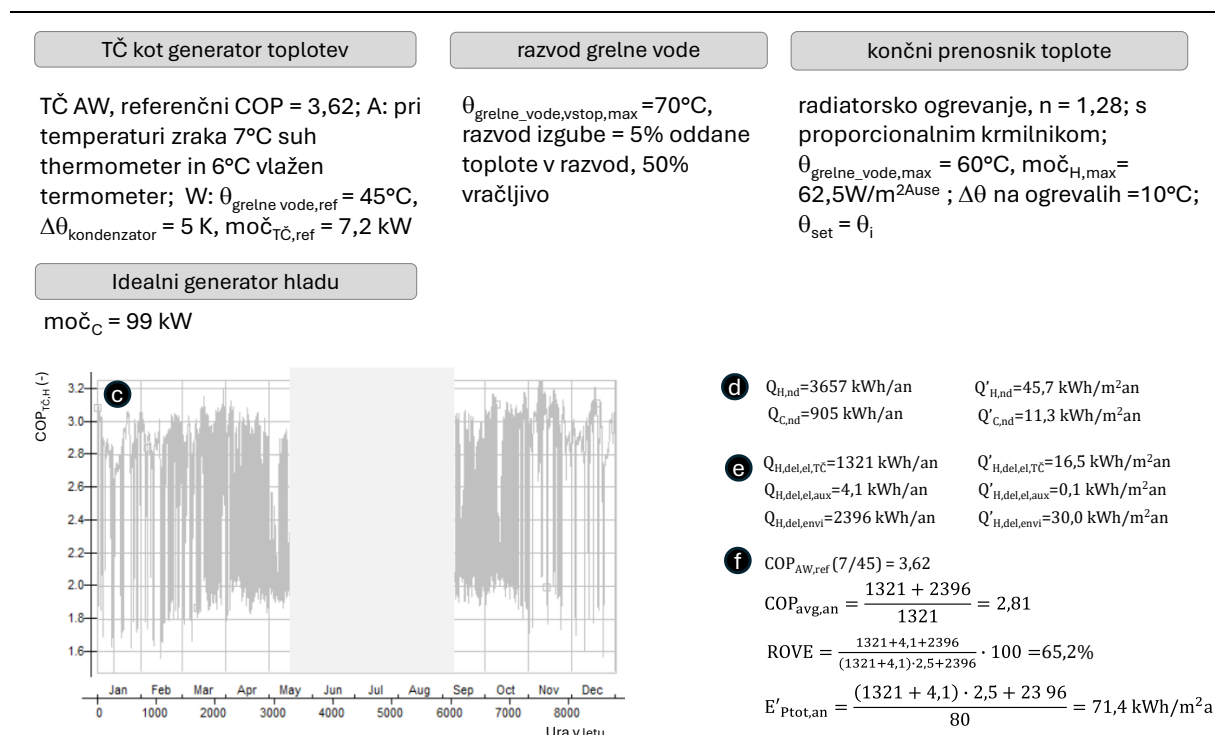




Slika 79: Rezultati dinamičnega modeliranja količine dovedene energije za ogrevanje referenčnega prostora REF 2 (slika 11); potrebna toplota za ogrevanje $Q_{H,nd}$ in odvedena toplota za hlajenje $Q_{C,nd}$ se izračunata kot samostojna kazalnika s predpostavljenima idealnima generatorjema toplote in hladu (a); pri dinamičnem modeliranju se dovedena energije za delovanje TSS ogrevanja določi z dejanskimi lastnostmi in načinom delovanja vgrajenih naprav in podsistemov (b), pri čemer zaradi zagotavljanja ustreznega toplotnega ugodja (b_1), predpostavi tudi hlajenje z idealnim generatorjem hladu; kazalniki energijske učinkovitosti so prikazani kot letne vrednosti (za REF 2) in kot specifične vrednosti (na enoto A_{use}) za dovedeno električno energijo (e), $COP_{Tc,H}$, deležem obnovljivih virov energije $ROVE_H$ in s specifično letno potrebno primarno energijo $E'_{Ptot,H,an}$ (f), skladno z zahtevami PURES-3.

7.2.3. Primer 2. Modeliranje ogrevanja s TČ

Na sliki 79 za REF 2 z mehanskim prezračevanjem z vračanjem toplote (ε_{rec} 0,80) in nizkotemperaturnim podnim ogrevanjem, na sliki 80 pa so prikazani rezultati dinamičnega modeliranja prostora REF 2, ki je naravno prezračevan ($n= 0,5 \text{ h}^{-1}$) in je ogrevan z visokotemperaturnim ogrevalnim sistemom s ploščatimi ogrevali.



Slika 80: Rezultati dinamičnega modeliranja kazalnikov energijske učinkovitosti naravno prezračevanega prostora REF2, ko je ta ogrevan s TČ in visokotemperaturnim ogrevalnim sistemom s ploščatimi ogrevali; prikazane veličine so opisane na sliki 79.

7.3. DOVEDENA ENERGIJA ZA TSS MEHANSKEGA PREZRAČEVANJA

Dinamično modeliranje omogoča analizo prezračevanja s spremenljivim pretokom zunanjega zraka pri čemer je ciljna spremenljivka v stavbah, v katerih so ljudje glavni vir onesnaževanja zraka, koncentracija CO_2 . Ker stavbe prezračujemo z zunanjim zrakom, je koncentracija CO_2 v zunanjem zraku pomembna. Standard SIST EN 13779 opredeljuje onesnaženost zunanjega zraka s tremi razredi ODA (outdoor), onesnaženost notranjega zraka pa s štirimi razredi IDA (indoor). Pravilnik o prezračevanju in klimatizaciji stavb ter PURES-3 uporabljata enako opredelitev kakovosti zraka, pri čemer PURES-3 zahteva, da je kakovost notranjega zraka najmanj IDA 2 (slika 81). Pri dinamičnem modeliranju stavb lahko upoštevamo kako se kakovost zunanjega zraka (ODA) spreminja glede na dnevni čas (ODA) in kakovost notranjega zraka (IDA) pa glede na zasedenost stavbe. S tem prilagajamo delovanje sistema ob najmanjši rabi dovedene energije za delovanje TSS.

Kakovost zunanjega zraka	Koncentracija CO ₂ (ppm)	Kakovost notranjega zraka	Koncentracija CO ₂ nad zunanjim okoljem (ppm)	Količina zraka za prezračevanje prostora brez kadičev (m ³ /h)
ODA 1 podeželje, brez virov (kurilne naprave, prometnice)	350	IDA 1 visoka kakovost	<= 400	> 54
ODA 2 manjša naselja/mesta	400	IDA 2 srednja kakovost, mejna vrednost po PURES 2022	400 - 600	36 - 54
ODA 3 center večjih mest	500	ODA 3 slabša kakovost	600 - 1000	22 - 36
		ODA 4 slaba kakovost	> 1000	< 22

Slika 81: Referenčne vrednosti onesnažila in priporočene količine dovedenega svežega zraka pri prezračevanju, kakor jih opredeljuje SIST EN 13779:2016.

Raba energije za temperiranje zraka za prezračevanje (gretje/hlajenje) je vključena v izračun potrebne energije za ogrevanje $Q_{H,nd}$ in hlajenje $Q_{C,nd}$ tudi pri dinamičnem modeliranju. Če je TSS prezračevanja namenjen toplozračnemu ogrevanju, hlajenju z ohlajenim zrakom ali vzdrževanju vlažnosti notranjega zraka, se obravnava kot sistem za klimatizacijo. Zato v izračunu dovedene energije za delovanje TSS prezračevanja upoštevamo le energijo (električno) za pogon ventilatorjev in kontrolnih naprav. Na dovedeno energijo za delovanje ventilatorjev vpliva znižanje tlaka v razvodnem kanalskem sistemu, ki ga mora pokriti ventilator. Pri tem imajo filtra za izločanje onesnažil zraka velik vpliv. Tehnični standard SIST EN 13779:2016 priporoča naslednje kakovosti filtrov glede na razred onesnaženosti zunanjega zraka (ODA) in želeno kakovost notranjega zraka (IDA) (slika 82).

Kakovost zunanjega zraka	Kakovost notranjega zraka	IDA 1 visoka kakovost	IDA 2 srednja kakovost, mejna vrednost po PURES 2022	ODA 3 slabša kakovost	ODA 4 slaba kakovost
ODA 1 podeželje, brez virov (kurilne naprave, prometnice)		F9	F8	F7	F5
ODA 2 manjša naselja/mesta		F7+F9	F6+F8	F5 + F7	F5 + F6
ODA 3 center večjih mest		F7 + GF + F9	F7 + GF + F9	F5 + F7	F5 + F6
		F filtri delcev, GF filtri plinastih onesnažil			

Slika 82: Priporočeni filtri v prezračevalnem sistemu (po SIST EN 13779:2016) glede na razred kakovost zunanjega zraka (ODA) in načrtovano kakovost notranjega zraka (IDA); označeno je območje kakovosti notranjega zraka, kakor ga predvidevata PURES-3 in TSG-1-004.

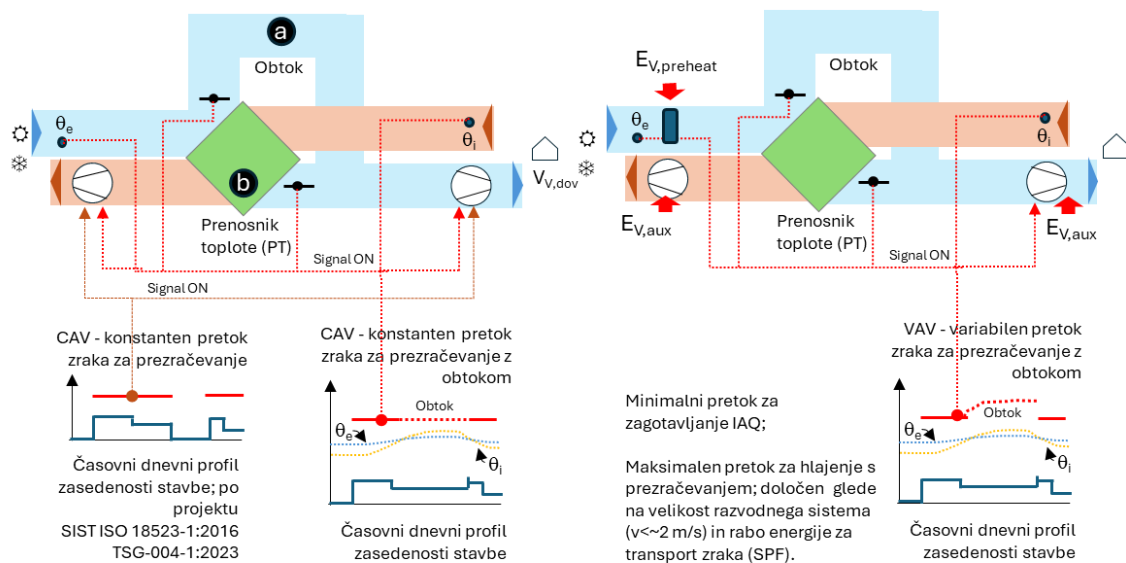
Dovedena električna energija za delovanje TSS prezračevanja se pri dinamičnem modeliranju določi kot produkt moči ventilatorjev in časovnega koraka simulacije (na primer ene ure), pri čemer lahko upoštevamo delovanje VAV – delovanje s spremenljivim pretokom zraka. Električna moč ventilatorja je enaka:

$$P_{el} = \frac{\Sigma \Delta p \cdot \dot{V}}{\eta_{VAV} \cdot \eta_v \cdot \eta_m} \quad (W)$$

pri čemer je $\Sigma\Delta p$ vsota tlačnih padcev na elementih v prezračevalnem sistemu, V pretok zraka v razvodu (m^3/s), η_{VAV} izkoristek pogona pri spremenljivem pretoku s frekvenčno regulacijo (med 0,96 pri 100 % do 0,75 pri 20 % pretoku), η_v izkoristek ventilatorja (od 0,45 pri manjših količinah; do 300 m^3/h in do 0,85 za ventilatorje z veliko dobavno količino; > 5000 m^3/h) in η_m izkoristek električnega pogona (od 0,8 do 0,85). Tipični padec tlaka Δp v razvodu zraka naj nebi presegal 1 Pa na m dolžine razvoda. Hidravlični elementi (lok, odcepi, združitve, lopute) se obravnavajo z vsoto nadomestne dolžine razvoda (tipično od 0,1 do 0,3 m na element). Večji tlačni padec je značilen za filtre in prenosnike toplote. Tipično povečano specifično moč ventilatorja navaja EPBD podporni standard SIST EN 16798-3 po EPBD: 0,08 W za transport m^3/h zraka v sistemu z vgrajenim filtrom F5 - F7 in GF filtrom, 0,25 W/(m^3/h) s filtrom F8 - F9 (HEPA), 0,08 W za transport m^3/h zraka, če je v sistemu vgrajen prenosnik toplote (na primer rekuperator).

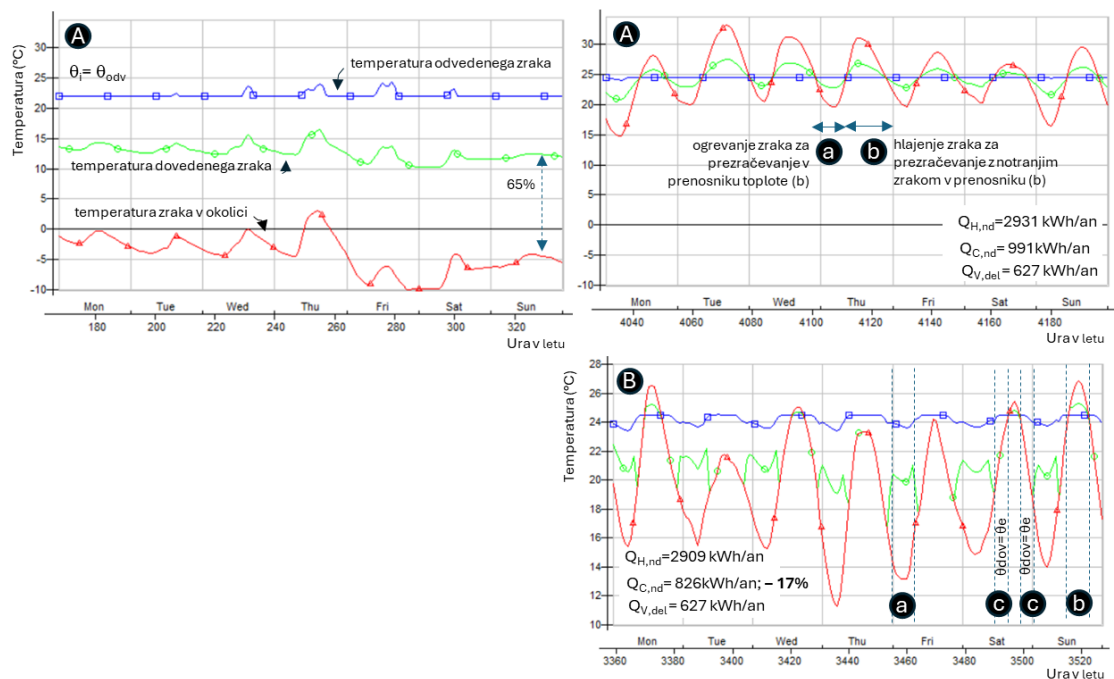
7.4. DINAMIČNO MODELIRANJE PREZRAČEVALNEGA SISTEMA

S TSS mehanskega prezračevanja zagotavljamo primerno kakovost notranjega zraka (IAQ). Običajno predgrevanje in predhlajenje zraka pred vstopom v stavbo/toplotno cono ni predvideno, razen ob morebitnem preprečevanju kondenzacije vodne pare v prenosniku in takrat, ko izkoriščamo naravne vire energije, na primer z zemeljskim prenosnikom toplote (GHX). Za te sisteme pa je značilno delovanje z obtokom (slika 83, (A, a)). To je krmiljeno glede na trenutno temperaturo v stavbi θ_i in okolici θ_e , tako, da z aktivnim naravnim hlajenjem s prezračevanjem (praviloma nočnim) zmanjšamo rabo energije za hlajenje. Pri tem je ciljna spremenljivka tudi minimalna temperatura v stavbi z vidika toplotnega ugodja (na primer ne manj kot 18 °C). Delovanje takega sistema in vpliv na rabo energije je mogoče preveriti le z dinamičnim modeliranjem. Pri modeliranju moramo preveriti, ali je v algoritem delovanja vključeno tudi to merilo. Dovedena energija je odvisna od moči ventilatorjev, pri čemer je lahko izhodišče (v novih stavbah) največja dovoljena specifična moč ventilatorjev (SFP; dovodni/odvodni) glede na TSG-1-004. Prezračevalni sistemi delujejo praviloma s svežim zrakom, zato je količina dovedenega zraka ($V_{\text{V,dov}}$) približno enaka odvedeni/zavrženi količini zraka ($V_{\text{V,dov}} = V_{\text{V,odv}} = V_{\text{V,ext}}$). Primer delovanja prezračevalnega sistema z obtokom je za izbrana tedna (TML Ljubljana) prikazan na sliki 83. Dovedena energija za delovanje TSS mehanskega prezračevanja je enaka dovedeni energiji za pogon ventilatorjev ($E_{\text{V,aux}}$) in morebitno dovedeni energiji za predgrevanje zraka ($E_{\text{V,preheat}}$), da preprečimo kondenzacijo vodne pare v prenosniku.



Mehansko prezračevanje z vračanjem toplote brez in z obtokom

Primer: toplotna cona REF 2, mehansko prezračevanje $150 \text{ m}^3/\text{h}$ CAV, $\eta_{T,rec} = 65\%$, stalno delovanje (8760 h/an), idealni generator toplote in hladilni agregat ($COP_H 1$, $COP_C 1$); $\theta_{set} = \theta_i$, $\theta_{i,min} = 18^\circ\text{C}$, $\theta_{H,set} = 22^\circ\text{C}$, $\theta_{C,set} = 24,5^\circ\text{C}$; $\Delta p_{dov} 800 \text{ Pa}$, $\Delta p_{odv} 600 \text{ Pa}$, $\eta_V 80\%$.



Slika 83: Primer dinamičnega modeliranja TSS za mehansko prezračevanje z vračanjem toplote in obtokom svežega zraka; (A) temperature zraka modelirane v izbranem zimskem in poletnem tednu (TML Ljubljana) pri delovanju brez obtoka in z obtokom (B); v poletnem obdobju z obtokom in vpihovanjem zunanjega zraka mimo rekuperatorja stavbo aktivno naravno hladimo (z nočnim prezračevanjem); algoritem krmiljenja mora zagotoviti največjo energijsko učinkovitost (B, a, b, c) in hkrati upoštevati kriterije toplotnega ugodja.

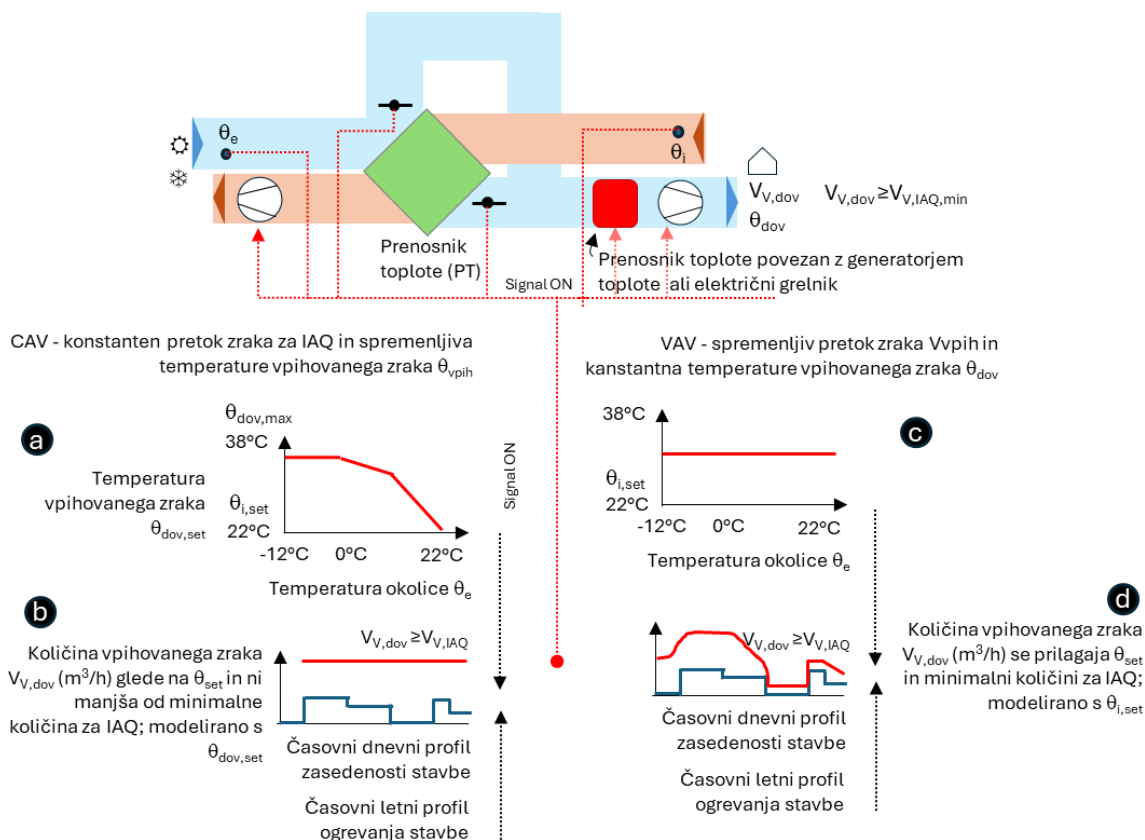
7.5. DINAMIČNO MODELIRANJE PREZRAČEVALNEGA SISTEMA, KI JE NADGRAJEN V TOPLOZRAČNI OGREVALNI SISTEM

Prenos toplote z zrakom običajno zahteva transport večje količine zraka kot zadošča za zagotavljanje ustrezne kakovosti notranjega zraka. Zato ti sistemi delujejo z obtokom in se povratni količini zraka v mešalni komori dodaja le minimalna potrebna količina svežega zraka za IAQ. V primeru majhne toplotne obremenitve stavbe, ki okvirno ne presega 15 W na m² kondicionirane površine, se za ogrevanje stavbe lahko nadgradi mehanski prezračevalni sistem (slika 84). Tak sistem lahko deluje z nespremenljivim (angl. Constant Air Volume - CAV) ali spremenljivim pretokom zraka (angl. Variable Air Volume - VAV). Prednost zadnjega je predvsem v manjši dodatni energiji za delovanje sistema $Q_{V,aux} = Q_{V,del}$ (če imajo ventilatorji frekvenčno regulacijo pretoka, kar je pomemben ukrep za večjo energijsko učinkovitost TSS). Osnovni robni pogoji za delovanje prezračevalnega sistema CAV in VAV za toplozračno ogrevanje so prikazani na sliki 80.

Segrevanje zraka se izvede s prenosnikom toplote, ki je lahko tekočinski, ali z neposredno v razvod zraka vgrajenim električnim grelnikom. Modeliranje zadnjega omenjenega je precej bolj enostavno, ker je električna energija čista eksergija. Če se toplota proizvaja z ločenim generatorjem toplote in z grelno vodo prenaša v prenosnik, moramo temperaturo grelne vode ustrezno prilagoditi glede na predvideno temperaturo vpihovanega zraka.

Opomba: Pri toplozračnem ogrevanju (in hlajenju) je zelo pomembno, da preverimo tudi kriterije toplotnega ugodja, saj zaradi visoke temperature vpihovanega zraka in večjih hitrosti zraka v stavbi to lahko odstopa od zahtevanega II. razreda kakovosti.

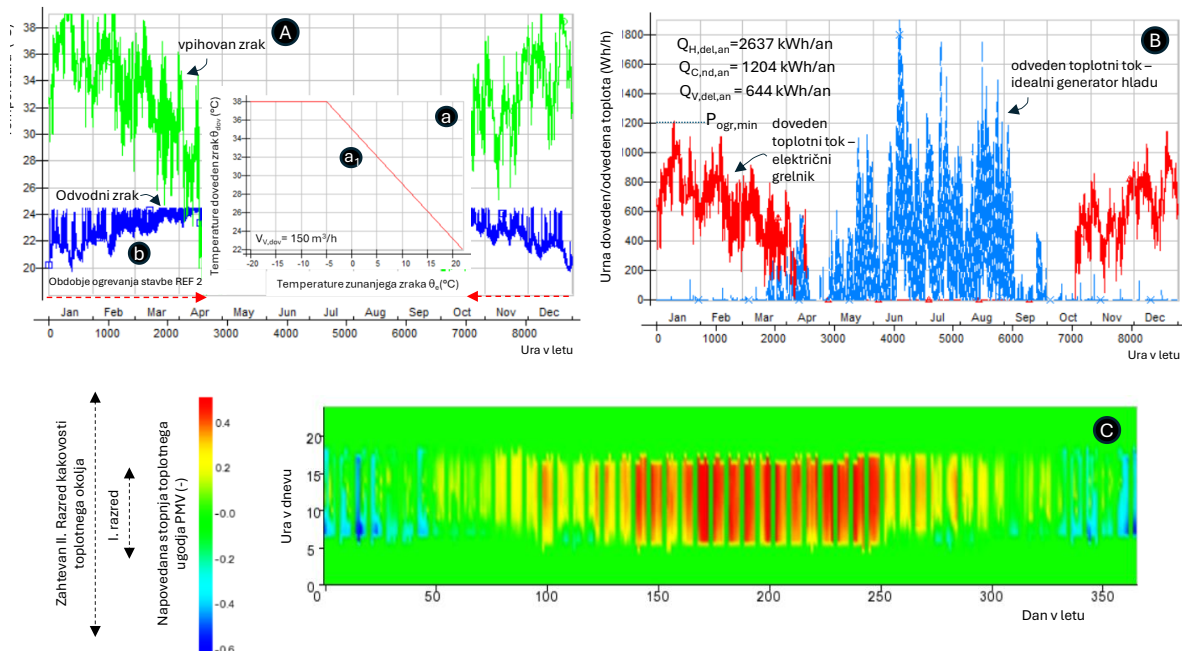
Primer dinamičnega modeliranja s prezračevalnim sistemom CAV za toplozračno ogrevanje referenčnega prostora REF 2 (slika 11) je prikazan na sliki 85. Sistem mehanskega hlajenja ni predviden, vendar pri modeliranju dodamo idealni hladilni agregat, da zagotovimo predpisano kakovost toplotnega ugodja in je modeliranje potrebne toplote za ogrevanje realnejše. Kot robni pogoj je bilo izbrano enakotlačno prezračevanje s prostorninskim pretokom dovedenega zraka $V_{V,dov}$ ($= V_{V,odv} = V_{V,zavržen}$), s katerim zagotovimo ustrezno kakovost notranjega zraka, in temperatura vpihovanega zraka θ_{dov} (slika 84, a), ki se prilagaja glede na temperaturo zunanjega zraka θ_e v času ogrevanja stavbe. To obdobje je opredeljeno z ločenim časovnikom od 10. oktobra do 20. aprila, glede na predhodno modelirano potrebno toploto za ogrevanje $Q_{H,nd}$. Mejni vrednosti spremenljivk $V_{V,dov,max} = 150 \text{ m}^3/\text{h}$ in $\theta_{dov,max} = 38^\circ\text{C}$ sta bili določeni na podlagi števila uporabnikov stavbe (7/24) in zahtevanega II. razreda kakovosti IAQ (PURES-3, TSG-1-004) ter zahteve glede toplotnega ugodja. Obe spremenljivki, $V_{V,dov,max}$ in $\theta_{dov,max}$ sta bili preverjeni tudi glede na potreben doveden toplotni tok (b), saj zagotavljata primerno operativno temperaturo v stavbi ($22^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$), oziroma II. razred kakovosti toplotnega okolja (c) v območju zunanjih temperatur, kot jih navaja TRL za Ljubljano.



Slika 84: Nastavitve pri modeliranju toplozračnega ogrevanja s sistemom CAV in VAV kot nadgradnje mehanskega prezračevanja z vračanjem toplote; sistem deluje samo z zunanjim zrakom; pri CAV sistemu presojevalec določi pretok zraka za prezračevanje $V_{V, dov}$, temperatura dovedenega zraka θ_{dov} pa je odvisna od temperature zunanjega zraka (a) – pri projektnih zimskih pogojih naj praviloma ne presega 38 - 40 °C, da zagotovimo primerno/zahtevano toplotno ugodje; količina dovedenega zraka $V_{V, dov}$ naj bo zaradi nižje rabe energije za transport zraka čim manjša (b), vendar ne manjša od $V_{V, IAQ}$; pri VAV sistemih načrtovalec določi konstantno temperaturo vpihovanega zraka θ_{dov} (c), pretok zraka pa se računsko prilagodi potrebnemu toplotnemu toku za ogrevanje v vsakem od časovnih korakov dinamičnega modeliranja (d).

Mehansko prezračevanje z vračanjem toplote in toplozračno ogrevanje

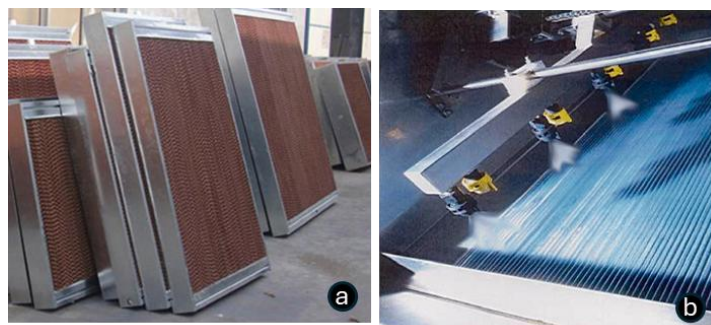
Primer: referenčni prostor REF 2, mehansko prezračevanje z obtokom; V_V 150 m³/h CAV, $\epsilon_{rec} = 80\%$, stalno delovanje (8760 h/an), električni grelnik ($\eta_H = 1$) idealni hladilni agregat ($COP_C = 1$); $\theta_{set} = \theta_i$, $\theta_{H,set} 22^\circ\text{C}$, $\theta_{C,set} 24,5^\circ\text{C}$; Δp_{dov} 800 Pa + 50 Pa (grelnik), Δp_{odv} 600 Pa, η_V 80%.



Slika 85: Primer dinamičnega modeliranja referenčnega prostora REF 2; referenčna toplotna obremenitev 15 W/m² ($P_{ogr,min}/A_{use}$) je primerna za toplozračno ogrevanje.

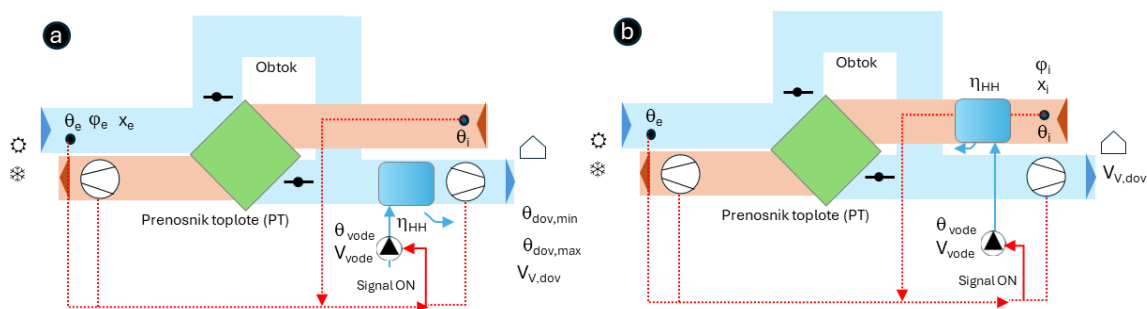
7.6. DINAMIČNO MODELIRANJE PREZRAČEVALNEGA SISTEMA S HLAPILNIM HLAJENJEM

Hlapilno hlajenje (HH) je proces hlajenja zraka za prezračevanje s ponorom toplote, ki ga povzroči hlapenje kapljic vode ali vodne površine, ki je v stiku z zrakom. Proces hlapilnega hlajenja poteka pri stalni entalpiji (notranji energiji zraka), zato ga imenujemo tudi adiabatno hlajenje. Zraku se zniža temperatura (senzibilna toplota), a hkrati poveča vlažnost (latentna toplota). Zrak, ki se prenaša v stavbo, lahko teoretično ohladimo do temperature rosišča, kar pomeni, da bo učinek hlapilnega hlajenja odvisen od temperature, hitrosti in vlažnosti zraka v stiku z vodo v dodatnem elementu prezračevalnega sistema, pa tudi od temperature vode, ki jo uporabljamo za hlajenje. Proces je učinkovitejši v okoljih s toplejšim in bolj suhim zrakom. Tudi v podnebju, značilnem za Slovenijo, je hlapilno hlajenje energijsko učinkovit način za zmanjšanje rabe električne energije za hlajenje. Voda je v stiku z zrakom za prezračevanje z vodnim filmom, ki ga ustvarimo na površini satovja (slika 86,a) ali s kapljicami vode, ki jih brizgamo v tok zraka (slika 86, b).



Slika 86: Satovje na katerem se v prezračevalni napravi ustvari vodni film in skozi katerega teče zrak (a), šobe za pršenje vode v tok zraka (b), napravi sta vgrajeni v napravo za prezračevanje (klimat, AHU).

Pri hlapilnem hlajenju v prezračevalnih sistemih sta najpogostejši tehnični rešitvi neposredno in posredno hlapilno hlajenje, kakor prikazuje slika 87. Pri obeh tehnikah se zrak navlaži/ohladi do približno 80 % teoretične vrednosti, to je razlike med temperaturo suhega in mokrega termometra. Pri neposrednem hlajenju se navlažuje zrak, ki vstopa v toplotno cono/stavbo. Tak zrak je hladnejši, toda tudi vlažnejši, kar lahko povzroči manjše toplotno ugodje. Pri posrednem hlapilnem hlajenju pa se navlažuje in ohladi zavrženi zrak, ta nato v prenosniku toplote (rekuperatorju) prevzame toploto svežega zraka, ki vstopa v stavbo. V tem primeru je učinek naravnega hlajenja odvisen tudi od učinkovitosti rekuperatorja, vendar se zraku za prezračevanje ne poveča absolutna vlažnost. Tako se izognemo prenosu kapljevite vode v zrak in možnemu razvoju mikroorganizmov. Termodinamični procesi pri hlapilnem hlajenju so prikazani v Medved S., Gradbena fizika II, Fakulteta za arhitekturo, 2014.



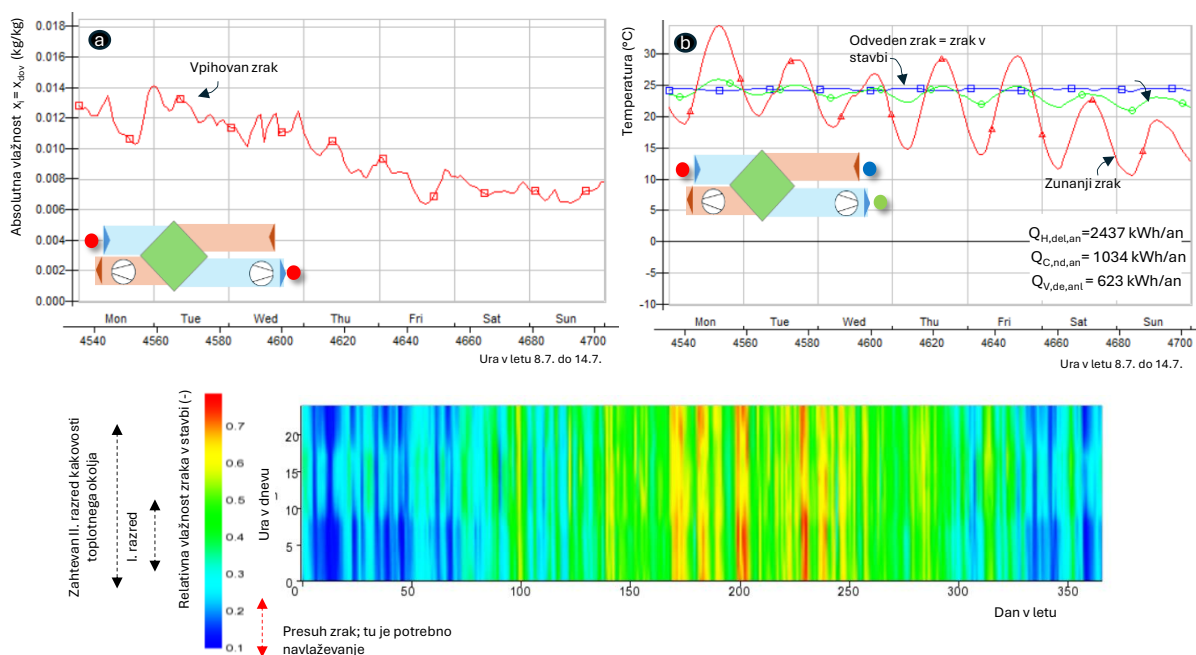
Slika 87: Hlapilno hlajenje zraka za prezračevanje je lahko neposredno (a) ali posredno (b); na sliki so prikazane tudi robne spremenljivke pri dinamičnem modeliranju učinka hlapilnega hlajenja; opomba: možna je tudi izvedba z obema tehnikama, vendar v praksi ni običajna.

Hlapilno hlajenje v prezračevalnih sistemih modeliramo z eksperimentalno določenimi lastnostmi . lastnostmi vlažilne naprave pri referenčnih pogojih. Ti obsegajo pretok, temperaturo in vlažnost zraka ter količino in temperature vode, ki jo dovajamo v napravo. To so tudi potrebne robne spremenljivke pri dinamičnem modeliranju, pri katerem pa se učinek navlaževanja določi v vsakem časovnem koraku. Robne spremenljivke so tudi spremenljivke stanja zunanjega zraka in ciljno stanje zraka v stavbi (θ_i , ϕ_i ,

x_i), s katerimi je opredeljeno toplotno ugodje. Te moramo preveriti vedno, ko je za toplotno cono/stavbo predvideno neposredno hlapilno hlajenje. Primer dinamičnega modeliranja prezračevalne naprave nadgrajene za hlapilno hlajenje dovedenega zraka v toplotno cono/stavbo je prikazan na sliki 88 (A, B, C). Spremenljivke stanj zraka ter potrebna količina dovedene in odvedene toplote za ogrevanje in hlajenje referenčnega prostora REF 2 (slika 11), so primerjane tudi s prezračevalno napravo brez hlapilnega hlajenja (slika 88, A).

A Mehansko prezračevanje z vračanjem toplote brez obtoka zraka v klimatu

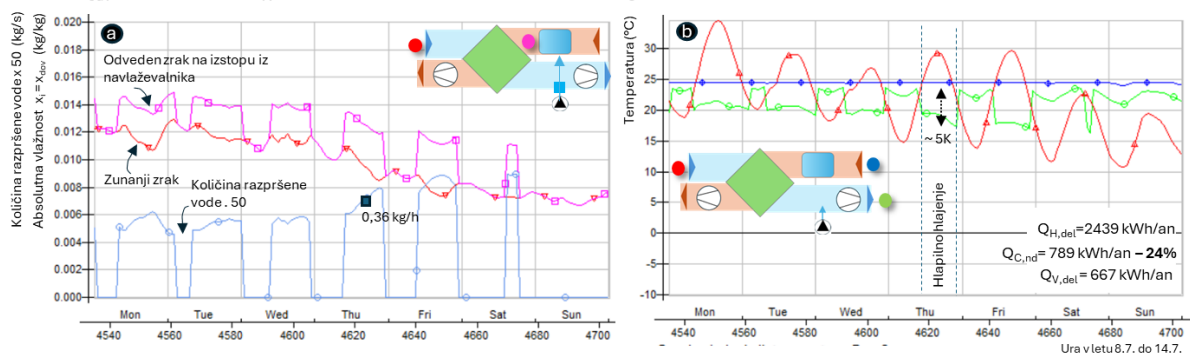
Primer: referenčni proctor REF 2, mehansko prezračevanje brez obtoka; V_V 150 m³/h CAV, $\epsilon_{rec} = 80\%$, stalno delovanje (8760 h/an), idealni generator toplote in idealni hladilni agregat ($COP_H = 1$, $COP_C = 1$); $\theta_{set} = \theta_i$, $\theta_{H,set} 22^\circ\text{C}$, $\theta_{C,set} 24,5^\circ\text{C}$; Δp_{dov} 800 Pa, Δp_{odv} 600 Pa, η_V 80%.



Slika 88, A: Primer delovanja sistema mehanskega prezračevanja z vračanjem toplote; navedene so potrebna toplota za ogrevanje $Q_{H,nd}$ in odvedena toplota za hlajenje $Q_{C,nd}$ ter dovedena energija (električna energija) za delovanje sistema $Q_{V,del}$, izračunana za REF 2 (slika 11) z meteorološkimi podatki iz TML za Ljubljano za izbrani teden v letu; kot kazalnik toplotnega ugodja je prikazana dinamično modelirana relativna vlažnost zraka ji v toplotni coni za vse ure v letu; ta pokaže, da je kazalnik večino ur v letu v zahtevanem (PURES-3, TSG-1-004) II. razredu kakovosti, vendar bi bilo treba zrak v prostoru navlaževati ($\phi_i < 25\%$) v obdobju ogrevanja stavbe ali uporabiti “entalpijski” prenosnik toplote v prezračevalni napravi.

B Mehansko prezračevanje z vračanjem toplote brez obtoka s posrednim hlapilnim hlajenjem

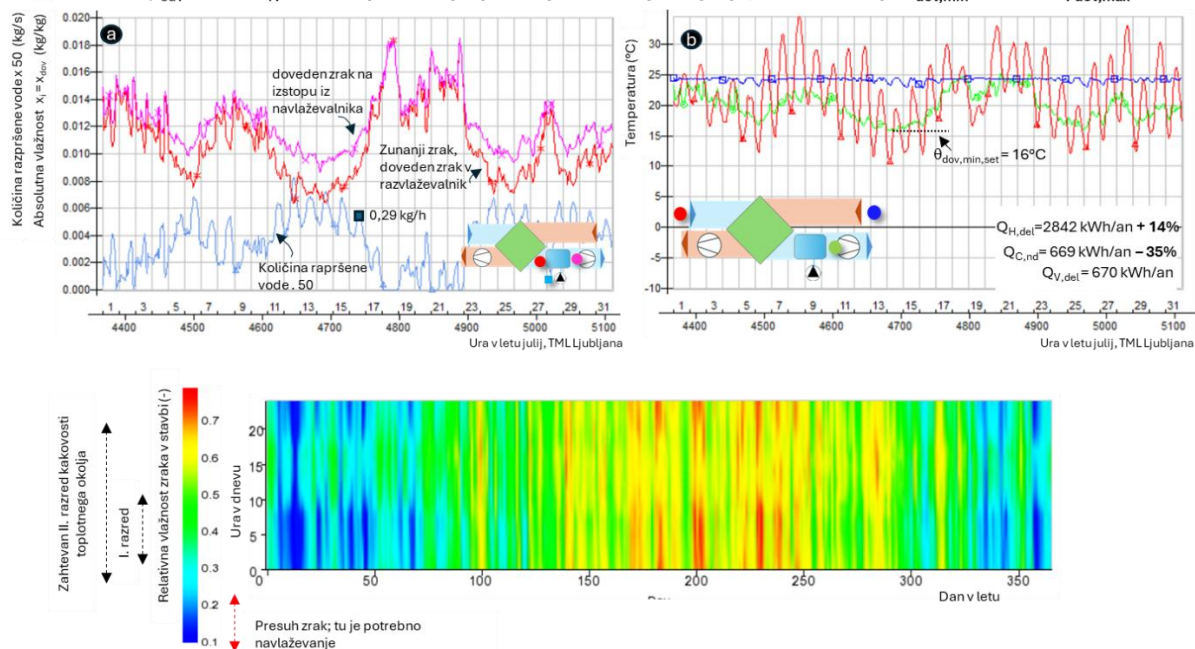
Primer: toplotna cona REF 2, mehansko prezračevanje brez obtoka; V_V 150 m³/h CAV, $\eta_{T,rec} = 80\%$, stalno delovanje (8760 h/an), idealni generator toplote in idealni hladilni agregat (COP_H 1, COP_C 1); $\theta_{set} = \theta_i$, $\theta_{H,set} 22^\circ\text{C}$, $\theta_{C,set} 24,5^\circ\text{C}$; Δp_{dov} 800 Pa, Δp_{odv} 600 Pa + 50 Pa η_V 80%; **hlapilno hlajenje deluje ko je $\theta_e \geq 22^\circ\text{C}$.**



Slika 88, B: Posredno hlapilno hlajenje ne vpliva na vlažnost zraka v stavbi, ima pa zaznaven vpliv na znižano temperaturo vpihovanega zraka podnevi; to vpliva zmanjšano letno rabo energije za hlajenje $Q_{C,nd,an}$; za do 5K nižja temperatura (v primerjavi s sliko 84, A) dokazuje, da s hlapilnim hlajenjem občutno kompenziramo vpliv toplotnih otokov v mestnem okolju; primer je izdelan z meteorološkimi podatki iz TML za Ljubljano za izbrani teden v letu.

C Mehansko prezračevanje z vračanjem toplote brez obtoka z neposrednim hlapilnim hlajenjem

Primer: toplotna cona REF 2, mehansko prezračevanje brez obtoka; V_V 150 m³/h CAV, $\eta_{T,rec} = 80\%$, stalno delovanje (8760 h/an), idealni generator toplote in idealni hladilni agregat (COP_H 1, COP_C 1); $\theta_{set} = \theta_i$, $\theta_{H,set} 22^\circ\text{C}$, $\theta_{C,set} 24,5^\circ\text{C}$; Δp_{dov} 800 Pa + 100 Pa, Δp_{odv} 600 Pa, η_V 80%; **hlapilno hlajenje deluje v obdobju hlajenja, vendar le ko je $\theta_{dov,min} > 16^\circ\text{C}$ in $\phi_{dov,max} < 80\%$**

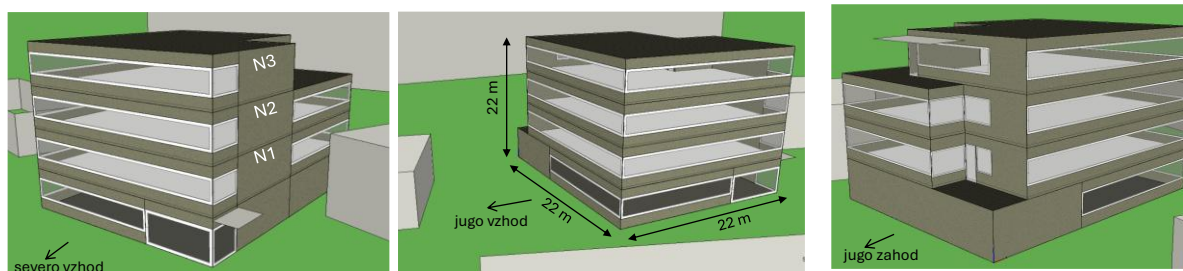


Slika 88, C: Z neposrednim hlapilnim hlajenjem se potrebna količina odvedene toplote za hlajenje najbolj zmanjša (opomba: za obravnavani primer dinamičnega modeliranja) rabo energije za hlajenje, vendar so nizke jutranje temperature vzrok za nekoliko večjo potrebno količino toplote za ogrevanje;

tudi absolutna vlažnost je občasno nad priporočeno mejno vrednostjo ($x_i = 0,012 \text{ kg/kg}$); sistem bi bilo treba dodatno optimizirati, na primer z vključitvijo delovanja z obtokom; primer potrjuje smiselnost dinamičnega modeliranja pri zasnovi stavb in TSS, saj statično modeliranje (z mesečnimi povprečji) tega nikakor ne omogoča.

8. SKLEP

Priročnik končujemo s primerom dinamičnega modeliranja poslovnega objekta s kondicionirano površino $A_{\text{use}} = 1297,2 \text{ m}^2$ v štirih etažah, z bruto prostornino $V_b = 5484 \text{ m}^3$, neto prostornino 4385 m^3 in faktorjem oblike stavbe $f_0 = 0,27 \text{ m}^{-1}$ (slika 89). Stavbo obravnavamo kot energetske zahtevno stavbo. S primerom želimo prikazati prednosti dinamičnega modeliranja ter usmeriti načrtovalce stavb k prehodu s statičnega modeliranja notranjega okolja in kazalnikov energijske učinkovitosti stavb na dinamično.



Slika 89: Geometrijski model stavbe v BIM/BEM orodju.

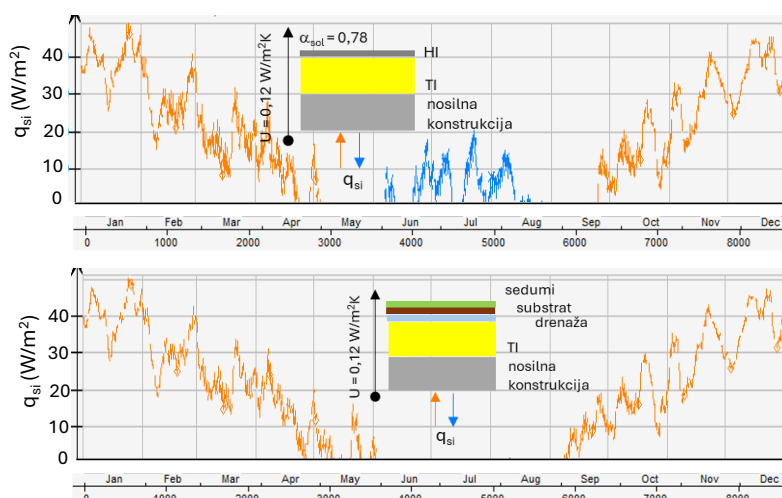
Objekt je na lokaciji (x 111---; y 445---) ter je senčen z naravnima ovirama (višja grebena na jugozahodni in jugovzhodni strani) in s sosednjimi stavbami (slika 90). Pri statičnem modeliranju je treba geometrijske relacije med zunanjimi ovirami opredeliti za vsak transparentni gradnik toplotnega ovoja, pri dinamičnem modeliranju se vpliv zunanjih ovir na naravno osvetlitev in rabo energije izvede za vse transparentne gradnike izvede samodejno.



Slika 90: Grafični prikaz naravnih ovir in sosednjih stavb, ki senčijo modelirano stavbo; modelirana in referenčna stavba sta enako senčeni !

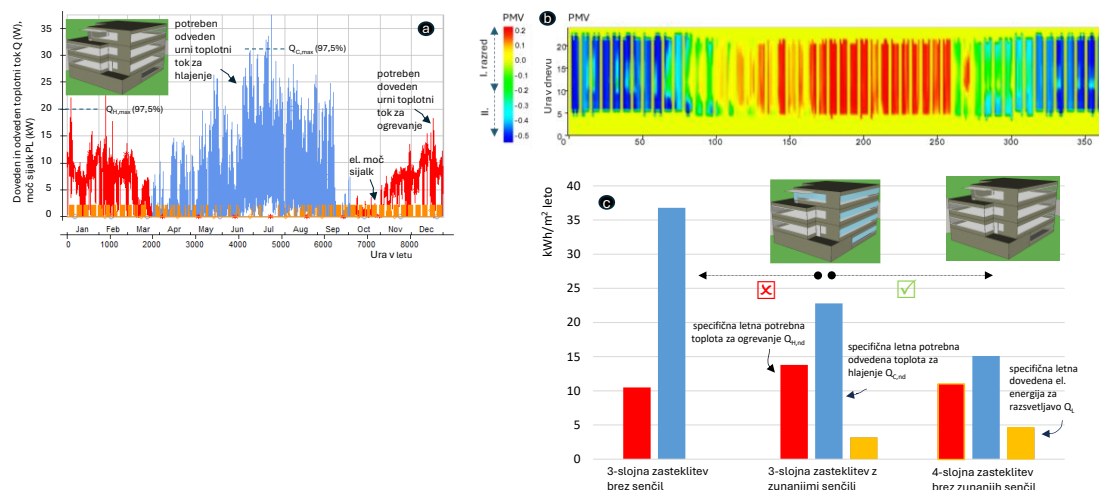
Lastnosti transparentnih gradnikov vplivajo na rabo energije za ogrevanje, hlajenje in razsvetljavo. Dinamično modeliranje omogoča optimiziranje lastnosti gradnikov tudi na podlagi algoritmov uravnavanja spremenljivk notranjega okolja, česar statično modeliranje ne omogoča. Glede na projektno nalogo je bilo uporabljeno dinamično modeliranje kot orodje za optimizacijo zasnove modelirane stavbe, kot na primer:

- proučitev vpliva ozelenjene strehe na potrebno toploto za ogrevanje in odvedeno toploto za hlajenje v etaži N3; modeliranje ozelenjenih gradnikov toplotnega ovoja je opisano v poglavju 5.3;



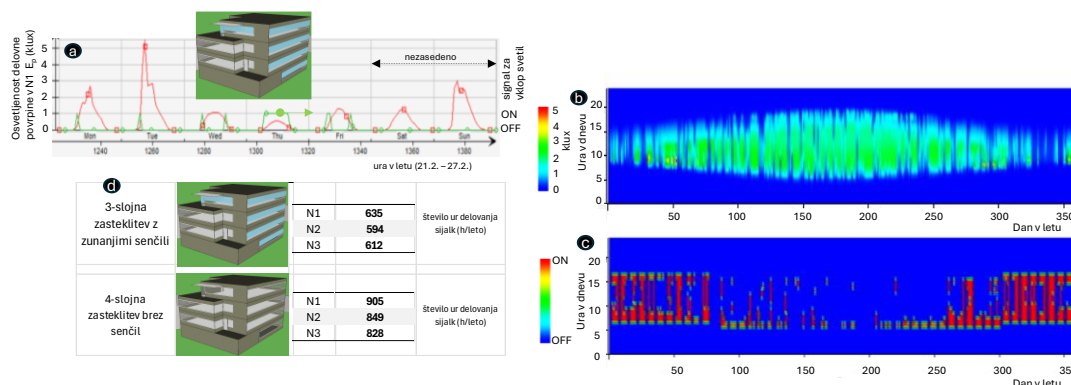
Slika 91: Toplotni tok na notranji površini ravne strehe s temnim slojem hidroizolacije (HI) (zgoraj) in ozelenjene ravne strehe (spodaj); v obdobju hlajenja ozelenjena streha ne povzroča dodatnih toplotnih obremenitev ($q_{si} = 0 \text{ W/m}^2$).

- opustitev obvezne vgradnje zunanjih senčil; glede na določila PURES-3 je namestitev zunanjih senčil obvezna za vse gradnike usmerjene med SV-J-SZ, razen, če načrtovalec stavbe ne dokaže, da opustitev senčil (na primer zaradi zunanjih ovir) ne poveča potrebne energije za zagotavljanje toplotnega ugodja ($Q_{H,nd}$ in $Q_{C,nd}$); z dinamičnim modeliranjem so bile preverjene te tržne tehnologije: troslojna zasteklitev ($U_{frame} = 0,8 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$; $U_g = 0,605 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$; $g = 0,536$; $\tau_{vis} = 0,733$; $f_{frame} = 0,15$) brez zunanjih senčil in z zunanjimi senčili ($S_f = 0,15$) ter štirislojna zasteklitev ($U_{frame} = 0,8 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$; $U_g = 0,303 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$; $g = 0,252$; $\tau_{vis} = 0,49$; $f_{frame} = 0,15$). Slika 88. prikazuje toplotni tok, ki ga morata ustvariti idealni grelnik in hladilni agregat za zagotavljanje toplotnega ugodja v stavbi s troslojno zasteklitvijo brez senčil (a) in v tem primeru napovedano stopnjo toplotnega ugodja PMV za vsak časovni korak modeliranja (uro) v letu (b). Čeprav je toplotno ugodje ustrezno, in je večino časa v delovniku v I. razredu kakovosti (PMV od -0,2 do +0,2), pa se ob nekoliko povečani količini potrebne toplote pri vgradnji zunanjih senčil občutno zmanjša potrebna odvedena toplota za hlajenje. Nasprotno pa se pri štirislojni zasteklitvi zmanjšata tako potrebna toplota za ogrevanje ($Q_{H,nd}$, manjši U), kot tudi potrebna odvedena toplota za hlajenje ($Q_{C,nd}$, manjši g) (c). Torej je taka rešitev brez senčil v skladu z zahtevo PURES-3, kljub nekoliko večji rabi energije za razsvetljavo (nižji τ_{vis});



Slika 92: Modelirani urni potrebni toplotni tok za ogrevanje in hlajenje ter električna moč vgrajenih sijalk P_L (a); največja toplotna moč generatorja toplote ($Q_{H,max}$) in generatorja hladu ($Q_{C,max}$), določena kot 97,5 % vrednosti absolutno največjega modeliranega toplotnega toka obeh generatorjev (a); modelirane vrednosti napovedane stopnje toplotnega ugodja PMV v vsakem računskem koraku modeliranja ($\Delta t = 1$ h) (b); potrebna specifična dovedena ($Q'_{H,nd}$) in odvedena toplota ($Q'_{C,nd}$) za izbrane vrste zasteklitev (c).

- povezava modela naravne in električne razsvetljave in optimiziranje delovanja senčil glede na kriterije svetlobnega ugodja ter modeliranje dovedene (električne) energije za razsvetljavo; povezava modelov je bila izvedena s krmilniki (vklop svetil $E_p < 550$ lux + urnik zasedenosti) in prednostno zaščito pred pregrevanjem - vklop senčenja pri $G_{glob,w} > 100$ W/m². Primer modeliranja osvetljenosti delovne površine v etaži N1 in delovanje svetil prikazuje slika 89. za izbrani teden v letu (a) ter letu (b, c). Sijalke delujejo brez zatemnjevanja, zato je dovedena električna energija proporcionalna uram delovanja v letu (d).



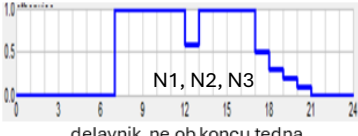
Slika 93: Modelirana osvetlitev delovne površine E_p v energijski coni N1 za izbrani teden (a) in signal krmiljenja zunanjih senčil (c), integralni kazalnik toplotnega ugodja PMV (b) v urah v letu za primer tri-

slojne zasteklitve z zunanjimi senčili; število ur v letu ko so vklopljene sijalke pri različnih zasteklitvah v treh energijskih conah (N1, N2, N3) (d).

8.1. KAZALNIKI ENERGIJSKE UČINKOVITOSTI MODELIRANE STAVBE PO PURES-3

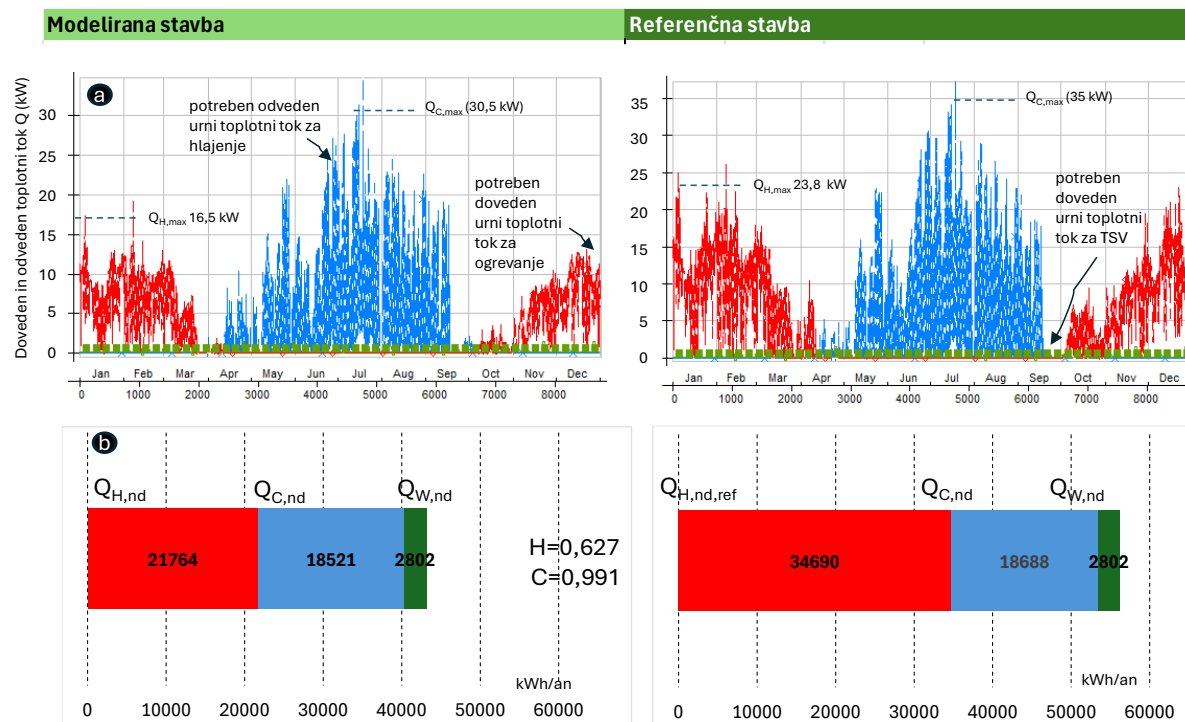
8.1.1. Kazalniki učinkovite rabe energije za področje gradbene fizike

PURES-3 opredeljuje za energetsko zahtevne skoraj ničenergijske stavbe ($A_{use} \geq 500 \text{ m}^2$) in področje gradbene fizike minimalne zahteve za lastnosti gradnikov toplotnega ovoja s številčnimi vrednostmi ter razmernik potrebne toplote za ogrevanje H in potrebne odvedene toplote C kot razmerji med potrebnima toplotama $Q_{H,nd}$ in $Q_{C,nd}$ modelirane in referenčne stavbe. Robni pogoji za dinamično modeliranje primera poslovnega objekta (slika 94) so navedeni na sliki 90. Ustrezne lastnosti gradnikov, vključno z zrakotesnostjo stavbe, se določijo z metodami statičnega modeliranja ali laboratorijskimi eksperimenti za industrijske izdelke. Samo z eksperimentom je mogoče preveriti zrakotesnost stavbe (n_{50}). Razmernika H in C se določita z dinamičnim modeliranjem obeh stavb (obravnavane in referenčne stavbe).

Modelirana stavba	Referenčna stavba
	TSG-1-004; Točka 2.4.
	● enaka arhitektura in je zgrajena na isti lokaciji - enaki meteorološki podatki in senčenje z okoliškimi naravnimi in grajenimi ovirami
notranji viri toplote po projektu - prilagojen urnik	● ima enake notranje vire toplote
 N1, N2, N3 delavnik, ne ob koncu tedna	● ima enake urnike uporabe za posamezne toplotne cone
$\theta_{set,H} = 22^\circ\text{C}$, brez nočnega in tedenskega znižanja; $\theta_{set,C} = 25^\circ\text{C}$, obdobje ogrevanje/hlajenje določeno s $Q_{H,nd}$ in $Q_{C,nd}$ v celem letu	● enako termostatisirano temperaturo $\theta_{set,H}$ in $\theta_{set,C}$
$U_{nettransparentno}$ - po projektu (med $0,124 \text{ W/m}^2\text{K}$ in $0,156 \text{ W/m}^2\text{K}$; U_{oken} (4-slojna zasteklitev $U_w =$, brez senčil	PURES 3 $U_{nettransparentno} = U_{dov}$ ($0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$, $0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$, $0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$; $U_{oken} = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$, $f_{frame} = 0,15$; $g = 0,5$, $t_{vis} = 0,6$; zunanja senčila $S_g = 0,25$;
toplotni mostovi $\Delta\psi = 0,04 \text{ W/m}^2\text{K}$	toplotni mostovi - brez dodatka
zrakotesnost stavbe po projektu - $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$	zrakotesnost stavbe $n_{50} = 1,5 \text{ h}^{-1}$
ogrevanje - idealni generator toplote	ogrevanje - idealni generator toplote
hlajenje - idealni generator hladu (tudi če stavba nima vgrajen sistem mehanskega hlajenja)	hlajenje - idealni generator hladu
mehansko prezračevanje z vračanjem toplote, centralni sistem, VAV; $V = 1940 \text{ m}^3/\text{h}$ proporcionalno po urniku zasedenosti; $\eta_{rec} = 85\%$	mehansko prezračevanje z vračanjem toplote, centralni sistem, VAV; $V = 1940 \text{ m}^3/\text{h}$ proporcionalno po urniku zasedenosti; $\eta_{rec} = 65\%$

Slika 94: Robni pogoji za določitev kazalnikov energijske učinkovitosti energetsko zahtevne stavbe za področje gradbene fizike povzeti po PURES-3 in TSG-1-004 (PURES-3, Tabela 5, TSG-1-004 Tabela 8.1.) za referenčno stavbo ter privzeti iz projektne dokumentacije za modelirano stavbo.

Rezultati dinamičnega modeliranja potrebne energije za ogrevanje, hlajenje in pripravo TSV ter kazalnika energijske učinkovitosti stavbe za področje gradbene fizike so navedeni na sliki 95.



Slika 95: Dinamično modelirana potrebna letna toplota za ogrevanje $Q_{H,nd}$, odvedena toplota za hlajenje $Q_{C,nd}$ in potrebna toplota za TSV $Q_{W,nd}$ (a), letne količine potrebne energije (b) in kazalnika energijske učinkovitosti stavb za področje gradbene fizike (razmernika H in C); navedene so tudi informativne moči generatorja toplote $Q_{H,max}$ in hladu $Q_{C,max}$ za obe stavbi (a).

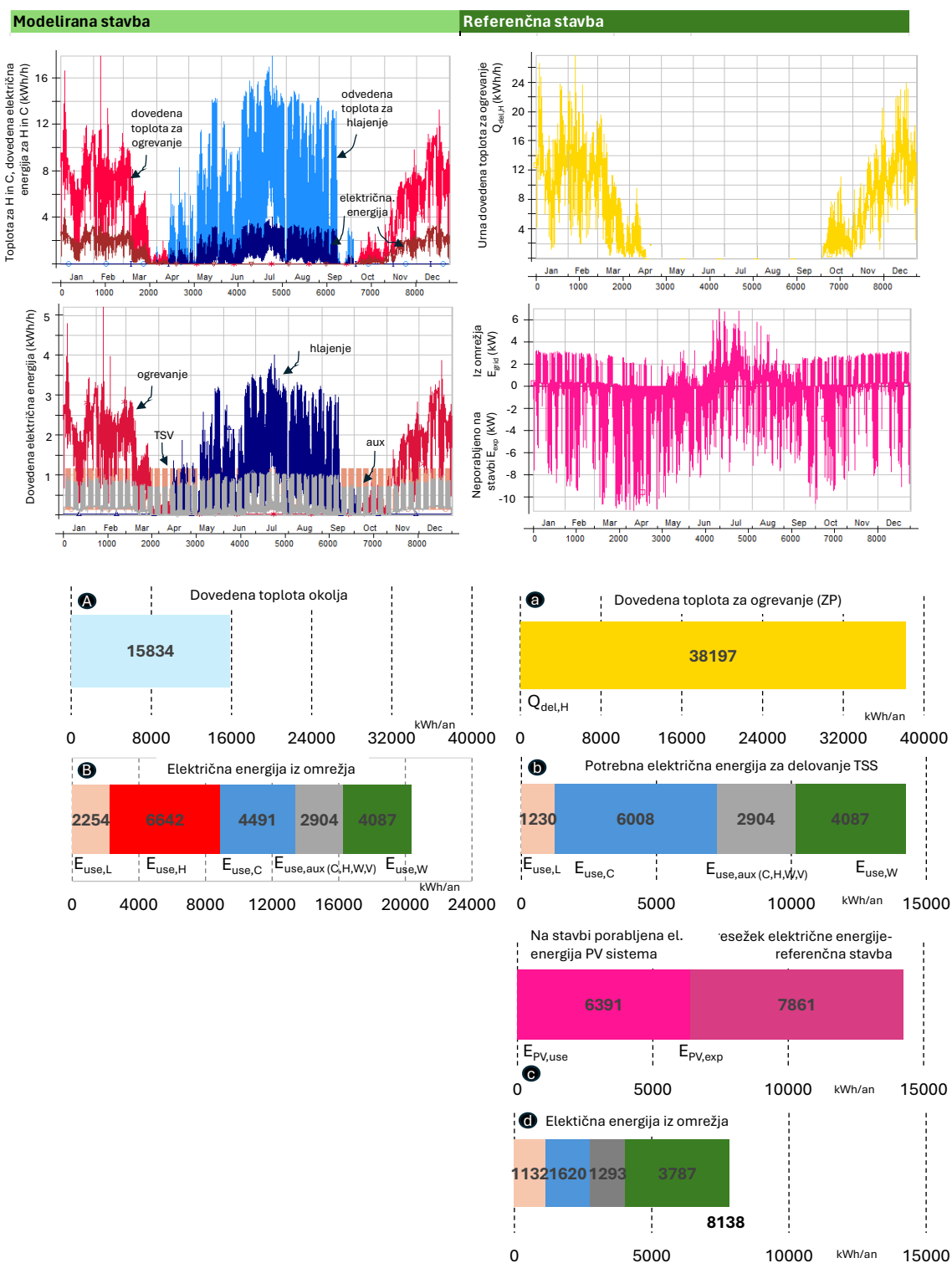
8.1.2. Kazalniki učinkovite rabe energije za področje pretvarjanja energij

Za določitev kazalnikov energijske učinkovitosti stavbe za področje pretvarjanja energij uporabimo robne pogoje, opredeljene v poglavju 8.1.1. ter lastnosti tehničnih stavbnih sistemov v modelirani stavbi, kakor so načrtovani. Lastnosti tehničnih stavbnih sistemov v referenčni stavbi so opredeljene za "Poslovne in upravne stavbe" v TSG-1-004, v tabeli 11.4. Robne pogoje za obravnavani primer povzema slika 96.

	Modelirana stavba	Referenčna stavba
razsvetljava	$E_{p, set} = 550$ lux po projektu, KDS se računa dinamično glede na τ_{vis} , učinek sijalke 150 lm/W, brez dimanja (ON/OFF); moč vgrajenih sijalk $P_{el} = P 760$ W, N1 760 W, N2 760 W, N3 608 W, delovanje po urniku zasedenosti na posamezno energetska cono, dodan algoritem z upoštevanjem naravne osvetlitve	$E_{p, set} = 300$ lux, KDS = 0, učinek sijalke 80 lm/W, moč vgrajenih sijalk $P_{el} = P 780$ W, N1 780 W, N2 780 W, N3 625 W, delovanje po urniku zasedenosti na posamezno energetska cono, enak algoritem za vklop
prezračevanje	mehansko prezračevanje z vračanjem toplote, prostorninski pretok $V = 1940$ m ³ /h, VAV po urniku prisotnosti + 1h, $\eta_{rec} = 85\%$, +HEPA filter, $\Delta q_{vent, dov, odv} = 1^\circ\text{C}$, $SFP_{dov} = 0,255$ W/(m ³ /h) (494 W), $SFP_{odv} = 0,142$ W/(m ³ /h) (213 W)	mehansko prezračevanje z vračanjem toplote, prostorninski pretok $V = 1940$ m ³ /h, VAV šp urniku prisotnosti + 1 h, $\eta_{rec} = 65\%$, $\Delta \theta_{vent, dov, odv} = 0^\circ\text{C}$, $SFP_{dov} = 0,211$ W/(m ³ /h) (316 W), $SFP_{odv} = 0,142$ W/(m ³ /h) (213 W).
ogrevanje	generator: TČ, $COP_{H, ref} = 3,5$ (7°C/35°C); korekcija Carnotovega izkoristka ($\gamma_{TČ, H} = 0,4$), 55°C/45°C ($\theta_{sup} = 55^\circ\text{C}$ pri -13°C; 45°C pri 0°C, 20°C pri 20°C), pripravljenost 25 W, moč obtočne črpalke 125 W; toplotna moč ventilatorski konvektorji H = 16500 W, $P_{el, max} = 780$ W, PI krnilnik, izgube sistema 15% Q_{gen} (generator, razvod, regulacija), 50% vračljivo	generator: kondenzacijski kotel na zemeljski plin, izkoristek 95% (zgornja kurilnost); moč v obdobju pripravljenosti 25 W; 55°C/45°C ($\theta_{sup} = 55^\circ\text{C}$ pri -13°C; 45°C pri 0°C, 20°C pri 20°C), moč obtočne črpalke 125 W, toplotna moč ventilatorski konvektorji H = 24000 W, $P_{el, max} = 960$ W, PI krnilnik, izgube cevodov 15% Q_{gen} (generator, razvod, regulacija), 50% vračljivo
hlajenje	hlajenje z ohlajeno vodo, $COP_{C, ref} = 4,5$, (7°C/27°C), korekcija Carnotovega izkoristka ($\gamma_{TČ, C} = 0,4$), hlajenje z ohlajeno vodo (7°C/12°C); moč obtočne črpalke 125 W, toplotna moč ventilatorski konvektorji C = 30500 W, $P_{el, max} = 780$ W, izgube sistema (cevod, končni prenosniki, regulacija) 10% Q_{gen} , 0% vračljivo	hlajenje z ohlajeno vodo, EER 3,5, 7°C/27°C, korekcija Carnotovega izkoristka ($\gamma_{TČ, C} = 0,4$), pripravljenost 25 W, hlajenje z ohlajeno vodo (8°C/14°C); moč obtočne črpalke 125 W, toplotna moč ventilatorski konvektorji C = 32000 W, $P_{el, max} = 960$ W, izgube cevodov 10% Q_{gen} (generator, razvod, regulacija), 0 % vračljivo
TSV	priprava TSV z električnimi grelniki, $\theta_{W, set} = 55^\circ\text{C}$, poraba TSV po projektu 4 lit/dan osebo, 45°C/10°C, št. oseb 66; lokalni električni grelniki; $V = 10$ lit, $P_{el} = 1,5$ kW, število grelnikov 20, poraba TSV ob delavnikih po urniku zasedenosti stavbe, toplotne izgube A+ (8 W), brez cirkulacije, dolžina cevodov 0m	priprava TSV z električnimi grelniki, $\theta_{W, set} = 55^\circ\text{C}$, poraba TSV po projektu 4 lit/dan na osebo, 45°C/10°C po urniku zasedenosti stavbe, , št. oseb 66; lokalni električni grelniki v N1, N2 in N3; 20 grelnikov, $V = 10$ lit (1 grelnik na 100 m ² A_{use}), $P_{el} = 1,5$ kW, toplotne izgube A (10 W) , brez cirkulacije, dolžina razvoda 0m
PV		fotopanelni sistem; otočno delovanje, površina PV modulov $0,04 \times A_{use} = 58,6$ m ² , $\eta_{PV} = 0,18$, jug, naklon modulov 30°, ne senčeno.

Slika 96: Robni pogoji za obravnavano energijsko zahtevno poslovno stavbo za področje pretvarjanja energij povzeti po PURES-3 in TSG-1-004 za referenčno stavbo in privzeti iz projektne dokumentacije za modelirano stavbo, ki so bili uporabljeni pri dokazovanju kazalnikov (PURES-3, Tabela 5, TSG-1-004 Tabela 8.1).

Rezultati dinamičnega modeliranja dovedene energije za delovanje TSS v modelirani in referenčni stavbi so povzeti na sliki 93. Prikazana je urna raba električne energije za delovanje TSS v modelirani in referenčni stavbi (B, b), za modelirano stavbo tudi dovedena toplota okolja (A) ter za referenčno stavbo dovedena energija za ogrevanje (a), referenčni energent je ZP. Referenčna stavba ima vgrajen PV sistem za samooskrbo, v skladu s PURES-3 pa sistem deluje otočno.



Slika 97: Dinamično modelirana toplota za zagotavljanje toplotnega ugodja ($Q_{H,use}$, $Q_{C,use}$) in raba električne energije za delovanje TSS v modelirani stavbi; za referenčno stavbo je prikazana dovedena toplota z ZP (a) in energijska bilanca delovanja PV sistema (c) - na stavbi porabljena proizvedena električna energija $E_{PV,use}$ in presežek proizvedene električne energije, ki se na stavbi ne porabi, saj sistem glede na določilo PURES-3 deluje otočno ($E_{PV,exp}$).

Vrsta in količina energentov, navedena kot dovedena energija, sta podlaga za izračun kazalnikov energijske učinkovitosti stavbe za področne pretvarjanja energija – ROVE in E_{Ptot} . ROVE je kazalnik z opredeljeno minimalno zahtevo ($\text{ROVE} \geq 50 \%$, najmanj 25 % z uvedbo kompenzacijskega faktorja Y_{ROVE} . (PURES-3, Priloga 1, tabela 4), medtem ko mora biti količina skupne primarne energije, E_{Ptot} potrebna za delovanje TSS, manjša, kakor je to značilno za referenčno stavbo.

Modelirana stavba	Referenčna stavba
$\text{ROVE} = \frac{15834 \cdot 1 + 20378 \cdot 1}{15834 \cdot 1 + 20378 \cdot 2,5} \cdot 100 = \mathbf{54,2 \%$ $Y_{\text{ROVE}} = 1$	
$E_{\text{Ptot}} = 15834 \cdot 1 + 20378 \cdot 2,5$ $E_{\text{Ptot}} = \mathbf{66779 \text{ kWh/an}}$	$E_{\text{Ptot}} = 38197 \cdot 1,1 + 8138 \cdot 2,5 + 6391 \cdot 1$ $E_{\text{Ptot}} = \mathbf{68752 \text{ kWh/an}}$